

УДК 550.837

А. К. Матевосян

**Определение полных интегральных амплитудно-временных параметров
 вызванной поляризации по результатам векторных измерений**

(Представлено чл.-кор. НАН РА С.М.Оганесяном 15/V11 2010)

Ключевые слова: *электроразведка, вызванная поляризация, векторная съемка, амплитудно-временные характеристики*

В [1] предложены обобщенные характеристики вторичного электрического поля - интегральные амплитудно-временные параметры вызванной поляризации (ИАВП ВП) при исследованиях (по результатам измерений) одной (х- или у-составляющей) приемной линией в пункте наблюдений:

$$\Omega_Q(x,y)=Q_c(x,y) / Q_z(x,y) , \quad \Omega_W(x,y)=W_c(x,y) / W_z(x,y) , \quad \Omega_U(x,y)=U_c(x,y) / U_z(x,y) \quad (1)$$

и

$$Q_{z(x,y)} = \eta_{k(x,y)} E_{o(x,y)} \int_0^{t_3} [1 - F_{(x,y)}(T)] dT ,$$

$$W_{z(x,y)} = \eta_{k(x,y)} E_{o(x,y)}^2 \int_0^{t_3} [1 - F_{(x,y)}(T)] [1 + \eta_{(x,y)} F_{(x,y)}(T)] dT ,$$

$$U_{z(x,y)} = E_{o(x,y)} \int_0^{t_3} [1 + \eta_{k(x,y)} F_{(x,y)}(T)] dT , \quad (2)$$

$$Q_{c(x,y)} = \eta_{k(x,y)} E_{o(x,y)} \int_0^{\infty} F_{(x,y)}^*(T) dT , \quad W_{c(x,y)} = \eta_{k(x,y)}^2 E_{o(x,y)}^2 \int_0^{\infty} [F_{(x,y)}^*(T)]^2 dT ,$$

$$U_{c(x,y)} = \eta_{k(x,y)} E_{o(x,y)} \int_0^{\infty} F_{(x,y)}^*(T) dT ,$$

здесь $\Omega_{Q(x,y)}$, $\Omega_{W(x,y)}$, $\Omega_{U(x,y)}$ – отдача ВП по заряду, энергии и напряжению, соответственно; параметры при зарядке в выражениях (1-2) обозначены индексом "з", а на спаде индексом "с";

$E_{ВП(x,y)} = \eta_{k(x,y)} E_{o(x,y)}$ – асимптотическое (максимальное – при предельной длительности зарядки $t_3 \rightarrow \infty$) значение х- или у- составляющей вектора напряженности вторичного электрического поля;

$\eta_{k(x,y)} = E_{ВП(x,y)} / E_{o(x,y)}$ – асимптотическое значение кажущейся поляризуемости по результатам измерений х- или у-составляющей в пункте наблюдений;

$E_{ВП(x,y)} = \eta_{k(x,y)} E_{o(x,y)}$ – асимптотическое (максимальное – при предельной длительности зарядки $t_3 \rightarrow \infty$) значение x - или y -составляющей вектора напряженности вторичного электрического поля;

$\eta_{k(x,y)} = E_{ВП(x,y)} / E_{o(x,y)}$ – асимптотическое значение кажущейся поляризуемости по результатам измерений x - или y -составляющей в пункте наблюдений;

$E_{o(x,y)}$ – величина x - или y -составляющей вектора напряженности первичного электрического поля;

$F_{(x,y)}(T) = \eta_{k(x,y)}(T) / \eta_{k(x,y)}$ – значение переходной характеристики (ПХ) ВП в момент времени T x - или y -составляющей наблюдаемого поля при прямоугольном импульсе постоянного тока;

$\eta_{k(x,y)}(T)$ – значение кажущейся поляризуемости при зарядке в момент времени T по результатам измерений соответствующей составляющей в пункте наблюдений;

$E_{ВП(x,y)}(T) = \eta_{k(x,y)} F_{(x,y)}(T) E_{o(x,y)}$ – величина x - или y -составляющей вектора напряженности вторичного поля при зарядке в момент времени T ;

$$F_{(x,y)}^*(T) = F_{(x,y)}(T + t_3) - F_{(x,y)}(T) \quad (3)$$

– кривая (характеристика) спада при прямоугольном одиночном импульсе постоянного тока длительностью t_3 по результатам измерений x - или y -составляющей в пункте наблюдений.

В этой статье аналогичным образом сформулируем *полные интегральные амплитудно-временные параметры ВП* по данным векторных измерений в исследуемом пункте наблюдений (в нижеприведенных выражениях обозначены индексом "S"):

$$\Omega_{oS} = Q_{cS} / Q_{3S}, \quad \Omega_{wS} = W_{cS} / W_{3S}, \quad \Omega_{uS} = U_{cS} / U_{3S} \quad (4)$$

и

$$Q_{3S} = \eta_S E_{oS} \int_0^{t_3} [1 - F_S(T)] dT, \quad W_{3S} = \eta_S E_{oS}^2 \int_0^{t_3} [1 - F_S(T)][1 + \eta_S F_S(T)] dT, \\ U_{3S} = E_{oS} \int_0^{t_3} [1 + \eta_S F_S(T)] dT, \quad (5)$$

$$Q_{cS} = \eta_S E_{oS} \int_0^{\infty} F_S^*(T) dT, \quad W_{cS} = \eta_S^2 E_{oS}^2 \int_0^{\infty} [F_S^*(T)]^2 dT, \quad U_{cS} = \eta_S E_{oS} \int_0^{\infty} F_S^*(T) dT,$$

здесь $E_{oS} = \sqrt{E_{ox}^2 + E_{oy}^2}$ – величина вектора напряженности первичного электрического поля \mathbf{E}_{oS} ;

$\eta_S = E_{ВПs} / E_{oS}$ – асимптотическое значение полной кажущейся поляризуемости, нормированное по первичному полю;

$F_S^*(T) = E_{ВП}^*(T) / E_{ВП}S$ – полная характеристика спада при прямоугольном оди-
 ночном импульсе постоянного тока длительностью t_3 , определенная по результатам
 измерений x- и y-составляющих электрических полей.

В вышеприведенных формулах $\eta_{k(x,y)}$ или η_S – асимптотическое (при $t_3 \rightarrow \infty$)
 значение соответствующей кажущейся поляризуемости [1-4], определяемой как отно-
 шение поля ВП к первичному (при $t_3 \rightarrow 0$) полю; $E_o(x,y) = \rho_{k(x,y)} I_o / k_{(x,y)} r_{(x,y)}$ – величина
 напряженности первичного электрического поля по направлению соответствующей (x-
 или y-) приемной линии; $\rho_{k(x,y)}$ – кажущееся удельное сопротивление, $k_{(x,y)}$ – коэф-
 фициент установки и $r_{(x,y)}$ – разнос приемной линии по тем же направлениям.

С целью анализа особенностей предлагаемых параметров и обоснования эффек-
 тивности их использования (информативности) при выполнении электроразведочных
 исследований проведено математическое моделирование проявления пространственно-
 временных характеристик первичного и вторичного электрических полей на поверх-
 ности разнотипных геоэлектрических сред. Некоторые полученные результаты теоре-
 тических исследований представлены ниже.

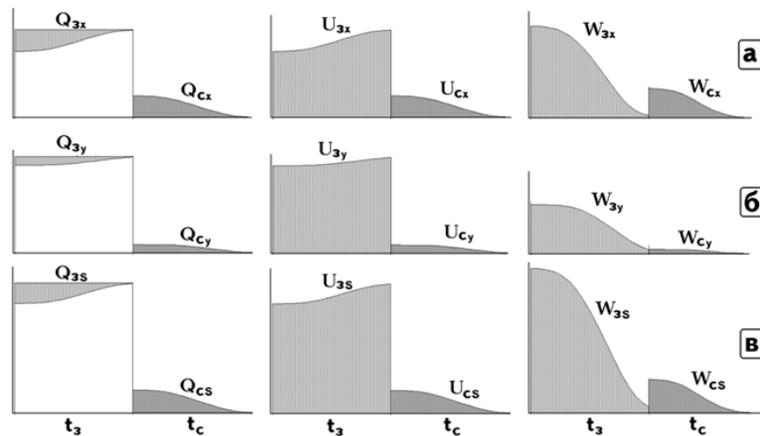


Рис.1. Схематическое представление интегральных амплитудно-временных
 параметров вызванной поляризации при возбуждении электрического поля
 импульсом прямоугольной формы по результатам измерений x- (а), y-
 составляющих (б) в пункте наблюдений и вычислений полного поля (в).

На рис.1 приведен пример графиков интегральных амплитудно-временных пара-
 метров вызванной поляризации при возбуждении электрического поля импульсом пря-
 моугольной формы по результатам измерений x-, y-составляющих в пункте наблюде-
 ний и вычислений полных параметров. Расчеты выполнены при следующих значениях:
 $t_3 = 256c$, $E_{ox}/E_{oy} = 3/4$, $\eta_{kx}/\eta_{ky} = 10/3$, $B_x = \sqrt{1000}$, $B_y = \sqrt{1200}$, $T_{ox} = 1c$, $T_{oy} = 5c$. Здесь T_{ox} и
 T_{oy} – абсциссы максимума производной переходной характеристики (задаваемой логар-
 ритмической зависимостью [2]) ВП по направлениям x и y осей.

Принципиальное отличие соотношений (1-2) и (4-5) заключается в том, что в рас-
 сматриваемом общем случае справедливо неравенство $F_S^*(T) \neq F_S(T+t_c) - F_S(T)$ в отличие

от (3), т.е. даже при проявлении линейных процессов ВП по отдельным произвольным направлениям (в частности по x и y) вычисленная полная переходная характеристика в зависимости от использованных исходных данных: при пропускании тока или по спаду – различна. Тем самым, при определении полных ИАВП по векторным измерениям нарушается принятое понятие линейности ВП [2], которое выражается в отсутствии возможности построения требуемой полной характеристики (кривой) спада по полной переходной характеристике, и наоборот, получения полной переходной характеристики по набору (серии) полных кривых спада при различных t_3 . Это утверждение легко объясняется в силу справедливости векторного соотношения $\mathbf{E}_{ВПIS}(T) = \mathbf{E}_S(T) - \mathbf{E}_{oS}$, откуда $|\mathbf{E}_{ВПIS}(T)| = |\mathbf{E}_S(T) - \mathbf{E}_{oS}| \geq |\mathbf{E}_S(T)| - |\mathbf{E}_{oS}|$, поскольку в общем случае направления векторов $\mathbf{E}_S(T)$ и \mathbf{E}_{oS} не совпадают. Следовательно,

$$\sqrt{E_{ВПIS}^2(T) + E_{ВПY}^2(T)} = \sqrt{[E_x(T) - E_{ox}]^2 + [E_y(T) - E_{oy}]^2} \geq \sqrt{E_x^2(T) + E_y^2(T)} - \sqrt{E_{ox}^2 + E_{oy}^2}$$

или при сопоставлении величин приращений векторов напряженности полного электрического поля

$$E_S(T=t_3) - E_{oS} = \sqrt{[1 + \eta_{kx} F_x(t_3)]^2 E_{ox}^2 + [1 + \eta_{ky} F_y(t_3)]^2 E_{oy}^2} - \sqrt{E_{ox}^2 + E_{oy}^2}$$

и напряженности поля ВП

$$E_{ВПIS}(T=t_3) = \sqrt{\eta_{kx}^2 [F_x(t_3)]^2 E_{ox}^2 + \eta_{ky}^2 [F_y(t_3)]^2 E_{oy}^2}$$

в конце зарядки длительностью t_3 (за счет поляризационных процессов).

Из $\mathbf{E}_{ВПIS}(T=t_3) = \mathbf{E}^*_{ВПIS}(T=0)$ следует, что в общем случае $E_S(T=t_3) - E_{oS} \leq E^*_{ВПIS}(T=0)$, т.е. в момент выключения тока падение величины вектора напряженности полного (суммарного – первичного и вторичного) электрического поля не равно (как обычно при рассмотрении одной составляющей указанных электрических полей), а не больше величины вектора напряженности первичного поля.

На рис.2 представлены годографы (временные диаграммы) вектора напряженности поля ВП ($\mathbf{E}_{ВПIS}(T)$ – при зарядке и $\mathbf{E}^*_{ВПIS}(T)$ – на спаде) в пункте наблюдений при полном цикле измерений в результате возбуждения электрического поля прямоугольным импульсом тока при трех длительностях зарядки ($t_3=1, 16$ и 256 с).

Вычисления проведены с соблюдением принципа линейности процессов ВП при регистрации каждой (x - и y -) составляющей электрического поля. Приведенные временные зависимости иллюстрируют изменение ориентации вектора напряженности вторичного электрического поля при полном цикле измерений и тем самым являются годографами рассматриваемого вектора. Как видно на рис.2, траектория конца вектора напряженности вторичного поля при пропускании тока отличается от его траектории на спаде. Указанное обстоятельство наглядно и убедительно свидетельствует о весьма важной закономерности проявления вторичного поля при исследовании неоднородных геоэлектрических сред, заключающееся в том, что несмотря на линейность проявления вторичных процессов вдоль отдельных произвольных направлений, но при отличающихся значениях хотя бы одного из основных параметров вторичного поля, а именно, при справедливости неравенства $\eta_{kx} \neq \eta_{ky}$ или $F_x(T) \neq F_y(T)$, в исследуемом пункте

наблюдений при полном цикле измерений происходит (наблюдается) необратимое (неадекватное) возвращение возбужденной геоэлектрической среды в исходное первоначальное состояние. Следует особо подчеркнуть, что конфигурация приведенных на рис.2 векторных диаграмм не зависит от выбора используемых при расчетах исходных составляющих электрических полей в данном пункте, что в очередной раз говорит в пользу необходимости проведения векторных электроразведочных измерений (векторной съемки).

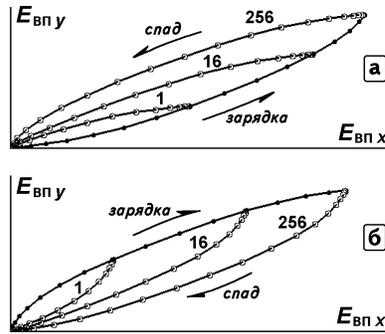


Рис.2. Годографы вектора напряженности вторичного поля в пункте наблюдений при полном цикле измерений. Шифр кривых – t_3 (в секундах).

Из (1-5) следует, что однозначно характеризующий линейность вторичных процессов интегральный параметр $\Omega_{Q(\alpha,y)}$ – отдача ВП, по заряду равный 1 [1], по полным ИАВП удовлетворяет условию $\Omega_{QS} \geq 1$, причем $\Omega_{QS} = 1$ только при коллинеарности векторов \mathbf{E}_{os} и $\mathbf{E}_{ВП}(T)$ в течение полного цикла измерений, т.е. при $\alpha_1 = \alpha_2(T) = \alpha_2^*(T)$. Здесь $\alpha_1 = \arctg(E_{oy}/E_{ox})$, $\alpha_2(T) = \arctg[E_{ВПy}(T)/E_{ВПx}(T)]$, $\alpha_2^*(T) = \arctg[E_{ВПy}^*(T)/E_{ВПx}^*(T)]$ – углы между направлениями векторов \mathbf{E}_{os} , $\mathbf{E}_{ВП}(T)$ при зарядке в момент времени T , $\mathbf{E}_{ВП}^*(T)$ на спаде в момент времени T и осью x , соответственно. Это условие наблюдается, когда переходные характеристики идентичны и асимптотические значения кажущихся поляризуемостей при различных направлениях одинаковы: $F_S(T) = F_{(x,y)}(T)$ и $\eta_{kx} = \eta_{ky}$, в частности, для случая однородной изотропной поляризуемой среды. При исследованиях реальных геоэлектрических сред, которым свойственна электрическая неоднородность, $\Omega_{QS} \neq 1$.

Анализ ИАВП ВП по выражениям (1-2) и (4-5) позволяет установить между рассматриваемыми параметрами следующие соотношения:

- $(|Q_{3x}|, |Q_{3y}|) < Q_{3S} < (|Q_{3x}| + |Q_{3y}|)$ и $(|Q_{cx}|, |Q_{cy}|) < Q_{cS} < (|Q_{cx}| + |Q_{cy}|)$,
- $(|U_{3x}|, |U_{3y}|) < U_{3S} < (|U_{3x}| + |U_{3y}|)$ и $(|U_{cx}|, |U_{cy}|) < U_{cS} < (|U_{cx}| + |U_{cy}|)$,
- $W_{3S} = W_{3x} + W_{3y}$ и $W_{cS} = W_{cx} + W_{cy}$,
- Ω_{QS} принимает промежуточные значения между Ω_{Ux} и Ω_{Uy} , а Ω_{WS} – между Ω_{Wx} и Ω_{Wy} .

Отметим также, что значения полной кажущейся поляризуемости η_S и полного кажущегося сопротивления ρ_S находятся в интервалах $(|\eta_{kx}|, |\eta_{ky}|)$ и $(|\rho_{kx}|, |\rho_{ky}|)$, соответственно. Здесь приведены абсолютные величины кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости при x и y ориентировках приемных линий, поскольку в зависимости от применяемой установки, временного режима измерений и распределения электрических свойств (удельного электрического сопротивления и поляризуемости) исследуемой геоэлектрической среды могут наблюдаться и отрицательные значения этих параметров.

Следует еще раз особо обратить внимание на то, что поскольку определение ИАВП ВП при изучении геоэлектрической среды основано на результатах измерений возбужденного первичного и вторичного электрических полей в данном пункте наблюдений, то отмеченные параметры зависят не только от особенностей распределения электрических свойств (удельного электрического сопротивления и поляризуемости) среды, но и от конкретной примененной установки измерений. Ввиду этого следует условно считать их кажущимися параметрами (наряду с кажущимся сопротивлением и кажущейся поляризуемостью).

Однако определяемые по выражениям (1-3) ИАВП ВП напрямую зависят и от ориентации приемной линии (конкретно измеренной составляющей электрических полей). В отличие от них вышесформулированные полные ИАВП, определяемые по векторным измерениям (4-5), характеризуются инвариантностью относительно выбранных исходных x и y направлений приемных линий в пункте наблюдений, что безусловно является неоспоримым преимуществом этих параметров. Кроме этого, имея результаты измерений электрических полей в исследуемом пункте при двух различных ориентациях приемных линий (в частности, по осям x и y , полученным в результате векторной съемки) [3, 5], можно вычислить и их проявление для представляющих интерес направлений и в итоге определить и полноценно изучить особенности как интегральных, так и дифференциальных параметров ВП [2, 4]. Проведенные теоретические исследования и численные расчеты на конкретных разнотипных геоэлектрических моделях позволили установить интересную закономерность: когда при не менее двух произвольных направлениях (в частности, вдоль осей x и y) ориентации приемных линий в пункте наблюдений проявляется линейность процессов вторичного поля, она будет наблюдаться в этом пункте и при другом произвольном направлении.

В заключение отметим, что результаты настоящих исследований еще раз подтверждают необходимость проведения унифицированных комплексных векторных электроразведочных исследований для получения достоверного и полноценного высокоинформативного экспериментального материала с целью дальнейшей более однозначной пространственно-временной интерпретации электроразведочных данных и их успешного геологического истолкования.

Институт геологических наук НАН РА

А. К. Матевосян

**Определение полных интегральных амплитудно-временных параметров
вызванной поляризации по результатам векторных измерений**

Предложены полные интегральные амплитудно-временные параметры вызванной поляризации, определяемые при векторной съемке. Приводится их сопоставление с аналогичными параметрами, вычисляемыми при исследованиях геоэлектрической среды одной приемной линией в пункте наблюдений. Комплексная интерпретация электроразведочных данных векторной съемки с использованием как дифференциальных, так и интегральных амплитудно-временных параметров вызванной поляризации позволит существенно повысить разрешающую способность и информативность экспериментальных работ.

Ա. Կ. Մաթևոսյան

**Հարուցված բևեռացման լրիվ ինտեգրալ ամպլիտուդաժամանակային չափանիշների
որոշումը վեկտորային չափումների արդյունքներով**

Առաջարկվում են հարուցված բևեռացման լրիվ ինտեգրալ ամպլիտուդաժամանակային չափանիշներ, որոնք որոշվում են էլեկտրահետախուզական վեկտորային հանույթի ժամանակ և համեմատվում են նույնանման չափանիշների հետ մեկ ընդունիչ գծով չափումներ կատարելիս:

Վեկտորային հանույթի տվյալների համատեղ մեկնաբանումը, օգտագործելով ինչպես դիֆերենցիալ, այնպես և ինտեգրալ չափանիշներ, կնպաստի զգալի չափով բարձրացնել փորձարարական աշխատանքների արդյունավետությունը երկրաէլեկտրական միջավայրի ուսումնասիրությունների ժամանակ:

A. K. Matevosyan

**Determination of Total Integral Amplitude-time Parameters
of Induced Polarization on Results of Vector Survey**

The total integral amplitude-time parameters of induced polarization, defined under vector survey are suggested. Their collation with similar parameters, calculated at the study of the geoelectrical medium by one receiving line in the point of the observations by the induced polarization method is shown.

Литература

1. *Матевосян А.К.* - ДНАН Армении. 2001. Т. 101. N1. С. 76-83.
2. *Комаров В.А.* Электроразведка методом вызванной поляризации. Л. Недра. 1980. 391 с.
3. *Матевосян А.К.* - Изв. НАН Армении. Науки о Земле. 2002. Т. 55. N1-3. С. 54-58.
4. Электроразведка. Справочник геофизика. М. *Недра*. 1989. в двух книгах - 438 с, 378 с.
5. *Матевосян А.К.* Разработка теоретических основ методики векторной съемки при электроразведочных исследованиях. Автореф. докт. дис. Ереван. ИГН НАН РА. 2003. 33 с.