

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГИСТЕРЕЗИСА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

© 2012 г. А. К. Матевосян

*Институт геологических наук НАН РА
0019, Ереван, пр. Маршала Баграмяна, 24а, Республика Армения,
E-mail: arshak.matevosyan@yandex.ru
Поступила в редакцию 17.05.2012 г.*

Проанализированы особенности и сформулировано понятие гистерезиса вызванной поляризации (ВП), который проявляется при электроразведочных исследованиях методом ВП в виде неоднозначной петлеобразной зависимости поляризации геоэлектрической среды под воздействием внешнего непрерывного циклического электрического поля. В результате математического моделирования и численных расчетов на конкретных примерах геоэлектрических сред выявлены закономерности проявления петли гистерезиса ВП. Рассмотрены годографы вектора напряженности вторичного электрического поля при синусоидальном временном режиме измерений. Установлено, что при векторной съемке рассматриваемый способ возбуждения электрического поля дает принципиальную возможность хорошей дифференциации геоэлектрических сред, характеризующихся малыми величинами временного параметра переходного процесса. Изучение особенностей проявления гистерезиса вызванной поляризации геологической среды создает весомые предпосылки для выполнения оперативных и достаточно информативных исследований методом ВП на переменном токе при решении различных задач.

Под гистерезисом (Физ. энци. сл., 1983) подразумевается явление, состоящее в том, что физическая величина, характеризующая состояние тела, неоднозначно зависит от физических величин, отражающих внешние условия. Гистерезис имеет место в тех случаях, когда состояние тела в данный момент времени определяется внешними условиями не только в тот же, но и предшествующие моменты времени. Неоднозначная зависимость величин наблюдается в любых процессах, поскольку для изменения состояния тела всегда требуется определенное время (время релаксации), а реакция тела отстает от вызванных ее причин. Такое отставание тем меньше, чем медленнее изменяются внешние условия. Однако для некоторых процессов отставание при замедлении изменения внешних условий не уменьшается. В этих случаях неоднозначную зависимость величин называют гистерезисной, а само явление гистерезисом. Наблюдается гистерезис в различных веществах и при различных физических процессах. Хорошо исследованы магнитный, диэлектрический, упругий гистерезис.

В статье впервые проанализированы особенности гистерезиса вызванной поляризации, который может проявляться при электроразведочных исследованиях вторичного электрического поля методом вызванной поляризации (ВП) (Комаров В.А., 1980; Электроразведка, 1989) в виде неоднозначной петлеобразной зависимости поляризации геоэлектрической среды от внешнего электрического поля при его непрерывном циклическом (в

частности, синусоидальном) изменении. С целью исследования закономерностей проявления гистерезиса ВП выполнены математическое моделирование и численные расчеты для однородной изотропной поляризующейся модели геоэлектрической среды с параметрами: $\Pi=1/3$ – поляризуемость, $T_0=1\text{с}$ и $t_0=0.003\text{с}$ – временные параметры: абсциссы максимумов первых производных переходных характеристик (постоянные времени) поляризационного (геоэлектрохимического) и индукционного полей по десятичному логарифму времени, соответственно, при коэффициентах $B=\sqrt{1000}$ и $m=2$ (Матевосян А.К, 2011²) и с соблюдением линейности процессов вторичного поля (Комаров В.А., 1980).

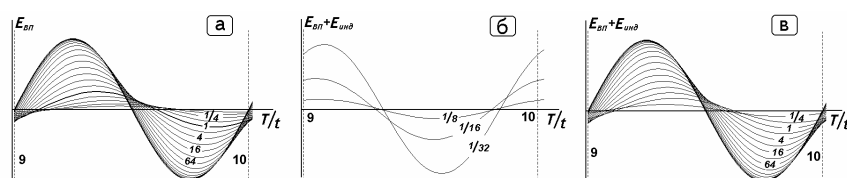


Рис.1. Семейства кривых изменения напряженности вторичного поля за десятый период синусоидального воздействия при отсутствии (а) и в присутствии (б, в) индукционных процессов. Шифр кривых – t/T_0 .

На рис.1 представлены совмещенные (построенные путем нормирования длительности возбуждения по величине периода синусоидального тока t) временные зависимости изменения напряженности вторичного поля в присутствии и отсутствии индукционных процессов за десятый период воздействия синусоидальным током $I(T)=I_0\sin(2\pi T/t)$ для разных значений периода колебаний, изменяющихся геометрической прогрессией. Теоретические исследования показали, что при рассматриваемом временном режиме возбуждения результирующее электрическое поле практически устанавливается (приходит в квазиравновесное состояние) уже после нескольких (практически с пятого) периодов. Приведенные временные зависимости напряженности вторичного поля – основного измеряемого параметра (рис.1), наглядно отражают особенности проявления исследуемых процессов в широком временном диапазоне изменения t (от миллисекунд до нескольких часов). Здесь же можно проследить, как с увеличением величины соотношения t/T_0 уменьшается фазовый сдвиг между исследуемой составляющей векторов напряженности первичного и вторичного электрических полей, измеряемой конкретной приемной линией.

Для визуализации подобным образом протекающих физических процессов обычно рекомендуется построение петель гистерезиса на временных зависимостях, наблюдаемых при циклическом возбуждении внешнего поля путем отложения по оси ординат значений суммарного или аномального поля, а по оси абсцисс – величины интенсивности внешнего воздействия за полный цикл (один период) (Физ. энц. сл., 1983). Отметим, что в

зависимости от используемой измерительной аппаратуры возможно и непосредственное наблюдение гистерезиса ВП в процессе исследования.

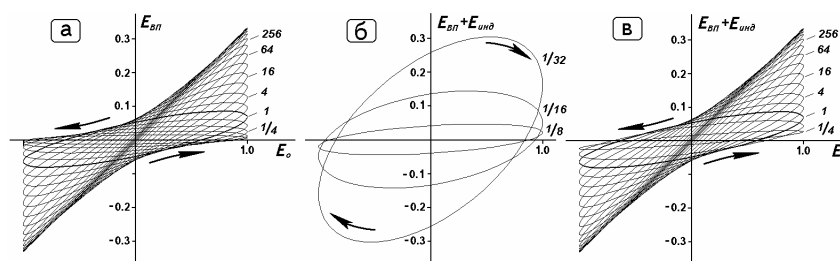


Рис.2. Семейства петель гистерезиса вызванной поляризации за десятый период синусоидального возбуждения электрического поля при отсутствии (а) и в присутствии (б, в) индукционных процессов (графики нормированы по максимальной величине первичного поля). Шифр кривых – t/T_0 .

На рис. 2 изображены петли гистерезиса ВП в отсутствии (а) и присутствии (для наглядности представлены на двух графиках – б, в) индукционных процессов, полученные теоретическими расчетами при синусоидальном изменении внешнего первичного электрического поля для описанной выше модели геоэлектрической среды. Исследования показали, что одному и тому же значению напряженности внешнего воздействия соответствуют разные значения вторичного поля, что характерно гистерезису. Эта неоднозначность обусловлена предшествующим состоянием исследуемого объекта – геологической среды, образца или модели. Судя по приведенным зависимостям, с определенным приближением можно считать, что петли гистерезиса ВП имеют форму эллипса или овала. Как следует из рис. 2а, с увеличением параметра t/T_0 (периода колебаний, нормированного по T_0 – по основному амплитудно-временному параметру переходной характеристики ВП) происходит постепенное увеличение интенсивности поляризационных процессов, непосредственно прямо пропорционально величине основного интерпретируемого параметра – кажущейся поляризуемости, которое на приведенных зависимостях отражается увеличением угла наклона петли гистерезиса: большой оси эллипса относительно оси абсцисс. Кроме этого, при определенном значении t/T_0 петля гистерезиса имеет наибольшую “ширину” (максимальную величину малой оси эллипса), а в момент отсутствия первичного поля ($E_0=0$) наблюдается максимальная остаточная величина вторичного поля, что напрямую характеризует величину T_0 . Следует подчеркнуть, что при отсутствии индукционного поля направление “вращения по петле” за период внешнего воздействия происходит против часовой стрелки. Известно (Физ. энцикл., 1983), что площадь петли гистерезиса характеризует энергетические затраты за один цикл (период) внешнего воздействия на формирование вторичного поля, что в конечном счете идет на нагревание образца. Расчеты показали, что в нашем случае максимальная величина площади петли гистерезиса ВП проявляется при $t/T_0 \approx 8$ (рис. 2а). Поскольку при рассмот-

ренном временном режиме измерений процесс геоэлектрохимической поляризации исследуемого объекта не доводится до состояния полного насыщения, то полученную зависимость следует считать **петлей частного гистерезиса** (непредельная петля гистерезиса ВП). Указанные параметры (ширина и площадь петли гистерезиса) могут являться достаточно информативными при изучении вторичных процессов в режиме реального времени (экспресс-анализ).

В присутствии электродинамических процессов при определенной частоте синусоидального тока в ранней стадии наблюдается полная компенсация поляризованного поля индуктивным полем. В представленном случае это происходит во временном интервале $1/8 < t/T_0 < 1/4$ и на рассматриваемой зависимости не может проявляться, поскольку в этом случае “петля гистерезиса” практически сливается с осью абсцисс. Характерное отличие приведенных временных зависимостей вторичного суммарного поля (для исходной модели геоэлектрической среды) прослеживается при значениях $t/T_0 = 1/8$ и менее (сравнивая рис.1б и рис.1а) и заключается в значительном увеличении интенсивности вторичного поля (амплитуды) с одновременным уменьшением величины сдвига фаз. Поскольку индукционный процесс проявляется на петлях гистерезиса ВП противоположным направлением “вращения” – по часовой стрелке (рис. 2б), то при малых значениях t/T_0 суммарное поле также характеризуется отмечанным направлением “вращения”, что свидетельствует о доминирующей составляющей индукционного поля. С изменением частоты внешнего электромагнитного поля меняются форма и площадь петли гистерезиса ВП, и такую петлю можно назвать **динамической**.

Таким образом, согласно общепринятому определению гистерезиса (Физ. энцикл., 1983), наблюдаемое проявление вторичного электрического поля при изучении геоэлектрической среды при внешнем циклическом электрическом воздействии **условно можно считать гистерезисным**, поскольку с изменением частоты первичного поля меняется форма петли, что противоречит обычно подразумеваемому понятию гистерезиса. Кроме этого, следует подчеркнуть, что при проведении электроразведочных исследований неоднородных геоэлектрических сред определяемые и интерпретируемые параметры являются **кажущимися (фиктивными)** – зависящими не только от пространственного распределения электрических свойств среды, но и от применяемой установки измерений (конфигурации, размеров и ориентировки).

Особый интерес представляет рассмотрение динамики вектора напряженности вторичного поля **$E_{впс}$** (Матевосян А.К., 2002; Матевосян А.К., 2011¹) при циклическом возбуждении поля в процессе выполнения векторной съемки. На рис. 3 приведены временные зависимости изменения вектора **$E_{впс}$** (годографы вектора вторичного поля (Матевосян А.К., 2011¹), которые для наглядности при различных t приведены в разных масштабах в исследуемом пункте наблюдений по взаимно перпендикулярным направлениям x и y за десятый период при синусоидальном внешнем

воздействии, полученные при следующих значениях основных параметров: $E_{ox}/E_{oy}=3/4$, $\eta_{kx}/\eta_{ky}=10/3$, $B_x=\sqrt{1000}$, $B_y=\sqrt{1200}$ для двух поляризующихся геоэлектрических сред (а, б), отличающихся только значениями T_{ox} и T_{oy} (1 и 5с). В интервале $0.01 < t/(T_{ox}, T_{oy}) < 100$ наблюдается изменение ориентировок и площадей этих зависимостей, что несомненно может являться характерным и весьма эффективным признаком, характеризующим амплитудно-временные параметры поляризационных процессов (наряду с фазовым сдвигом вторичного поля относительно первичного) геоэлектрической среды при возбуждении поля синусоидальным током. Согласно выше представленным теоретическим исследованиям, на рис. 4 для рассматриваемых геоэлектрических сред приведены петли гистерезиса ВП, полученные по наблюдаемым x- и y-составляющим напряженностей первичного и вторичного электрических полей в пункте наблюдений за десятый период. Здесь же приведены временные зависимости величины вектора напряженности вторичного поля $E_{впс}$ от величины вектора напряженности первичного поля $E_{ос}$ за тот же рассматриваемый временной интервал. В последнем случае получены замкнутые кривые сложной формы, а насколько информативно представление и анализ таких временных зависимостей в процессе интерпретации разнохарактерного экспериментального материала покажут дальнейшие исследования. Кроме этого, судя по полученным годографам вектора $E_{впс}$, можно утверждать, что рассматриваемый временной режим измерений при векторной съемке дает принципиальную возможность хорошей дифференциации геоэлектрических сред, характеризующихся малыми величинами T_0 , и создает весомые предпосылки для выполнения эффективных исследований при решении розличных задач. Здесь следует только отметить, что общая особенность приведенных зависимостей заключается в полном непрерывном смещении конца вектора $E_{впс}$ по замкнутой кривой за один период, и с уменьшением частоты тока наблюдается увеличение величины вторичного поля.

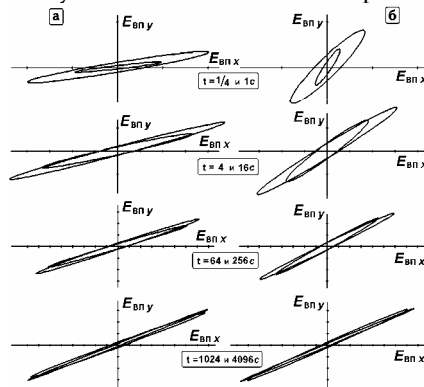


Рис.3. Динамика вращения вектора напряженности вторичного поля $E_{впс}$ за десятый период при возбуждении поля синусоидальным током различной частоты в исследуемом пункте наблюдений при векторной съемке.
а – $T_{ox}=1с$ и $T_{oy}=5с$, б – $T_{ox}=5с$ и $T_{oy}=1с$.

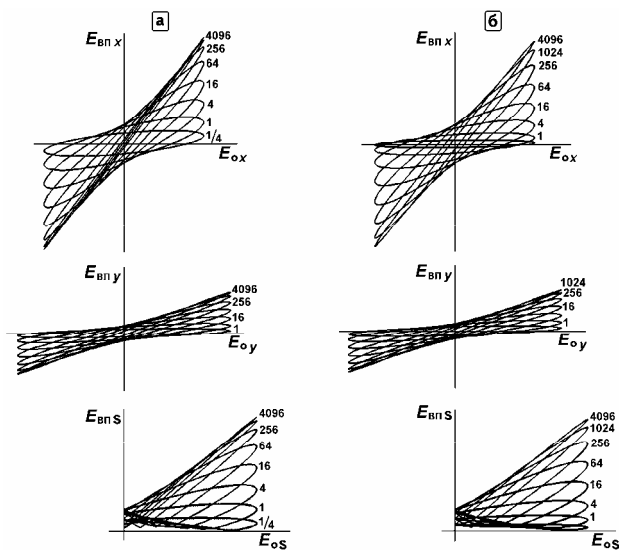


Рис.4. Семейства петель гистерезиса ВП, построенные по x - и y -составляющим, и временные зависимости полных значений напряженностей первичного и вторичного электрических полей за десятый период при возбуждении поля синусоидальным током различной частоты по результатам векторной съемки. Шифр кривых – t (в секундах).
а – $T_{ox}=1c$ и $T_{oy}=5c$, б – $T_{ox}=5c$ и $T_{oy}=1c$.

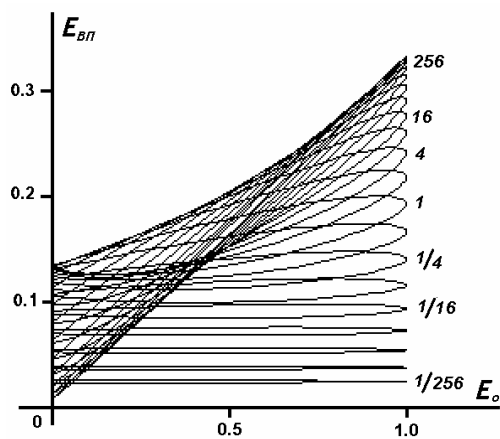


Рис.5. Семейство петель частного гистерезиса вызванной поляризации за десятый период при непрерывном однополярном возбуждении электрического поля. Шифр кривых – t/T_o .

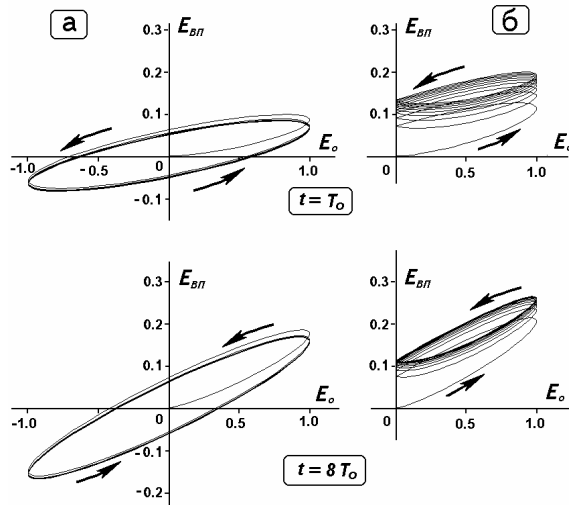


Рис.6. Динамика изменения петель гистерезиса вызванной поляризации за первые десять периодов при непрерывном разнополярном (а) и однополярном (б) возбуждении электрического поля.

На рис. 5 изображены петли частного гистерезиса ВП (в отсутствии индукционных процессов) за десятый период при непрерывном однополярном периодическом внешнем воздействии при различных величинах периода колебаний для вышерассмотренной модели геоэлектрической среды. При малых значениях t/T_0 (рис. 5) петли гистерезиса ориентированы почти параллельно оси абсцисс и имеют незначительную “ширину”, характеризующую нарастание ВП за данный период возбуждения. С увеличением t/T_0 увеличиваются угол наклона и ширина петли гистерезиса с постепенным нарастанием значений вторичного поля. При определенной величине соотношения t/T_0 (для рассматриваемой среды при $t/T_0 \approx 10$) петли гистерезиса имеют наибольшую площадь (и как в предыдущем случае – при знакопеременном синусоидальном токе), также характеризующую энергетические затраты на формирование поляризационного поля. В отличие от синусоидального внешнего поля, в данном однополярном случае при малых значениях t/T_0 (во временной области непосредственно следующей за наиболее интенсивными значениями индукционного поля) не наблюдается быстрое (к пятому периоду) установление равновесного динамического состояния среды к приложенному электрическому воздействию. Эта закономерность наглядно отражена на рис. 6. Характерная особенность петель гистерезиса (рис. 6б) – спиралеобразное с вращением против часовой стрелки монотонное увеличение интенсивности поля ВП с каждым последующим периодом однополярного возбуждения. При таком характере изменения приложенного поля основным поляризационным параметром (ВП) может являться величина напряженности вторичного

поля в момент отсутствия первичного поля, либо усредненная величина вторичного поля за один период воздействия. Кроме этого, могут быть использованы и геометрические параметры петли гистерезиса: ширина при половине максимальной величины первичного поля, площадь и угол наклона (с учетом выбранных шкал осей абсцисс и ординат).

Таким образом, резюмируя сказанное можно констатировать, что изучение особенностей проявления гистерезиса вызванной поляризации геологической среды создает весомые предпосылки для выполнения оперативных и достаточно информативных исследований методом ВП на переменном токе при решении различных (инженерно-геологические, гидрогеологические, геоэкологические, сейсмопрогностические, археологические) задач.

ЛИТЕРАТУРА

- Комаров В.А.** Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980, 391 с.
- Матевосян А.К.** К вопросу изучения особенностей проявления системы параметров кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости. Изв. НАН Армении, Науки о Земле, 2002, LV, № 1-3, с. 54-58.
- Матевосян А.К.** Определение полных интегральных амплитудно-временных параметров вызванной поляризации по результатам векторных измерений. Доклады НАН Армении, 2011¹, 111, № 2, с. 157-163.
- Матевосян А.К.** Особенности проявления интегральных амплитудно-временных параметров вызванной поляризации в присутствии индукционных процессов. Доклады НАН Армении, 2011², 111, № 3, с. 280-287.
- Физический энциклопедический словарь.** М. Сов. энциклопедия. 1983. 928 с.
- Электроразведка.** Справочник геофизика. М.: Недра, 1989, в двух книгах – 438 с., 378 с.

Рецензент С.М.Оганесян

ՀԱՐՈՒՑՎԱԾ ԲԵՎԵՌԱՑՄԱՆ ՀԻՍՏԵՐԵԶԻՍԻ ՅՈՒՐԱՀԱՏՈՒՎ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա. Կ. Մաթևոսյան

Ամփոփում

Վերլուծված են հարուցված բևեռացման (ՀԲ) հիստերեզիսի առանձնահատկությունները, որը ի հայտ է գալիս երկրաէլեկտրական միջավայրի բևեռացման ոչ միանշանակ օղականման կախվածության տեսքով արտաքին փոփոխական էլեկտրական դաշտի պարբերական ազդեցության ներքո ՀԲ մեթոդով էլեկտրահետախուզական ուսումնասիրություններ կատարելիս:

Մաթեմատիկական մոդելավորման և թվային հաշվարկների արդյունքների հիման վրա որոշակի երկրաէլեկտրական միջավայրերի համար հետազոտված է ՀԲ հիստերեզիսի օրինաչափություն-

ների արտահայտումը: Դիտարկված են երկրորդական էլեկտրական դաշտի լարվածության վեկտորի հոդոգրաֆները սինուսոիդալ ժամանակային ռեժիմի չափման ժամանակ:

Ապացուցված է, որ վեկտորային հանույթի ժամանակ դիտարկվող էլեկտրական դաշտի գրգռման եղանակը հնարավորություն է տալիս լավ տարանջատել այն երկրաէլեկտրական միջավայրերը, որոնք բնութագրվում են անցումային պրոցեսի ժամանակային չափանիշի փոքր արժեքներով: Նշված օրինաչափությունը ստեղծում է ծանրակշիռ նախադրյալներ փոփոխական հոսանքով ՀԲ մեթոդով երկրաբանական միջավայրի արդյունավետ ուսումնասիրություններ կատարելու համար ինժեներաերկրաբանական, հիդրոերկրաբանական, երկրաէկոլոգիական, սելսմական խագուշակային, հնագիտական և այլ խնդիրներ լուծելիս:

THE SPECIFIC PARTICULARITY OF THE HYSTERESIS OF INDUCED POLARIZATION

A. K. Matevosyan

Abstract

Analysed the particularities and formulated the concept of the induced polarization (IP) hysteresis, which manifests itself in the electrical prospecting of the secondary electric field study by IP method in the form of the ambiguous loop-like dependence of the polarization of the geoelectric media by the external electric field at it's the cyclic (sinusoidal) change.

As a result of the mathematical modeling and numerical calculations on the specific examples of the geoelectric media are revealed the regularities of the manifestation of the IP hysteresis loop. The considered hodographs are of the vector of the intensity of the secondary electric field at the sinusoidal time mode of the measurement.

It is established, that at the vector survey the considered mode of the excitation of the electric field gives a good possibility of the differentiation of the geoelectric media with the small values of the time parameter of the transition process. The specified regularity creates the weighty premises for performing the efficient studies by the considered time mode of IP method for the decision non-metallic (geotechnical, hydrogeological, environmental, seismic, archaeological) geological tasks.