

А. К. Матевосян

**Интегральные амплитудно-временные параметры
вызванной поляризации**

(Представлено академиком Р. Т. Джрбашьяном 22/ХП 2000)

Современные исследования как геоэлектрической среды, так и образцов горных пород и руд методом вызванной поляризации выполняют с использованием различных временных режимов наблюдений, а обработка и интерпретация результатов измерений сводится к получению дифференциальных параметров переходного процесса вторичного электрического поля [1-3]. Несмотря на повышенную разрешающую способность измерений и информативность дифференциальных параметров, они не характеризуют весь исследуемый процесс полностью (в целом).

К настоящему времени известен интегральный амплитудно-временной параметр вызванной поляризации (ВП) - заряжаемость [4], определяемый как разность потенциалов, проинтегрированная за определенный период времени по кривой спада и нормированная по величине разности потенциалов при зарядке (пропускании тока), и имеющий размерность времени. Однако ввиду низкой информативности он не нашел широкого практического применения.

В связи с этим в настоящей статье рассмотрим обобщенные параметры ВП, получаемые по данным регистрации поля как при пропускании электрического тока, так и после его выключения и характеризующие весь временной диапазон исследуемого процесса. Для этого введем понятия интегральных амплитудно-временных параметров $\Omega_Q, \Omega_W, \Omega_U$, характеризующих отдачу электрохимических процессов (ВП) по количеству электричества (электрическому заряду), энергии, напряжению, соответственно:

$$\Omega_Q = Q_c/Q_3, \quad \Omega_W = W_c/W_3, \quad \Omega_U = U_c/U_3, \quad (1)$$

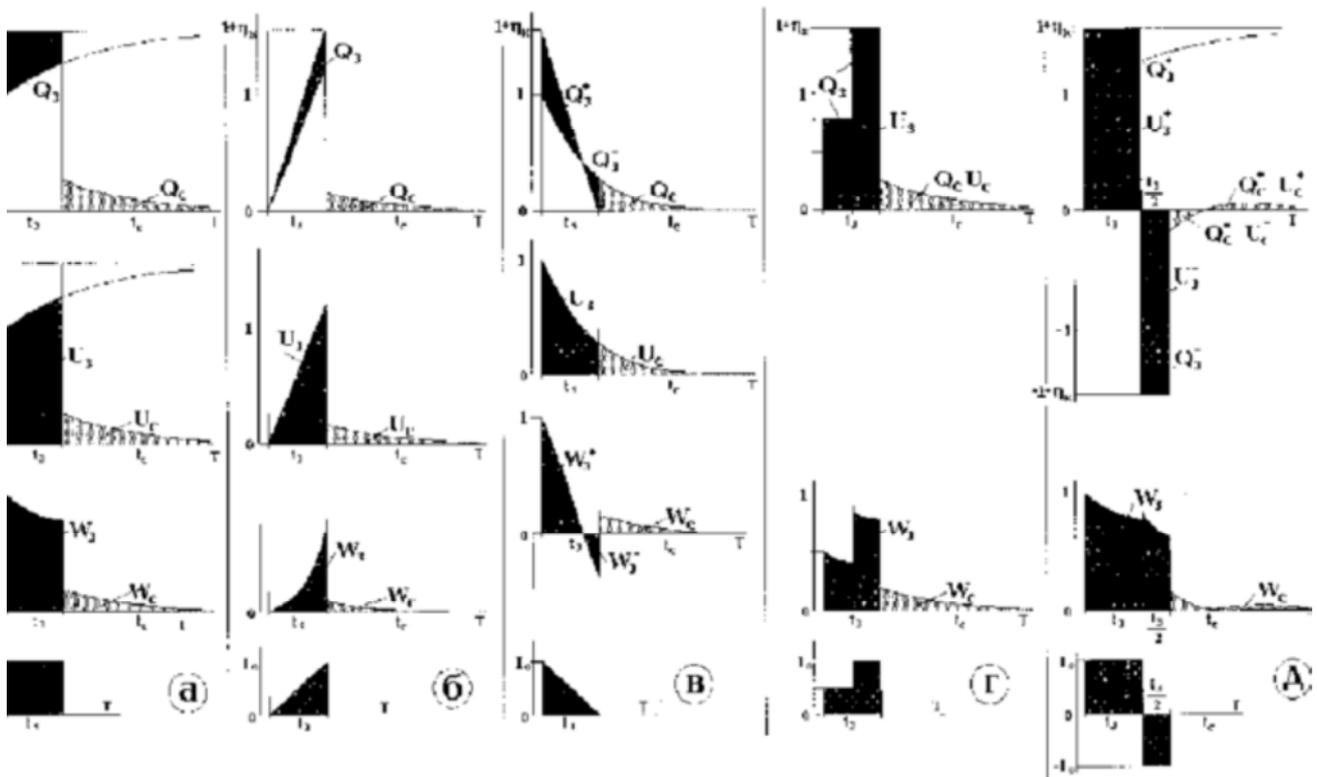


Рис. 1. Графическое представление интегральных амплитудно-временных параметров

вызванной поляризации при возбуждении электрического поля: а - импульсом прямоугольной формы; б - импульсом треугольной формы с прямым углом в его конце; в - импульсом треугольной формы с прямым углом в его начале; г - однополярным ступенчатым импульсом; д - двумя разнополярными прямоугольными импульсами.

где, при возбуждении в исследуемой среде электрического поля:

импульсом постоянного тока длительностью t_3 : $I(T) = I_0$ (рис. 1, а),

$$Q_c = \eta_K E_0 \int_0^{\infty} F^*(T) dT, \quad W_c = \eta_K^2 E_0 \int_0^{\infty} [F^*(T)]^2 dT, \quad U_c = \eta_K E_0 \int_0^{\infty} F^*(T) dT \quad (2a)$$

и

$$Q_3 = \eta_K E_0 \int_0^{t_3} [1 - F(T)] dT, \quad W_3 = \eta_K E_0^2 \int_0^{t_3} [1 - F(T)][1 + \eta_K F(T)] dT,$$

$$U_3 = \eta_K E_0^2 \int_0^{t_3} [1 + \eta_K F(T)] dT,$$

здесь $F^*(T) = F(T + t_3) - F(T)$, $F(T)$ - переходная характеристика (ПХ) ВП при прямоугольном одиночном импульсе постоянного тока; откуда

$$Q_3 = Q_c = U_3 = \eta_K E_0 t_3 - \eta_K E_0 \int_0^{t_3} F(T) dT \quad \text{и} \quad U_3 + U_c = (1 + \eta_K) E_0 t_3;$$

треугольным импульсом тока длительностью t_3 с прямым углом в его конце:

$I(T) = I_0 T/t_3$ (I_0 - ток в вершине треугольного импульса) (рис. 1, б),

$$Q_{\Delta c} = \eta_K E_0 \int_0^{\infty} F_{\Delta}^*(T) dT, \quad W_{\Delta c} = \eta_K^2 E_0^2 \int_0^{\infty} [F_{\Delta}^*(T)]^2 dT, \quad U_{\Delta c} = \eta_K E_0 \int_0^{\infty} F_{\Delta}^*(T) dT,$$

и

(2б)

$$Q_{\Delta 3} = \eta_K E_0 \int_0^{t_3} [T/t_3 - F_{\Delta}(T)] dT, \quad W_{\Delta 3} = \eta_K E_0^2 \int_0^{t_3} [T/t_3 - F_{\Delta}(T)][T/t_3 + \eta_K F_{\Delta}(T)] dT,$$

$$U_{\Delta 3} = E_0 \int_0^{t_3} [T/t_3 + \eta_K F_{\Delta}(T)] dT,$$

здесь $F_{\Delta}^*(T) = (1 + T/t_3)F_{\Delta}(T + t_3) - (T/t_3)F_{\Delta}(T) - F(T)$, $F_{\Delta}(T)$ - ПХ ВП при данном импульсе тока;

В ЧАСТНОСТИ

$$Q_{\Delta_3} = Q_{\Delta_c} = U_{\Delta_3} = 0.5\eta_K E_o t_3 - \eta_K E_o \int_0^{t_3} F_{\Delta}(T) dT \text{ и } U_3 + U_c = 0.5(1 + \eta_K) E_o t_3;$$

треугольным импульсом тока длительностью t_3 с прямым углом в его начале:

$$I(T) = I_o(1 - T/t_3) \text{ (рис. 1,в),}$$

$$Q_{\nabla_c} = \eta_K E_o \int_0^{\infty} F^*_{\nabla}(T) dT, \quad W_{\nabla_c} = \eta_K^2 E_o^2 \int_0^{\infty} [F^*_{\nabla}(T)]^2 dT, \quad U_{\nabla_c} = \eta_K E_o \int_0^{\infty} F^*_{\nabla}(T) dT,$$

и

(2в)

$$Q_{\nabla_3} = \eta_K E_o \int_0^{t_3} [1 - T/t_3 - F_{\nabla}(T)] dT,$$

$$W_{\nabla_3} = \eta_K E_o^2 \int_0^{t_3} [1 - T/t_3 - F_{\nabla}(T)][1 - T/t_3 + \eta_K F_{\nabla}(T)] dT,$$

$$U_{\nabla_3} = E_o \int_0^{t_3} [1 - T/t_3 + \eta_K F_{\nabla}(T)] dT,$$

здесь $F^*_{\nabla}(T) = F(T + t_3) - (1 + T/t_3)F_{\Delta}(T + t_3) + (T/t_3)F_{\Delta}(T)$ и $F_{\nabla}(T) = F(T) - F_{\Delta}(T)$ - ПХ ВП при этом импульсе тока; в частности

$$Q_{\nabla_3} = Q_{\nabla_c} = U_{\nabla_3} = 0.5\eta_K E_o t_3 - \eta_K E_o \int_0^{t_3} F_{\nabla}(T) dT \text{ и } U_3 + U_c = 0.5(1 + \eta_K) E_o t_3;$$

заметим, что при графическом представлении параметры Q_3 и W_3 представляются двумя поверхностями - положительной и отрицательной частями;

однополярным ступенчатым импульсом: $I(T) = 0.5I_o$, при $0 \leq T \leq 0.5t_3$, и $I(T) = I_o$, при $0.5t_3 < T \leq t_3$ (рис. 1,г),

$$Q_c = \eta_K E_o \int_0^{\infty} F^*(T) dT, \quad W_c = \eta_K^2 E_o^2 \int_0^{\infty} [F^*(T)]^2 dT, \quad U_c = \eta_K E_o \int_0^{\infty} F^*(T) dT \quad (2г)$$

и

$$Q_3 = 0.5\eta_K E_o \left\{ \int_0^{0.5t_3} [1 - F(T)]dT + \int_{0.5t_3}^{t_3} [2 - F(T) - F(T - 0.5t_3)]dT \right\},$$

$$W_3 = 0.25\eta_K E_o^2 \left\{ \int_0^{0.5t_3} [1 - F(T)][1 + \eta_K F(T)]dT + \int_{0.5t_3}^{t_3} [2 - F(T) - F(T - 0.5t_3)][2 + \eta_K F(T) + \eta_K F(T - 0.5t_3)]dT \right\},$$

$$U_3 = 0.5E_o \left\{ \int_0^{0.5t_3} [1 + \eta_K F(T)]dT + \int_{0.5t_3}^{t_3} [2 + \eta_K F(T) + \eta_K F(T - 0.5t_3)]dT \right\},$$

здесь $F(T) = 0.5[F(T + t_3) + F(T - 0.5t_3)] - F(T)$; в частности

$$Q_3 = Q_c = U_3 = 0.75\eta_K E_o t_3 - \eta_K E_o \int_0^{0.5t_3} F(T)dT - 0.5\eta_K E_o \int_{0.5t_3}^{t_3} F(T)dT$$

$$\text{и } U_3 + U_c = 0.75(1 + \eta_K)E_o t_3;$$

двумя разнополярными импульсами: $I(T) = I_o$, при $0 \leq T \leq t_3$, и $I(T) = -I_o$, при $t_3 < T \leq 1.5t_3$ (рис. 1,д),

$$Q_c = \eta_K E_o \int_0^{\infty} F^*(T)dT, \quad W_c = \eta_K^2 E_o^2 \int_0^{\infty} [F^*(T)]dT, \quad U_c = \eta_K E_o \int_0^{\infty} F^*(T)dT$$

и

(2д)

$$Q_3 = \eta_K E_o \int_0^{t_3} [1 - F(T)]dT - \eta_K E_o \int_{t_3}^{1.5t_3} [1 + F(T) - 2F(T - t_3)]dT,$$

$$W_3 = \eta_K E_o^2 \left\{ \int_0^{t_3} [1 - F(T)][1 + \eta_K F(T)]dT + \int_{t_3}^{1.5t_3} [1 + F(T) - 2F(T - t_3)][1 - \eta_K F(T) + 2\eta_K F(T - t_3)]dT \right\},$$

$$U_3 = E_o \int_0^{t_3} [1 + \eta_K F(T)]dT - E_o \int_{t_3}^{1.5t_3} [1 - \eta_K F(T) + 2\eta_K F(T - t_3)]dT,$$

здесь $F^*(T) = F(T + 1.5t_3) - 2F(T + 0.5t_3) + F(T)$; и в частности

$$Q_3 = Q_c = U_3 = 0.5\eta_K E_o t_3 + \eta_K E_o \int_0^{t_3} F(T) dT - \eta_K E_o \int_{0.5t_3}^{1.5t_3} F(T) dT \text{ и } U_3 + U_c = 0.5(1 + \eta_K) E_o t_3;$$

при графическом представлении параметр W_3 определяется только "положительной" поверхностью, в отличие от которой Q_3 и U_3 - двумя: положительной и отрицательной частями, соответственно каждого импульса; Q_c и U_c также слагаются из положительной и отрицательной частей. Отметим, что этот временной режим измерений используется для непосредственной регистрации второй производной переходной характеристики ВП по десятичному логарифму времени [3].

В формулах (2а-2д) η_K - асимптотическое (при $t_3 \rightarrow \infty$) значение кажущейся поляризуемости, определяемой как отношение поля ВП к первичному (при $t_3 \rightarrow 0$) полю; $E_o = \rho_K I_o / K_r$ - напряженность первичного электрического поля; ρ_K - кажущееся удельное сопротивление; K - коэффициент установки; r - разнос приемной линии.

Таким образом, под отдачей вызванной поляризации по количеству электричества Ω_Q подразумевается отношение кажущегося количества электричества, полученного на спаде, к кажущемуся количеству электричества, затраченному при зарядке (пропускании тока). Аналогично по энергии Ω_W и напряжению Ω_U . Предлагаемые параметры отдачи ВП являются обобщенными амплитудно-временными характеристиками вызванной поляризации исследуемой поляризуемой геоэлектрической среды.

Значения интегральных амплитудно-временных параметров ВП

Импульс	T_o	Q_3	W_3	W_c	U_3	Ω_W	Ω_U
Прямоугольной формы (рис. 1,а)	1/16	0.272	1.000	0.0369	3.727	0.0368	0.0739
	1/4	0.445	1.568	0.0499	3.554	0.0318	0.1265
	1	0.626	2.100	0.0504	3.373	0.0240	0.1866
	4	0.788	2.525	0.0392	3.211	0.0155	0.2443
	16	0.907	2.803	0.0218	3.092	0.0077	0.2822
Треугольной формы (рис. 1,б)	1/16	0.166	0.382	0.0189	1.835	0.0494	0.0920
	1/4	0.255	0.571	0.0221	1.746	0.0388	0.1479
	1	0.342	0.741	0.0199	1.659	0.0269	0.2085
	4	0.417	0.870	0.0136	1.584	0.0156	0.2627
	16	0.466	0.949	0.0065	1.535	0.0068	0.2934
Треугольной формы (рис. 1,в)	1/16	0.106	0.369	0.0033	1.891	0.0089	0.0563
	1/4	0.190	0.556	0.0059	1.807	0.0107	0.1059
	1	0.283	0.727	0.0073	1.714	0.0100	0.1654
	4	0.371	0.861	0.0067	1.626	0.0078	0.2263
	16	0.440	0.944	0.0045	1.557	0.0047	0.2712

На рис. 2 в полулогарифмическом масштабе приведены зависимости интегральных амплитудно-временных параметров от длительности прямоугольного импульса тока (рис. 1,а) при логарифмической переходной характеристике и линейности процессов ВП [1] (при $\eta_K = 1/3$, $B = \sqrt{1000}$, t_3 в единицах T_o - абсциссы максимума производной ПХ ВП). В таблице представлены значения интегральных амплитудно-временных параметров Q_3 , W_3 , W_c , U_3 , (Q_3 , U_3 - в единицах

$B \cdot c/m$; W_3, W_c – в $B^2 \cdot c/m^2$) Ω_W, Ω_U ($\Omega_Q=1, Q_3 = Q_c = U_c$) для различных импульсов тока (рис. 1,а-в) при разных характеристиках среды T_0 (в единицах t_3).

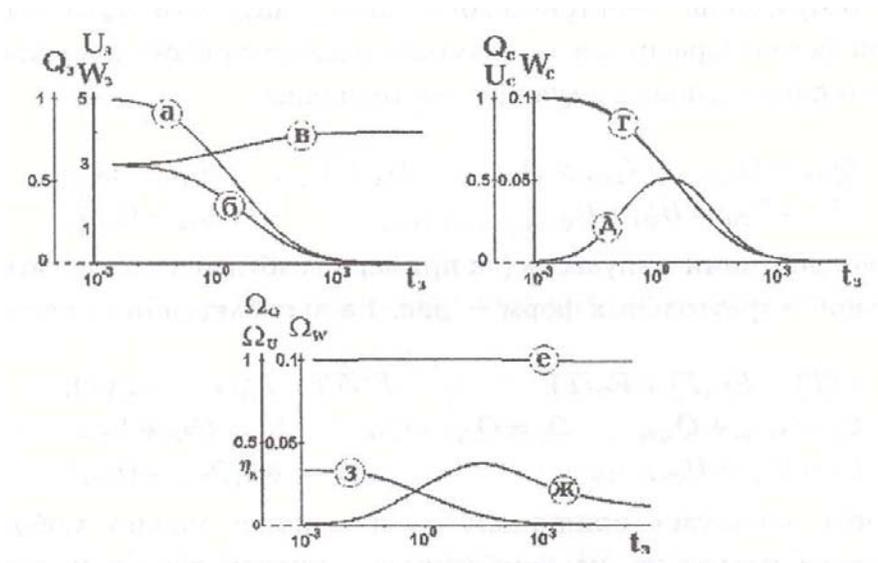


Рис. 2. Зависимости параметров Q_3 (а), W_3 (б), U_3 (в), Q_c (г), W_c (д), U_c (е) (нормированных по t_3) и Ω_Q (е), Ω_W (ж), Ω_U (з) от длительности прямоугольного импульса постоянного тока.

При вычислениях, с использованием известного подхода, применяемого при численном расчете определенного интеграла по формуле трапеций, получены приближенные выражения для расчета вышеприведенных интегралов при шаге (интервале) между последующими моментами времени (измерениями), возрастающими по геометрической прогрессии. В частности, со знаменателем прогрессии, равным двум, эти интегралы при зарядке (S_3) и на спаде (S_c) поля ВП вычислялись по приближенным выражениям:

$$S_3 = 1.3t_1 f(t_1) + 0.7 \sum_{i=2}^{n-1} t_i f(t_i) + 0.3t_n f(t_n), \quad (3)$$

$$S_c = 0.8t_1 f^*(t_1) + 0.7 \sum_{i=1}^n t_i f^*(t_i), \quad (4)$$

здесь n – количество замеров; f и f^* – подынтегральные функции при зарядке и на спаде, соответственно, определяемые по формулам (2а)-(2д). Результаты численных расчетов показали, что погрешность вычисления соответствующих интегралов во временном диапазоне $2^{-10}T_0 \leq T \leq 2^{20}T_0$ при $n = 1000$, по этим приближенным формулам для логарифмической зависимости ПХ ВП не превосходит 2%.

Резюмируя вышесказанное (с учетом линейности процессов ВП), можно заключить, что:

отдача ВП по количеству электричества (Ω_Q) равна 1 (100%) независимо от t_3 и формы импульса;

при возбуждении электрического поля импульсом тока различной треугольной формы (сравнивая зависимости и параметры ВП, представленные на рис. 1,б,в) справедливы следующие соотношения:

$$Q_{\Delta_c} > Q_{\nabla_c}, \quad Q_{\Delta_3} > Q_{\nabla_3}, \quad U_{\Delta_c} > U_{\nabla_c}, \quad U_{\Delta_3} > U_{\nabla_3},$$

$$U_{\Delta_3} + U_{\Delta_c} = U_{\nabla_3} + U_{\nabla_c}, \quad \Omega_{w\Delta} > \Omega_{w\nabla}.$$

при суперпозиции импульсов (на примере возбуждения поля импульсом прямоугольной и треугольных форм – рис. 1,а-в) соблюдаются соотношения:

$$F(T) = F_{\Delta}(T) + F_{\nabla}(T), \quad F^*(T) = F_{\Delta}^*(T) + F_{\nabla}^*(T),$$

$$Q_c = Q_{\Delta_c} + Q_{\nabla_c}, \quad Q_3 = Q_{\Delta_3} + Q_{\nabla_3}, \quad U_c = U_{\Delta_c} + U_{\nabla_c},$$

$$U_3 = U_{\Delta_3} + U_{\nabla_3}, \quad \Omega_U = 0.5(\Omega_{U_{\Delta}} + \Omega_{U_{\nabla}}).$$

Отметим, что, пользуясь принципом суперпозиции, можно любой набор импульсов тока разложить на комбинацию ступенек тока или разбить на трапеции, которые представляют собой сумму прямоугольника и треугольника, и по заданной переходной характеристике определить поведение вышеприведенных параметров линейной ВП [1].

Известно, что проявление ВП геоэлектрической среды обусловлено наложением различных по своей природе процессов [1], в связи с чем предлагаемый подход с целью получения обобщенных параметров наблюдаемых явлений, несомненно, представляет большой практический интерес. Кроме этого, использование рассмотренных интегральных амплитудно-временных параметров при выборе оптимального временного режима измерений (особенно при поисках и картировании сред с электропроводящими включениями) позволит в конечном итоге увеличить геологическую эффективность метода ВП.

Институт геологических наук НАН РА

Ա. Կ. Մաթևոսյան

**Հարուցված բևեռացման ինտեգրալ
ամպլիտուդաժամանակային չափանիշներ**

Հոդվածում առաջարկվում են հարուցված բևեռացման երևույթների ընդհանրացված բնութագրեր ինտեգրալ ամպլիտուդաժամանակային չափանիշներ, որոնք հիմնված են էլեկտրական դաշտի գրանցման (ինչպես հոսանքի բացթողման ժամանակ, այնպես և նրա անջատելուց հետո) վրա և բնութագրում են էլեկտրաքիմիական պրոցեսների հատույցն ըստ լիցքի քանակության, էներգիայի և լարումի:

Литература

1. *Комаров В.А.* Электроразведка методом вызванной поляризации. Л. Недра. 1980. 391 с.
2. *Шаповалов О.М., Черныш В.Ю., Кузьмичев В.В.* В кн.: Методы разведочной геофизики. Л. НПО "Геофизика". 1976. Вып. 26. С. 86-95.
3. *Матевосян А.К.* - Изв. АН АрмССР. Науки о Земле. 1987. Т. 40. № 1. С. 59-63.
4. *Телфорд В.М., Гелдарт Л.П., Шерифф Р.Е., Кейс Д.А.* Прикладная геофизика. М. Недра. 1980. 502 с.