

УДК 550.34.016

## Регистрация реальной и мнимой компонент напряжения вызванной поляризации и их применение для разделения различных пород по форме кривой

*В.Н. Мельников, А.А. Миллер*

Национальный Минерально-Сырьевой Университет «Горный»,  
199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2  
e-mail: [dfcz1994@yandex.ru](mailto:dfcz1994@yandex.ru), [andreymiller@yandex.ru](mailto:andreymiller@yandex.ru)

**Аннотация.** Предлагается для разделения различных горных пород использовать форму кривой зависимости тангенса сдвига фаз гармонического сигнала на измерительных электродах от частоты тока, подаваемого на питающие электроды. Под тангенсом сдвига фаз понимается отношение мнимой компоненты напряжения на измерительных электродах к вещественной компоненте этого напряжения. Для регистрации таких компонент можно использовать синхронное детектирование сигнала, что также позволяет получить хорошую фильтрацию для большого диапазона частот. При измерениях на образцах получены кривые  $tg \varphi_{ВП}(f)$ . Для каждой горной породы она различна. Отмечено влияние плотности тока на форму кривых.

**Ключевые слова:** вызванная поляризация, реальная составляющая, мнимая составляющая, синхронный детектор.

## Registration real and imaginary part of induced polarization (IP) process in device and possibility of such view for distinction between different rocks by form of $tg \varphi(f)$ curve

*V.N. Melnikov, A.A. Miller*

National mineral resources university (Mining university),  
21 line Vasilevsky island, 2, St. Petersburg, 199106 Russia  
e-mail: [dfcz1994@yandex.ru](mailto:dfcz1994@yandex.ru), [andreymiller@yandex.ru](mailto:andreymiller@yandex.ru)

**Abstract.** We suggest to use the curve of shift phase tangent between mono frequency supply current transmitting electrodes (AB) and voltage receiver electrodes (Umn) as of frequency for distinction between different rocks. Also we suggest to use synchronous detection in order to get real and imaginary part of Umn (i.e., two voltages with proportion of  $Re(Umn)$  and  $Im(Umn)$  simultaneously) in device. As known, synchronous detection helps to get good frequency filtration in wide frequency range (near  $10^6$  in our device) with narrow band width. We developed experimental device and got  $tg \varphi(f) = Im(Umn)/Re(Umn)$  curves for several samples of graphitized shales and sulfide ore rocks. The influence of current density on the curve forms is marked.

**Keywords:** induced polarization; real part, imaginary part; synchronous detection; experimental IP curve.

## **Введение**

Уже достаточно давно был поднят вопрос о получении из процесса вызванной поляризации (ВП) дополнительной информации, то есть не только об измерении одной скалярной величины - вызванной поляризуемости при времени регистрации 0,5с, но и каких-то иных параметров, в частности, позволяющих отличить поляризацию, вызванную присутствием сульфидов, от поляризации, вызванной наличием углеродистых включений [1,4]. Например, в работе Комарова В.А., Мовчана И.Б. [4] было показано, что кривая дифференциальной поляризуемости  $f_d$  меняется в зависимости от типа породы.

$$f_d = -dF(t)/d \ln t \quad (1)$$

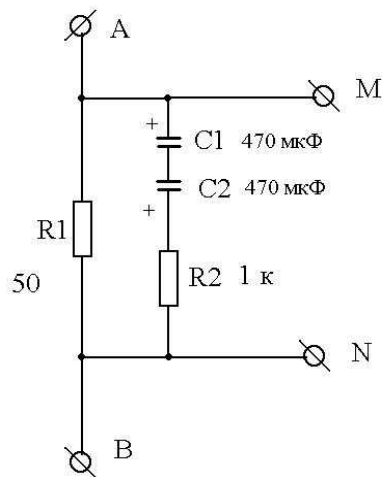
где  $F(t)$  - характеристика спада.

Известно [3], что схожую с  $f_d(t)$  форму кривой должны иметь и зависимость от частоты мнимой компоненты напряжения ВП при подаче гармонического сигнала, и зависимость  $tg \varphi_{ВП}(f)$ , то есть отношение мнимой и реальной компоненты напряжения на измерительных электродах ( $U_{mn}$ , рис. 1, рис. 4). Для процесса ВП с одним характерным временем эти кривые имеют форму колокола. График зависимости реальной компоненты напряжения ВП от периода возбуждающих колебаний при этом имеет вид кривой, монотонно возрастающей с увеличением периода. Обе компоненты  $U_{mn}$  (для линейной модели ВП) пропорционально возрастают с повышением силы зондирующего тока, и их отношение оказывается постоянным при измерениях с разной силой тока. Следовательно, в рамках линейной модели ВП функция  $tg \varphi_{ВП}(f)$  оказывается независимой от величины тока. Зависимость  $tg \varphi_{ВП}(f)$  можно использовать для непосредственного определения величины  $\eta_\infty$  (поляризуемости для бесконечного времени зарядки, предельной поляризуемости) [4].

С помощью аппаратуры, включающей синхронный детектор, можно выделить непосредственно из  $U_{mn}$  реальную и мнимую компоненты сигнала, то есть получить на выходе детектора соответствующие постоянные напряжения. Меняя частоту генератора тока, подключенного к питающим электродам АВ (рис. 1, рис. 4), с помощью опорного сигнала, частота и фаза которого совпадают с частотой и фазой питающего тока, можно

выделять реальную компоненту измеряемого сигнала, при этом автоматически достигается фильтрация сигнала на частоте генератора. При сдвиге фазы опорного сигнала на  $90^\circ$  мы получим мнимую компоненту. При этом может использоваться форма питающего тока АВ в виде двухполярного меандра. Синхронное детектирование позволяет легко получить узкополосную фильтрацию на частоте полезного сигнала для широкого диапазона частот (порядок изменения частоты -  $10^6$  раз). Таким образом, при использовании этого подхода возможно построение аппаратуры, пригодной для использования в полевых условиях.

Такая аппаратура была изготовлена в виде лабораторного макета. Она была откалибрована на RC-цепи (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема калибровочной цепи (встречное включение электролитических конденсаторов позволяет подавать на них двухполярный сигнал).

Как известно [3], для переходной характеристики ВП в виде экспоненциальной функции  $\text{tg } \varphi_{ВП}$  зависит от частоты как

$$\text{tg } \varphi_{ВП} = \frac{\omega T_0 \eta_\infty}{1 + \eta_\infty + \omega^2 T_0^2},$$

где  $T_0$  - постоянная времени спада,  $\eta_\infty$  - предельная поляризуемость,  $\omega$  - текущая частота.

Для малых  $\eta_\infty$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ВП}} = \frac{\omega T_0 \eta_{\infty}}{1 + \omega^2 T_0^2}. \quad (2)$$

Для цепи, изображенной на рис.1,

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ВП}} = \frac{\omega C R_1}{1 + \omega^2 C^2 R_1 R_2 + \omega^2 C^2 R_2^2}, \quad (3)$$

где  $C$  - величина емкости последовательно соединенных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ .

Для случая  $R_1 \ll R_2$

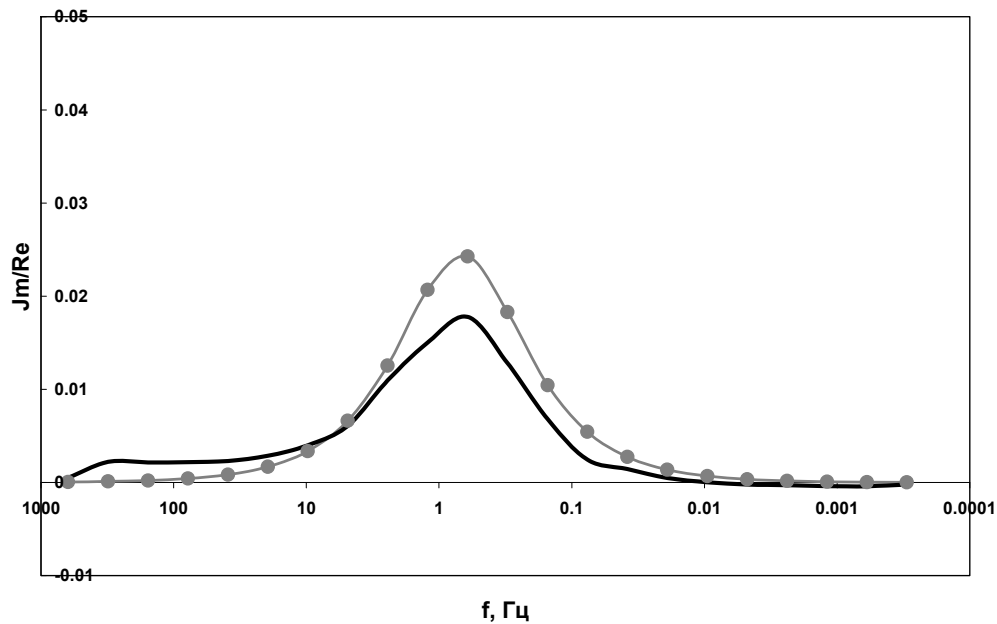
$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ВП}} = \frac{\omega C R_1}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2}. \quad (4)$$

Положим  $T_0 = CR_2$ , так как характерное время переходного процесса  $T_0$  для RC-цепочки из элементов  $R_2$  и  $C$  определяется величиной произведения их номиналов. Величиной  $R_1$  в нашем случае можно пренебречь. Подставим значение  $T_0$  в (2), тогда из равенства (2) и (4) получим  $CR_2 \eta_{\infty} = CR_1$ , откуда следует:

$$\eta_{\infty} = \frac{R_1}{R_2} \quad (5)$$

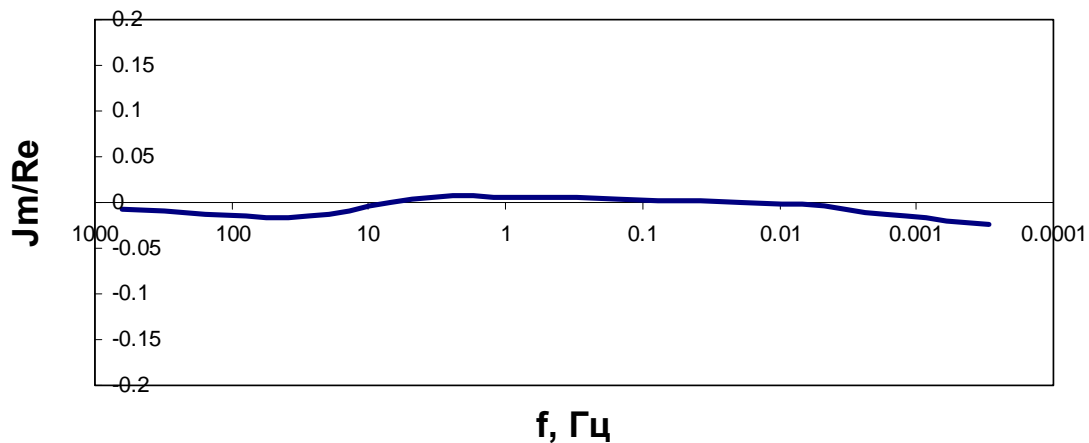
Для параметров цепи на рисунке 1,  $\eta_{\infty} = 0.05$ ;  $T_0 = 0.517 \text{ с}$ .

Результат калибровки показан ниже (рис. 2). Результаты калибровки показывают корректность предложенной методики непосредственного измерения компонент  $U_{mn}$  и способа расчета параметров калибровочной цепи.



**Рис. 2.** Результат калибровки макета аппаратуры ВП с измерением квадратурных компонент сигнала; линия с кружками - теоретическая кривая, рассчитанная из параметров цепи на рисунке 1; гладкая линия - практическая кривая, полученная при калибровке.

Также для проверки корректности работы собранной аппаратуры были сделаны замеры в электролите. Электролитом послужила вода из петербургского водопровода Василеостровского района с удельным сопротивлением около 80 Ом·м. Результат представлен на рисунке 3. Модуль максимального отклонения кривой  $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ВП}}(f)$  от нуля не превышает 0.02.



**Рис. 3.** Экспериментальная кривая для воды.

Эту величину можно рассматривать как оценку сверху общей погрешности измерений.

Для измерения на образцах мы использовали экваториальную дипольную установку (рис.4) (из практических соображений компактности). Электроды из меди М1 (содержание Си 99,9%). Для создания неполяризуемой среды в пластиковые блоки S1 и S2 помещена смесь муки, медного купороса и поваренной соли. Основные преимущества такого решения – пластичность вещества, низкое сопротивление, кроме того, смесь долго не подвержена высыханию. Измерения проводились в диапазоне частот от 625 Гц до 0.00029 Гц. Образец произвольной формы соприкасается с веществом через мембрану (в нашем эксперименте - марля). Изучаемые горные породы: два образца вкрапленной халькопиритовой руды, один - сплошной халькопиритовой руды и два образца различных шунгитов.

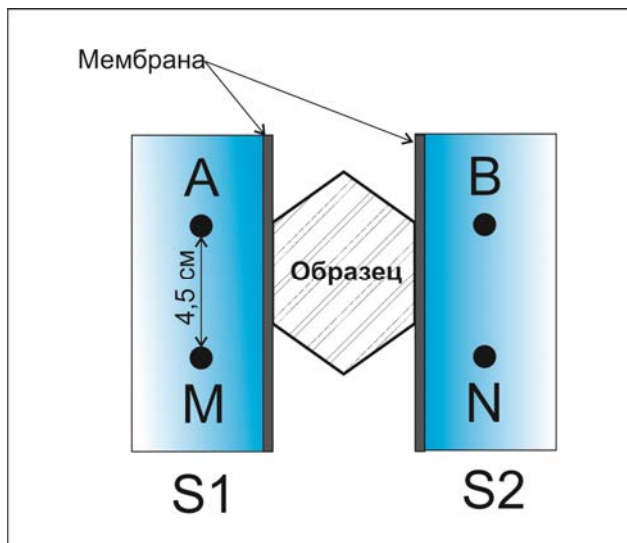


Рис. 4. Схема экваториальной установки. Вид сверху.

В процессе измерений было замечено, что их результат зависит от плотности тока. Она составляла величину порядка  $10-100 \text{ мА/м}^2$ . Проводились замеры реальной и мнимой компонент напряжения на измерительных электродах  $\text{Re}U_{mn}$  и  $\text{Im}U_{mn}$  для разных величин питающих токов и, соответственно, разных плотностей тока в образце. Для каждого образца была подобрана такая величина плотности тока, для которой дальнейшее понижение силы питающего тока не приводило к изменению формы кривой  $\text{tg}\varphi_{ВП}(f)$ .

При этом можно считать, что при такой силе тока процесс ВП линейен. Ниже показаны результаты измерений на двух образцах шунгита (графитосодержащей породы) (рис. 5), на следующем рисунке - на трех образцах сульфидной руды (рис. 6).

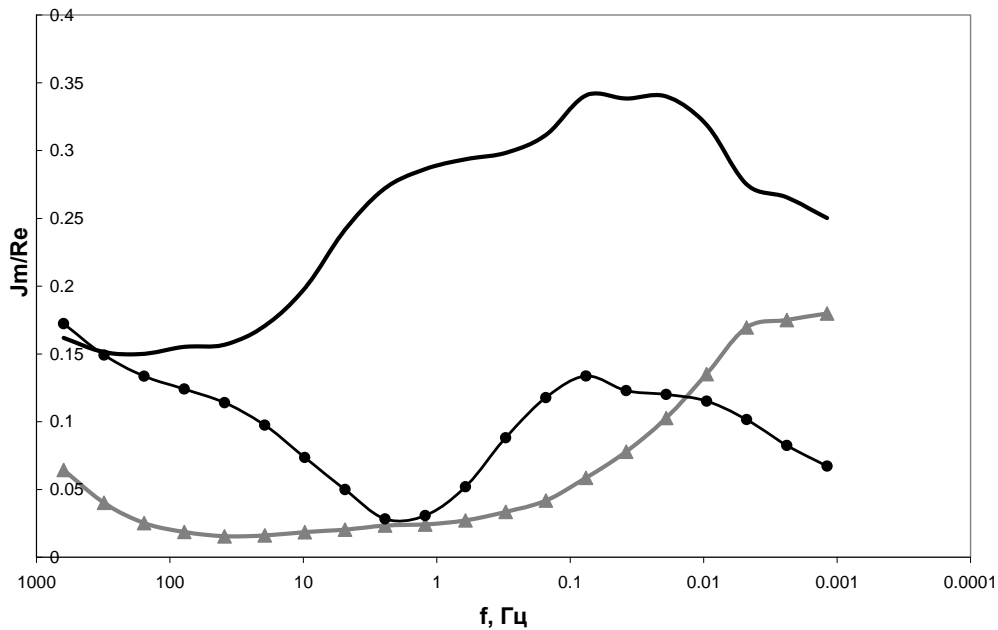
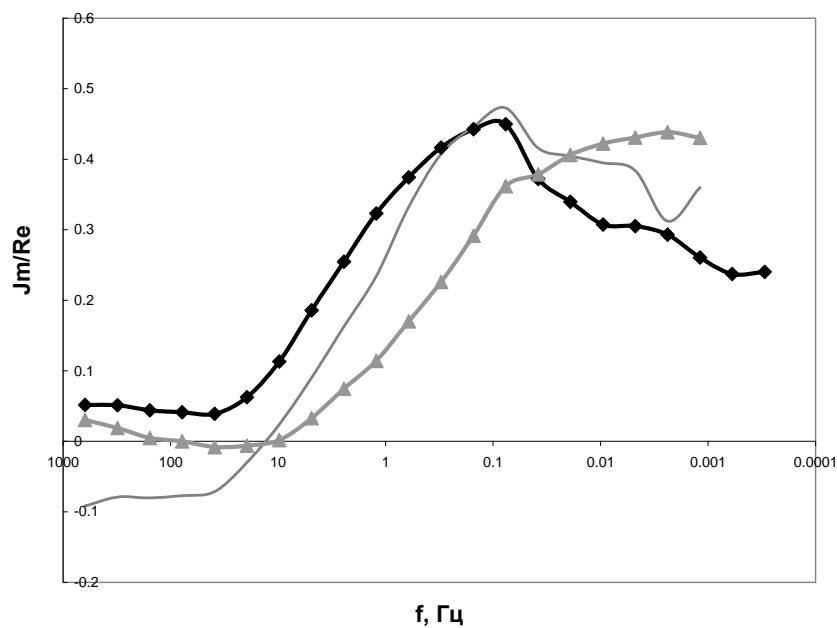


Рис. 5. Зависимость  $\text{tg } \varphi_{\text{ВП}}(f)$  для двух образцов шунгита (образец "шунгит №1" - треугольники, образец "шунгит №2" - кружки, образец "шунгит №2" с повышенным током - гладкая линия).



**Рис. 6.** Кривые  $tg\varphi_{ВП}(f)$  для образца сплошной халькопиритовой руды (ромбы), вкрапленной руды (сплошная линия) и другой вкрапленной руды (треугольники).

При повышении величины тока до нелинейной области форма кривой  $tg\varphi_{ВП}(f)$  начинает зависеть от величины тока (см. рис.5). На рис. 5 представлены результаты замеров в образце "шунгит №2" с током, находящимся с линейной области (линия с кружками), и один из вариантов кривых с током в нелинейной области (гладкая линия).

Возможны различные способы математической обработки результатов измерения величин  $ReU_{mn}$  и  $ImU_{mn}$ . Можно, например, анализировать форму кривой  $tg\varphi_{ВП}(f)$ , вычисляя коэффициент корреляции между эталонной кривой  $tg\varphi_{ВП}(f)$  и кривой исследуемого образца (или кривой, измеренной на определенном пикете при полевых измерениях).

Альтернативный вариант обработки следующий: можно рассматривать величины  $ReU_{mn}(f)$  и  $ImU_{mn}(f)$  как реальную и мнимую компоненту спектра  $\dot{S}_{mn}(f)$  временной функции  $U_{mn}(t)$ . Эта временная функция фактически будет представлять собой отклик образца (или участка пород на профиле между электродами MN при полевых измерениях) на дельта-функцию, помноженную на величину тока  $I$ , т.е. на импульс тока, длительность которого стремится к нулю, а интеграл от которого по времени в бесконечных пределах равен  $I$  [5]. Мы же получаем величины  $ReU_{mn}(f)$  и  $ImU_{mn}(f)$  замерами реальной и мнимой компонент  $U_{mn}(f)$ , подавая по очереди ток различных частот на электроды АВ. При желании затем мы можем найти явный вид временной функции  $U_{mn}(t)$  с помощью обратного преобразования Фурье. Рассмотрим вариант полевых измерений. Предположим, что  $U_{mn}(t)$  - это напряжение на измерительных электродах, вызываемое наличием полезного ископаемого (например, руды), а  $U_{mn\text{ породы}}(t)$  - напряжение, вызванное присутствием каких-то вмещающих пород. Допустим, что общее напряжение  $U_{mn\text{ общ}}(t)$  будет равно сумме напряжений от руды и вмещающей породы. Можно рассматривать  $U_{mn}(t)$  как полезный сигнал, а  $U_{mn\text{ породы}}(t)$  как помеху. При таком подходе возможно применение методов обработки сигналов, развитых в радиотехнике. В



частности, возможна постановка задачи построения оптимальных фильтров, то есть таких частотно-зависимых цепей, после прохождения которых отношение сигнал/помеха становится максимальным. В нашем случае фильтр будет реализовываться как математическая функция, или какой-то комплексный коэффициент передачи  $\dot{K}(f)$ , имеющий зависимость от частоты. Методы вычисления коэффициентов передачи таких фильтров известны [5]. Таким образом, зная спектр суммарного напряжения от породы и руды на электродах, можно найти спектр сигнала после прохождения оптимального фильтра  $\dot{S}_{\text{вых}}(f)$

$$\dot{S}_{\text{вых}}(f) = \dot{K}(f) \dot{S}_{\text{мп общ}}(f),$$

где  $\dot{S}_{\text{мп общ}}(f)$  - спектр сигнала  $U_{\text{мп общ}}(t) = U_{\text{мп}}(t) + U_{\text{мп породы}}(t)$ ,

и затем перейти от  $\dot{S}_{\text{вых}}(f)$  к сигналу во временной области  $U_{\text{вых}}(t)$ , который будет иметь максимальную амплитуду именно в точке замера над (условно говоря) центром рудного тела, при этом влияние вмещающей породы будет минимально.

**Вывод:** измерение реальной и мнимой составляющих сигнала ВП в полевых условиях с вычислением  $tg \varphi_{ВП}(f)$  может способствовать разделению пород по дополнительному признаку - форме кривой  $tg \varphi_{ВП}(f)$  (наряду с традиционным параметром – поляризуемостью).

## Литература

1. Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Оценка объемного содержания электропроводящих минералов по данным метода вызванной поляризации // Вестник СПб ун-та. Сер. 7, 2014, Вып. 1, С. 4 – 19.
2. Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Спектральная характеристика вызванной поляризации вкрапленных руд // Вестник СПб ун-та. Сер. 7, 2013, Вып. 1, С. 14 – 30.
3. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. 366 с.
4. Комаров В.А., Березин Г.И., Духнин К.Ю. Использование временных особенностей дифференциальной поляризуемости при поисках кимберлитовых тел. - Применение метода вызванной поляризации при поисках месторождений полезных ископаемых. Межвузовский научный сборник. Москва, изд.МГРИ, 1987, с. 93-99.
5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

## References

1. Gurin G.V., Tarasov A.V., Ilyin, Y.T., Titov K. V. Ocenka obemnogo sodержaniya jelektronoprovodjashhih mineralov po dannym metoda vyzvannoj poljarizacii [Estimation of the volume content elektronoprovodyaschie minerals according to the induced polarization method]. Vestnik. SPb. un-ta [Herald of St. Petersburg University]. 2014, no1, pp 4-19.
2. Gurin G.V., Tarasov A.V., Ilyin, Y.T., Titov K. V. Spektral'naja harakteristika vyzvannoj poljarizacii vkraplennyh rud [Spectral induced polarization characteristics of disseminated ores]. SPb. un-ta [Herald of St. Petersburg University]. 2013, no1, pp 14-30.
3. Komarov V. A. Jelektrozvedka metodom vyzvannoj poljarizacii [Electrical prospecting by the method of induced polarization]. Leningrad, Nedra, 1980. 366 p.
4. Komarov V. A., Movchan I. B. Novye parametry vyzvannoj poljarizacii geologicheskikh tel [New parameters induced polarization of geologic feature]. Issledovano v Rossii, 1999, no1-4. (In Russ.) Available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/1999/003.pdf>

## Рекомендуемая ссылка на статью:

*Мельников В.Н., Миллер А.А.* Регистрация реальной и мнимой компонент напряжения вызванной поляризации и их применение для разделения различных пород по форме кривой // Геофизические методы исследования Земли и ее недр. 2016. С. 76–85. DOI: 10.13140/RG.2.1.3985.8167

## How to cite:

*Melnikov, V.N., Miller A.A.* Registration real and imaginary part of induced polarization (IP) process in-device and possibility of such view for distinction between different rocks by form of  $tg \varphi(f)$  curve , *Geophysical methods of survey the Earth and its subsoil*, **2016**, 76–85. DOI: 10.13140/RG.2.1.3985.8167