

## ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ КАК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЯВЛЕНИЕ (общая феноменологическая теория)

Прошло более трёх десятилетий с тех пор, как геофизики начали рассматривать вызванную поляризацию (ВП) как электромагнитное (ЭМ) явление, что предопределило целесообразность представления обзорного доклада, обобщающего этот опыт. Обобщение проведено на основе предложенной авторами Общей феноменологической теории (ОФТ) ЭМ поля в гетерогенной геологической среде. ЭМ свойства такой среды зависят от времени и частоты поля.

**Ключевые слова:** Вызванная поляризация, частотная дисперсия, гео-электромагнетизм, феноменология.

### Введение

Электрическая и магнитная вызванная поляризация горных пород в поле переменного тока, несмотря на свою весьма разнообразную природу, феноменологически проявляется как ЭМ процесс. К пониманию этого явления геофизики пришли постепенно в ходе развития метода переходных процессов (МПП) или зондирований становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Одно из первых упоминаний о ВП как о возможной причине смены знака переходного процесса в совмещённых петлях относится к 1976 г. и содержится во введении „Руководства по применению МПП в рудной геофизике” (кол. авт. под ред. Ф.М. Каменецкого). В дальнейшем в изучение эффекта ВП как ЭМ явления большой вклад внесли многие российские, украинские и зарубежные геофизики.

### Постановка задачи

Для решения прямых и обратных задач электроразведки потребовалась достаточно общая феноменологическая теория ЭМ поля в поляризующейся-диспергирующей среде. Эта теория развивается идеи С.М. Шейнманна и в особенности В.В. Кормильцева в наиболее общей постановке. Основой предлагаемой теории является возможность распространения уравнений Максвелла на поляризующуюся-диспергирующую среду, что непосредственно следует из вида этих уравнений в их канонической форме:

$$I. \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{d\mathbf{B}}{dt}, \quad II. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}_c + \frac{d\mathbf{D}}{dt}, \\ III. \operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \quad IV. \operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Имеется в виду возможность порождения вихревых ЭМ полей изменениями во времени не только самих полей, но и электрических и магнитных свойств исследуемой среды. При этом уравнения материальных связей должны быть представлены не произведениями, а интегралами типа свёртки. В связи с этим, основные уравнения второго порядка коренным образом изменяются по сравнению с обычно используемыми Телеграфным уравнением или уравнением теплопроводности. В частотной области свёртка заменяется произведением, и соответствующее уравнение Гельмгольца остаётся неизменным.

При наличии поляризации-дисперсии феноменологический подход является сегодня единственным средством, решения практических задач ЭМ зондирования (ЭМЗ) [Kamenetsky, Stettler, Trigubovich, 2010] и получает особое развитие в связи с разработкой и внедрением современных трёхмерных технологий ЭМЗ становлением поля в движении и автоматической инверсии данных [Тригубович, 2011; Тригубович, Персова, Соловейчик, 2009; Trigubovich, 2000].

Далее рассматриваются необходимые базовые понятия (модель горной породы и др.). Затем даётся описание Общей феноменологической теории ЭМ поля (ОФТ) в поляризующейся-диспергирующей среде.

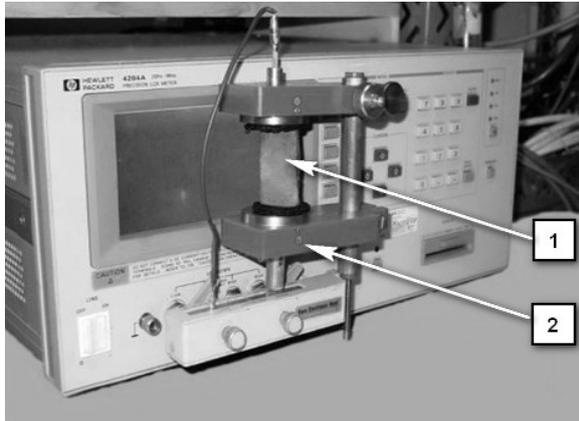
### Модель горной породы

Объектом исследования ОФТ является горная порода. В отличие от исследуемого в физике т. н. „чистого вещества” горные породы являются природными многокомпонентными и многофазными образованиями. Поэтому модель исследуемой среды следует рассматривать на двух уровнях: на микроуровне, когда объём среды соизмерим с размерами отдельных слагающих её компонентов; и на макроуровне, когда объём среды существенно превышает размеры отдельных компонентов.

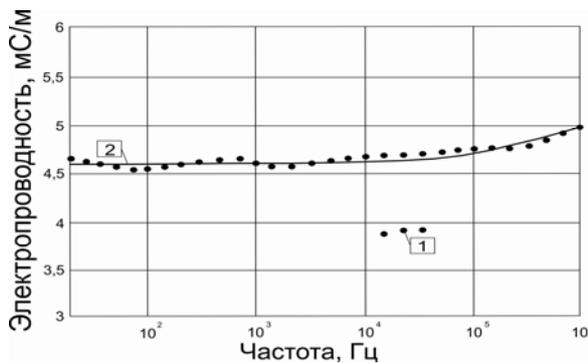
В общем случае Микромодель горной породы представляет собой конгломерат произвольного состава и структуры. Он содержит зёрна различных минералов, имеющих различную форму, химический состав и размеры; известковый и/или глинистый цемент; рассеянную минерализацию электронного типа проводимости (сульфиды); магнитные частицы (магнетит и др.); поры и трещины, заполненные газом или флюидом (растворами минеральных солей ионного типа проводимости); участки мерзлых пород; солевые отложения и разного рода примеси (плёнки нефти, прослойки углей, битумов и других углеводородов – УВ); продукты эпигенеза; остатки органики и т.д. Таким образом, любая горная порода является типично неоднородной средой при рассмотрении её на микроуровне, или микронеоднородной.

Другим важным свойством горной породы является то, что все её составные элементы

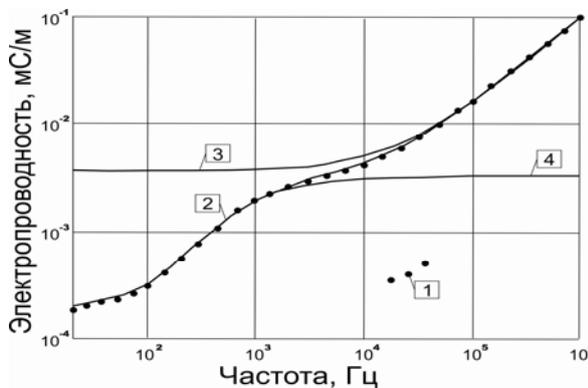
„перемешаны” каким-то природным (хаотичным или как-то упорядоченным) образом настолько „тщательно” и одинаково, что в любой точке массива состав и структура породы, усреднённые по некоторому представительному объёму, также оказываются одинаковыми. В этом случае мы можем рассматривать модель той же породы на макроуровне (Макромодель) и считать её на этом уровне однородной или макрооднородной.



**Рис. 1.** Установка для измерений электропроводности образцов горных пород:  
1 – образец, 2 – держатель



**Рис. 2.** Образец песчаника, пропитанный водой  
1 – измерения, 2 – Cole-Cole



**Рис. 3.** Образец песчаника, пропитанный смесью воды с дизельным топливом  
1 – измерения, 2 – Multi Cole-Cole, 3 – Cole-Cole 1, 4 – Cole-Cole 2.

Такая макрооднородная среда характеризуется эффективными свойствами, соответствующими истинным свойствам такой однородной среды, которая при том же способе возбуждения и измерения поля даёт те же физические показатели (токи, напряжения и т. д.), что и макрооднородная среда. Пропускание через такую среду произвольно меняющегося во времени тока приводит к накоплению зарядов на границах между компонентами и фазами. Иначе говоря, в такой среде возникает ВП. Происходят электрофизические и электрохимические процессы, приводящие к образованию заряжаемых природных элементов типа конденсаторов и аккумуляторов. Разряд этих элементов создаёт в поляризующейся среде вторичный ток противоположного направления по отношению к току зарядки. В результате эффективные значения электропроводности и диэлектрической проницаемости становятся зависимыми от времени и частоты во временной и частотной области соответственно.

Наличие в среде рассеянных намагниченных наночастиц (размером 10-50 нм) вызывает магнитную поляризацию-дисперсию. Это явление известно также как магнитная вязкость или суперпарамагнетизм (СПМ). Магнитная проницаемость  $\mu$  такой среды зависит от времени и частоты поля.

В качестве общего случая в ОФТ рассмотрена Макромодель с учётом поляризации-дисперсии геологической среды для всех трёх ЭМ параметров ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ ). Из общего случая следуют частные: электрическая поляризация-дисперсия, магнитная поляризация-дисперсия, отсутствие какой-либо поляризации-дисперсии.

**Зависимость феноменологических параметров от частоты-времени**

Эта зависимость заимствована геофизиками из теории несовершенных диэлектриков. Соответствующие алгоритмы широко используются в практике. Их сводку можно найти в [Dias, 2000]. На сегодняшний день наиболее общепризнанной является формула Multi-Cole-Cole

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[ 1 - m_1 \left( 1 - \frac{1}{1 + (\rho T_{IP1})^{c_1}} \right) \right] \cdot \left[ 1 - m_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + (\rho T_{IP2})^{c_2}} \right) \right] \dots etc ,$$

в которой:

$\rho = -i\omega$ ,  $0 < m < 1$  – стационарная (установившаяся) поляризуемость,  $\rho_0$  – удельное сопротивление среды на постоянном токе (нулевой частоте),  $T_{IP}$  – постоянная времени поляризации и  $0 < c < 1$  – степенной фактор, определяющий форму процесса ВП во временной области.

Эта зависимость подтверждена результатами измерений на образцах (рис. 1-3).

#### Литература

- Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. – М., РФФИ, ГЕОС. – 1997, – 162 с.
- Кормильцев В.В. Вызванная поляризация в уравнениях электродинамики. – Свердловск, УНЦ АН СССР. – 1981, – 44 с.
- Тригубович Г.М., Электромагнитная разведка становлением поля наземного и воздушного базирования: новая концепция и результаты, Всеросс. школа-семинар по ЭМ зондированиям. – Кн. 1, СПбГУ. – 2011. – С. 115-124.
- Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., 3D-электроразведка. – Новосибирск: Наука, 2009. – 314 с.
- Dias, C.A., Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks: Geophysics, – 2, – 2000. – P 437-451.
- Hallbauer-Zadorozhnaya, V.Yu., Kamenetsky, F.M., and Shmidbaue R.E., Laboratory measurements of frequency dispersion of sedimentary rocks' electric properties as applied to groundwater contamination, The 16ts Workshop on EM induction in the Earth, The College of Santa Fe, New Mexico, USA, EM. – 2002. – С. 1-2.
- Kamenetsky, F.M. Equations of the electromagnetic field in dispersive media, Extended Abstracts of the 16ts Workshop on EM induction in the Earth, The College of Santa Fe, New Mexico, USA, EM. – 2002. – С. 2-5.
- Kamenetsky F.M., Stettler E.H., Trigubovich G.M. Transient Geo-Electromagnetics, Munich, Ludwig-Maximilian University, Vela Verlag. – 2010. – 304 p.
- Trigubovich G.M. Pulse induction electric prospecting with the moving sensors in solving engineering and hydrogeological problems under urban conditions, Abstracts of 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil. – 2000
- Trigubovich G.M. and Eпов M.I. Technology of electromagnetic scanning the near-surface layer as applied to solving the engineering-geology problems Extended Abstracts of EAGE and EAGO Conference and Exhibition, Moscow. – 1997.

### НАВЕДЕНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ ЯК ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЯВИЩЕ (загальна феноменологічна теорія)

**Ф.М. Камєнєцький, Г.М. Трігубович**

Прошло більше трьох десятиліть відколи геофізики почали розглядати наведену поляризацію як електромагнітне явище, що зумовило доцільність представлення оглядової доповіді, яка узагальнює цей досвід. Узагальнення проведене на основі запропонованої авторами загальної феноменологічної теорії електромагнітного поля в гетерогенному геологічному середовищі. Електромагнітні властивості такого середовища залежать від часу і частоти поля.

**Ключевые слова:** викликана поляризація, частотна дисперсія, гео-електромагнетизм, феноменологія.

### INDUCED POLARIZATION AS ELECTROMAGNETIC PHENOMENON (general phenomenological theory)

**F.M. Kamenetsky, G.M. Trigubovich,**

The fact that about thirty years ago geophysicists began to analyze the induced polarization (IP) as an electromagnetic (EM) phenomenon has induced the authors to prepare a current review generalizing the experience. The generalization is done based on General Phenomenological Theory (GPT) of EM Field in Heterogeneous Geological Medium, suggested by the authors. In this case, EM properties of the medium depend on time and frequency of the field.

**Keywords:** induced polarization, frequency dispersion, geo-electromagnetics, phenomenological theory.

<sup>1</sup>Університет Людвіга-Максимиліана, г. Мюнхен, Германия.

<sup>2</sup>СНИИГГИМС, г. Новосибирск, Россия.