УДК 550.837

ПРИЕМЫ ПОЛЕВЫХ И КАМЕРАЛЬНЫХ РАБОТ В МЕТОДЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ БЛУЖДАЮЩИМИ ТОКАМИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Вишнев В.С. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Изложены теоретические основы, рассмотрены характерные особенности, приведены примеры экспериментального опробования метода разведки недр блуждающими токами электрической железной дороги.

Железная дорога, помехи, импульсы, полезный сигнал, модель, параметры, поле, кривые, кажущееся сопротивление.

THE FIELD WORKS AND OFFICE STUDIES TECHNIQUES IN STRAY CURRENTS GEOELECTRICAL METHOD

Vishnev V. S. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The theoretical basics are stated and the characteristic features are considered. The examples of tentation of the stray currents from electric railways prospecting method are shown.

The railways, noise, pulses, friendly signal, model, parameters, field, the apparent resistance curves.

Введение

Возле действующих электрических железнодорожных веток (ЭЖДВ), как известно, в любое время суток наблюдаются интенсивные апериодические импульсные поля – помехи.

Они используются более или менее регулярно для геологоразведочных нужд в методе блуждающих токов (МБТ), который применяют, в основном, на территориях или вблизи горнодобывающих предприятий, оснащенных откаточными средствами на электрической тяге, при картировании и разведке «электронопроводящих» залежей полезных ископаемых (Березин, Семенов, 1973; Гамоян, 1989; Инструкция по электроразведке, 1984). Там рельсы, как правило, контактируют с рудой, места токов утечки из железнодорожного полотна локализованы, морфология пространственного распределения электрических составляющих импульсов практически неизменна, аномалии намного превышают нормальное поле, а непостоянство его интенсивности легко устраняется делением амплитуды сигнала, зарегистрированного в рядовом пункте наблюдения, на соответствующую амплитуду базисном.

Однако в пределах большинства ЭЖДВ, особенно магистрального (междугороднего) назначения, контакты рельсов с рудой (или с другими сильно проводящими геологическими образованиями), надо полагать, отсутствуют и на огромных пространствах, где пролегают такие пути, использование обсуждаемых полей по методике БТ становится неэффективным. Это побуждает заниматься их дальнейшим изучением.

В работах (Вишнев, 1989; 2003) было показано, что из апериодических импульсных помех, возникающих при изменении режимов энергопотребления электровозов, можно выделять однотипные по структуре источника (полезные) сигналы.

Упомянутое свойство рассматриваемого носителя геологической информации послужило толчком для модернизации метода.

Ниже приведено краткое обоснование усовершенствованной разновидности МБТ, условно обозначенной аббревиатурой ЭПЖД – электроразведка полем железной дороги, или МЭПЖД – метод электроразведки полем железной дороги, которая позволяет (в благоприятных условиях) применять импульсные помехи

от ЭЖДВ (далее ЭЖД) для получения как качественных, так и количественных геоэлектрических характеристик, причем, в присутствии и отсутствии действующих рудников.

1. ***Некоторые сведения о системе энергоснабжения электровозов и исходная модель источника полезного сигнала метода ЭПЖД***

Представления об источнике, ответственном за возбуждение изучаемого поля, можно почерпнуть, например, ознакомившись с работой (Марквардт, 1965).

Согласно ее энергия к электропоезду подается от одной или, максимум, от двух тяговых подстанций с помощью подводящих и отсасывающих фидеров, токосъемников локомотива, электрически неразрывного рельсового пути и секционированного контактного провода. Поскольку железнодорожное полотно контактирует с землей, то в передаче электричества участвует и земля (грунт). Энергетические нагрузки в силовых агрегатах электровозов изменяются дискретно. Время становления тока в их цепях не превышает 0,1–0,3 с.

Железнодорожные перегоны имеют участки (подъемы, переезды, остановочные пункты, мосты и т.п.), где изменение режима энергопотребления любых локомотивов практически неизбежно.

На основании выше изложенного не трудно прийти к выводу, что, несмотря на сложную и весьма непостоянную конфигурацию токовых приращений в элементах тяговой сети ЭЖД, в апериодических импульсах содержатся сигналы с эпизодически повторяющейся пространственной структурой, источник которых сравнительно простой и (в общих чертах) заранее известный.

Значит, при выполнении полевых работ методом БТ или, точнее, методом ЭПЖД необходимо выявить одно из мест, где поезда вынуждены изменять свою тяговую нагрузку, и, наряду с синхронным измерением поля на рядовых и базисном пунктах, фиксировать время, направление и особенности их движения (остановка, ускорение, торможение) по этому отрезку пути. Тогда, отбирая импульсы, возникшие в моменты, когда электровозы изменяли свой режим движения на данном отрезке ЭЖД, можно, вероятно, используя несложные статистические приемы, выделить поочередно на всех пунктах наблюдения сигналы (именуемые «полезными»), источник которых один и тот же.

Исходной моделью этого источника надо, по-видимому, считать обособленную ветку с одним неподвижным, но многократно изменяющим свой режим энергопотребления, локомотивом, питаемым одной (при односторонней схеме) или одновременно двумя (при двухсторонней схеме энергоснабжения электровозов) тяговыми подстанциями.

Предлагаемая модель предельно проста и, если принять, что соответствующий участок рельсового пути прямолинейный, неветвящийся и равномерно заземленный, а поле установившееся, легко поддается алгоритмизации.

2. ***Формулы нормального поля основных токонесущих элементов ЭЖД, результаты его расчетов и методические приемы, вытекающие из их анализа***

Вывод расчетных формул профильных и площадных распределений полезного сигнала МЭПЖД для случая горизонтально-однородного слоистого полупространства и выше упомянутой модели ЭЖД при двухстороннем и одностороннем энергоснабжении электровозов подробно изложен в работах (Вишнев, 1989; 2007). Здесь, чтобы было понятно на чем основаны приведенные ниже методические приемы, представим соответствующие математические выражения еще раз, но, в отличие от предыдущих публикаций, в виде удобном для программирования и лишь для случая двухстороннего питания электровоза, так как он наиболее общий:

1. Поле токов утечки железнодорожного полотна:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{4\pi} k \left\{ \int_{-\infty}^{0} Q_1 f + \int_{0}^{+\infty} Q_2 f + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 f + \right.$$
$$\left. + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 f + \int_{-\infty}^{L} Q_5 f + \int_{L}^{+\infty} Q_6 f \right\} dl, \qquad (1)$$

$$E_x = \frac{\rho_1 I}{4\pi} k \left\{ \int_{-\infty}^{0} Q_1 \lambda x_м + \int_{0}^{+\infty} Q_2 \lambda x_м + \right.$$
$$\left. + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \lambda x_м + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \lambda x_м + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \lambda x_м + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \lambda x_м \right\} dl, \quad (1')$$

$$E_y = \frac{\rho_1 I}{4\pi} k \left\{ \int_{-\infty}^{0} Q_1 \lambda (y_м - l) + \right.$$
$$+ \int_{0}^{+\infty} Q_2 \lambda (y_м - l) + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \lambda (y_м - l) +$$
$$+ \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \lambda (y_м - l) + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \lambda (y_м - l) +$$
$$\left. + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \lambda (y_м - l) \right\} dl, \quad (1'')$$

$$H_y = \frac{I}{8\pi} k \left\{ \int_{-\infty}^{0} Q_1 F \frac{x_м}{r} + \right.$$
$$+ \int_{0}^{+\infty} Q_2 F \frac{x_м}{r} + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 F \frac{x_м}{r} + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 F \frac{x_м}{r} +$$
$$\left. + \int_{-\infty}^{L} Q_5 F \frac{x_м}{r} + \int_{L}^{+\infty} Q_6 F \frac{x_м}{r} \right\} dl, \quad (2)$$

$$H_x = \frac{-I}{8\pi} k \left\{ \int_{-\infty}^{0} Q_1 F \frac{y_м - l}{r} + \right.$$
$$+ \int_{0}^{+\infty} Q_2 F \frac{y_м - l}{r} + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 F \frac{y_м - l}{r} +$$
$$+ \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 F \frac{y_м - l}{r} + \int_{-\infty}^{L} Q_5 F \frac{y_м - l}{r} +$$
$$\left. + \int_{L}^{+\infty} Q_6 F \frac{y_м - l}{r} \right\} dl. \quad (2')$$

2. Поле токов, текущих по рельсам:

$$\left| \vec{H}_р \right| = \frac{I}{8\pi} \left(x_м^2 + z_м^2 \right)^{1/2} \left\{ \int_{-\infty}^{0} \frac{\phi_1}{R^3} + \right.$$
$$+ \int_{0}^{+\infty} \frac{\phi_2}{R^3} + \int_{-\infty}^{l_0} \frac{\phi_3}{R^3} + \int_{l_0}^{+\infty} \frac{\phi_4}{R^3} +$$
$$\left. + \int_{-\infty}^{L} \frac{\phi_5}{R^3} + \int_{L}^{+\infty} \frac{\phi_6}{R^3} \right\} dl, \quad (3)$$

$$H_{xр} = \frac{I}{8\pi} z_м \left\{ \int_{-\infty}^{0} \frac{\phi_1}{R^3} + \int_{0}^{+\infty} \frac{\phi_2}{R^3} + \int_{-\infty}^{l_0} \frac{\phi_3}{R^3} + \right.$$
$$\left. + \int_{l_0}^{+\infty} \frac{\phi_4}{R^3} + \int_{-\infty}^{L} \frac{\phi_5}{R^3} + \int_{L}^{+\infty} \frac{\phi_6}{R^3} \right\} dl = 0, \quad (3')$$

$$H_{zр} = \frac{-I}{8\pi} x_м \left\{ \int_{-\infty}^{0} \frac{\phi_1}{R^3} + \int_{0}^{+\infty} \frac{\phi_2}{R^3} + \right.$$
$$\left. + \int_{-\infty}^{l_0} \frac{\phi_3}{R^3} + \int_{l_0}^{+\infty} \frac{\phi_4}{R^3} + \int_{-\infty}^{L} \frac{\phi_5}{R^3} + \int_{L}^{+\infty} \frac{\phi_6}{R^3} \right\} dl, \quad (3'')$$

где

$$Q_1 = -(1 - l_0 / L) e^{kl}, \quad Q_3 = +e^{k(l - l_0)},$$
$$Q_2 = -(1 - l_0 / L) e^{-kl}, \quad Q_4 = +e^{-k(l - l_0)},$$
$$Q_5 = -(l_0 / L) e^{k(l - L)}, \quad Q_6 = -(l_0 / L) e^{-k(l - L)}, \quad (4)$$

$$\phi_1 = (1 - l_0 / L) e^{kl}, \quad \phi_3 = -e^{k(l - l_0)},$$
$$\phi_2 = -(1 - l_0 / L) e^{-kl}, \quad \phi_4 = e^{-k(l - l_0)},$$
$$\phi_5 = (l_0 / L) e^{k(l - L)}, \quad \phi_6 = -(l_0 / L) e^{-k(l - L)}, \quad (4')$$

$$k = (r_р / r_п)^{1/2}, \quad R = \left\{ x_м^2 + (y_м - l)^2 + z_м^2 \right\}^{1/2},$$
$$H_{yр} = 0, \quad H_z = 0,$$

и (на поверхности проводящего полупространства, т.е. при $z_м$=0)

$$f = \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n}{\left[r^2 + (2dn)^2 \right]^{1/2}}, \quad F = \frac{1}{r},$$
$$\lambda = \frac{1}{r^3} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n}{\left[r^2 + (2dn)^2 \right]^{3/2}}, \quad (4'')$$
$$R = r = \left[x_м^2 + (y_м - l)^2 \right]^{1/2}, \quad H_{xр} = 0,$$

U_1 – потенциал (в первом слое проводящего полупространства); E_i – электрические; H_i – магнитные составляющие напряженности поля утечек из рельсов (i=x, y); $x_м$, $y_м$, $z_м$ – координаты пунктов наблюдения (М) в прямоугольной системе xyz с началом в месте расположения одной из питающих электровоз (Э) тяговой подстанции (которая обозначена условно буквой А, а работающая с ней на параллельную нагрузку – буквой В), осью y, направленной от подстанции А к электровозу Э и подстанции В, осью z – по вертикали вниз; $r_р$ – погонное электрическое сопротивле-

ние рельсов (Ом/км); $r_п$ – погонное электрическое сопротивление перехода рельс – земля (Ом·км); l_0 – координата электровоза в момент изменения режима энергопотребления; $\vec{H}_р$, $H_{xр}$, $H_{zр}$ – вектор и декартовы составляющие напряженности поля тока рельсов; l – текущая координата железнодорожного полотна, отсчитываемая по оси y; q_n – коэффициенты (эмиссии), характеризующие электрические свойства геологической среды; L – длина соответствующей секции контактного провода; d – общая мера глубин нижних границ пластов горизонтально-однородного слоистого полупространства; ρ_1 – удельное электрическое сопротивление пород первого слоя; I – тяговый ток электровоза Э; l_0/L – доля тока подстанции В; $(1 - l_0/L)$ – доля тока подстанции А; р – символ рельсового пути.

3. Поле токов секции (с) контактного провода:

$$H_{xс} = \frac{Ih}{4\pi(x_м^2+h^2)}\left\{\frac{y_м(1-l_0/L)}{(x_м^2+y_м^2+h^2)^{1/2}} - \right.$$
$$- \frac{(y_м-l_0)(1-l_0/L)}{[x_м^2+(y_м-l_0)^2+h^2]^{1/2}} -$$
$$- \frac{(y_м-l_0)(l_0/L)}{[x_м^2+(y_м-l_0)^2+h^2]^{1/2}} + \qquad (5)$$
$$\left. + \frac{(y_м-L)(l_0/L)}{[x_м^2+(y_м-L)^2+h^2]^{1/2}}\right\},$$

$$H_{zс} = \frac{-Ix_м}{4\pi(x_м^2+h^2)}\left\{\frac{y_м(1-l_0/L)}{(x_м^2+y_м^2+h^2)^{1/2}} - \right.$$
$$- \frac{(y_м-l_0)(l_0/L)}{[x_м^2+(y_м-l_0)^2+h^2]^{1/2}} -$$
$$- \frac{(y_м-l_0)(1-l_0/L)}{[x_м^2+(y_м-l_0)^2+h^2]^{1/2}} + \qquad (5')$$
$$\left. + \frac{(y_м-L)(l_0/L)}{[x_м^2+(y_м-L)^2+h^2]^{1/2}}\right\},$$

где h – высота подвеса контактного провода (принятая при расчетах равной 0,006 км), $z_м = 0$, $H_{yс} = 0$.

4. Поле тока вертикального фидера (ф):

$$H_{xф} = \frac{I'\cdot y_м}{4\pi[(x_м-x_0)^2+(y_м-y_0)^2]}\times$$
$$\times\frac{h'}{[(x_м-x_0)^2+(y_м-y_0)^2+(h')^2]^{1/2}}, \qquad (6)$$

$$H_{yф} = \frac{I'\cdot x_м}{4\pi[(x_м-x_0)^2+(y_м-y_0)^2]}\times$$
$$\times\frac{h'}{[(x_м-x_0)^2+(y_м-y_0)^2+(h')^2]^{1/2}}, \qquad (6')$$

где x_0, y_0 – координаты основания, h' – длина фидера, I' – ток подстанции А, или ток подстанции В, $z_0 = z_м = 0$, $h' = h$, $H_{zф} = 0$.

Если $d \to \infty$, то выражения (1), (1'), (1'') и (4'') становятся пригодными для случая однородного полупространства. Если L положить равной $\pm\infty$, то есть исключить действие подстанции В, то (1), ..., (5') будут подходить и для случая одностороннего питания Э.

Рассматривая математические выражения (1–6'), не трудно заметить, что в установившемся режиме, как и следовало ожидать, сведения о параметрах геоэлектрического разреза содержатся только в электрических составляющих полезного сигнала.

Значит, на базисном пункте метода ЭПЖД (или на базисном и рядовых) надо измерять еще и магнитные составляющие поля БТ и нормировать амплитуды электрических импульсов к соответствующим амплитудам магнитных, так как последние отражают, в основном, лишь особенности их возбудителя. В стандартном же варианте МБТ приведение данных измерения к одной и той же интенсивности источника производится путем деления электрических импульсов рядовых пунктов на электрические же импульсы базисного пункта, что, даже при точном знании структуры токовых приращений в элементах тяговой сети ЭЖД, делает эти данные малопригодными для количественного истолкования.

Формулы (1–6') были использованы при математическом моделировании профильных и площадных распределений полезного сигнала МЭПЖД (Вишнев, 2007). В результате моделирования установлено:

1. Несмотря на многочисленность возбудителей, нормальные поля горизонтальных магнитных (H_x, H_y) составляющих изучаемого сигнала на удалениях свыше полутора – двух километров от железнодорожного полотна (также как E_x и E_y в установившемся режиме) создаются в основном

лишь токами утечки из рельсов. Вертикальной (H_z) – практически везде только токами, проходящими по рельсам и контактной подвеске.

Значит, в случаях, когда контактная сеть оказывается сложной, базисный пункт лучше располагать на расстоянии примерно 2 км от ЭЖД и, по возможности, там, где амплитуды H_x и H_y соизмеримые, то есть обе достаточно интенсивные. Тогда при обработке полевых материалов метода ЭПЖД учет особенностей устройства соответствующей секции контактного провода становится необязательным.

Если используемый участок ЭЖД не очень сложный, или же количественные данные об исследуемом геоэлектрическом разрезе не требуются, то базисный пункт МБТ лучше располагать в непосредственной близости (100–400 м) от выбранного места вынужденного изменения тяговой нагрузки электровозов. Так как следить за временем, направлением и изменениями характера движения поездов удобнее прямо с базисного пункта.

2. В точках местности, находящихся вблизи дороги (на расстояниях примерно до 500 метров от рельсов), абсолютные величины H_x, H_y в несколько раз меньше, чем H_z.

Следовательно, амплитуды H_z, измеренные в этих точках, не должны сильно зависеть от электропроводности горных пород при любом реальном геологическом разрезе. И по их распределениям можно, вероятно, вычислять значения параметров тяговой сети, величины которых заранее неизвестны, в частности, приращения токов утечки из рельсов на различных отрезках железнодорожного полотна, вызвавшие импульсы E_i, H_j во всем пространстве наблюдения, и др.

Откуда вытекает, что источник полезных сигналов, выделяемых из помех от ЭЖД, по своей сути детерминируемый и его можно использовать для получения как качественных, так и количественных геоэлектрических характеристик.

Теоретическое обоснование методики определения токов утечки с различных отрезков рельсового пути по амплитудам H_z составляющей полезного сигнала МЭПЖД приведено в статье (Вишнев, 2000).

Однако сама методика, в связи с наличием ряда причин, в основном, организационного характера, еще никак не опробована. Но и без знания конкретных структурных особенностей упомянутых утечек можно, вероятно, (в благоприятных обстоятельствах) данные измерения помех от ЭЖД преобразовывать в параметр кажущееся сопротивление $\rho_{к,тс}$ (тс – тяговая сеть), профильные распределения которого (кривые $\rho^{ij}_{к,тс}$) легко интерпретировать количественно.

3. *Математические выражения для расчета параметра* $\rho_{к,тс}$

Общая формула, по которой рассчитывают экспериментальные кривые $\rho_{к,тс}$, имеет вид (Вишнев, 1989; 2010; 2011):

$$\rho^{ij}_{к,тс} = \frac{G^j_0}{P^i_0} \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta H_j},\ i = x, y;\ j = y, x, \qquad (7)$$

где G^j_0 / P^i_0 – соотношение, играющее роль коэффициента электроразведочной установки; ΔE_i – составляющая по оси x или y прямолинейных координат импульса напряженности электрического поля, измеренного на рядовом пункте наблюдения; ΔH_j – составляющая по оси y или x импульса напряженности магнитного поля, измеренного на базисном либо том же рядовом пункте наблюдения; 0 – символ рядового (р) или базисного (д) пункта; $\rho^x_{к,тс}$ – «поперечные» (ось x – поперек дороги); $\rho^y_{к,тс}$ – «продольные» кривые кажущегося сопротивления, причем, если схема питания электровозов двухсторонняя, а рельсовый путь прямолинейный, равномерно заземленный и неветвящийся (или близок к таковому), то

$$P^x_0 = \frac{k}{4\pi}\left\{\int_{-\infty}^{0} Q_1 \frac{x_м}{r^3} + \int_{0}^{+\infty} Q_2 \frac{x_м}{r^3} + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \frac{x_м}{r^3} + \right.$$
$$\left. + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \frac{x_м}{r^3} + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \frac{x_м}{r^3} + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \frac{x_м}{r^3}\right\} dl\ , \qquad (8)$$

$$P_0^y = \frac{k}{4\pi}\left\{\int_{-\infty}^{0} Q_1 \frac{(y_м - l)}{r^3} + \int_{0}^{+\infty} Q_2 \frac{(y_м - l)}{r^3} + \right.$$
$$+ \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \frac{(y_м - l)}{r^3} + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \frac{(y_м - l)}{r^3} + \quad (8')$$
$$\left. + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \frac{(y_м - l)}{r^3} + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \frac{(y_м - l)}{r^3}\right\} dl,$$

$$G_0^y = \frac{k}{8\pi}\left\{\int_{-\infty}^{0} Q_1 \frac{x_м}{r^2} + \int_{0}^{+\infty} Q_2 \frac{x_м}{r^2} + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \frac{x_м}{r^2} + \right.$$
$$\left. + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \frac{x_м}{r^2} + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \frac{x_м}{r^2} + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \frac{x_м}{r^2}\right\} dl, \quad (9)$$

$$G_0^x = \frac{-k}{8\pi}\left\{\int_{-\infty}^{0} Q_1 \frac{y_м - l}{r^2} + \int_{0}^{+\infty} Q_2 \frac{y_м - l}{r^2} + \right.$$
$$+ \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \frac{y_м - l}{r^2} + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \frac{y_м - l}{r^2} + \quad (9')$$
$$\left. + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \frac{y_м - l}{r^2} + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \frac{y_м - l}{r^2}\right\} dl + J_x,$$

$$J_x = \frac{h}{4\pi(x_м^2 + h^2)}\left\{\frac{y_м(1 - l_0/L)}{(x_м^2 + y_м^2 + h^2)^{1/2}} - \right.$$
$$- \frac{(y_м - l_0)(1 - l_0/L)}{[x_м^2 + (y_м - l_0)^2 + h^2]^{1/2}} - \quad (9'')$$
$$- \frac{(y_м - l_0)(l_0/L)}{[x_м^2 + (y_м - l_0)^2 + h^2]^{1/2}} +$$
$$\left. + \frac{(y_м - L)(l_0/L)}{[x_м^2 + (y_м - L)^2 + h^2]^{1/2}}\right\}.$$

Математическое выражение для расчета теоретических значений этого параметра в случае горизонтально-однородного слоистого полупространства выглядит несколько иначе, а именно (Вишнев, 2010):

$$\rho_{k,mc}^i = \frac{\rho_1 \cdot P_{сл}^i}{P_0^i}, \ i = x, y, \quad (10)$$

где

$$P_{сл}^x = \frac{k}{4\pi}\left\{\int_{-\infty}^{0} Q_1 \lambda x_м + \int_{0}^{+\infty} Q_2 \lambda x_м + \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \lambda x_м + \right.$$
$$\left. + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \lambda x_м + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \lambda x_м + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \lambda x_м\right\} dl, \quad (10')$$

$$P_{сл}^y = \frac{k}{4\pi}\left\{\int_{-\infty}^{0} Q_1 \lambda(y_м - l) + \int_{0}^{+\infty} Q_2 \lambda(y_м - l) + \right.$$
$$+ \int_{-\infty}^{l_0} Q_3 \lambda(y_м - l) + \int_{l_0}^{+\infty} Q_4 \lambda(y_м - l) + \quad (10'')$$
$$\left. + \int_{-\infty}^{L} Q_5 \lambda(y_м - l) + \int_{L}^{+\infty} Q_6 \lambda(y_м - l)\right\} dl,$$

$$\lambda = \frac{1}{r^3} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n}{\left[r^2 + (2dn)^2\right]^{3/2}},$$

q_n – как и прежде, коэффициенты (эмиссии), характеризующие электрические свойства геологической среды; d – наибольшая общая мера глубин нижних границ пластов горизонтально-однородного слоистого (сл) полупространства.

При моделировании поведения параметра $\rho_{к,тс}$ над двухслойными разрезами коэффициенты q_n тождественны выражению:

$$q_n = \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}\right)^n,$$

при моделировании поведения $\rho_{k,тс}$ над многослойными разрезами рассчитываются по рекуррентным формулам. В случае, например, трехслойного разреза соответствующая рекуррентная формула имеет вид (Заборовский, 1963):

$q_{p2+m} = k_{12}q_{p2-p1+m} + k_{23}\cdot q_m - k_{12}\cdot k_{23}\cdot q_{p1+m}$,

где

$$k_{12} = \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}\right), \ k_{23} = \left(\frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2}\right),$$

ρ_1, ρ_2, ρ_3 – удельные электрические сопротивления пород первого, второго и третьего слоя; $p_1 = d_1/d$, $p_2 = d_2/d$, d_1 и d_2 – расстояния от дневной поверхности до подошвенных границ пластов; m = 1, 2, 3, …, $(n - p_2)$; n = 1, 2, 3, …, ∞; n – номера коэффициентов q_n.

Анализируя формулы (7–10''), замечаем, чтобы рассчитать ту или иную кривую $\rho_{к,тс}$, например экспериментальную, нужно, кроме полезных сигналов, знать еще значения параметров модели источника помех. К ним относятся: длина секции контактного провода (L), координата места изменения тяговой нагрузки электровозов (l_0) и

величина корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k = (r_р/r_п)^{1/2}$). В реальных условиях их можно регистрировать (в большинстве случаев) только приближенно. Значит, погрешности задания этих характеристик определяют будут ли кривые $\rho_{к,тс}$ отражать особенности геоэлектрического разреза или модельные несоответствия. Примерно то же можно сказать и о координатах пунктов наблюдения ($x_м$, $y_м$), так как отсчитываются они от осей, связанных с выбранной моделью источника.

Влияние наличия ошибок в рассматриваемых величинах на ход профильных распределений $\rho^{ij}_{к,тс}$ изучалось путем сравнения теоретических трехслойных, а также двухслойных, кривых, рассчитанных с точными и не точными значениями L, l_0, $x_м$, $y_м$ и k (рис. 1а, б; 2а, б).

В результате установлено (Вишнев, 2011):

1. Ошибки параметров модели источника полезного сигнала, выделяемого из импульсных помех от ЭЖД, действуют на кривые $\rho^{x}_{к,тс}(x)$ и $\rho^{y}_{к,тс}(x)$ неодинаково. Наиболее сильное влияние они оказывают на профильные распределения величины $\rho^{y}_{к,тс}(x)$.

2. Погрешностями параметра k искажаются (сравнительно сильно), в основном, левые ветви $\rho^{y}_{к,тс}(x)$ и (незначительно) правые части второй (от ЭЖД) трети профиля $\rho^{x}_{к,тс}(x)$, а погрешностями в L и l_0 – (сравнительно слабо) правые ветви $\rho^{y}_{к,тс}(x)$ и, соответственно, (также сравнительно слабо) левые и средние части аналогичной трети профиля $\rho^{x}_{к,тс}(x)$.

3. Для получения практически значимых кривых $\rho^{ij}_{к,тс}$ достаточно обеспечить: задание длины секции контактного провода (L) с ошибкой не более нескольких единиц процентов, задание координаты места изменения тяговой нагрузки электровозов (l_0) с ошибкой не более нескольких десятков – первых сотен метров, задание параметра k с ошибкой примерно равной 10 %.

4. Неточности координат пунктов измерения $x_м$ и $y_м$ действуют на кривые $\rho^{ij}_{к,тс}(x)$ также неодинаково. Наиболее сильное влияние на профильные распределения величин $\rho^{x}_{к,тс}(x)$, $\rho^{y}_{к,тс}(x)$ оказывают погрешности координаты $x_м$.

5. Ошибками $\Delta x_м$ искажаются, в основном, левые ветви $\rho^{ij}_{к,тс}(x)$, ошибками $\Delta y_м$ – средние части ближней к ЭЖД трети расчетного профиля.

6. Для получения кондиционных кривых $\rho^{ij}_{к,тс}$ достаточно обеспечить: задание координаты $x_м$ с погрешностью до первых десятков метров, а координаты $y_м$ с погрешностью до 20 – 30 % (от ее действительного значения).

Из этого следует: если при регулярной сети наблюдения техногенного импульсного поля ЭЖД встретилось препятствие, мешающее разворачиванию электроразведочной аппаратуры, то соответствующий пункт измерения предпочтительно смещать параллельно преимущественному направлению рельсового пути. Причем величина смещения может достигать (иногда) нескольких сотен метров, практически не влияя (в случае горизонтально-однородного геоэлектрического разреза) на качество полевого материала.

7. Суммарное воздействие рассматриваемых ошибок на ход профильных распределений параметра кажущееся сопротивление имеет тенденцию уменьшения с удалением пунктов измерения от дороги (рис. 1, 2). Это объясняется тем, что максимальные искажения $\rho^{ij}_{к,тс}(x)$, обусловленные погрешностями $\Delta x_м$ и Δk, сосредоточены в областях, находящихся вблизи рельсового пути (рис. 1в, г, 2в, г). И распределения $\rho^{ij}_{к,тс}(x)$, даже при значительно больших значениях $\Delta x_м$ и Δk, чем номинальные (соответственно, 10–20 м и 10 %), можно уже с расстояний свыше 1 км от ЭЖД считать неискаженными (рис. 1а, б, в; 2а, б, в).

8. Выявленные требования к точности величин L, l_0, $x_м$, $y_м$ и k довольно мягки, независимы от типа (по крайней мере, слоистого) разреза и (при благоприятных условиях постановки метода БТ) вполне выполнимы.

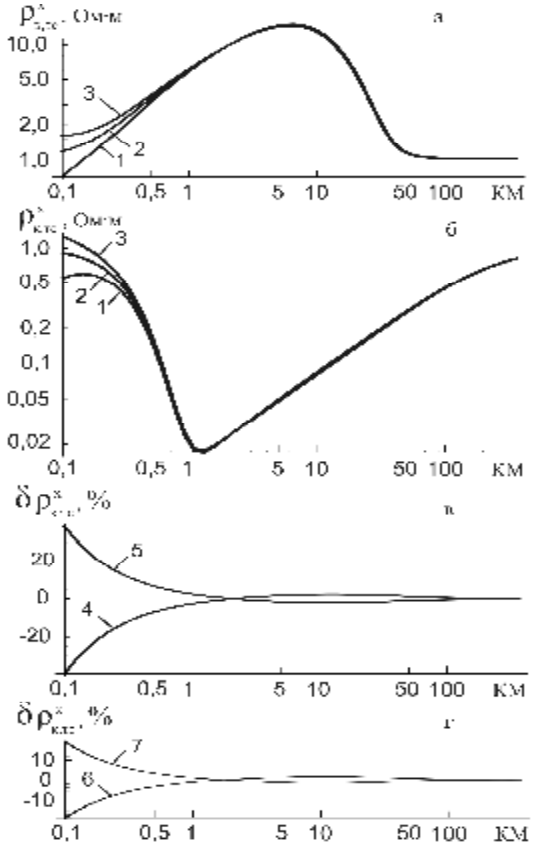


Рис. 1. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления $\rho^{x}_{к,тс} = (G^{y}_{р} / P^{x}_{р})\Delta E_{хр} / \Delta H_{ур}$ и графиков их погрешностей при ошибках задания длины секции контактного провода ($L \pm \Delta L$), координаты места изменении режимов энергопотребления электровозов ($l_0 \pm \Delta l$), корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k \pm \Delta k$) и координат пунктов наблюдения ($x_м + \Delta x$, $y_м + \Delta y$): а – трехслойный геоэлектрический разрез типа «*К*» (ρ_1 = 1 Ом·м, h_1 = 0,2 км, ρ_2=1000 Ом·м, h_2=0,3 км, ρ_3=1 Ом·м, h_3=∞ км), б – трехслойный геоэлектрический разрез типа «*Н*» (ρ_1 = 1 Ом·м, h_1=0,2 км, ρ_2=0,001 Ом·м, h_2=0,3 км, ρ_3=1 Ом·м, h_3= ∞ км); 1 – при ΔL=1 км, Δl = –100 м, Δk= –0,028 км$^{-1}$, Δx=-0,04 км, Δy= = –0,2 км, 2 – при ΔL=0 км, Δl=0 м, Δk=0 км$^{-1}$, Δx=0 км, Δy=0 км, 3 – при ΔL= –1 км, Δl=+100 м, Δk=+0,028 км$^{-1}$, Δx=0,04 км, Δy=0,2 км; в, г – графики относительных погрешностей значений $\rho^{x}_{к,тс}$: 4 – ΔL= = +1 км, Δl= –100 м, Δk= –0,028 км$^{-1}$, Δx = = –0,04 км, Δy= –0,2 км, 5 – ΔL= –1 км, Δl =+100 м, Δk=+0,028 км$^{-1}$, Δx=0,04 км, Δy=0,2 км, 6 – ΔL= = +1 км, Δl = –100 м, Δk = –0,014 км$^{-1}$, Δx = –0,02 км, Δy= –0,2 км, 7 – ΔL= –1 км, Δl=+100 м, Δk = = +0,014 км$^{-1}$, Δx = 0,02 км, Δy = 0,2 км. Параметры источника БТ и координаты точек расчета: $l_0 \pm \Delta l$ = 7,0±Δl км, $k \pm \Delta k$ = 0,14±Δk км$^{-1}$, $L \pm \Delta L$ = 20,0±ΔL км; x = 0,1 – 365 км, y = 5,0 км

Действительно, параметр L реальной модели источника полезного сигнала МЭПЖД с погрешностью до 2–2,5 % легко оценить с помощью топографической карты или плана; параметр l_0 с погрешностью до 10–100 м можно определить, фиксируя координаты мест торможения (остановки, ускорения, начала движения) поездов *GPS* – приемником либо используя ту же карту; параметр k с погрешностью до 10–20 % можно задать, сравнивая отношения ΔH_z к ΔH_x или (и) ΔH_z к ΔH_y, зарегистрированные, например, на базисном пункте и полученные для того же пункта путем расчетов, и т.д.

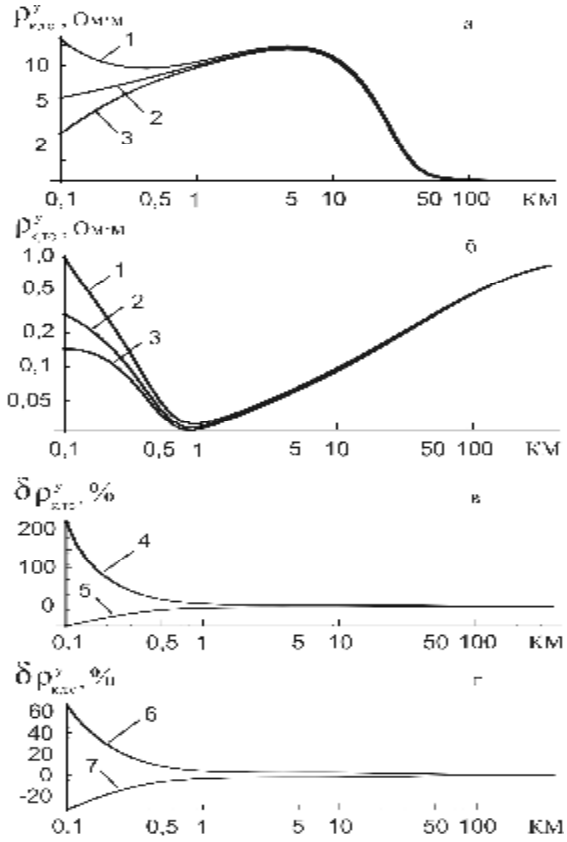


Рис. 2. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления $\rho^{y}_{к,тс} = (G^{x}_{р} / P^{y}_{р})\Delta E_{ур} / \Delta H_{хр}$ и графиков их погрешностей при ошибках задания длины секции контактного провода ($L \pm \Delta L$), координаты места изменении режимов энергопотребления электровозов ($l_0 \pm \Delta l$), корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k \pm \Delta k$) и координат пунктов наблюдения ($x_м + \Delta x$, $y_м + \Delta y$): а, б (1, 2, 3) – то же, что и на рис. 1; в, г – графики относительных погрешностей значений $\rho^{y}_{к,тс}$ (4, 5, 6, 7 – то же, что и на рис. 1)

4. ***Методика и техника полевых наблюдений, камеральная обработка и интерпретация в рассматриваемом варианте электроразведки***

Для регистрации техногенного импульсного поля ЭЖД хорошо подходит любая (серийно выпускаемая) цифровая или аналоговая многоканальная, широкополосная электроразведочная аппаратура. В том числе: магнитотеллурическая лаборатория МТЛ-71 Мытищинского приборостроительного завода, магнитотеллурическая станция GMS 06 фирмы *Metronix* (Германия), магнитотеллурическая станция V5-2000 MTU фирмы *Phoenix* (Канада), макет магнитотеллурической станции МТЦ-01 (разработка Института геофизики УрО РАН) и т.п.

В качестве вспомогательного оборудования, не входящего в комплект используемой станции, в отдельных случаях потребуются еще сравнительно точные наручные часы, или какой-либо другой хронометр, *GPS*-навигатор (по возможности) и, конечно, пикетажная книжка и журнал наблюдений.

Методика полевых работ в обсуждаемой разновидности электроразведки отличается от методики полевых работ стандартного варианта МБТ только тем, что базисный пункт располагают около такого отрезка рельсового пути, на котором изменение режима энергопотребления тяговых потребителей практически неизбежно. И тем, что регистрируют, наряду с электрическими составляющими, еще магнитные составляющие поля, координаты выбранного места, где электровозы изменяют свой режим энергопотребления, а также время, направление и особенности прохождения поездов (ускорение, остановка и т.п.) мимо базисного пункта. Причем координаты места изменения тяговой нагрузки электровозов, также как и координаты тяговых подстанций и пунктов наблюдения, можно определять инструментально, например, с помощью *GPS*-навигатора, а можно и снимать с топографической карты либо плана, используя визуальные ориентиры. В остальном она такая же, как в методе БТ или теллурических токов.

Обработка полевых материалов МЭПЖД включает в себя выделение однотипных по структуре источника (полезных) сигналов, пересчет их значений в величины $\rho_{к,тс}^{ij}$ и построение профильных либо площадных распределений параметров $\rho_{к,тс}^{\parallel}$, $\rho_{к,тс}^{\perp}$, где символы $\parallel$ и $\perp$ обозначают, соответственно, параллельное и перпендикулярное к (преимущественному простиранию) ЭЖД направление измерительной установки (*MN*) электрического поля. Предпочтительно также дополнять эти распределения графиками параметров $\gamma_{xy}=\Delta E_{xр}/\Delta H_{yд}$, $\gamma'_{yx}=\Delta E_{yр}/\Delta H_{xр}$, $\mu_{xx}=\Delta E_{xр}/\Delta E_{xд}$, $\phi_x = P_д^x \Delta E_{xр}/\Delta E_{xд}$ и т.п.

4.1. *Выделения полезных сигналов из промышленных помех от железной дороги*

а). *Критерии качества исходных импульсов.* В работе (Вишнев, 2003) отмечено, что возмущения техногенного поля, возникающие за счет изменений тяговой нагрузки электровозов, отличаются от сопутствующих возмущений специфической формой импульса, огромной амплитудой в пунктах, расположенных вблизи рельсового пути, и резким затуханием по мере удаления от ЭЖД. Иными словами, опознать перспективные для применения в электроразведке импульсы довольно просто. Однако входящие в них полезные компоненты могут превалировать над остальными, а могут быть и очень маленькими. Значит, использование всех импульсов, возникших при изменении тяговой нагрузки электровозов, проходящих мимо базисного пункта, на равных ведет к увеличению времени полевых работ или к ухудшению качества конечного результата. То есть зарегистрированные импульсы желательно подвергать селекции. Для обоснования критерия их разбраковки вспомним, что в любой точке стационарного по структуре источника поля отношения каких-либо взаимно перпендикулярных составляющих его напряженности (при разных токах) всегда одинаковы. То же, вероятно, должно быть и у импульсов со значительными полезными слагаемыми, только с некоторым раз-

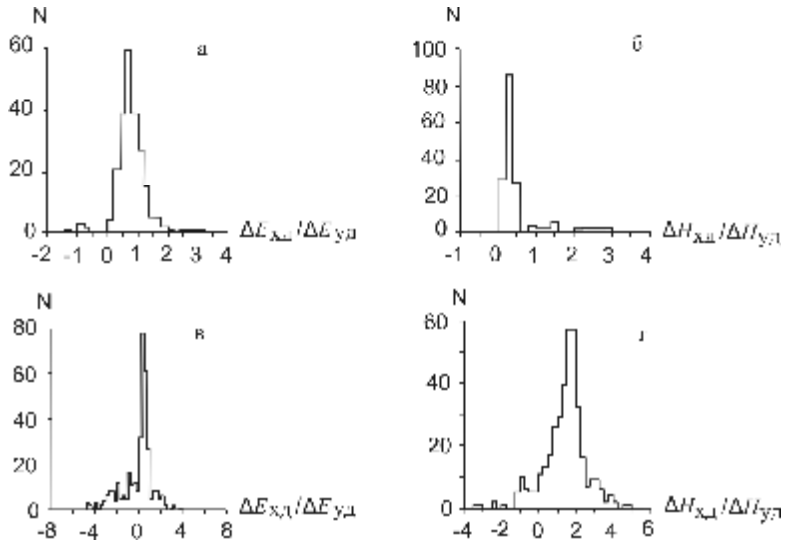


Рис. 3. Гистограммы отношений: а, в – $\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$; б, г – $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$; а, б – для базисного пункта участка 1; в, г – для базисного пункта участка 2 (N – количество, соответственно, значений $\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$ и значений $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$)

бросом. Проверим это на фактических материалах.

На рис. 3 изображены гистограммы отношений $\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$ и $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$, построенные по амплитудам импульсов поля ЭЖД, измеренным на базисных (д) пунктах двух различных участков местности (географическая привязка в разделе 5). Каждая из них характеризуется ясно выраженным одиночным максимумом. Естественно, появление этих экстремумов обусловлено повторением одних и тех же условий возбуждения какой-то части обработанных колебаний. Но допустить, что полезные слагаемые импульсов, входящих в максимумы соответствующих гистограмм, произошли за счет дублирования более сложной ситуации, чем многократное изменение режимов энергопотребления электровозов на одном, заранее обусловленном, отрезке пути, нельзя. Так как исходные материалы были получены на обоих участках работ в разное время суток, то есть при резко отличающихся сочетаниях и взаимных положениях поездов. Откуда вытекает: если отношения $\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$ или (и) $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$, ($\Delta H_{хд}/\Delta H_{zд}$ и др.) являются часто встречающимися, то соответствующие импульсы $\Delta E_{iр}$, $\Delta H_{jд}$, $\Delta E_{iд}$, $\Delta H_{jр}$ наиболее подходящие для выделения полезного сигнала метода ЭПЖД, если отношения $\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$, $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$ и т.п. попадают на боковые ветви своих гистограмм, то соответствующие $\Delta E_{iр}$, $\Delta H_{jд}$, $\Delta E_{iд}$, $\Delta H_{jр}$ содержат сравнительно малые полезные слагаемые и их, по возможности, лучше отбраковать.

Таким образом, критериями качества импульсов поля ЭЖД, пригодных для использования в электроразведке, могут служить величины отношений взаимно перпендикулярных составляющих их амплитуд, измеренных в базисном пункте наблюдения, причем наиболее предпочтительными, как выявлено при математическом моделировании (Вишнев, 2007), являются отношения $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$ и $\Delta H_{хд}/\Delta H_{zд}$.

б). *Приемы, позволяющие извлекать полезные сигналы из помех от ЭЖД.* Из выше изложенного вытекает, что для выделения однотипных по структуре источника сигналов при электрической разведке недр блуждающими токами тяговой сети ЭЖД нужно:

1). Осуществить рекогносцировку ближайшего к участку геофизических работ отрезка рельсового пути и выбрать одно из мест, где электровозы вынуждены изменять свой режим энергопотребления.

2). Развернуть около него базисный пункт, оборудованный средствами регистрации, по возможности всех пяти составляющих напряженности электромагнитного поля, а также средствами слежения за временем, направлением и особенностями прохождения поездов по выбранному отрезку пути.

3). Произвести синхронно с измерениями в базисном (д) пункте съемку поля ЭЖД в каждом рядовом (р) пункте. При

этом в качестве электроразведочной аппаратуры можно использовать два, три комплекта любой магнитотеллурической станции, например V5-2000 MTU фирмы *Phoenix* (Канада), осуществляя слежение за поездами визуально и отмечая время, а также особенности (остановка, ускорение и т.п.) их движения в полевом журнале с помощью наручных часов или какого-либо прочего хронометра.

4). Выполнить корреляцию данных регистрации поля базисного и каждого рядового пунктов.

5). Выделить импульсы, возникшие во время прохождения поездов по выбранному месту дороги, и снять их амплитуды.

6). Рассчитать отношения $\Delta H_{xд}/\Delta H_{yд} = \eta_{xy}$ или $\Delta E_{xд}/\Delta E_{yд} = \mu_{xy}$, $\Delta H_{xд}/\Delta H_{zд} = \eta_{xz}$ и т.п.

7). Построить гистограммы величин η_{xy} или (и) μ_{xy}, η_{xz} и др.

8). Определить интервалы наиболее часто встречающихся значений η_{xy} и пр.

9). Отбраковать импульсы, соответствующие отношениям составляющих поля, не входящим в экстремумы упомянутых гистограмм.

10). Построить графики $\Delta E_{xр}(\Delta H_{yд})$, $\Delta E_{yр}(\Delta H_{xд})$, $\Delta E_{xр}(\Delta H_{yр})$, $\Delta E_{xр}(\Delta E_{xд})$ и др.

11). Снять тангенсы углов наклона к осям абсцисс прямых $\Delta E_{xр}(\Delta H_{yд})$, $\Delta E_{yр}(\Delta H_{xд})$, $\Delta E_{xр}(\Delta H_{yр})$, $\Delta E_{xр}(\Delta E_{xд})$ и т.п., которые (если учтены соответствующие размерные единицы) и будут искомыми полезными сигналами.

4.2. *Пересчет полезных сигналов в значения параметров* $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel}_{к,тс}$

а). *Задание модели источника поля БТ.* Для задания модели источника поля БТ ЭЖД следует взять соответствующий топографический планшет (масштаба не мельче чем 1:100 000), обозначить на нем нужный отрезок рельсового пути и используемые тяговые подстанции, нанести сеть измерений, провести из области подстанции А в область подстанции В прямую, причем так, чтобы выбранное место изменения тяговой нагрузки электровозов находилось как можно ближе к ней (или непосредственно на ней), снести отмеченные тяговые подстанции и гипотетический пункт изменения режимов энергопотребления электровозов на эту прямую, которая (после присвоения параметрам L, l_0, k надлежащих номиналов) и будет моделью источника полезного сигнала метода ЭПЖД.

б). *Определение значений величин L, l_0, k и координат пунктов измерения. Расчет параметра* $\rho_{к,тс}$. Величины L, l_0 и координаты пунктов наблюдения $x_м$, $y_м$, $x_д$, $y_д$ проще всего определять графически, снимая их с рабочего планшета относительно осей координат, связанных с выбранной моделью ЭЖД, то есть с началом в точке, изображающей подстанцию А, осью y, направленной вдоль линии АВ, имитирующей рельсовый путь, осью z – вниз.

Параметр k можно найти методом подбора, сравнивая отношения $\Delta H_{xд}/\Delta H_{yд}$ или (и) $\Delta H_{zд}/\Delta H_{jд}$, полученные по экспериментальным данным и рассчитанные по формулам 2–5', либо задать, исходя из анализа степени изношенности рельсового пути, погодных условий проведения полевых работ, вещественного состава балласта и погонного сопротивления рельса. В случае летнего сезона это будет число, лежащее в интервале 0,07 – 0,28 км$^{-1}$ (Вишнев, 2011).

Вычисление значений $\rho^{\parallel}_{к,тс}$, $\rho^{\perp}_{к,тс}$ удобно производить на персональном компьютере, предварительно запрограммировав формулы (7–9''), используя, например, пакет программ компьютерной математики – Mathematica 7. При этом если исходными являются сигналы $\Delta E_{xр}/\Delta H_{yд}$, $\Delta E_{yр}/\Delta H_{xд}$, то в математические выражения (9–9'') надо подставлять координаты x, y базисного пункта ($x_м=x_д$, $y_м=y_д$), если исходными являются сигналы $\Delta E_{xр}/\Delta H_{yр}$, $\Delta E_{yр}/\Delta H_{xр}$, то в выражения (9–9''), как и в выражения (8–8') (в обоих случаях), надо подставлять координаты $x_м$, $y_м$ соответствующего рядового пункта.

в). *Информационные параметры метода ЭПЖД.* В усовершенствованном варианте МБТ, в связи с возможностью выделения однотипных по структуре источника сигналов и измерения магнитных составляющих поля в рядовых и базисном пунктах съемки, имеется расширенный ассорти-

мент интерпретационных параметров. К ним относятся:

$$\rho^{\perp}_{\text{к,тс}} = \frac{G^{y}_{\text{д}}}{P^{x}_{\text{р}}}\frac{\Delta E_{x\text{р}}}{\Delta H_{y\text{д}}}, \qquad \rho^{\parallel}_{\text{к,тс}} = \frac{G^{x}_{\text{д}}}{P^{y}_{\text{р}}}\frac{\Delta E_{y\text{р}}}{\Delta H_{x\text{д}}},$$

$$\rho^{\perp'}_{\text{к,тс}} = \frac{G^{y}_{\text{р}}}{P^{x}_{\text{р}}}\frac{\Delta E_{x\text{р}}}{\Delta H_{y\text{р}}}, \qquad \rho^{\parallel'}_{\text{к,тс}} = \frac{G^{x}_{\text{р}}}{P^{y}_{\text{р}}}\frac{\Delta E_{y\text{р}}}{\Delta H_{x\text{р}}},$$

$$\phi_x = P^{x}_{\text{д}}\frac{\Delta E_{x\text{р}}}{\Delta E_{x\text{д}}}, \quad \phi_y = P^{y}_{\text{д}}\frac{\Delta E_{y\text{р}}}{\Delta E_{y\text{д}}} \quad q_x = G^{y}_{\text{д}}\frac{\Delta E_{x\text{р}}}{\Delta H_{y\text{д}}}$$

$$q_y = G^{x}_{\text{д}}\frac{\Delta E_{y\text{р}}}{\Delta H_{x\text{д}}}, \quad q'_x = G^{y}_{\text{р}}\frac{\Delta E_{x\text{р}}}{\Delta H_{y\text{р}}}, \quad q'_y = G^{x}_{\text{р}}\frac{\Delta E_{y\text{р}}}{\Delta H_{x\text{р}}},$$

а также $\gamma_{xy} = \Delta E_{x\text{р}}/\Delta H_{y\text{д}}$, $\gamma_{yx} = \Delta E_{y\text{р}}/\Delta H_{x\text{д}}$, $\gamma'_{xy} = \Delta E_{x\text{р}}/\Delta H_{y\text{р}}$, $\gamma'_{yx} = \Delta E_{y\text{р}}/\Delta H_{x\text{р}}$, $v_{xx} = \Delta E_{x\text{р}}/\Delta E_{x\text{д}}$, $v_{yy} = \Delta E_{y\text{р}}/\Delta E_{y\text{д}}$ и т.п., где $\rho^{\perp}_{\text{к,тс}}$ – кажущееся сопротивление геоэлектрического разреза по измерениям линией *MN*, перпендикулярной, $\rho^{\parallel}_{\text{к,тс}}$ – кажущееся сопротивление по измерениям линией *MN*, параллельной преимущественному направлению дороги. Причем, величины $\rho^{\perp}_{\text{к,тс}}$, $\rho^{\parallel}_{\text{к,тс}}$, $\rho^{\perp'}_{\text{к,тс}}$, $\rho^{\parallel'}_{\text{к,тс}}$, ϕ_x, ϕ_y, q_x, q_y, q'_x, q'_y зависят от точности определения параметров модели источника поля, а – $\gamma_{xy}=\Delta E_{x\text{р}}/\Delta H_{y\text{д}}$, $\gamma_{yx}=\Delta E_{y\text{р}}/\Delta H_{x\text{д}}$, $\gamma'_{xy}=\Delta E_{x\text{р}}/\Delta H_{y\text{р}}$, $\gamma'_{yx}=\Delta E_{y\text{р}}/\Delta H_{x\text{р}}$, $v_{xx}=\Delta E_{x\text{р}}/\Delta E_{x\text{д}}$, $v_{yy}=\Delta E_{y\text{р}}/\Delta E_{y\text{д}}$ – от точности задания значений L, l_0 и k, а также от точности определения (относительно преимущественного направления ЭЖД) координат $x_{\text{м}}$, $y_{\text{м}}$, не зависят. Значит, по результатам сравнения особенностей хода первых и вторых распределений можно судить о степени соответствия выбранной модели самому источнику.

4.3. *Интерпретация*

Интерпретация полевых материалов в методе ЭПЖД в отличие от стандартного варианта МБТ может выполняться как на качественном, так и на количественном уровне. Она осуществляется с помощью тех же приемов, что и в других методах сопротивления, например, машинным подбором, соответствующего кривым $\rho^{\perp}_{\text{к,тс}}$ или (и) $\rho^{\parallel}_{\text{к,тс}}$, геоэлектрического разреза и т.д. При этом для изучения распределения электропроводности горных пород по вертикали (на количественном уровне) лучше подходят параметры типа $\rho^{\perp}_{\text{к,тс}}$ и q_x, по горизонтали – параметры типа $\rho^{\parallel}_{\text{к,тс}}$ и q_y. Данное утверждение обосновывается тем, что величины $\rho_{\text{к,тс}}$ и q контролируются двумя действующими разносами. Один из них определяется расстояниями между положительными и отрицательными полюсами источника, другой – расстояниями от пункта измерения до точек стекания (натекания) тока рельсового пути. Первый разнос (особенно в ближних к ЭЖД точках местности) оказывает большее влияние на распределения параметров $\rho^{\parallel}_{\text{к,тс}}$ и q_y, второй – параметров $\rho^{\perp}_{\text{к,тс}}$ и q_x, за счет чего нормальные кривые $\rho^{\perp}_{\text{к,тс}}$, например трехслойные, рельефнее, чем $\rho^{\parallel}_{\text{к,тс}}$ (Вишнев, 1989).

В остальном приемы интерпретации в методе ЭПЖД ни чем не отличаются от аналогичных приемов других полевых электроразведочных методов.

5. *Экспериментальное опробование усовершенствованной модификации МБТ*

В связи с тем, что метод ЭПЖД пока не вышел на стадию производственного применения, а ресурсы его разработчиков весьма ограничены, на настоящий период времени известны только три полевых эксперимента с частичным использованием изложенных выше технологических приемов (Вишнев, 1989, 2003, Вишнев, Дьяконова, Хачай, 1995). Так как работоспособность этих приемов можно подтвердить только практическими материалами, приведем результаты двух наиболее показательных экспериментов еще раз с некоторыми незначительными изменениями и критическими замечаниями.

5.1. *Опытные работы в районе Уральской сверхглубокой скважины* СГС-4. Уральская сверхглубокая скважина СГС-4 находится примерно в 5 км на запад от г. Верхняя Тура Свердловской области (рис. 4), на территории Тагильского мегасинклинория, сложенного, в основном, вулканогенно-осадочными породами – продуктами силурийского и девонского возраста.

Изучаемый массив горных пород изобилует тектоническими нарушениями, глубокими карманами наносов и прочими неоднородностями. Геоэлектрический разрез в целом высокоомный (Савельев, Дьяконо-

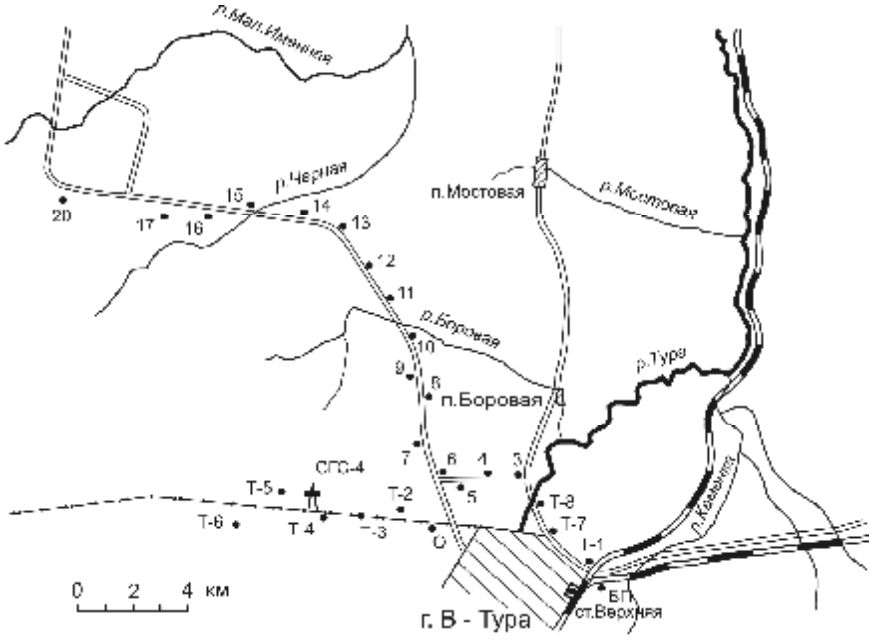


Рис. 4. Схема сети наблюдений на участке 1. БП – базисный пункт, СГС-4 – Уральская сверхглубокая скважина, затемненные кружки – пункты наблюдения

ва, Вишнев, 1988). Рельеф слабохолмистый, с немногочисленными выходами скальных пород на дневную поверхность, местами заболоченный. Участок геофизических работ (участок 1) почти со всех сторон окружен электрическими железнодорожными ветками. Рельсовый путь извилистый и разветвленный.

Помехи от ЭЖД наблюдались одновременно тремя комплектами МТЛ-71. С помощью одного из них велись измерения в точке, расположенной около подъездных путей станции Верхняя (базисный пункт), с помощью остальных – близ километровых столбов автодороги г. Верхняя Тура – пос. Арбатский (бывший) и вдоль ЛЭП, идущей на ст. Чекмень (рядовые пункты).

Особенности движения поездов по выбранному отрезку пути фиксировались визуально и заносились в полевой журнал в виде записей: 14 ч 32 мин – электропоезд с юга ускоряется или 19 ч 41 мин 25 с – Э с севера замедляется и т.п.

Синхронизация измерений на рядовых и базисном пунктах осуществлялась с помощью сигналов точного времени радиовещательной станции «Маяк» и контактных хронометров МТЛ-71. Привязка точек наблюдения была картографической.

Обработка экспериментальных данных заключалась в следующем. Сверяли осциллографические записи поля базисного и соответствующего рядового пунктов. По меткам хронометров и радиостанции «Маяк», а также сведениям об особенностях движения тяговых потребителей, зафиксированным в полевом журнале, выделяли участки регистрации, совпадающие по времени с прохождением поездов по выбранному отрезку вынужденного изменения тяговой нагрузки электровозов. Находили импульсы, возникшие в это время. Снимали амплитуды ΔE_{ip}, $\Delta H_{jд}$, $\Delta E_{iд}$, ΔH_{jp}, Вычисляли их отношения и анализировали. Оказалось, что все они, если не произвести какую-либо разбраковку, имеют огромные (до трех – четырех порядков) разбросы, но усредненные распределения $\Delta E_{ip}/\Delta H_{jд}$, $\Delta E_{ip}/\Delta E_{jд}$ вдоль профиля наблюдения в общих чертах сходны между собой, а отношения $\Delta H_{xд}/\Delta H_{уд}$, $\Delta E_{xд}/\Delta E_{уд}$ нередко повторяются. Причем, часто встречающиеся $\Delta H_{xд}/\Delta H_{уд}$, $\Delta E_{xд}/\Delta E_{уд}$ являются такими, к которым стремятся средние значения этих величин.

На основании выявленных закономерностей был выполнен отбор исходных импульсов (рис. 3а, б; 5а, б) и построены графики зависимостей:
$V(R)=R^2\Delta E_{гр}/\Delta H_{гд}$, $W(R)=R^2\Delta E_{гр}/\Delta E_{гд}$,
$\rho_{к,тс}(R) = (G_д^г / P_р^г)\Delta E_{гр}/\Delta H_{гд}$ при $\Delta H_{xд}/\Delta H_{уд} =$ $=0{,}3 \pm 0{,}1$, $\Delta E_{xд}/\Delta E_{уд} = 0{,}85 \pm 0{,}15$ (рис. 5в), где R – расстояние пункта наблюдения от преимущественного направления ЭЖД, г –

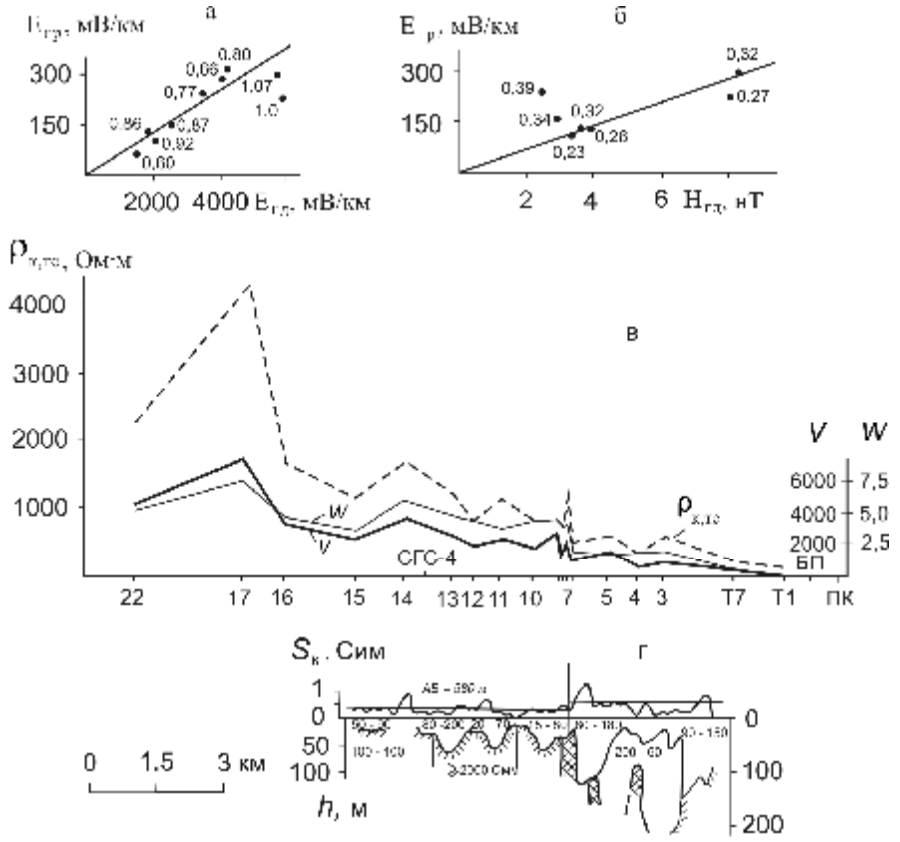


Рис. 5. Результаты полевых работ на участке 1: а – графики $\Delta E_{гр}/\Delta E_{гд}$ (цифры у точек – отношения $\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$); б – графики $\Delta E_{гр}/\Delta H_{гд}$ (цифры у точек – отношения $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$); в – распределения значений W, V и $\rho_{к,тс}$, принадлежащих пунктам измерения, снесенным на перпендикулярный преимущественному направлению ЭЖД профиль; г – кривая кажущейся продольной проводимости и геоэлектрический разрез, построенный по материалам ВЭЗ

символ проекций векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ на касательную к земной поверхности «горизонтальную» плоскость.

Сопоставление профильного хода V, W, $\rho_{к,тс}$ с аналогичным ходом кривой кажущейся продольной проводимости $S_к$ (рис. 5г), полученной по материалам вертикального электрического зондирования производственной организацией ранее (Глушков и др., 1985), показало:

1). Все четыре распределения довольно хорошо согласуются между собой, то есть как по графикам V, W, $\rho_{к,тс}$, так и по кривой $S_к$ можно выделить, например, границу блоков геологических образований с относительно повышенным и относительно пониженным электрическим сопротивлением.

2). Несмотря на сильную изрезанность, распределение $\rho_{к,тс}$ испытывает с удалением от ЭЖД все возрастающее одностороннее отклонение от оси абсцисс, что обусловлено, по-видимому, наличием под проводящими поверхностными рыхлыми образованиями весьма неоднородного, но, в целом, высокоомного фундамента консолидированных пород.

3). Геоэлектрический разрез (рис. 5г) не противоречит характерному ходу кривой $\rho_{к,тс}$.

Таким образом, выводы о возможности выделения из электрических помех от тяговой сети ЭЖД однотипных по структуре источника сигналов, а также соображения о преимуществах нормировки $\Delta E_{iр}$ к $\Delta H_{jд}$ или к $\Delta H_{jр}$, а не к $\Delta E_{jд}$, как в стандартном варианте МБТ, экспериментально подтвердились.

Однако интерпретировать полученные данные количественно, вероятно, нельзя, так как используемый отрезок ЭЖД очень сложный, базисный пункт расположен непосредственно у дороги, а измерения ΔH_z (по близко расположенному к железнодорожному полотну профилю), позволяющие определять интенсивность токов утечки с различных точек рельсового пути, не проводились. То есть структура источника при расчете рассматриваемой кривой $\rho_{к,тс}$, если и учтена, то только в первом приближении. Чего явно недостаточно.

5.2. *Пример постановки* МЭПЖД *в благоприятных условиях применения*



Рис. 6. Схема сети наблюдений на участке 2:
1 – Остановочный пункт 2102 км, 2 – точки измерения помех от ЭЖД, 3 – буровые скважины, 4 – пункты МТЗ

Участок работ (участок 2) находился в Зауралье, приблизительно в 17 км на восток от районного центра Тугулым Свердловской обл., у магистрали Екатеринбург – Тюмень (рис. 6). Рельеф местности там равнинный. Железнодорожная ветка почти прямолинейная. Разветвления путей вблизи профиля наблюдений отсутствуют. Геоэлектрический разрез верхних горизонтов довольно выдержанный и, в целом, весьма низкоомный (Краснобаева, Вишнев, Руднева, 1972). Полевые и камеральные работы велись в основном так, как рекомендовано в предыдущих разделах. Эксперимент выполнялся с целью проверки возможности использования помех от ЭЖД для изучения распределения электропроводности горных пород по вертикали. Результаты показали:

1). В точках, находящихся примерно на равных расстояниях по обе стороны от рельсов, значения соответствующих $\rho_{к,тс}$ по порядку величин совпадают (рис. 7а, б, 7г, д). Что обусловлено, по-видимому, присутствием довольно мощного и сравнительно однородного по простиранию низкоомного осадочного чехла и горизонтально-неоднородного, но в совокупности слабо проводящего фундамента коренных пород погребенной части уральских структур.

2). Графики $\rho^{\perp}_{к,тс}(x) = (G^y_д / P^x_р)\Delta E_{хр} / \Delta H_{уд}$ и $\rho^{\parallel}_{к,тс}(x) = (G^x_д / P^y_р)\Delta E_{ур} / \Delta H_{хд}$, равно как $\rho^{\perp'}_{к,тс}(x) = (G^y_р / P^x_р)\Delta E_{хр} / \Delta H_{ур}$ и $\rho^{\parallel'}_{к,тс}(x) = (G^x_р / P^y_р)\Delta E_{ур} / \Delta H_{хр}$, имеют заметные различия. Если $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\perp'}_{к,тс}$, построенные на билогарифмическом бланке, с увеличением x довольно быстро растут, приближаясь в средней части к асимптоте S (S–суммарная продольная проводимость горных пород осадочного чехла изучаемого геоэлектрического разреза), то $\rho^{\parallel}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel'}_{к,тс}$ колеблются около линии, почти параллельной оси абсцисс. То есть ход кривых $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\perp'}_{к,тс}$ в большей степени отражает изменение электропроводности земных толщ по вертикали, а $\rho^{\parallel'}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel}_{к,тс}$ – по горизонтали.

3). Распределения $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel}_{к,тс}$ (рис. 7а), особенно в своих начальных частях, значительно плавнее $\rho^{\perp'}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel'}_{к,тс}$ (рис. 7г), что, очевидно, объясняется меньшей степенью влияния на величины $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel}_{к,тс}$ ошибок выделения полезных сигналов, ошибок привязки пунктов наблюдения и пр., чем на $\rho^{\perp'}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel'}_{к,тс}$. Значит, графики $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel}_{к,тс}$, по крайней мере, в обсуждаемом случае предпочтительнее графиков $\rho^{\perp'}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel'}_{к,тс}$.

Кривые $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\perp'}_{к,тс}$ были проинтерпретированы количественно (рис. 7в) с помощью метода подбора на ЭВМ при предположении дискретного изменения электропроводности горных пород и только по оси глубин (z). Их поведение согласуется с двухслойной средой, имеющей параметры: ρ_1 = 1–3 Ом·м, h_1 = 0,5–1,0 км, ρ_2 = = 1000–3000 Ом·м, $h_2 = \infty$, которые вполне вероятны, что подтверждается данными интерпретации кривых МТЗ (рис. 7е), полученных на участке работ ранее (до электрификации железнодорожной ветки Екатеринбург – Тюмень). Так как средние значения продольной проводимости осадочного чехла (S_l), как по МТЗ, так и по МЭПЖД, практически одинаковы и составляют 300–500 См (Краснобаева, Вишнев, Руднева, 1972).

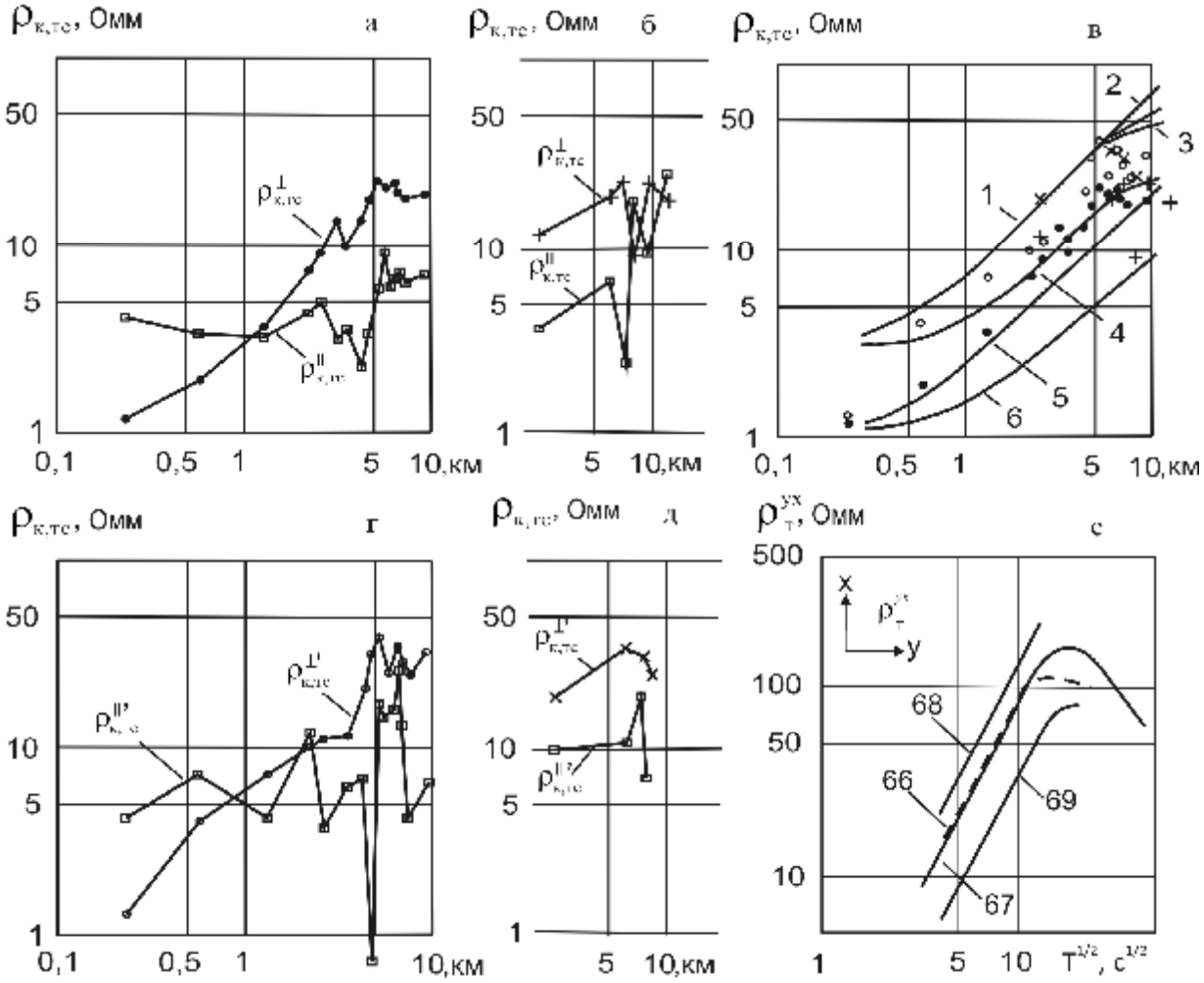


Рис. 7. Результаты полевых работ на участке 2: а, б – кривые $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel}_{к,тс}$; г, д – $\rho^{\perp'}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel'}_{к,тс}$; а, г – южный профиль; б, д – северный профиль; в – пример количественной интерпретации распределений $\rho^{\perp}_{к,тс}$ и $\rho^{\perp'}_{к,тс}$ (цифры у кривых – номера геоэлектрических разрезов с параметрами: 1 – ρ_1= 3 Ом·м, h_1 = 0,5 км, ρ_2 = 3000 Ом·м, h_2 = 2,0 км, ρ_3 = 30 Ом·м, h_3 = ∞ км; 2 – ρ_1 = 3 Ом·м, h_1 = =0,5 км, ρ_2 = 3000 Ом·м, h_2 = ∞ км; 3 – ρ_1 = 3 Ом·м, h_1 = 0,5 км, ρ_2 = 1000 Ом·м, h_2 = 2,0 км, ρ_3 = =30 Ом·м, h_3 = ∞ км; 4 – ρ_1 = 3 Ом·м, h_1 = 1,0 км, ρ_2 = 1000 Ом·м, h_2 = 2,0 км, ρ_3 = 100 Ом·м, h_3 = = ∞ км; 5 – ρ_1 = 1 Ом·м, h_1 = 0,5 км, ρ_2 = 3000 Ом·м, h_2 = 2,0 км, ρ_3 = Ом·м, h_3 = ∞ км; 6 – ρ_1 =1 Ом·м, h_1 = 1,0 км, ρ_2 = 3000 Ом·м, h_2 = ∞км); е – поперечные кривые магнитотеллурического зондирования (цифры у кривых – номера точек наблюдения)

Таким образом, метод ЭПЖД можно уже при современном состоянии развития успешно использовать при изучении геоэлектрического разреза по вертикали. Кроме того, если внимательно присмотреться к кривым $\rho^{\parallel}_{к,тс}$ и $\rho^{\parallel'}_{к,тс}$, то легко догадаться, что рассматриваемая модификация электроразведки позволяет картировать геологические неоднородности под очень большим слоем наносов.

Заключение

Из вышеизложенного следует:

1. Выделение однотипных по структуре источника сигналов из совокупности измерений импульсных помех от ЭЖД и представление их в виде распределений параметра кажущееся сопротивление являются вполне осуществимыми и весьма полезными методическими приемами. Эти приемы позволяют (по крайней мере, при стечении благоприятных обстоятельств) получать в

рамках метода блуждающих токов материалы, пригодные как для качественной, так и для количественной интерпретации.

2. Использование кривых $\rho_{к,тс}$ должно, вероятно, привести в дальнейшем к значительному расширению круга производственных задач, решаемых с помощью МБТ. К их числу надо, очевидно, в первую очередь отнести мониторинг состояния грунтов под крупными инженерными сооружениями, прилегающими к ЭЖД, включая и особо опасные участки самой дороги, так как применение других методов электроразведки там сопряжено с большими трудностями. Однако для достижения поставленной цели необходимо в ближайший отрезок времени разработать алгоритмы расчета различных составляющих используемого в МЭПЖД полезного сигнала в присутствии в моделях геоэлектрических разрезов хотя бы простейших по форме локальных неоднородностей. Что на современном этапе развития метода вполне осуществимо.

Работа выполнена (частично) при финансовой поддержке УрО РАН конкурсной программы № 09-Т-5-1024.

Литература

Березин Г.И., Семенов М.В. Об использовании полей блуждающих токов для электроразведки флангов разрабатываемых месторождений // Методика и техника разведки. 1973. № 86. С. 69–76.

Вишнев В.С. Об использовании поля тяговой сети электрической железной дороги для электрозондирования // Электрометрические исследования на Урале: Сборник. Ин-т геофизики Уро РАН. Свердловск, 1989. С. 2–27. – Рукопись деп. в ВИНИТИ № 4380–В89.

Вишнев В.С. О методике оценки тока утечки рельсов по данным измерения техногенного поля тяговой сети железной дороги // Теория и практика геоэлектрических исследований. Екатеринбург, 2000. Вып. 2. С. 129–134.

Вишнев В.С. Некоторые характеристики техногенного электромагнитного импульсного поля тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. 2003. № 5. С. 16–23.

Вишнев В.С. Результаты математического моделирования электроразведочного сигнала, выделяемого из импульсных помех от тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. 2007. № 2, 3 (11, 12). С. 35–47.

Вишнев В.С. Определение кажущегося сопротивления слоистой среды в методе блуждающих токов // Уральский геофизический вестник. 2010. № 1. С. 10–16.

Вишнев В.С. Трехслойные кривые кажущегося сопротивления в методе блуждающих токов при неточном задании параметров источника // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 15–22.

Вишнев В.С., Дьяконова А.Г., Хачай О.А. Опыт электрозондирования верхней части земной коры Урала полем тяговой сети электрифицированной железной дороги // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 12. С. 122–127.

Гамоян В.Б. Основы электроразведки методом блуждающих токов: Дис…. д-ра геол.- мин. наук. Свердлрвский горный ин-т. Свердловск, 1989. 386 с.

Глушков А.Н., Григорьева А.Г. и др. Отчет Красноуральской геолого-съемочной партии по групповому геологическому доизучению масштаба 1:50000 Красноуральской площади в пределах листов О-40-60-3, Р; О-40-72-А, Б; О-41-49-А, В; О-41-61-А, проведенному в 1978–1984 гг. 1985. (Фонды ПГО «Уралгеология»).

Заборовский А.И. Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1963. 423 с.

Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 352 с.

Краснобаева А.Г., Вишнев В.С., Руднева Т.Л. Геоэлектрическое строение верхней мантии по профилю Красноуфимск–Омск // Мат-лы междунар. семинара. Прага, 1972. С. 313–320.

Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965. 464 с.

Савельев А.А., Дьяконова А.Г., Вишнев В.С. Новые данные об электропроводности земной коры Среднего Урала // ДАН СССР. 1988. Т. 300. № 2. С. 334–337.