



Company "KruKo" Ltd.  
Russia, Moscow



## **HARDWARE ELECTROPROSPECTING COMPLEX**

*AGE-xxl*

**Комплекс программ обработки и анализа**

**данных электроразведки.**

**(WLF – Wet Line Finding)**

*Версия 3-5.1*

### ***ПРИЛОЖЕНИЕ 1***

**«Алгоритмы трансформаций и формулы расчета  
электроразведочных параметров»**

<i>Обработка данных ЧЗ</i>	4
«Коррекция фазы» .....	4
«Расчет A (амплитуда) по Re, Im» .....	4
«Расчет F (фаза) по Re, Im».....	4
«Расчет каж. уд. сопротивления Ro_w1 по A» .....	4
«Расчет каж. уд. сопротивления Ro_w2 по A» .....	5
«Расчет эфф. уд. сопр. R <sub>w</sub> (по выбору: A, Re, Im)» .....	6
«Расчет R <sub>w</sub> и поляризации Eta для E <sub>x</sub> (по выбору: A, Re и Im)» .....	7
«Расчет параметров для (i*Im+Re)/(i*ImE-ReE)» .....	8
«Расчет Eta1 по R <sub>w</sub> и Re для E <sub>x</sub> ».....	8
«Расчет Eta2 по R <sub>w</sub> и Im для E <sub>x</sub> ».....	8
«Расчет Eta3 по R <sub>w</sub> и Re, Im для E <sub>x</sub> ».....	8
«Расчет Ph_P (2-частотный фазовый параметр) по Re, Im» .....	9
«Расчет Ph_P (2-частотный фазовый параметр) по F» .....	9
«Расчет Ph_P3 (3-частотный фазовый параметр) по Re, Im» .....	9
«Расчет Ph_P135 (3-частотный фазовый параметр) по Re, Im» .....	9
«Пересчет параметра по формуле расчета ф.п.» .....	10
«Расчет P_Amp (ампл. поляризационный параметр) по A» .....	10
«Расчет PFE (процентный эффект частоты) по A» .....	10
«Расчет MCF (металл-фактор) по Ro» .....	11
«Расчет DPh_P (2-част. разностный фазовый параметр)» .....	11
«Расчет DPh_P3 (3-част. разностный фазовый параметр)» .....	11
«Расчет Hf, Sf и Rf (по Ro)».....	11
«Расчет Hw (по Ro)» .....	12
«Пересчет Ht (H_t) в Hw».....	12
«Пересчитать Hw с учетом альтитуды».....	12
«Расчет Sw по Ro и Hw» .....	12
«Расчет интерпрет.сопротивления Ri_w по Sw и R <sub>w</sub> » .....	12
«Пересчет параметра на равномерную сетку H» .....	12
«Расчет Hw (по R(H))» .....	13
«Расчет Hw (по Eta(H))» .....	13
«Расчет Am_P (амплитудный параметр) по A».....	13
«Расчет Df_P (дифференциальный параметр) по A».....	13
«Поворот осей (пересчет Re, Im для E <sub>x</sub> , E <sub>y</sub> )» .....	14
«Расчет модуля вектора параметра по E <sub>x</sub> , E <sub>y</sub> ».....	14
«Расчет комплексного модуля полного вектора поля E <sub>xy</sub> по E <sub>x</sub> , E <sub>y</sub> » .....	14
«Расчет Z (импеданс)» .....	14
«Расчет E <sub>s</sub> по Re,Im» .....	14
«Расчет приведенного расстояния Lpr по Ro» .....	14
«Сформировать параметр T».....	15
<i>Обработка данных ЗС</i>	16
«Расчет каж.уд.сопротивления Ro_t1 по E <sub>s</sub> » .....	16
«Расчет каж.уд.сопротивления Ro_t2 по E <sub>s</sub> » .....	17
«Расчет каж.уд.сопротивления Ro_t3 по E <sub>s</sub> » .....	17
«Расчет каж.уд.сопротивления Ro_k1 по Epr» .....	18
«Расчет каж.уд.сопротивления Ro_k2 по Epr» .....	18
«Расчет эфф.уд.сопротивления Ro_t по E <sub>s</sub> » .....	18
«Расчет эфф.уд.сопр. Ro_t и поляризации Eta1 по E <sub>s</sub> ».....	19
«Расчет кажущейся поляризации E_vr».....	20
«Расчет ДНП в паузе» .....	20
«Расчет ДНП на пропускании».....	21
«Расчет Hf, Sf и Rf (по Ro)».....	21
«Расчет H_t (по Ro)».....	21

«Расчет $H_t$ (по $R(H)$ )» .....	22
«Расчет $H_t$ по $St$ , связь Н-Т по каротажу» .....	22
«Расчет $H_t$ по $St$ , связь Sh- $St$ по каротажу» .....	22
«Пересчет $H_w$ в $H_t$ » .....	22
«Расчет интерпрет.сопротивления $Ri_t$ по $St$ и $Rt$ » .....	22
«Пересчет $Rt$ по $St$ и $H_t$ » .....	22
«Пересчитать $H(t)$ с учетом альтитуды» .....	23
«Расчет $St$ по $Ro$ и $H_t$ » .....	23
«Пересчет параметра на равномерную сетку $H$ (по $H_t$ )» .....	23
«Пересчет параметра на равномерную сетку $H$ (по $H_t$ )» .....	23
«Расчет $R_t$ и $H_t$ по $Ro$ (по Барсукову)» .....	23
«Расчет $Rt$ , $St$ и $H_t$ по $Es$ Q-q (рудн.)» .....	24
«Замена $Es$ асимптотой БЗ» .....	24
«Дифф. трансформация ЗСБ (расчет $St$ , $H_t$ , $Rt$ )» .....	24
«Исправить $Es$ (для трансф. ЗС КГУ)» .....	24
«Трансформация ЗС КГУ (расчет $St$ , $Rt$ , $H_t$ )» .....	25
«Трансформация ЗС КГУ ( $Q=4AB$ )» .....	25
«Подобрать модель $R(H)$ по $Es$ » .....	25
«Учет уровня "0" для $Es$ » .....	25
«Устранение отрицательных значений $Es$ » .....	25
«Расчет $f_t$ по $Es$ для АВ-q» .....	25
«Расчет потенциала EP по $EpZS$ » .....	26
«Расчет дифференциальных параметров по $Es$ » .....	26
«Расчет $Re$ и $Im$ по $Es$ » .....	26
«Расчет спектра $Es$ », «Расчет $Es$ по спектру» .....	26
«Поворот осей (пересчет $Es$ для $Ex$ , $Ey$ )» .....	26
«Расчет приведенного расстояния $Lpr$ по $Ro$ » .....	26
«Сформировать параметр $t$ » .....	27
<i>Процедуры преобразования параметров модели</i> .....	
«Пересчитать $Sh$ в $Ri$ (выделить слои)» .....	28
«Расчет сумм.проводимости $SM$ по $R$ ( $SM_i$ by $R_i$ )» .....	28
«Расчет уд.электропроводности $Gh$ по $Sh$ » .....	28
«Сформировать параметр $R(H)$ из модели» .....	28
«Пересчитать $H$ для $R$ с учетом альтитуды» .....	28
«Пересчет параметра $R$ ( $R_i$ ) в $R_h$ (на равномерную сетку $H$ )» .....	28

## Обработка данных ЧЗ

---

### «Коррекция фазы»

Выполняет корректировку фазы при неверной полярности подключения MN – анализирует для различных компонент фазу по низкой частоте и в случае несоответствия меняет знак параметров Re, Im.

После корректировки необходимо заново рассчитать фазу по исправленным параметрам Re, Im.

---

### «Расчет A (амплитуда) по Re, Im»

Выполняет расчет амплитуды по параметрам Re, Im.

$$A = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad [ \text{abs}( \text{Re} + i * \text{Im} ) ]$$


---

### «Расчет F (фаза) по Re, Im»

Выполняет расчет фазы по параметрам Re, Im.

$$F = \arctg(\text{Im}/\text{Re}) \quad [ \text{unwrap}( \text{angle}( \text{Re} + i * \text{Im} ) ) ]$$


---

### «Расчет каж. уд. сопротивления Ro\_w1 по A»

Расчет кажущегося удельного сопротивления для режима ЧЗ по параметру A производится по формуле  $\text{Ro}_w = |K| * A$ , где K – геометрический коэффициент.

- для наземного АВ (установка АВ-MN, компоненты Ex, Ey):

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

AM, BM, AN, BN – расстояния между точками электродов питающих и приемных линий A, B, M, N.

- для наземного АВ (установка АВ-q, компонента Vz):

$$K = \frac{2\pi}{\frac{2BD}{y^3 r_2^3} + \frac{AD}{y^3 r_1^3} + \frac{BD}{y r_2^3} + \frac{AD}{y r_1^3}}$$

$r_1, r_2$  – расстояния между точками электродов питающей линии A, B и центром приемной петли;

AD, BD – расстояние по X между точками A, B и центром приемной петли в системе диполя;

y – расстояние по Y от центра приемной петли до линии АВ в системе диполя.

- для скважинного АВ (установка АВ-MN, компонента Er):

$$K = \frac{2\pi \cdot l^2}{\frac{r}{(r^2 + d^2)^{3/2}} - \frac{r}{(r^2 + 1)^{3/2}}}, \text{ где}$$

$E_r$  – нормальное электрическое поле вертикального кабеля на постоянном токе для полупространства ( $E_r = A$ );

$I$  – сила тока в питающей линии;

$\sigma = 1/\rho$  – удельная проводимость среды;

$l$  – глубина до нижнего заземления;

$d, r$  – глубина до верхнего заземления и разнос (расстояние от скважины до центра MN), выраженные в долях  $l$ .

*Кормильцев В.В., Семенов В.Д. Электроразведка методом заряда. – М.: Недра, 1987., стр.19*

### «Расчет каж. уд. сопротивления $R_{o\_w2}$ по А»

Расчет кажущегося удельного сопротивления для режима ЧЗ по параметру А производится по формулам:

- для скважинного АВ (установка АВ-MN, компонента  $E_r$ ):

$$R_{o\_w} = K \cdot A, \text{ где } K = \frac{2\pi \gamma^2}{(1 + r^3/R^3)} - \text{геометрический коэффициент}$$

$r$  – расстояние от наземного электрода В до центра MN;

$R$  – расстояние от заглубленного электрода А до центра MN.

- для наземного АВ (установка АВ-MN, компоненты  $E_x, E_y$  для длинной линии):

$$R_{o\_w} = A / P_{k_{E_x}}^L,$$

$$P_{k_{E_x}}^L_{д.з.} = \frac{1}{2\pi} \left[ (0.5AB - x) \left( \frac{1}{y^2 R_2} + \frac{1}{R_2^3} \right) + (0.5AB + x) \left( \frac{1}{y^2 R_1} + \frac{1}{R_1^3} \right) \right];$$

$$R_2 = \sqrt{(AB/2 - x)^2 + y^2}, \quad R_1 = \sqrt{(AB/2 + x)^2 + y^2}$$

$x, y$  – координаты точки измерения (начало координат в центре диполя, ось  $x$  вдоль диполя);

$AB$  – длина питающей линии.

- для наземного АВ (установка АВ- $q$ , компонента  $V_z = dHz/dt$  для длинной линии):

$$R_{o\_w} = A / P_{k_{V_z}}^L,$$

$$P_{k_{V_z}}^L = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot y} \left[ (0.5AB - x) \left( \frac{2}{y^2 R_2} + \frac{1}{R_2^3} \right) + (0.5AB + x) \left( \frac{2}{y^2 R_1} + \frac{1}{R_1^3} \right) \right];$$

$x, y$  – координаты точки измерения (начало координат в центре диполя, ось  $x$  вдоль диполя);

AB – длина питающей линии.

Расчет кажущегося удельного сопротивления для режима ЧЗ по параметру A компоненты Z (импеданс) производится по формуле:

$$Ro_w = A^2 / (\omega * \mu_0), \text{ где}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума;}$$

$\omega$  – круговая частота.

### «Расчет эфф. уд. сопр. R<sub>w</sub> (по выбору: A, Re, Im)»

Расчет эффективного удельного сопротивления для режима ЧЗ с источником поля в виде наземного АВ осуществляется путем решения «полного» уравнения относительно r. Эффективное удельное сопротивление по значению и размерности равно удельному сопротивлению однородного изотропного полупространства независимо от характера источника поля, типа и размеров установки.

Уравнения для различных составляющих электромагнитного поля источника в виде заземленного прямолинейного кабеля конечной длины имеют вид:

$$E_{x0} = -\frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{l+x}{r_1^3} + \frac{l-x}{r_2^3} + \int_{-l}^l \frac{1 - (1+k_1 r) e^{-k_1 r}}{r^3} d\zeta \right\},$$

$$E_{y0} = \frac{I\rho y}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right\},$$

$$H_z = \frac{2Iy}{k_1^2} \int_{-l}^l \frac{3 - (3 + 3k_1 r + k_1^2 r^2) e^{-k_1 r}}{r^5} d\zeta,$$

поскольку  $B_z = \mu H_z$  и  $k_1 = \sqrt{-i\omega\mu_0 / \rho}$  по теореме о спектре производной имеем уравнение для  $dB_z/dt$ :

$$dB_z = 2Iy\rho \int_{-l}^l \frac{3 - (3 + 3k_1 r + k_1^2 r^2) e^{-k_1 r}}{r^5} d\zeta.$$

Во всех формулах:

$I$  – сила тока в питающей линии;

$\rho$  – удельное сопротивление среды;

$l$  – половина длины питающей линии;

$x, y$  – координаты точки измерения в системе источника (начало координат в центре источника, ось  $x$  вдоль линии источника);

$\zeta$  – текущая координата на кабеле;

$$r = \sqrt{(\zeta - x)^2 + y^2}; \quad r_1 = \sqrt{(l + x)^2 + y^2}; \quad r_2 = \sqrt{(l - x)^2 + y^2}$$

$k_1 = \sqrt{-i\omega\mu_0 / \rho}$  – волновое число проводящего полупространства в случае немагнитного полупространства и низкочастотного электромагнитного поля, когда можно пренебречь влиянием токов смещения, т.е. диэлектрической проницаемостью среды;

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума;}$$

$\omega$  – круговая частота.

Уравнение для первичного электрического поля источника в виде заземленного вертикального кабеля конечной длины имеет вид (установка АВ-MN, компонента E<sub>r</sub>):

$$E_r = \frac{I}{4\pi\sigma l^2} e_r,$$

$$e_r = -\frac{r}{R_1^3} \left(1 + \sqrt{jp} R_1\right) e^{-\sqrt{jp} R_1} - \frac{r}{R_2^3} \left(1 + \sqrt{jp} R_2\right) e^{-\sqrt{jp} R_2} + \frac{r}{R_3^3} \left(1 + \sqrt{jp} R_3\right) e^{-\sqrt{jp} R_3} +$$

$$+ \frac{r}{R_4^3} \left(1 + \sqrt{jp} R_4\right) e^{-\sqrt{jp} R_4},$$

$$R_1^2 = r^2 + (z-d)^2, R_2^2 = r^2 + (z+d)^2, R_3^2 = r^2 + (z-1)^2, R_4^2 = r^2 + (z+1)^2, p = \omega\mu\sigma l^2, \text{ где}$$

$\sigma = 1/\rho$  – удельная проводимость среды;

$\mu = 4\pi 10^{-7}$  (Гн/м) – магнитная постоянная;

$\omega$  – круговая частота;

$l$  – глубина до нижнего заземления;

$z=0$  для измерений на земной поверхности;

$d, r$  – глубина до верхнего заземления и разнос (расстояние от скважины до центра MN), выраженные в долях  $l$ .

*Кормильцев В.В., Семенов В.Д. Электроразведка методом заряда. – М.: Недра, 1987., стр.30*

Любое из данных уравнений решается относительно  $\rho$  численным методом с помощью функции **MATLAB** «fsolve» (процедура решения системы уравнений) отдельно для каждой частоты из всего набора частот, причем в зависимости от участвующего в расчетах параметра базы (A, Re или Im) оно принимает вид:

$\text{abs}(E_{x\omega}) = A$  или

$\text{real}(E_{x\omega}) = \text{Re}$  или

$\text{imag}(E_{x\omega}) = \text{Im}$

где A, Re, Im – реальные измеренные значения параметров.

Результатом решения уравнения являются значение эффективного удельного сопротивления  $R_w$  и ошибка решения уравнения  $\text{Err}_{R_w}$ . Дополнительно по полученному значению  $R_w$  с помощью уравнения для выбранной компоненты рассчитываются «расчетные» значения параметров базы: ReE, ImE, AE, FE, Ph\_PE Ph\_PE135.

### «Расчет $R_w$ и поляризации $\eta$ для $E_x$ (по выбору: A, Re и Im)»

Расчет эффективного удельного сопротивления и поляризуемости для компоненты  $E_x$  режима ЧЗ с источником поля в виде наземного АВ осуществляется аналогично предыдущей процедуре для компоненты  $E_x$ , однако сопротивление и поляризация представлены в рамках классической модели Cola-Cola, описывающей частотную дисперсию сопротивления среды в виде:

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left( 1 + \frac{\eta}{1 - \eta + (-i\omega\tau)^c} \right), \text{ где}$$

$\rho_0$  – активное сопротивление;

$\eta$  – интенсивность поляризации,  $0 \leq \eta \leq 1$ ;

$\tau$  – постоянная времени процесса поляризации (принята по умолчанию за 1);

$c$  – логарифмическая скорость релаксации (принята по умолчанию за 0.5).

Уравнение решается относительно переменных  $\rho$ ,  $\eta$  численным методом с помощью функции **MATLAB** «fsolve» отдельно для каждой частоты из всего набора частот.

Результатом решения уравнения являются значение эффективного удельного сопротивления  $R_w$ , эффективной поляризации  $E_{\eta}$  и ошибка решения уравнения  $E_{ps\_Rw}$ . Дополнительно по полученным значениям  $R_w$ ,  $E_{\eta}$  с помощью уравнения для  $E_{x\omega}$  рассчитываются «расчетные» значения параметров базы:  $ReE$ ,  $ImE$ ,  $AE$ ,  $FE$ ,  $Ph\_PE$ ,  $Ph\_PE135$ .

#### «Расчет параметров для $(i*Im+Re)/(i*ImE-ReE)$ »

Осуществляет расчет отношения «реального» поля  $E_{x1}=i*Im+Re$  к «расчетному»  $E_{x2}=i*ImE-ReE$  (деление комплексных чисел), затем рассчитываются значения соответствующих параметров нового «поля»:  $Re$ ,  $Im$ ,  $A$ ,  $F$ ,  $Ph\_P$ ,  $Ph\_P135$ . Результирующие параметры записываются в компоненту  $AnEx$ .

#### «Расчет $E_{\eta 1}$ по $R_w$ и $Re$ для $E_x$ »

Осуществляет расчет эффективной поляризуемости для режима ЧЗ по параметрам  $R_w$  и  $Re$  компоненты  $E_x$  с источником поля в виде наземного АВ. Сопротивление и поляризация представлены в рамках классической модели Cola-Cola, описывающей частотную дисперсию сопротивления среды в виде:

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left( 1 + \frac{\eta}{1 - \eta + (-i\omega\tau)^c} \right), \text{ где}$$

$\rho_0$  – активное сопротивление;

$\eta$  – интенсивность поляризации,  $0 \leq \eta \leq 1$ ;

$\tau$  – постоянная времени процесса поляризации;

$c$  – логарифмическая скорость релаксации (принята за 0.5).

Отличие этой процедуры от процедуры «**Calculate  $R_w$  and  $E_{\eta}$  for  $E_x$  (by:  $A$ ,  $Re$  &  $Im$ )**»

заключается в том, что в качестве активного сопротивления среды  $\rho$  здесь используются ранее рассчитанные значения  $R_w$ . Уравнение  $\text{real}(E_{x\omega})=Re$  решается относительно переменной  $\eta$  численным методом с помощью функции **MATLAB** «fsolve» отдельно для каждой частоты из всего набора частот.

#### «Расчет $E_{\eta 2}$ по $R_w$ и $Im$ для $E_x$ »

Осуществляет расчет эффективной поляризации для режима ЧЗ по параметрам  $R_w$  и  $Re$  компоненты  $E_x$  с источником поля в виде наземного АВ аналогично предыдущей процедуре. Уравнение  $\text{imag}(E_{x\omega})=Im$  решается относительно переменной  $\eta$  численным методом с помощью функции **MATLAB** «fsolve» отдельно для каждой частоты из всего набора частот.

#### «Расчет $E_{\eta 3}$ по $R_w$ и $Re$ , $Im$ для $E_x$ »

Осуществляет расчет эффективной поляризации для режима ЧЗ по параметрам  $R_w$  и совместно  $Re$  и  $Im$  компоненты  $E_x$  с источником поля в виде наземного АВ аналогично предыдущей процедуре. Система уравнений  $\text{real}(E_{x\omega})=Re$ ,  $\text{imag}(E_{x\omega})=Im$  решается



относительно переменной  $\eta$  численным методом с помощью функции **MATLAB** «fsolve» отдельно для каждой частоты из всего набора частот.

#### «Расчет Ph\_P (2-частотный фазовый параметр) по Re, Im»

Выполняет расчет двухчастотного фазового параметра по параметрам Re, Im (по 1 и 3-й гармоникам частот свип-сигнала) – сначала рассчитывается фаза F по параметрам Re, Im и затем параметр Ph\_P.

$$\text{Ph}_P = \frac{F_1\omega_3 - F_3\omega_1}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{3F_1 - F_3}{2}$$

$\omega_1 < \omega_3$  – частоты 1 и 3 гармоник одной из набора частот свип-сигнала;  
 $F_1, F_3$  – соответствующие им значения фазы.

#### «Расчет Ph\_P (2-частотный фазовый параметр) по F»

Выполняет расчет двухчастотного фазового параметра по фазе F (по 1 и 3-й гармоникам частот свип-сигнала).

$$\text{Ph}_P = \frac{F_1\omega_3 - F_3\omega_1}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{3F_1 - F_3}{2}$$

$\omega_1 < \omega_3$  – частоты 1 и 3 гармоник одной из набора частот свип-сигнала;  
 $F_1, F_3$  – соответствующие им значения фазы.

#### «Расчет Ph\_P3 (3-частотный фазовый параметр) по Re, Im»

Выполняет расчет трехчастотного фазового параметра по параметрам Re, Im по трем смежным частотам из всего набора частот – сначала рассчитывается фаза F по параметрам Re, Im и затем параметр Ph\_P3.

$$\text{Ph}_{P3} = \Delta D / D$$

$$D = \begin{vmatrix} 1 & \omega_1 & \omega_1^{3/2} \\ 1 & \omega_2 & \omega_2^{3/2} \\ 1 & \omega_3 & \omega_3^{3/2} \end{vmatrix}; \Delta D = \begin{vmatrix} F_1 & \omega_1 & \omega_1^{3/2} \\ F_2 & \omega_2 & \omega_2^{3/2} \\ F_3 & \omega_3 & \omega_3^{3/2} \end{vmatrix};$$

$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$  – соседние частоты;  
 $F_1, F_2, F_3$  – соответствующие им значения фазы.

#### «Расчет Ph\_P135 (3-частотный фазовый параметр) по Re, Im»

Выполняет расчет трехчастотного фазового параметра по параметрам Re, Im по 1, 3 и 5 гармоникам частот свип-сигнала – сначала рассчитывается фаза F по параметрам Re, Im и затем параметр Ph\_P135.

$$\text{Ph}_{P3} = \Delta D / D$$

$$D = \begin{vmatrix} 1 & \omega_1 & \omega_1^{3/2} \\ 1 & \omega_2 & \omega_2^{3/2} \\ 1 & \omega_3 & \omega_3^{3/2} \end{vmatrix}; \Delta D = \begin{vmatrix} F_1 & \omega_1 & \omega_1^{3/2} \\ F_2 & \omega_2 & \omega_2^{3/2} \\ F_3 & \omega_3 & \omega_3^{3/2} \end{vmatrix};$$

$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$  – частоты 1, 3 и 5 гармоник одной из набора частот свип-сигнала;  
 $F_1, F_2, F_3$  – соответствующие им значения фазы.

---

#### «Пересчет параметра по формуле расчета ф.п.»

Для выбранного параметра применяется алгоритм расчета трехчастотного фазового параметра по фазе по трем смежным частотам из всего набора частот. Результат записывается на прежнее место.

$$F = \Delta D / D$$

$$D = \begin{vmatrix} 1 & \omega_1 & \omega_1^{3/2} \\ 1 & \omega_2 & \omega_2^{3/2} \\ 1 & \omega_3 & \omega_3^{3/2} \end{vmatrix}; \Delta D = \begin{vmatrix} F_1 & \omega_1 & \omega_1^{3/2} \\ F_2 & \omega_2 & \omega_2^{3/2} \\ F_3 & \omega_3 & \omega_3^{3/2} \end{vmatrix};$$

$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$  – соседние частоты;  
 $F_1, F_2, F_3$  – соответствующие им значения параметра.

---

#### «Расчет P\_Amp (ампл. поляризационный параметр) по A»

Выполняет расчет кажущейся поляризации по параметру A. Рассчитывается для двух выбранных значений периодов (т.е. двух частот) по формуле:

$$P\_Amp = \frac{A_L - A_H}{A_L} \cdot 100\%$$

$A_L, A_H$  – значения амплитуды при измерениях на низкой и высокой частоте соответственно.

---

#### «Расчет PFE (процентный эффект частоты) по A»

Выполняет расчет процентного эффекта частоты по параметру A. Рассчитывается для двух выбранных значений периодов (т.е. двух частот) по формуле:

$$PFE = \frac{A_L - A_H}{A_L} \cdot \frac{1}{\lg(T_L/T_H)} \cdot 100\%$$

$A_L, A_H$  – значения амплитуды при измерениях на низкой и высокой частоте соответственно.

$T_L, T_H$  – соответствующие значения периода.

### «Расчет MCF (металл-фактор) по Ro»

Выполняет расчет металл-фактора по выбранному параметру Ro (это может быть один из параметров: Rw, Ro\_w1, Ro\_w2). Рассчитывается для двух выбранных значений периодов (т.е. двух частот) по формуле:

$$MCF = \frac{Ro_L - Ro_H}{Ro_L \cdot Ro_H} \cdot 6\pi \cdot 10^4$$

Ro<sub>L</sub>, Ro<sub>H</sub> – значения удельного сопротивления при измерениях на низкой и высокой частоте соответственно.

### «Расчет DPh\_P (2-част. разностный фазовый параметр)»

Выполняет расчет «разностного» фазового параметра по параметру Ph\_P (для двух скважинных АВ). Рассчитывается для основных гармоник по формуле:

$$DPh\_P = P_2 - P_1$$

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> – значения фазового параметра при измерениях от двух разных АВ (короткого и длинного соответственно).

### «Расчет DPh\_P3 (3-част. разностный фазовый параметр)»

Выполняет расчет «разностного» (по двум скважинным АВ) фазового параметра по параметру Ph\_P3 (аналогично DPh\_P).

### «Расчет Hf, Sf и Rf (по Ro)»

Работает по выбранному параметру Ro. Расчет обобщенных параметров разреза (глубина залегания опорного горизонта Hf, суммарная продольная проводимость разреза Sf и среднее сопротивление опорной толщи Rf) по минимуму кривых Ro(T) (это может быть один из параметров: Rw, Ro\_w1, Ro\_w2).

Рассчитываются по формулам:

$$Sf = 535 \sqrt{\frac{T_{\min}}{\rho_{\min}}}; \quad Rf = K \cdot \rho_{\min}; \quad Hf = Sf \cdot Rf$$

где T<sub>min</sub> – период, на котором достигается минимум; ρ<sub>min</sub> – величина этого минимума.

Перед запуском расчета запрашивается значение коэффициента K (по умолчанию K=1).

### «Расчет Нw (по Ro)»

Работает по выбранному параметру Ro. Выполняет расчет зависимости глубины от периода Нw(T) по функции Ro(T) (это может быть один из параметров: Rw, Ro\_w1, Ro\_w2).

Рассчитывается по формуле:

$$H_w = K \cdot \sqrt{\rho \cdot T}, \text{ по умолчанию } K = \frac{\sqrt{10^7}}{2\pi} \approx 503.29.$$

Перед запуском расчета значение коэффициента К может быть изменено оператором.

*Матвеев Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. Учебник для вузов. М., Недра, 1982, стр.293.*

### «Пересчет Нt (Н\_t) в Нw»

Выполняет пересчет зависимости эффективной глубины от времени Нt или Н\_t (ЗС) в зависимость эффективной глубины от периода Нw (ЧЗ) с использованием формулы  $T=2\pi \cdot t$  и пересчетом на сетку периодов ЧЗ.

### «Пересчитать Нw с учетом альтитуды»

Выполняет учет альтитуды точек профиля для параметра Нw.

Нw – эффективная глубина, может быть получена с использованием вышеприведенной процедуры расчета Нw по Ro. Значения альтитуды точек профилей должны присутствовать в топоданных по площади

Пользователю необходимо следить за тем, чтобы над одним и тем же объектом данных эта процедура проводилась однократно.

### «Расчет Sw по Ro и Нw»

Выполняет расчет суммарной продольной проводимости Sw по формуле  $Sw=Hw/Ro$ .

### «Расчет интерпрет.сопротивления Ri\_w по Sw и Rw»

Расчет интерпретационного сопротивления по формуле

$$Ri_w = \frac{Sw \cdot \frac{\partial Rw}{\partial T} + Rw \cdot \frac{\partial Sw}{\partial T}}{\frac{\partial Sw}{\partial T}}$$

### «Пересчет параметра на равномерную сетку Н»

Работает по выбранному параметру из списка Rw, Ro\_w1, Ro\_w2, Ri\_w, Sw. Рассчитывает параметр Rh, Rh1, Rh2, Ri\_h, Sh соответственно. Для выполнения процедуры необходимо наличие в базе параметра Нw.

Процедура пытается по исходной  $H_w$  построить монотонную функцию  $H(T)$  и затем интерполирует соответствующие значения параметра на новую равномерную сетку глубин.

#### «Расчет $H_w$ (по $R(H)$ )»

Построение зависимости  $H(T)$  для заданной модели среды. Эта процедура позволяет, используя возможность расчета прямой задачи для горизонтально-слоистой среды, получить функцию «эффективной» глубины – глубины проявления контрастного проводящего пласта. Для этого «сквозь» заданную модель среды «прогоняется» тонкий проводящий пласт и анализируется изменение параметра  $A(T)$ . Интервал глубин и дискретность для «прогона» задается в диалоге. Для каждого положения проводящей плоскости (то есть – глубины) определяется одно значение частоты (периода), на которой изменение  $A(T)$  максимально. Определенная таким образом «эффективная» *глубина не является количественно достоверной*, однако позволяет для всего профиля получить *достоверные качественные оценки изменения глубин* залегания проводящих пластов.

WLF позволяет также получить аналогичную зависимость для контрастного изолятора – непроводящего тонкого пласта, что может быть использовано при анализе данных на месторождениях углеводородов.

#### «Расчет $H_w$ (по $E_t(H)$ )»

Аналогичная процедура позволяет построить зависимость  $H(T)$  – определить «эффективные» глубины проявления контрастного по поляризуемости пласта.

#### «Расчет $Am\_P$ (амплитудный параметр) по $A$ »

Выполняет расчет амплитудного параметра для наземно-скважинных измерений по параметру  $A$ . Рассчитывается для полной сетки периодов по формуле:

$$Am\_P = \frac{A_2}{L_2} \bigg/ \frac{A_1}{L_1}$$

$A_1, A_2$  – амплитудные значения при измерениях от двух разных АВ (короткого и длинного соответственно);

$L_1, L_2$  – длины АВ.

#### «Расчет $Df\_P$ (дифференциальный параметр) по $A$ »

Выполняет расчет «дифференциального» параметра метода ДНМЭ по параметру  $A$ . Применяется при измерениях  $E_x$  ( $E_r$ ) по «сплошному» профилю, позволяет оценить изменение пространственной производной по профилю без учета величины тока при измерениях. Рассчитывается для полной сетки периодов по формуле:

$$Df\_P_i = \frac{A_{i+1} - A_i}{A_{i+1} + A_i}$$

$A_i, A_{i+1}$  – амплитудные значения при измерениях для двух соседних точек профиля.

Нужно отметить, что при выполнении измерений тока и выполненной нормировке на ток в WLF более информативно изучение производных любого порядка без расчета этого параметра.

---

### «Поворот осей (пересчет Re, Im для Ex, Ey)»

Процедура может применяться, если в базе присутствуют параметры Re, Im обеих компонент электрического поля Ex, Ey. Поворот координатных осей осуществляется процедурой на заданный угол, определяемый предварительно на основании файла координат или по кнопке «Работа с картами» WLF. Результат помещается в исходные данные Ex, Ey - (Re, Im).

Эта возможность WLF позволяет проектировать работы с «векторной» съемкой электрического поля по прямоугольной сетке профилей так, что вдоль любых прямолинейных участков профиля измеряются компоненты Ex и Ey – параллельно и перпендикулярно линии профиля, что облегчает выполнение топоработ.

---

### «Расчет модуля вектора параметра по Ex, Ey»

Процедура применима для любого параметра, если в базе присутствуют обе компоненты электрического поля Ex, Ey со значениями этого параметра. Осуществляет расчет модуля выбранного параметра (скалярная величина) по двум его проекциям (Ex, Ey). Результат помещается в компоненту Exy того же параметра.

---

### «Расчет комплексного модуля полного вектора поля Exy по Ex, Ey»

Процедура применима, если в базе присутствуют параметры Re, Im обеих компонент электрического поля Ex, Ey. Осуществляет расчет Re, Im полного вектора поля по двум проекциям (Ex, Ey). Результат помещается в компоненту Exy.

---

### «Расчет Z (импеданс)»

Выполняет расчет Re, Im компоненты Z (импеданс) по параметрам Re, Im компонент Ex и Ny (точнее dBy/dt).

$$\tilde{N}_y = N_y / i / \omega / \mu; \quad Z = \frac{\text{Re}E_x + i \cdot \text{Im}E_x}{\text{Re}\tilde{N}_y + i \cdot \text{Im}\tilde{N}_y}, \quad \text{Re}Z = \text{real}(Z), \quad \text{Im}Z = \text{imag}(Z), \quad \text{где}$$

$\mu = 4\pi 10^{-7}$  (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума;  
 $\omega$  – круговая частота.

---

### «Расчет Es по Re, Im»

Расчет сигнала становления Es по значениям Re, Im.

---

### «Расчет приведенного расстояния Lpr по Ro»

Процедура выполняет расчет параметра  $L_{pr} = |kr|$ , называемого приведенным расстоянием (или параметром поля). Здесь r – максимальное из двух величин: полудлины АВ и разноса Y (наименьшее расстояние от приемника до источника),  $k = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho}$  – волновое число полупространства,  $\omega = 2\pi/T$  – круговая частота поля (T – период, с),  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума,  $\rho$  – сопротивление полупространства (при вычислениях берутся значения выбранного параметра Ro (Rw, Ro\_w1 или Ro\_w2)).

### **«Сформировать параметр T»**

В результате процедуры в базе формируется новый параметр T(T) – в качестве значений этой функции используются значения аргумента (периоды). Этот параметр можно использовать для параметрического вывода обратных функций T(F).

---

## Обработка данных ЗС

### «Расчет каж.уд.сопротивления $Ro\_t1$ по $Es$ »

Расчет кажущегося удельного сопротивления для режима ЗС по параметру  $Es$  (мкВ/А/м) производится по формулам:

- для скважинного АВ (установка АВ-MN, компонента  $E_r$ ):

$Ro\_t = K \cdot |Es| \cdot 1e-6$ , где  $K$  – геометрический коэффициент

$$K = \frac{2\pi r^2}{(1 + r^3/R^3)}$$

$r$  – расстояние от наземного электрода В до центра MN;

$R$  – расстояние от заглубленного электрода А до центра MN.

- для наземного АВ (установка АВ-MN, компонента  $E_x$ , дальняя зона):

$$Ro\_t = \frac{2\pi r^3}{AB \cdot (3\cos^2\theta - 2)} \cdot |Es| \cdot 10^{-6}$$

$r$  – расстояние между центрами линий АВ и MN;

$\theta$  – угол между направлением линии АВ и линией, соединяющей центры линий АВ и MN.

- для наземного АВ (установка АВ-q, компонента  $V_z$ , ближняя зона):

$$Ro\_t = 10^{-25/3} \left( \frac{8\pi \cdot AB \cdot R_y \cdot q}{t^{5/2} \cdot |Es|} \right)^{2/3}$$

$R_y$  – разнос между точкой измерения и линией АВ;

$q$  – эффективная площадь приемной петли;

$t$  – время в секундах.

- для незаземленной петли (установка Q-q, компонента  $V_z$ , ближняя зона):

$$Ro\_t = 10^{-25/3} \left( \frac{16\pi \cdot L_1 L_2 \cdot q}{t^{5/2} \cdot |Es|} \right)^{2/3}$$

$L_1, L_2$  – размеры длинной и короткой сторон генераторной рамки;

$q$  – эффективная площадь приемной петли;

$t$  – время в секундах.



### «Расчет каж.уд.сопротивления $R_{o\_t2}$ по $E_s$ »

Расчет кажущегося удельного сопротивления для режима ЗС по параметру  $E_s$  (мкВ/А/м) производится по формулам:

- для скважинного АВ (установка АВ-MN, компонента  $E_r$ ) – аналогично  $R_{o\_t1}$

- для наземного АВ (установка АВ-MN, компонента  $E_x$ , дальняя зона):

$R_{o\_t} = |K \cdot E_s|$ , где  $K$  – геометрический коэффициент.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

AM, BM, AN, BN – расстояния между точками электродов питающих и приемных линий A, B, M, N.

- для наземного АВ (установка АВ-q, компонента  $B_z$ ):

$$R_{o\_t} = \frac{2\pi \cdot r^4 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot Lab \cdot S_q \cdot \sin \varphi} \cdot |E_s|$$

$r$  – расстояние от точки измерения до центра АВ;

$Lab$  – длина АВ;

$S_q$  – эффективная площадь приемной петли;

$\varphi$  – угол между направлением линии АВ и линией, соединяющей центры АВ и приемной петли.

- для незаземленной петли (установка Q-q, компонента  $B_z$ , ближняя зона) – аналогично  $R_{o\_t1}$ .

### «Расчет каж.уд.сопротивления $R_{o\_t3}$ по $E_s$ »

Расчет кажущегося удельного сопротивления для режима ЗС по параметру  $E_s$  производится по формулам:

- для скважинного АВ (установка АВ-MN, компонента  $E_r$ ) – аналогично  $R_{o\_t1}$

- для наземного АВ (установка АВ-MN, компонента  $E_x$ , дальняя зона, длинная линия):

$$R_{o\_t} = E_s / P_{k_{E_x}}^L;$$

$$P_{k_{E_x}}^L_{д.з.} = \frac{1}{2\pi} \left[ (0.5AB - x) \left( \frac{1}{y^2 R_2} + \frac{1}{R_2^3} \right) + (0.5AB + x) \left( \frac{1}{y^2 R_1} + \frac{1}{R_1^3} \right) \right];$$

$$R_2 = \sqrt{(AB/2 - x)^2 + y^2}, \quad R_1 = \sqrt{(AB/2 + x)^2 + y^2}$$

$x, y$  – координаты точки измерения (начало координат в центре диполя, ось  $x$  вдоль диполя);

$AB$  – длина питающей линии.

- для наземного  $AB$  (установка  $AB-q$ , компонента  $B_z$  для длинной линии):

$$R_{o\_t} = E_s / Pk_{dBz}^L;$$

$$Pk_{dBz}^L = \frac{1}{2\pi \cdot y} \left[ (0.5AB - x) \left( \frac{2}{y^2 R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + (0.5AB + x) \left( \frac{2}{y^2 R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \right];$$

$x, y$  – координаты точки измерения (начало координат в центре диполя, ось  $x$  вдоль диполя);

$AB$  – длина питающей линии.

- для незаземленной петли (установка  $Q-q$ , компонента  $B_z$ , ближняя зона) – аналогично  $R_{o\_t1}$ .

### «Расчет каж.уд.сопротивления $R_{o\_k1}$ по $E_{rg}$ »

Расчет кажущегося сопротивления для режима ЗС по параметру  $E_{rg}$  производится по формуле  $R_{o\_k} = |K| \cdot E_{rg}$ , где  $K$  – геометрический коэффициент (см. расчет  $R_{o\_w1}$ ).

### «Расчет каж.уд.сопротивления $R_{o\_k2}$ по $E_{rg}$ »

Расчет кажущегося сопротивления для режима ЗС по параметру  $E_{rg}$  производится по формулам, аналогичным расчету  $R_{o\_w2}$ .

### «Расчет эфф.уд.сопротивления $R_{o\_t}$ по $E_s$ »

Расчет эффективного удельного сопротивления для режима ЗС с источником поля в виде наземного  $AB$  осуществляется путем решения «полного» уравнения относительно  $\rho$ . Эффективное удельное сопротивление по значению и размерности равно удельному сопротивлению однородного изотропного полупространства независимо от характера источника поля, типа и размеров установки.

Уравнение для составляющей  $E_x$  электромагнитного поля источника в виде заземленного прямолинейного кабеля конечной длины имеет вид:

$$E_x(t) = \frac{I\rho}{2\pi} \int_{-l}^l \left( \Phi(u) - \frac{2u}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \right) \frac{1}{r^3} d\zeta$$

где  $u = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\rho t}}$  – безразмерный параметр,  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\lambda^2} d\lambda$  – интеграл вероятности (см. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации).

Уравнение для составляющей  $B_z$  электромагнитного поля источника в виде заземленного прямолинейного кабеля конечной длины имеет вид:

$$dB_z(t)/dt = \frac{3I\rho}{2\pi} \int_{-l}^l \left( \Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-u^2/2} u(1+u^2/3) \right) \frac{\sin\theta}{r^4} d\zeta$$

где  $u = 2\pi r/\tau$  – безразмерный параметр,  $\tau = 2\pi\sqrt{2t\rho/\mu}$  – параметр становления,

$\theta$  - угол между направлением линии АВ и линией, соединяющей центры АВ и приемной петли,

$$\Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x e^{-\lambda^2/2} d\lambda \quad - \text{интеграл вероятности (см. Ваньян Л.Л. Основы}$$

электромагнитных зондирований).

Во всех формулах:

$I$  – сила тока в питающей линии;

$\rho$  – удельное сопротивление среды;

$l$  – половина длины питающей линии;

$x, y$  – координаты точки измерения в системе источника (начало координат в центре источника, ось  $x$  вдоль линии источника);

$\zeta$  – текущая координата на кабеле;

$$r = \sqrt{(\zeta - x)^2 + y^2};$$

$$\mu = 4\pi 10^{-7} \text{ (Гн/м);}$$

$t$  – время становления.

Любое из данных уравнений решается относительно  $\rho$  численным методом с помощью функции **MATLAB** «fsolve» (процедура решения системы уравнений) отдельно для каждого времени и имеет вид

$$E_x(t) = E_s \text{ или}$$

$$dB_z(t)/dt = E_s$$

Результатом решения уравнения являются значение эффективного удельного сопротивления  $Ro_t$  и ошибка решения уравнения  $Err_{Rw}$ . Дополнительно по полученному значению  $Ro_t$  с помощью уравнения для выбранной компоненты рассчитывается «расчетное» значение ЭДС  $E_sE$ .

*Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. – М., Недра, 1978, стр.39*

*Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. – М., Недра, 1965, стр.41*

### «Расчет эфф.уд.сопр. $Ro_t$ и поляризации $Eta1$ по $E_s$ »

Расчет эффективных удельного сопротивления и поляризации для режима ЗС с источником поля в виде наземного АВ осуществляется путем решения «полного» уравнения относительно  $\rho$  и  $\eta$ . Эффективное удельное сопротивление по значению и размерности равно удельному сопротивлению однородного изотропного полупространства независимо от характера источника поля, типа и размеров установки.

Уравнения для различных составляющих электромагнитного поля источника в виде заземленного прямолинейного кабеля конечной длины имеют вид (см. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации):

$$E_x(t) = \frac{I\rho}{2\pi} \int_{-l}^l \left( \begin{aligned} &\Phi(u) - \frac{2u}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} + \eta(3\cos^2\theta - 2)e^{n^2/u^2} [1 - \Phi(n/u)] + \\ &+ \eta[\Phi(u) - \frac{2un}{\sqrt{\pi}}] e^{-u^2} + \eta e^{n^2/u^2} e^{2n} [1 - \Phi(n/u + u)](1 - 2n + 2n^2) \end{aligned} \right) \frac{1}{r^3} d\zeta$$

$$dB_z(t)/dt = \frac{I\rho}{2} \int_{-1}^1 \left[ \begin{aligned} & \Phi(u) - \frac{2u}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{2u^2}{3}\right) e^{-u^2} - \eta e^{n^2/u^2} \operatorname{erfc}(n/u) + \\ & + \eta \left[ \Phi(u) - \frac{2un}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{2}{3}n + \frac{2}{3}u^2\right) e^{-u^2} \right] + \\ & + \eta e^{n^2/u^2} e^{2n} \operatorname{erfc}(u + n/u) \left(1 - 2n + 2n^2 - \frac{4}{3}n^3\right) \end{aligned} \right] \frac{\sin\theta}{r^4} d\zeta$$

Параметр  $u = r\sqrt{\mu\rho}/2/\sqrt{t}$  используется при описании электродинамических явлений над неполяризуемыми средами, параметр  $n = r\sqrt{\mu\rho}/2/\sqrt{\tau}$  не зависит от  $t$  и определяет соотношение между скоростью поляризационных и электродинамических явлений,  $\tau$  - постоянная времени процесса поляризации,  $\eta$  - коэффициент поляризуемости,

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\lambda^2} d\lambda - \text{интеграл вероятности, } \operatorname{erfc}(x) = 1 - \Phi(x).$$

Любое из данных уравнений решается относительно  $\rho$  и  $\eta$  численным методом с помощью функции **MATLAB** «fsolve» (процедура решения системы уравнений) отдельно для каждого времени и имеет вид

$$E_x(t) = E_s \text{ или} \\ dB_z(t)/dt = E_s$$

Результатом решения уравнения являются значение эффективного удельного сопротивления  $Ro\_t$ , эффективной поляризации  $E_{tal}$  и ошибка решения уравнения  $Err\_Rw$ . Дополнительно по полученным значениям  $Ro\_t$  и  $E_{tal}$  с помощью уравнения для выбранной компоненты рассчитывается «расчетное» значение ЭДС  $E_sE$ .

*Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. – М., Недра, 1978, стр.39*

### «Расчет кажущейся поляризации $E_{vp}$ »

Выполняет расчет кажущейся поляризации по параметру  $E_s$  для компоненты  $E_x$ .  
Рассчитывается по всей сетке времен по формуле:

$$E_{vp} = \frac{E_s}{E_{pr}} \cdot 100\%$$

$E_s$  – ЭДС сигнала становления поля электрической компоненты  $E_x$ ;  
 $E_{pr}$  – значение сигнала становления на «полке» импульса тока («проходящее»)

### «Расчет ДНП в паузе»

Выполняет расчет параметров ДНМЭ по параметрам  $E_s, Es2, E_{pr}, E_{pr2}$ .

Если обозначить разность потенциалов между электродами М и О через  $\Delta U_1$ , между электродами О и N - через  $\Delta U_2$ , то:

$E_s = \Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2$  – разность потенциалов между электродами М и N (в паузе тока),

$Es2 = \Delta^2 U = \Delta U_1 - \Delta U_2$  – разность второго порядка (в паузе тока),

$E_{pr} = \Delta U_0$  - разность потенциалов, измеренная во время пропускания тока (на «полке»),

$E_{pr2} = \Delta^2 U_0$  – разность второго порядка на «полке» тока.

Рассчитываются следующие параметры:

$$DU = DU(t) = \Delta U(t) / \Delta U_0$$

$$D2U = D2U(t) = \Delta^2 U(t) / \Delta U_0$$

$$P1 = \Delta^2 U(t) / \Delta U(t)$$

$$PS = (\Delta^2 U(t) - \Delta^2 U_0) / (\Delta U - \Delta U_0)$$

$$Dphi = D\phi(t) = d(\Delta^2 U(t)) / dt / d(\Delta U(t)) / dt - P1$$

### «Расчет ДНП на пропускании»

Выполняет расчет параметров ДНМЭ по параметрам  $Es\_pr$ ,  $Es2\_pr$ ,  $Epr$ ,  $Epr2$ .

$Es\_pr = \Delta U_{np} = \Delta U_1 + \Delta U_2$  – разность потенциалов между электродами М и N, измеренная во время пропускания тока,

$Es2 = \Delta^2 U_{np} = \Delta U_1 - \Delta U_2$  – разность второго порядка, измеренная во время пропускания тока,

$Epr = \Delta U_0$  – разность потенциалов, измеренная во время пропускания тока (на «полке»),

$Epr2 = \Delta^2 U_0$  – разность второго порядка на «полке» тока.

Рассчитываются следующие параметры:

$$DU\_pr = DU_{np}(t) = \Delta U_{np}(t) / \Delta U_0$$

$$D2U\_pr = D2U_{np}(t) = \Delta^2 U_{np}(t) / \Delta U_0$$

$$PS\_pr = P1\_pr = \Delta^2 U_{np}(t) / \Delta U_{np}(t)$$

### «Расчет Hf, Sf и Rf (по Ro)»

Работает по выбранному параметру  $Ro$ . Выполняет расчет обобщенных количественных параметров разреза (суммарной мощности до кровли проводника  $Hf$ , суммарной продольной проводимости до кровли изолятора  $Sf$  и среднего сопротивления опорной толщи  $Rf$ ) по координатам минимума временной кривой  $Ro\_t$ .

Рассчитываются по формулам:

$$Sf = 452 \cdot K \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot t_{\min}}{\rho_{\tau \min}}}; \quad Hf = 4.9 \cdot 10^{-6} \cdot S^3 \cdot \left( \frac{\rho_{\tau \min}^2}{2\pi \cdot t_{\min}} \right); \quad Rf = Hf / Sf$$

$t_{\min}$  – абсцисса минимума кривой кажущегося сопротивления;

$\rho_{\tau \min}$  – его ордината;

$K$  – коэффициент.

### «Расчет H\_t (по Ro)»

Работает по выбранному параметру  $Ro$ . Выполняет расчет зависимости глубины от времени  $H(t)$  по функции  $Ro(t)$ .

Рассчитывается по формуле:

$$H(t) = K \cdot \sqrt{2\pi \cdot \rho \cdot t}, \text{ по умолчанию } K = \frac{\sqrt{10^7}}{2\pi} \approx 503.29.$$

Перед запуском расчета значение коэффициента  $K$  может быть изменено оператором.

---

### «Расчет Ht (по R(H))»

Построение зависимости H(t) для заданной модели среды. Эта процедура позволяет, используя возможность расчета прямой задачи для горизонтально-слоистой среды, получить функцию «эффективной» глубины – глубины проявления контрастного проводящего пласта. Для этого «сквозь» заданную модель среды «прогоняется» тонкий проводящий пласт и анализируется изменение параметра Es(t). Интервал глубин и дискретность для «прогона» задается в диалоге. Для каждого положения проводящей плоскости (то есть – глубины) определяется одно значение частоты (периода), на которой изменение Es(t) максимально. Определенная таким образом «эффективная» *глубина не является количественно достоверной*, однако позволяет для всего профиля получить *достоверные качественные оценки изменения глубин* залегания проводящих пластов.

WLF позволяет также получить аналогичную зависимость для контрастного изолятора – непроводящего тонкого пласта, что может быть использовано при анализе данных на месторождениях углеводородов.

---

### «Расчет H\_t по St, связь H-T по каротажу»

- выполняет расчет зависимости глубины от времени H\_t по St с использованием сохраненных заранее в файл модели интервальных параметров пересчета.

---

### «Расчет H\_t по St, связь Sh-St по каротажу»

- выполняет расчет зависимости глубины от времени H\_t по St с использованием Sh из файла модели. Анализируются точки одинаковых значений полевой St и модельной Sh суммарной проводимости и в этих точках строится функция H(t).

---

### «Пересчет Hw в H\_t»

Выполняет пересчет зависимости эффективной глубины от периода Hw (ЧЗ) в зависимость эффективной глубины от времени Ht (ЗС) с использованием формулы  $T=2\pi \cdot t$  и пересчетом на сетку времен ЗС.

---

### «Расчет интерпрет.сопротивления Ri\_t по St и Rt»

Расчет интерпретационного сопротивления по формуле:

$$Ri_t = \frac{St \cdot \frac{\partial Rt}{\partial t} + Rt \cdot \frac{\partial St}{\partial t}}{\frac{\partial St}{\partial t}}$$


---

### «Пересчет Rt по St и Ht»

Выполняет расчет сопротивления Rt по формуле  $Rt=Ht/St$ .

---

### «Пересчитать $H(t)$ с учетом альтитуды»

Работает по выбранному параметру:  $H_t$  или  $H\_t$ . Выполняет учет альтитуды пикетов профиля для параметра  $H(t)$ .

$H(t)$  – эффективная глубина, может быть получена в результате трансформаций сигналов становления поля. Значения альтитуды точек профилей должны присутствовать в топоданных по площади.

Пользователю необходимо следить за тем, чтобы над одним и тем же объектом данных эта процедура проводилась однократно.

---

### «Расчет $St$ по $Ro$ и $H\_t$ »

Выполняет расчет суммарной продольной проводимости  $St$  по формуле  $St=H\_t/Ro$ .

---

### «Пересчет параметра на равномерную сетку $H$ (по $H_t$ )»

Работает по выбранному параметру из списка  $St$ ,  $Rt$ ,  $Ri\_t$ . Рассчитывает соответственно параметры  $Sh$ ,  $Rh$ ,  $Ri\_h$ . Для выполнения процедуры необходимо наличие в базе параметра  $H_t$ .

Процедура пытается по исходной  $H_t$  построить монотонную функцию  $H(t)$  и затем интерполирует соответствующие значения параметра на новую равномерную сетку глубин.

---

### «Пересчет параметра на равномерную сетку $H$ (по $H\_t$ )»

Работает по выбранному параметру из списка  $St$ ,  $Rt$ ,  $Ri\_t$ . Рассчитывает соответственно параметры  $Sh$ ,  $Rh$ ,  $Ri\_h$ . Для выполнения процедуры необходимо наличие в базе параметра  $H\_t$ .

Процедура пытается по исходной  $H\_t$  построить монотонную функцию  $H(t)$  и затем интерполирует соответствующие значения параметра на новую равномерную сетку глубин.

---

### «Расчет $R\_t$ и $H\_t$ по $Ro$ (по Барсукову)»

Работает по выбранному параметру  $Ro$ . Трансформация для соосной установки  $Q$ - $q$ . Выполняет расчет зависимости эффективных сопротивления и глубины от времени по функции  $\rho_k(t)$ . Кажущееся сопротивление  $\rho_k(t)$  трансформируется в  $\rho_h(t)$  на основе простой идеи, плодотворно используемой в методе МТЗ:  $\rho_h(t)=\rho_k(t)*k(t)$ , где

$$k(t) = \frac{1}{(1-v)^{3/2}}; \quad v = \frac{d \ln \rho_k(t)}{\ln t}; \quad |v| < 1$$

Сопротивление  $\rho_h(t)$  возрастает, если растет логарифмическая производная  $v > 0$  и уменьшается, если  $v < 0$ .

Кажущаяся или эффективная глубина  $h_k$  исследований для каждого времени  $t$  определяется как

$$h_k = \sqrt{\frac{t\beta}{\mu}}; \quad \beta \in [\rho_k \rho_h]; \quad \mu = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

Параметр  $\beta$  имеет размерность Ом·м, регулирует разрешающую способность трансформаций. Для среднего уровня погрешностей в исходных данных  $\beta \approx (\rho_k \rho_h)^{1/2} = \rho_k \cdot k(t)^{1/2}$ .

*Барсуков П.О. Импульсные электромагнитные зондирования в микросекундном диапазоне. Автореферат диссертации на соискание ученой степени*

### «Расчет Rt, St и Ht по Es Q-q (рудн.)»

Трансформация для соосной или совмещенной установки Q-q. Выполняет расчет зависимости кажущихся сопротивления, проводимости и глубины от времени по ЭДС переходных процессов. Расчет осуществляется по формулам:

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0}{t_i} \left( \frac{M_{\Gamma} M_{II} \mu_0}{20\pi \sqrt{\pi} t_i E_i} \right)^{2/3},$$

$$S_{\tau} = \frac{2}{\mu_0} \left( \frac{2\pi}{3M_{\Gamma} M_{II} \mu_0} \right)^{1/3} \left[ \frac{t_{i+1} - t_i}{\left( \frac{1}{E_{i+1}} \right)^{1/4} - \left( \frac{1}{E_i} \right)^{1/4}} \right]^{4/3},$$

$$H_{\tau} = \left( \frac{3M_{\Gamma} M_{II}}{16\pi S_{\tau} E_i^*} \right)^{1/4} - \frac{t_i^*}{\mu_0 S_{\tau}},$$

где  $M_{\Gamma}$  – момент генераторного контура;  $M_{II}$  – момент измерительного контура;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $t_i$  – время наблюдения ( $t_i^*$  – среднее геометрическое  $t_i^* = \sqrt{t_i t_{i+1}}$ );  $E_i$  – ЭДС переходного процесса ( $E_i^*$  – среднее геометрическое  $E_i^* = \sqrt{E_i E_{i+1}}$ ).

*Стогний И.И., Стогний Вас.В. Рудная электроразведка. Электрические профилирования: Учеб.пособие. – М.:Вузовская книга, 2008, стр.52-53.*

### «Замена Es асимптотой БЗ»

Выполняет автоматически корректировку параметра Es выбранного объекта без вывода на экран, используя установленные параметры фильтра №12 по «Edit Curve».

### «Дифф. трансформация ЗСБ (расчет St, Ht, Rt)»

Работает по параметру Es. Выполняет дифференциальную трансформацию сигналов становления ЗСБ путем нормировки информативного сигнала и его производной по соответствующим теоретическим эквивалентам для модели тонкого проводящего слоя, возбуждаемого приподнятым на эффективную глубину импульсным источником – расчет параметров St, Ht, Rt. (Сидоров В.А., Тикшаев В.В.)

St – эффективная продольная проводимость;  
Ht – эффективная глубина проникновения электромагнитного поля;  
Rt=Ht/St – эффективное значение удельного эл.сопротивления.

### «Исправить Es (для трансф. ЗС КГУ)»

Операция исправляет ранние времена сигнала ЭДС (до выхода на спад) – приводит их «на полку».



---

### «Трансформация ЗС КГУ (расчет St, Rt, Ht)»

Выполняет трансформацию сигналов становления ЗС на основе индукционного анализа переходных процессов – расчет параметров St, Rt, Ht.

Работает для установок АВ-q, Q-q (соосная установка)

St – эффективное значение кажущейся продольной проводимости;

Rt – эффективное значение удельного эл.сопротивления;

Ht=Rt\*St – эффективная глубина проникновения электромагнитного поля.

---

### «Трансформация ЗС КГУ (Q=4AB)»

Аналогичная процедура для установки Q-q с произвольным расположением приемной петли. Используется представление незаземленной прямоугольной петли источника в виде 4-х заземленных линий.

---

### «Подобрать модель R(H) по Es»

Процедура инверсии данных ЗС, интерактивный подбор по параметру Es (наземный АВ, компоненты Vz,Ex,Exy). Правила выполнения инверсии смотри в основном описании, раздел 4.6.

Принципиальное отличие выполнения инверсии для данных ЗС заключается в длительности решения прямой задачи ЗС, которое делает затруднительным использование инверсии для каждого пикета при площадных измерениях.

---

### «Учет уровня "0" для Es»

- к накопленному сигналу (параметр Es) применяется поправка (параметр En(3)) для корректирования нулевого уровня сигнала ЭДС.

---

### «Устранение отрицательных значений Es»

- для параметра Es значения  $\leq 0$  заменяются на значение параметра TolRank ([private]) из файла "wlf.ini".

---

### «Расчет f\_t по Es для АВ-q»

Расчет зависимости f(t), объединяющей измерения в ближней и дальней зонах источника по временным кривым зондирования с установкой АВ-q.

Рассчитывается по формуле:

$$f(t) = \frac{L^2}{0.3 \cdot Lab \cdot Sq \cdot \sin \theta} \cdot t \cdot Es ;$$

L – расстояние от центра приемной петли до центра АВ;

Lab – длина АВ;

Sq – эффективная площадь приемной петли;

$\theta$  - угол между направлением линии АВ и линией, соединяющей центры АВ и приемной петли;

t – время в секундах.

---

### «Расчет потенциала EP по EpZS»

- расчет потенциалов пикетов профиля относительно выбранного пикета по параметру EpZS. Параметр EpZS не должен иметь контрольных точек.

---

### «Расчет дифференциальных параметров по Es»

Выполняет расчет параметров P1 и Dphi метода ДНМЭ по данным Es для электрической компоненты Ex вдоль «сплошного» профиля (попарно по соседним линиям MN) по формулам:

$$P1 = \Delta^2 U(t) / \Delta U(t)$$

$$Dphi = D\phi(t) = d(\Delta^2 U(t)) / dt / d(\Delta U(t)) / dt - P1$$

где  $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2$ ;  $\Delta^2 U = \Delta U_1 - \Delta U_2$ ;  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$  – ЭДС на соседних MN

---

### «Расчет Re и Im по Es»

Выполняет расчет спектра временного сигнала Es с получением параметров Re, Im.

---

### «Расчет спектра Es», «Расчет Es по спектру»

- взаимобратные операции (прямое и обратное БПФ), позволяют осуществить, например, фильтрацию спектра сигнала ЭДС с последующим возвратом во временную область. Спектральные оценки сигнала записываются в параметры Re, Im.

---

### «Поворот осей (пересчет Es для Ex, Ey)»

Процедура может применяться, если в базе присутствует параметр Es для обеих компонент электрического поля Ex, Ey. Поворот координатных осей осуществляется процедурой на заданный угол, определяемый предварительно на основании файла координат или по кнопке «Работа с картами» WLF. Результат помещается в исходные данные Ex, Ey - Es.

Эта возможность WLF позволяет проектировать работы с «векторной» съемкой электрического поля по прямоугольной сетке профилей так, что вдоль любых прямолинейных участков профиля измеряются компоненты Ex и Ey – параллельно и перпендикулярно линии профиля, что облегчает выполнение топоработ.

---

### «Расчет приведенного расстояния Lpr по Ro»

Выполняет расчет параметра  $Lpr = 2\pi \frac{r}{\tau}$ , называемого приведенным расстоянием (или относительным численным расстоянием).

Здесь r – наименьшее расстояние от приемника до источника,  $\tau = \sqrt{2\pi 10^7 \rho t}$  – параметр становления, t – время становления,  $\rho$  – удельное сопротивление земли (при вычислениях берутся значения выбранного параметра Ro (Rt, Ro\_t, Ro\_t1, Ro\_t2 или Ro\_t3)).

Дальняя зона – это область, где  $(2\pi r/\tau) \gg 1$ , а ближняя зона – область, где  $(2\pi r/\tau) \ll 1$ . Дальняя зона отвечает большим разностям и маленьким временам становления.

Ближняя зона отвечает малым разностям и большим временам становления. В зависимости от сопротивления среды одни и те же значения параметров  $r$  и  $t$  могут отвечать как дальней, так и ближней зонам.

*Матвеев Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. Учебник для вузов. М., Недра, 1982, стр.69-70.*

---

### **«Сформировать параметр $t$ »**

В результате процедуры в базе формируется новый параметр  $t(t)$  – в качестве значений этой функции используются значения аргумента (время). Этот параметр можно использовать для параметрического вывода обратных функций  $t(F)$ .

---

## Процедуры преобразования параметров модели

---

### «Пересчитать $Sh$ в $R_i$ (выделить слои)»

- попытка «расчленить» разрез по глубине на слои одинакового сопротивления по зависимости  $S(h)$ . Перед запуском расчета необходимо ввести диапазон рабочих глубин, минимальную толщину слоя (в метрах) и максимальное число слоев в разрезе. В результате получается параметр  $R_i$  нового типа – массив «послойных данных» или модель среды. Аналогичный результат в параметре  $R$  выдают процедуры инверсии.

---

### «Расчет сумм.проводимости $SM$ по $R$ ( $SM_i$ by $R_i$ )»

- выполняет расчет суммарной продольной проводимости  $SM$  для модели из параметра  $R$  (или  $R_i$ ) по формуле  $SM = \sum(h_i/\rho_i)$ , где  $h_i$  - мощность слоя,  $\rho_i$  – удельное сопротивление слоя.

---

### «Расчет уд.электропроводности $Gh$ по $Sh$ »

Расчет удельной электропроводности производится по формуле  $Gh = \frac{\partial Sh}{\partial H}$ .

---

### «Сформировать параметр $R(H)$ из модели»

- процедура создания в базе параметра  $R$  соответствующего модели из файла. С помощью этой процедуры можно загрузить исходную модель для каждого пикета профиля, а затем, используя, например, структурные данные (данные о глубинах залегания слоев) по профилю, получить стартовые модели инверсии для каждого пикета.

---

### «Пересчитать $H$ для $R$ с учетом альтитуды»

Выполняет учет альтитуды пикетов профиля для параметра  $R(H)$  – в общем случае к отрицательным значениям глубин в параметре  $R(H)$  добавляется величина альтитуды пикета.

Если необходимо вернуться к исходным значениям глубин (считая, что верхняя кровля разреза имеет глубину = 0), то для этого нужно сделать значение ключа в строке **AltAccountKey= -1** блока **[private]** файла **wlf.ini** и вновь использовать процедуру. Исходное значение ключа (по умолчанию) **AltAccountKey= 1**.

---

### «Пересчет параметра $R$ ( $R_i$ ) в $R_h$ (на равномерную сетку $H$ )»

Выполняет интерполяцию сопротивления слоев модели среды (в общем случае разной для каждого пикета профиля) на заданную равномерную сетку глубин. Формируется новый параметр  $R_h$ , который можно, например, рисовать по площади как карту сопротивлений на заданной глубине.

---