

Ю. И. Кудрявцев, В. С. Шульгин

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Для определения магнитной восприимчивости в лабораторных условиях наибольшее распространение получили приборы, в которых исследуемое вещество в виде твердого образца, сыпучей или жидкой пробы вносится в рабочий объем с переменным магнитным полем. Примером может служить чешский прибор KLY-2, отличающийся большим диапазоном измерений, высокой точностью и удобством работы [1].

В начале 90-х годов в СПбГУ разработан измеритель магнитной восприимчивости образцов ИМВО. В нем использован оригинальный индукционный преобразователь и предусмотрено измерение магнитной восприимчивости в двух полях: с пониженной и повышенной напряженностью. Производство этого прибора было освоено ГНПП "Геологоразведка", и он выпускается до настоящего времени малыми партиями [2].

В течение 1997 г. в один из приборов ИМВО было внесено усовершенствование, которое позволило увеличить напряженность намагничивающего поля и чувствительность измерений. Экспериментальные исследования, выполненные с этим вариантом прибора, в основном заключались в обнаружении и оценке эффектов зависимости магнитной восприимчивости от напряженности поля. Для образцов некоторых горных пород эта зависимость известна по литературным источникам [3]. Влияние напряженности поля на магнитную восприимчивость пирротина отмечалось сотрудниками ВИРГ-Рудгеофизика при обсуждении технического задания на прибор. Ниже рассматриваются устройство усовершенствованного прибора ИМВО и результаты экспериментальных исследований с ним.

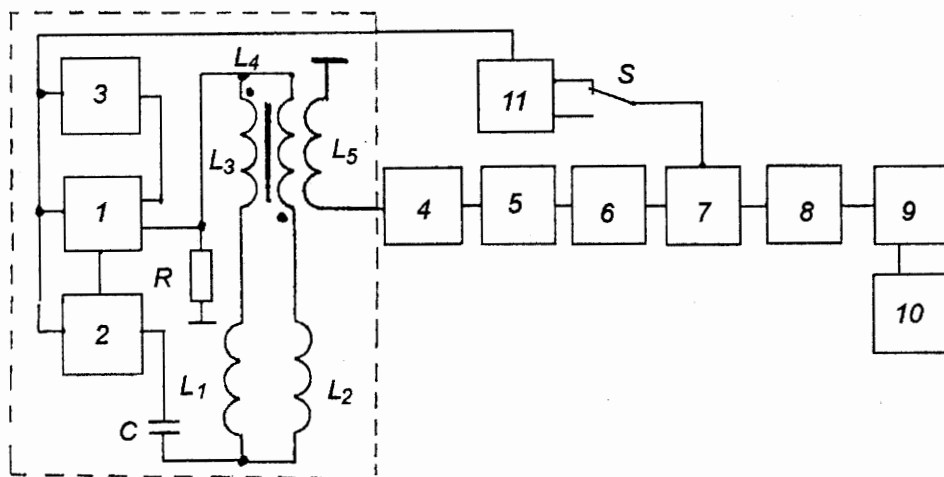
Описание прибора ИМВО

Прибор предназначен для измерения магнитной восприимчивости различных веществ: горных пород, руд, технологических материалов и т. п. Благодаря примененной схеме индукционного преобразователя достигается высокая чувствительность (до 10^{-8} ед. СИ) и стабильность измерений [4]. Прибор позволяет измерять магнитную восприимчивость χ при двух напряженностях магнитного поля с эффективными значениями 96 и 960 А/м. Рабочая частота 1 кГц.

Показания прибора выражаются непосредственно в единицах магнитной восприимчивости для образцов номинального объема $V_n = 100 \text{ см}^3$. Диапазон измерений при V_n находится в пределах 10^{-8} –0,2 ед. СИ. При произвольном объеме образца вводится поправка в измеренное значение. С уменьшением объема диапазон измерений расширяется. Для сильно магнитных веществ фактически определяется кажущаяся магнитная восприимчивость χ' , для перехода от которой к χ необходимо учитывать форму образца (размагничивающий эффект).

Конструктивно прибор состоит из блока катушек и измерительного блока, соединенных кабелем. Функциональная схема прибора представлена на рисунке. На схеме штриховой линией выделены элементы индукционного преобразователя (ИП) [4].

В состав ИП входит трансформаторный мост, образованный катушками индуктивности L_1 , L_2 и плечевыми обмотками L_3 , L_4 измерительного трансформатора, обмотка L_5 которого является выходной (сигнальной). Каждая из катушек L_1 и L_2



Функциональная схема прибора

выполнена в виде катушки Жерара–Созада с утолщениями на концах [5]. В центральной части ее внутренней полости в пределах 8 см (по высоте и диаметру) достигается высокая однородность намагничивающего поля. При измерениях в полость одной из катушек вводится исследуемый образец. Внутрь другой катушки при дифференциальных измерениях можно поместить образец сравнения, а при компенсационных — однослойную катушку, замкнутую на конденсатор [6]. Одинаковые параметры катушек ИП способствуют глубокому, устойчивому к воздействию дестабилизирующих факторов балансу моста и в значительной степени обеспечивают компенсацию внешней переменной магнитной помехи.

Генератор 1 ИП вводится в автоколебательный режим с помощью цепи положительной обратной связи, состоящей из конденсатора C , трансформаторного моста и резистора R . Эта цепь через схему переключения намагничивающегося поля 2 подключена к выходу генератора, а посредством резистора R — к его входу. Колебания возникают на частоте, при которой сопротивление цепи носит активный характер, когда напряжение на конденсаторе компенсирует индуктивное напряжение моста. При этом полное напряжение на трансформаторном мосте оказывается в Q раз больше, чем выходное напряжение генератора (Q — добротность цепи), а токи через катушки L_1 и L_2 — наибольшими. Устойчивость колебаний при низком уровне гармоник поддерживает схема автоматической регулировки усиления β , включенная между выходом генератора и его вторым входом.

Повышенная напряженность магнитного поля в полостях катушек L_1 и L_2 достигается при положении переключателя режима генерации, при котором к цепи положительной обратной связи приложено полное напряжение с выхода генератора. Пониженная напряженность поля создается при другом положении переключателя, когда на эту цепь поступает $1/10$ часть напряжения генератора. При этом, однако, в 10 раз увеличивается коэффициент передачи усилителя генератора. Напряжение на его выходе поэтому сохраняется неизменным, что способствует устойчивой работе схемы автоматической регулировки усиления.

Таким образом, разработанный трансформаторный мост совмещает две функции: он используется по прямому назначению и одновременно служит индуктивным

элементом последовательного резонансного контура генератора. От трансформаторного моста прибора KLY-2 [1] он отличается и тем, что обмотки L_3 и L_4 трансформатора включены по магнитному потоку встречно, т. е. по схеме компаратора тока. В этом случае индуктивность моста определяется катушками L_1 и L_2 при их параллельном включении. К ним приложено практически полное напряжение питания моста, что также увеличивает чувствительность измерений. Стабильность повышенного напряжения моста обеспечивается благодаря автоподстройке частоты, а влияние собственной емкости соединительного кабеля исключается вследствие размещения конденсатора C в блоке катушек. Индукционный преобразователь содержит также цепи балансировки (на рисунке они не показаны), которые позволяют уравновешивать мост по реактивной и активной составляющим разбаланса.

При внесении во внутреннюю полость одной из катушек, например L_1 , исследуемого образца баланс токов через обмотки трансформатора L_3 , L_4 нарушается и на выходной обмотке L_5 появляется сигнальное напряжение, поступающее на вход усилительно-преобразовательной схемы. Она в основном традиционна и содержит следующие последовательно включенные элементы: согласующийся узел 4, аттенюатор 5, усилитель переменного напряжения 6, синхронный детектор 7, усилитель постоянного тока 8, цифровой вольтметр 9 и схему вычитания начального уровня 10.

К выходу генератора подключен также формирователь опорного напряжения 11, на двух выходах которого создается напряжение, отличающееся по фазе на 90° . С помощью переключателя S тот или иной выход формирователя 11 подключается к опорному входу синхронного детектора 7. Последний в зависимости от положения S выделяет реактивную составляющую сигнала, пропорциональную магнитной восприимчивости образца, или же активную составляющую, обусловленную влиянием его электропроводности.

Для заводской градуировки прибора используют эталонные образцы, изготовленные из смеси гипса с магнетитовым порошком и аттестованные во ВНИИМ по α' в направлении каждого ребра образца. Средние α' с учетом объема образца пересчитываются в эталонные значения $\alpha'_{\text{эт}}$, отвечающие номинальному объему $V_{\text{н}}$. Регулятор сигнального напряжения, находящийся на входе аттенюатора, устанавливается в положение, при котором показания прибора $n_{\text{эт}}$ от эталонов совпадают с $\alpha'_{\text{эт}}$ с наименьшей погрешностью. Градуировка с помощью эталонных образцов возможна для поддиапазонов с пониженной напряженностью магнитного поля, когда зависимостью α' от поля можно пренебречь. От этого ограничения свободен современный, более простой и точный способ градуировки с использованием однослойной катушки, к выводам которой подключается конденсатор [6].

Для оперативного контроля постоянства чувствительности прибора и линейности усилительно-преобразовательной схемы, как и в KLY-2, служит набор градуировочных образцов [1]. Каждый из них представляет собой ферритовый цилиндр с малым отношением высоты к диаметру и имеет определенное значение градуировочной кажущейся магнитной восприимчивости $\alpha'_{\text{гр}}$. Градуировочный образец в пределах точности его привязки создает такой же сигнал, как и эталонный образец с $\alpha'_{\text{эт}} = \alpha'_{\text{гр}}$.

При работе с прибором после его включения трансформаторный мост уравновешивают по реактивной и активной составляющим. По градуировочным образцам контролируют состояние прибора, выбирают подходящий поддиапазон измерений и при необходимости компенсируют смещение нуля с помощью схемы вычитания начального уровня. Во внутреннюю полость одной из катушек вносят исследуемый образец. Высвечиваемое на индикаторе цифрового вольтметра число умножают на

десятичный множитель, соответствующий положениям переключателей намагничивающего поля и аттенюатора. Полученное таким образом показание прибора n пересчитывается в кажущуюся магнитную восприимчивость α' с учетом выраженного в кубических сантиметрах объема образца V . Так как показание n пропорционально произведению $\alpha' V$, а $\alpha' = n$ при $V = V_n$, то формула пересчета имеет вид

$$\alpha' = nV_n/V. \quad (1)$$

С использованием обычной методики от α' можно перейти в магнитной восприимчивости α . В случае слабомагнитного образца с $\alpha' \leq 0,1$ ед. СИ значение $\alpha' \simeq \alpha$. При исследовании порошковых образцов целесообразно пользоваться кажущейся удельной восприимчивостью χ' , которая получается делением равенства (1) на плотность:

$$\chi' = nV_n/m, \quad (2)$$

где m — масса образца. При использовании формулы (1) объемы могут быть выражены в любых единицах, например кубических сантиметрах. В случае же формулы (2) χ' будет представлена в единицах СИ лишь при условии измерения m в килограммах, а V_n в кубических метрах.

При определении χ' градуировку прибора необходимо сохранить прежней — в единицах магнитной восприимчивости. Прибор можно использовать для измерения удельной электропроводности образцов, хотя его чувствительность ограничена вследствие низкой рабочей частоты. Способы градуировки прибора в этом случае рассмотрены в работе [7].

Компоненты магнитной восприимчивости

Используемые в приборе напряженности лежат в интервале относительно слабых полей, в которых намагниченность J ферро- и ферромагнетиков описывается эмпирическими уравнениями Рэлея [3, 8].

Поле повышенной напряженности H , вероятно, выводит J за пределы обратной намагниченности $\alpha_0 H$, где α_0 — начальная (обратимая) восприимчивость. При этом возникает явление гистерезиса. Петля гистерезиса появляется, например, при росте напряженности от наименьшего значения $-H_m$ до наибольшего H_m , а затем уменьшении поля от H_m до $-H_m$. Приращение намагниченности при изменении H от любой точки на петле гистерезиса со значениями H^* и J^* выражается вторым законом Рэлея [3, 8]:

$$J - J^* = \alpha_0(H - H^*) \pm \frac{\beta}{2}(H - H^*)^2, \quad (3)$$

где β — параметр Рэлея. Во втором слагаемом формулы (3) используется положительный знак при росте поля ($H > H^*$) и отрицательный — при уменьшении поля ($H < H^*$).

Для восходящей ветви петли гистерезиса напряженность и намагниченность увеличиваются от значений $H^* = -H_m$, $J^* = -J_m$ и уравнение (3) преобразуется к виду

$$J + J_m = \alpha_0(H + H_m) + \frac{\beta}{2}(H + H_m)^2, \quad (4)$$

Так как при $H = H_m$ намагниченность $J_m = \alpha_0 H_0 + \beta H_m^2$, то из формулы (4) следует

$$J = (\alpha_0 + \beta H_m)H - \frac{\beta}{2}(H_m^2 - H^2), \quad H_t' > 0, \quad (5)$$

где H'_t — производная напряженности по времени t .

При уменьшении напряженности и намагниченности от значений $H^* = H_m$, $J^* = J_m$ из формулы (3) следует выражение для нисходящей ветви

$$J = (\alpha_0 + \beta H_m)H + \frac{\beta}{2}(H_m^2 - H^2), \quad H'_t < 0. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) при $H = 0$ получается экспериментально подтверждаемое представление остаточной намагниченности:

$$J_r = \pm 0,5\beta H_m^2. \quad (7)$$

Запишем (5) и (6) в виде одной формулы:

$$J = (\alpha_0 + \beta H_m)H - \frac{\beta}{2} \frac{H'_t}{|H'_t|} (H_m^2 - H^2). \quad (8)$$

Для гармонически изменяющейся напряженности $H = H_m \cos \omega t$ уравнение (8) преобразуется:

$$J = (\alpha_0 + \beta H_m)H_m \cos \omega t - \frac{\beta}{2} H_m^2 f, \quad (9)$$

здесь

$$f = - \frac{\sin \omega t}{|\sin \omega t|} \sin^2 \omega t. \quad (10)$$

Функцию (10) можно также представить в виде

$$f = \begin{cases} -\sin^2 \omega t, & 0 \leq \omega t \leq \pi, \\ \sin^2 \omega t, & \pi \leq \omega t \leq 2\pi. \end{cases} \quad (11)$$

Если аргумент ωt выходит за указанные пределы, то f продолжается с периодом 2π .

Как следует из формулы (11), намагниченность, определяемая последним слагаемым формулы (9), растет по абсолютной величине от нуля при $H = -H_m$ (или H_m), достигает при $H = 0$ максимума, равного $|J_r|$, а затем убывает до нуля на другом конце промежутка. Таким образом, намагниченность $-0,5\beta H'_m f$ характеризует формирование и разрушение остаточной намагниченности в пределах каждого полупериода колебаний.

Функцию f можно разложить в ряд по синусам:

$$f = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin k\omega t. \quad (12)$$

Отличны от нуля лишь коэффициенты с нечетными индексами k :

$$A_k = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin kx \sin^2 x dx, \quad (13)$$

причем из формулы (13) следует

$$A_1 = -8/(3\pi), A_3 = 8/(15\pi), A_5 = 0,0243. \quad (14)$$

Как видно из равенств (14), третья гармоника в 5 раз, а пятая — в 35 раз слабее первой. Кроме того, эти гармоники подавляются благодаря частотной избирательности ИМВО и наличию в нем синхронного детектора. На основании формул (12) и (14) можно поэтому положить $f = -\frac{8}{3\pi} \sin \omega t$ и представить намагниченность (9) в виде

$$J = (\varkappa_0 + \varkappa_1)H_m \cos \omega t + \varkappa_2 H_m \sin \omega t, \quad (15)$$

где

$$\varkappa_1 = \beta H_m, \quad \varkappa_2 = \frac{4}{3\pi} \beta H_m. \quad (16)$$

Если временно ввести обозначения $y = J$ и $x = \varkappa_0 H_m \cos \omega t$, то равенство (15) легко привести к уравнению второй степени относительно координат одной физической природы x, y . В нашем случае кривая второго порядка может быть только эллипсом.

В соответствии с формулами (15) и (16) в области Рэлея к начальной восприимчивости \varkappa_0 добавляется восприимчивость \varkappa_1 , возрастающая прямо пропорционально амплитуде намагничивающего поля. Магнитная восприимчивость \varkappa_2 , также пропорциональная H_m , учитывает составляющую J , которая сдвинута по фазе относительно H на 270° . Амплитуда этой составляющей согласно формуле (7) почти совпадает с остаточной намагниченностью: $\varkappa_2 H_m = 0,85 J_r$, а отношение Q_r остаточной намагниченности к индуктивной составляет $Q_r = 1,18 \varkappa_2 / (\varkappa_0 + \varkappa_1)$. Отношение восприимчивостей \varkappa_2, \varkappa_1 не зависит от H_m :

$$\varkappa_2 / \varkappa_1 = 0,42. \quad (17)$$

Если ввести комплексную напряженность $H = H_m e^{i\omega t}$, то формула (15) преобразуется к виду $J = \hat{\varkappa} H$, где

$$\hat{\varkappa} = \varkappa_0 + \varkappa_1 - i\varkappa_2 \quad (18)$$

— комплексная магнитная восприимчивость. Появление отрицательной мнимой компоненты восприимчивости, как известно, связано с потерями на перемагничивание [9].

Формулы (15)–(18) свидетельствуют о многокомпонентности магнитной восприимчивости и о принципиальной возможности определения отдельных ее составляющих при измерениях в магнитных полях различной напряженности. Ввиду эмпирического происхождения законов Рэлея соотношения (16) и (17) вряд ли соблюдаются строго. Например, для горных пород известны случаи нелинейной зависимости \varkappa_1 от напряженности поля [3]. Трудно ожидать также, что отношение $\varkappa_2 / \varkappa_1$ будет оставаться постоянным и равным 42 %.

Экспериментальные исследования

Методика определения отдельных компонент восприимчивости (\varkappa_0, \varkappa_1 и \varkappa_2) состоит в следующем. При пониженной амплитуде $H_m^{(1)} = 136$ А/м (эффективное $H = 96$ А/м) устанавливают $\varkappa^{(1)}$ образца в режиме измерения магнитной восприимчивости и $\Delta \varkappa^{(1)}$ — в режиме измерения удельной электропроводности. Затем при повышенной амплитуде $H_m^{(2)} = 1360$ А/м определяют аналогичные величины $\varkappa^{(2)}$ и $\Delta \varkappa^{(2)}$. Составляя соответствующие разности, находят

$$\varkappa_1 = \varkappa^{(2)} - \varkappa^{(1)}, \quad \varkappa_2 = \Delta \varkappa^{(2)} - \Delta \varkappa^{(1)}. \quad (19)$$

Согласно формуле (16) значения (19) соответствуют амплитуде $H_m = H_m^{(2)} - H_m^{(1)}$. Начальную же восприимчивость вычисляют по формуле

$$\varkappa_0 = \varkappa^{(1)} - \varkappa_1 \frac{H_m^{(1)}}{H_m^{(2)} - H_m^{(1)}}. \quad (20)$$

Поправочное слагаемое в равенстве (20) влияет лишь при относительно больших \varkappa_1 , так как $\frac{H_m^{(1)}}{H_m^{(2)} - H_m^{(1)}} = 0,11$. При вычитании $\Delta\varkappa^{(1)}$ из $\Delta\varkappa^{(2)}$ исключается сигнал, обусловленный влиянием электропроводности образца.

Т а б л и ц а 1

№	Характеристика образца	$\varkappa_0 \cdot 10^3$	$\varkappa_1 \cdot 10^3$	$\varkappa_2 \cdot 10^3$	\varkappa_1/\varkappa_0	\varkappa_2/\varkappa_1
		Ед. СИ			%	
1	Эталонный образец	100	1,9	0,49	1,9	26
2	Эталонный образец	6,45	0,11	0,033	1,7	30
3	Флогопит-мелилитовая порода с мелкими включениями магнетита (Кольский п-в)	106	4,2	2,4	4,0	58
4	Массивная пирротиновая руда (Кольский п-в)	68,5	54,3	10,2	79	19
5	Массивная пирротиновая руда с галенитом и сфалеритом (Урал)	72,5	68,1	15,2	94	18
6	Метадиорит с вкрапленностью пирротина (Южная Карелия)	28,2	16,0	2,2	57	14

Для повышения точности определения малых значений \varkappa_1 и \varkappa_2 можно применить компенсационный способ измерения. Для этого используют однослойную катушку, которую помещают в свободную полость катушки L_2 и подключают к конденсатору переменной емкости или магазину емкостей. Подбором емкости конденсатора при пониженном поле добиваются компенсации сигнала от $\varkappa^{(1)}$. В этом случае измеренное при повышенном поле значение $\varkappa^{(2)} = \varkappa_1$. Компенсация сигнала от магнитной восприимчивости значительно снижает его частичное проникновение из-за конечной фазовой избирательности прибора в канал измерения электропроводности, что повышает точность измерений \varkappa_2 . В табл. 1 и 2 приводятся результаты измерений составляющих магнитной восприимчивости образцов и порошковых проб. В первом столбце каждой таблицы приводится номер объекта по порядку, а во втором — краткая характеристика образца или пробы. В следующих столбцах табл. 1 для каждого образца указаны \varkappa_0 , \varkappa_1 , \varkappa_2 в ед. СИ и отношения \varkappa_1/\varkappa_0 и \varkappa_2/\varkappa_1 в процентах. Для порошковых проб (табл. 2) указаны соответствующие удельные восприимчивости.

В табл. 1 эталонные образцы № 1 и 2, изготовленные из смеси магнетитового порошка с гипсом, имеют начальные восприимчивости $\varkappa_0 = 0,100$ и $6,45 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Значения компоненты \varkappa_1 составляют лишь 1,8 % от \varkappa_0 , а \varkappa_2 — 26–30 % от \varkappa_1 . Таким образом, эталонные образцы на основе магнетитового порошка, несмотря на весьма слабую зависимости их \varkappa от поля, можно использовать для аттестации приборов лишь при условии, что амплитуда намагничивающего поля не превосходит 100–120 А/м. В случае ИМВО с помощью таких эталонов допустима градуировка поддиапазонов с пониженным намагничивающим полем.

Образец № 3 флогопит-мелилитовой породы с мелкими включениями магнетита имеет начальную восприимчивость, как у образца № 1, но отличается в 2,2 раза большим α_1 и в 4,9 раза большим α_2 . Вследствие этого отношения α_1/α_0 и α_2/α_0 увеличиваются соответственно до 4 и 58 %.

Образцы № 4 и 5 массивных пирротиновых руд характеризуют близкими $\alpha_0 = 68,5 \cdot 10^{-3}$ и $72,5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ и очень большими α_1 , составляющими 79 и 94 % от α_0 . Отношение α_2/α_1 для этих образцов равно 19 и 18 %. Образец № 6 метадiorита с вкрапленностью пирротина имеет $\alpha_0 = 28,2 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ и также высокое отношение $\alpha_1/\alpha_0 = 57$ % и умеренное — $\alpha_2/\alpha_1 = 14$ %.

Порошковые пробы, представленные в табл. 2, отличаются минеральным составом, но содержат серу в количестве 1,4–4,7 %. В пробах № 2–4 отмечено наличие сульфидов. Начальная удельная восприимчивость χ_0 проб № 1–4 находится в пределах $(1,24 \div 2,92) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ. Отношение χ_1/χ_0 у них велико — 51–71 % — почти как у пирротиновых руд. Отношение же χ_2/χ_1 изменяется в пределах от 21 до 24 %. Несомненно, что магнетизм этих проб обусловлен пирротинном. Проба № 5 полевошпат-биотитового сланца с низким содержанием серы (0,3 %) характеризуется $\chi_0 = 0,87 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ, отношениями $\chi_1/\chi_0 = 2,8$ % и $\chi_2/\chi_1 = 35$ %. Магнитность ее, вероятно, связана с присутствием магнетита.

Т а б л и ц а 2

№	Характеристика пробы	$\chi_0 \cdot 10^6$	$\chi_1 \cdot 10^6$	$\chi_2 \cdot 10^6$	χ_1/χ_0	χ_2/χ_1
		Ед. СИ			%	
1	Сланец полевошпат-биотитовый. Содержание серы 4,7 %	2,15	1,10	0,24	51	22
2	Кварцит с сульфидами. Содержание серы 1,7 %	2,92	2,17	0,45	74	21
3	Кварцит с сульфидами. Содержание серы 1,4 %	1,24	0,79	0,18	64	23
4	Кварцит с биотитом и сульфидами. Содержание серы 2,9 %	1,84	1,15	0,27	62	24
5	Сланец полевошпат-биотитовый. Содержание серы 0,3 %	0,87	0,024	0,008	2,8	35
6	Проба с содержанием железа магн. 30 %, серы 1,7 %	223	1,5	0,9	1,0	60
7	Проба с содержанием железа магн. 25 %, серы 0,2 %	191	2,5	0,5	1,3	21
8	Проба с содержанием железа магн. 2,7 %, серы 1,1 %	37,3	1,4	0,6	3,8	43
9	Проба с содержанием железа магн. 4,9 %, серы 1,9 %	51,8	1,7	0,43	3,5	26

Рудные пробы № 6–9 имеют высокое содержание магнетитового железа и не более 2 % серы. Пробы № 6 и 7 отличаются наибольшими начальными удельными восприимчивостями $0,223 \cdot 10^{-3}$ и $0,191 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ и низкими отношениями χ_1/χ_0 (1 и 1,3 %). У проб № 8 и 9 с пониженными χ_0 можно предположить наличие пирротина, которое увеличивает отношение χ_1/χ_0 до 3,8 и 3,5 % соответственно.

Дальнейшее развитие каппаметрии зависит от новых аппаратных разработок. Достаточно простой прибор ИМВО характеризуется высокой чувствительностью,

помехозащищенностью, температурной и временной стабильностью выходных показаний. Дополнительные методические возможности его применения возникают благодаря измерениям реактивной и активной составляющих сигнала в двух различных по напряженности полях.

Для ферромагнитного вещества, намагничиваемого гармоническим полем, в области Рэлея помимо начальной восприимчивости установлены еще две компоненты восприимчивости, которые зависят от амплитуды поля, возрастая с ее увеличением. Большая компонента, как и начальная восприимчивость, вещественна, а меньшая компонента, связанная с пульсацией остаточной намагниченности, оказалась мнимой. Значительные компоненты восприимчивости обнаружены у образцов пород, магнетизм которых обусловлен пирротинном, и очень малые — у образцов, содержащих магнетит.

Введение дополнительных петромагнитных параметров повышает информативность капаметрии, но для выяснения перспектив их практического использования необходимы дальнейшие исследования.

Указатель литературы

1. Цифровой мост для измерения магнитной восприимчивости горных пород и ее анизотропии KLY-2 // Инструкция по обслуживанию. Брно: НП Геофизика, 1975. 55 с.
2. Измеритель магнитной восприимчивости образцов ИМВО // Техническое описание и инструкция по эксплуатации. СПб.: ГНПП Геологоразведка, 1995. 21 с.
3. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 347 с.
4. Кудрявцев Ю. И., Шульгин В. С. Устройство для измерения электромагнитных параметров материалов. А. с. СССР № 1602190 кл. G01 № 27/72, 1990.
5. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин — Л.: Энергия, 1979. 320 с.
6. Кудрявцев Ю. И., Шульгин В. С. Способ определения магнитной восприимчивости образцов // Российский геофизический журнал. 1995. № 5–6. С. 71–76.
7. Кудрявцев Ю. И. Индукционный способ измерения удельного электрического сопротивления образцов // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Геология, география. 1996. Сер. 7. Вып. 1. С. 99–103.
8. Трутин В. И. Введение в магнетизм горных пород. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 276 с.
9. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1978. 543 с.