

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ В МЕТОДЕ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

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

**Аннотация.** Приведены математические выражения, позволяющие трансформировать данные измерений электромагнитных импульсных помех от тяговой сети железной дороги в значения кажущегося сопротивления ( $\rho_{k,mc}$ ). Представлены формулы, пригодные для моделирования поведения различных распределений этого параметра на поверхностях горизонтально-однородных геоэлектрических разрезов. Выполнены расчеты ряда двухслойных и трехслойных кривых  $\rho_{k,mc}$ .

*Электромагнитные помехи, «полезный» сигнал, железная дорога, кажущееся сопротивление, геоэлектрический разрез.*

## DEFINITION OF APPARENT RESISTANCE OF THE LAYERED ENVIRONMENT IN THE METHOD OF WANDERING CURRENTS

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

**Abstract.** There are some mathematical expressions allow to transform measurements electromagnetic noise spikes from draft-grid of railway in values of apparent resistances ( $\rho_{k,mc}$ ). Represent formulas suitable for modulation of various distributions of this parameter above horizontal-homogeneous geoelectrical sections. Calculations of some two-layers and three-layers curves carried out.

*Electromagnetic interference, «desired» signal, rail, apparent resistance, ca, geoelectric section.*

### Введение

Техногенное электрическое поле тяговой сети железной дороги используется, как известно, в методе блуждающих токов (МБТ), являясь при постановке других модификаций электроразведки сильнейшей помехой. В стандартном варианте МБТ результаты обработки экспериментальных материалов представляют, обычно, в виде графиков параметра

$$\psi(x, y) = \frac{E(\Delta t)_p}{E(\Delta t)_d},$$

где  $E(\Delta t)_p$ ,  $E(\Delta t)_d$  – изменения напряженности поля за время  $\Delta t$ , соответственно, в подвижной (рядовой) и неподвижной (долговременной или базисной) приемной линии;  $x$ ,  $y$  – координаты пункта наблюдения (Инструкция по электроразведке, 1984). Однако, профильные и площадные распределения  $\psi(x, y)$  во многих случаях производства геофизических исследований не отвечают требованиям практики электроразведки, т.к. не пригодны для количественного истолкования. Чтобы выявить более подходящий интерпретационный параметр метода БТ, нами были осуществ-

лены соответствующие теоретические и экспериментальные изыскания (Вишнев, 1989; 2003; 2007; Вишнев, Дьяконова, Хачай, 1995). Их результаты (кратко) сводятся к следующему:

- из совокупности измерений аperiodических импульсных помех, наводимых электрической железной дорогой (ЭЖД), можно выделять однотипные по морфологии пространственного распределения («полезные») сигналы;
- источник получаемых сигналов достаточно простой и, если использовать только квазиустановившуюся часть их амплитуд, легко поддается математическому описанию;
- электрические составляющие импульсного поля тяговой сети ЭЖД зависят от физических свойств (подстилающего рельсовые пути) геологического разреза, а магнитные (особенно в близко расположенных к железнодорожному полотну пунктах местности) практически от них не зависят.

На основании вышеизложенного нетрудно прийти к выводу: «полезные» сигналы, выделяемые из импульсных помех

от ЭЖД, поддаются пересчету в величины (обозначим их буквосочетанием  $\rho_{k,mc}$ ,  $mc$  – тяговая сеть) близкие по смыслу параметру  $\rho_k$  (кажущееся сопротивление), широко используемому во многих методах электро-разведки.

Статья посвящена обоснованию математических операций, преобразующих профильные распределения техногенного импульсного поля ЭЖД в кривые  $\rho_{k,mc}$ , и выяснению основных закономерностей поведения этих кривых в случаях горизонтально-однородных геоэлектрических разрезов.

**Расчетные формулы экспериментальных значений  $\rho_{k,mc}$**

Вывод математических выражений, пригодных для пересчета данных полевых измерений помех от ЭЖД в величины  $\rho_{k,mc}$ , был представлен нами впервые в депонированной работе (Вишнев, 1989). Так как эта работа широкому кругу читателей, надо полагать, неизвестна, рассмотрим его еще раз, производя некоторые незначительные изменения.

Допустим, что прямолинейная, неветвящаяся электрическая железнодорожная ветка с равномерно заземленными рельсами лежит сначала на поверхности проводящего однородного, затем на поверхности горизонтально-однородного слоистого полупространства. Тогда, используя общие формулы (7'), (7''), (8'), (8'') (Вишнев, 2007, стр. 39), часть которых развернута ниже (математические выражения (5), (5'), (6), (6') настоящей работы), можем записать:

$$\Delta E_0 = \rho_0 \cdot \Delta I \cdot P_0, \quad \Delta H_0 = \Delta I \cdot G_0, \quad (1)$$

$$\Delta E_{cl} = \rho_1 \cdot \Delta I \cdot P_{cl}, \quad \Delta H_{cl} = \Delta I \cdot G_{cl}, \quad (2)$$

где  $\Delta E_0$ ,  $\Delta E_{cl}$  и  $\Delta H_0$ ,  $\Delta H_{cl}$  – импульсы электрической и магнитной напряженности поля, соответственно, на границе однородного (индекс 0) и горизонтально-однородного слоистого (cl) полупространства;  $P_0$ ,  $G_0$ ,  $G_{cl}$  – некоторые величины, определяемые параметрами источника (в т. ч., долями стекания – натекания тока различных участков рельсового пути) и координатами точек наблюдения;  $\rho_0$ ,  $\rho_1$  – удельные электрические сопротивления однородного и первого слоя горизонтально-однородного слоистого полупространства;  $\Delta I$  – импуль-

сы тока электровозов, инициирующих «полезные» сигналы ( $\Delta E_0$ ,  $\Delta E_{cl}$ ,  $\Delta H_0$ ,  $\Delta H_{cl}$ );  $P_{cl}$  – функция, зависящая от свойств геоэлектрического разреза, от координат пунктов наблюдения и от параметров источника поля.

Разрешив первое уравнение системы (1) относительно  $\rho_0$  и подставив в него значение  $\Delta I$ , определенное из второго уравнения этой системы, имеем:

$$\rho_0 = \frac{\Delta E_0}{P_0} \cdot \frac{G_0}{\Delta H_0} = \frac{\Delta E_0}{\Delta H_0} \cdot \frac{G_0}{P_0}.$$

Допустим далее, что геоэлектрический разрез, подстилающий ЭЖД, произвольный, а взаимное положение точек и долей стекания (натекания) токов рельсового пути и пунктов геофизических наблюдений такое же, как было в случае однородного полупространства. Тогда, по аналогии с соответствующими формулами методов сопротивления, например, вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) (Заборовский, 1963), в предыдущем математическом выражении надо  $\rho_0$  заменить на  $\rho_{k,mc}$  и, опуская индекс 0 у  $\Delta E_0$ ,  $\Delta H_0$ , записать:

$$\rho_{k,mc} = \frac{G_0}{P_0} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta H}, \quad (3)$$

где  $G_0/P_0$  – соотношение, играющее роль коэффициента электроразведочной установки;  $\Delta E$  – составляющая по оси  $x$  или  $y$  (декартовой системы координат  $x, y, z$ ) импульса напряженности электрического поля, измеренного на рядовом пункте;  $\Delta H$  – составляющая по оси  $x$ ,  $y$  или  $z$  импульса напряженности магнитного поля, измеренного на базисном либо том же рядовом пункте наблюдения. То есть:

$$\rho_{k,mc}^{ij} = \frac{G_0^j}{P_0^i} \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta H_j}, \quad i=x, y; j=x, y, z. \quad (3')$$

Таким образом, для преобразования реальных сигналов, выделенных из помех от ЭЖД, в профильные или площадные распределения параметра  $\rho_{k,mc}$  достаточно значения их электрических амплитуд поделить на соответствующие значения магнитных и частное от деления умножить на

константы  $G_0^j / P_0^i$ , играющие роль коэффициентов электроразведочной установки.

**Математические выражения для расчетов теоретических распределений  $\rho_{k,mc}$  на поверхностях горизонтально-однородных геоэлектрических разрезов**

Итак, при наличии реальной геологической среды величины  $\rho_{k,mc}$  вычисляются по формуле (3). Пусть, теперь, наша железнодорожная ветка лежит на горизонтально-однородном слоистом геоэлектрическом разрезе. Тогда, если в (3) вместо  $\Delta E$  и  $\Delta H$  подставить их значения из системы уравнений (2), то получим:

$$\rho_{k,mc} = \frac{\Delta E_{cl} \cdot G_0}{\Delta H_{cl} \cdot P_0} = \frac{\Delta I \cdot \rho_1 \cdot P_{cl} \cdot G_0}{\Delta I \cdot G_{cl} \cdot P_0}.$$

Но, как следует из раздела «введение» настоящей работы,  $\Delta H_0 = \Delta H_{cl}$ , значит и  $G_0 = G_{cl}$ , откуда

$$\rho_{k,mc} = \frac{\rho_1 \cdot P_{cl}}{P_0} \quad (4)$$

или, в координатной форме:

$$\rho_{k,mc}^i = \frac{\rho_1 \cdot P_{cl}^i}{P_0^i}, \quad i=x, y. \quad (4')$$

Согласно (Вишнев, 2007, стр. 39, формулы 7 и 7') для случая, например, одностороннего питания электровозов и однородного полупространства (после некоторых преобразований упомянутых формул) имеем:

$$\Delta E_0^x = \rho_0 \cdot \Delta I \cdot \frac{k}{4\pi} \times \left\{ \int_0^{l_0} Ax_m dl + \int_{-\infty}^0 Bx_m dl + \int_{l_0}^{+\infty} Cx_m dl \right\} = \rho_0 \cdot \Delta I \cdot P_{0,x}, \quad (5)$$

$$\Delta E_0^y = \rho_0 \cdot \Delta I \cdot \frac{k}{4\pi} \times \left\{ \int_0^{l_0} A(y_m - l) dl + \int_{-\infty}^0 B(y_m - l) dl + \int_{l_0}^{+\infty} C(y_m - l) dl \right\} = \rho_0 \cdot \Delta I \cdot P_{0,y}, \quad (5')$$

где

$$A = \frac{[-e^{-kl} + e^{k(l-l_0)}]}{[x_m^2 + (y_m - l)^2]^{3/2}},$$

$$B = \frac{[-e^{kl} + e^{k(l-l_0)}]}{[x_m^2 + (y_m - l)^2]^{3/2}},$$

$$C = \frac{[-e^{-kl} + e^{-k(l-l_0)}]}{[x_m^2 + (y_m - l)^2]^{3/2}},$$

а для случая горизонтально-однородного слоистого полупространства имеем:

$$\Delta E_{cl}^x = \rho_1 \cdot \Delta I \cdot \frac{k}{4\pi} \times \left\{ \int_0^{l_0} (Ax_m + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Dx_m) dl + \int_{-\infty}^0 (Bx_m + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Fx_m) dl + \int_{l_0}^{+\infty} (Cx_m + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Gx_m) dl \right\} = \rho_1 \cdot \Delta I \cdot P_{cl,x}, \quad (6)$$

$$\Delta E_{cl}^y = \rho_1 \cdot \Delta I \cdot \frac{k}{4\pi} \times \left\{ \int_0^{l_0} [A(y_m - l) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} D(y_m - l)] dl + \int_{-\infty}^0 [B(y_m - l) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} F(y_m - l)] dl + \int_{l_0}^{+\infty} [C(y_m - l) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} G(y_m - l)] dl \right\} = \rho_1 \cdot \Delta I \cdot P_{cl,y}, \quad (6')$$

где

$$D = \frac{q_n [-e^{-kl} + e^{k(l-l_0)}]}{[x_m^2 + (y_m - l)^2 + (2dn)^2]^{3/2}},$$

$$F = \frac{q_n [-e^{kl} + e^{k(l-l_0)}]}{[x_m^2 + (y_m - l)^2 + (2dn)^2]^{3/2}},$$

$$G = \frac{q_n [-e^{-kl} + e^{-k(l-l_0)}]}{[x_m^2 + (y_m - l)^2 + (2dn)^2]^{3/2}}.$$

Подставив в (4) вместо  $P_{cl}$  и  $P_0$  их значения из (6), (6') и (5), (5'), получим:

$$\rho_{k,mc}^x = \rho_1 \left\{ \left\{ \int_0^{l_0} (Ax_m + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Dx_m) dl \right\} + \left\{ \int_{-\infty}^0 (Bx_m + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Fx_m) dl \right\} + \left\{ \int_{l_0}^{+\infty} (Cx_m + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Gx_m) dl \right\} \right\}; \quad (7)$$

$$: \left\{ \int_0^{l_0} Ax_m dl + \int_{-\infty}^0 Bx_m dl + \int_{l_0}^{+\infty} Cx_m dl \right\},$$

$$\rho_{k,mc}^y = \rho_1 \left\{ \left\{ \int_0^{l_0} [A(y_m - l) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} D(y_m - l)] dl \right\} + \left\{ \int_{-\infty}^0 [B(y_m - l) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} F(y_m - l)] dl \right\} + \left\{ \int_{l_0}^{+\infty} [C(y_m - l) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} G(y_m - l)] dl \right\} \right\}; \quad (7')$$

$$: \left\{ \int_0^{l_0} A(y_m - l) dl + \int_{-\infty}^0 B(y_m - l) dl + \int_{l_0}^{+\infty} C(y_m - l) dl \right\},$$

где  $k=(r_p/r_n)^{1/2}$ ,  $r_p$  – погонное электрическое сопротивление рельсов (Ом/км),  $r_n$  – погонное электрическое сопротивление перехода рельс – земля (Ом×км);  $x_m, y_m$  – координаты пунктов наблюдения  $m$  в прямоугольной системе  $xuz$  с началом в месте расположения питающей электровоз тяговой подстанции, осью  $u$ , направленной вдоль рельсов от подстанции к электровозу, осью  $z$  – по вертикали вниз;  $l$  – текущая координата железнодорожного полотна;  $l_0$  – координата электровоза в момент изменения его тяговой нагрузки;  $q_n$  – коэффициенты (эмиссии), характеризующие электрические свойства геологической среды;  $d$  – общая мера глубин нижних границ пластов горизонтально-однородного слоистого полупространства;  $\Delta E_0^x, \Delta E_0^y, \Delta E_{cl}^x, \Delta E_{cl}^y$  – проекции вектора электрической напряженности поля на оси координат  $x, y$  измерительной установки; пункт  $m$  – на поверхности полупространства, ось  $l$  совпадает с осью  $u$ ,  $z_m=0$ .

При моделировании поведения параметра  $\rho_{k,mc}$  над двухслойными разрезами коэффициенты эмиссии тождественны выражению:

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

при моделировании поведения  $\rho_{k,mc}$  над многослойными разрезами – рассчитыва-

ются по рекуррентным формулам (Заборовский, 1963). В случае, например, трехслойного разреза соответствующая рекуррентная формула имеет вид:

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

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

$\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – 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 подошв соответствующих слоев;  $m = 1, 2, 3, \dots, (n - p_2)$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ ;  $n$  – номера коэффициентов эмиссии  $q_n$ .

Для случая двухстороннего питания электровозов математические выражения (7), (7'), обозначим их как (8), (8'), по своей структуре подобны и, в связи с громоздкостью, здесь не приводятся. При необходимости они могут быть получены путем несложных преобразований соответствующих формул, содержащихся в работе (Вишневу, 2007).

### **Результаты моделирования профильных распределений параметра $\rho_{k,mc}$**

Первые расчеты кривых  $\rho_{k,mc}$  были выполнены на ЭВМ БЭСМ-6 по алгоритмическим программам, составленным по просьбе автора Р.Б. Журавлевой и О.А. Хачай. Их результаты можно найти в статье (Вишневу, Дьяконова, Хачай, 1995). Однако

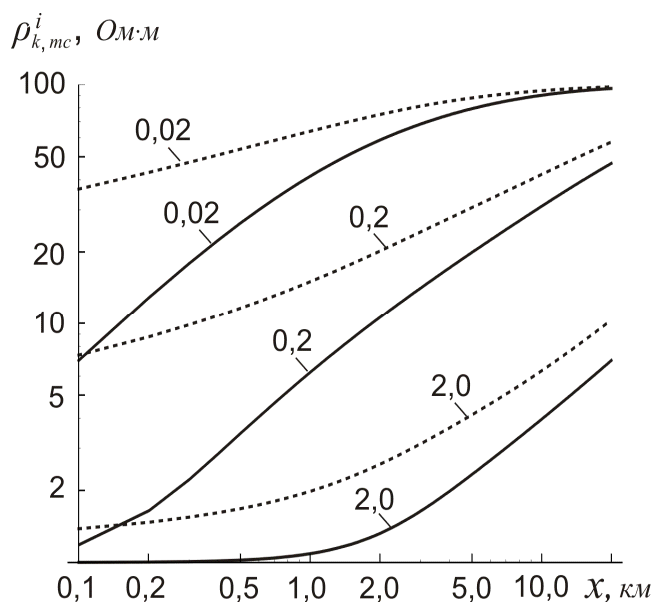
из-за малого быстродействия тогдашней вычислительной техники и острого дефицита машинного времени эти расчеты ограничивались незначительным количеством вариантов (менее десятка двухслойных кривых), и выводы, которые следовали из них, были неполными или, точнее, недостаточно обоснованными.

Новые материалы математического моделирования получены на ПК Intel Pentium 3 с использованием системы компьютерной математики – Mathematica 7. Они отличаются большим разнообразием сочетаний исходных характеристик тяговой сети ЭЖД, а значит и повышенной практической ценностью. Здесь, как и прежде, в качестве модели геологической среды взято горизонтально-однородное полупространство, но число слоев в полупространстве вычислительным алгоритмом, в отличие от алгоритма, используемого в работе (Вишнев, Дьяконова, Хачай, 1995), не ограничено. Оно может быть и два, и три, и сколько потребуется, лишь бы были в наличии необходимые технические средства. На текущий момент нам удалось рассчитать только двухслойные и трехслойные кривые  $\rho_{k,mc}$ . Однако для выявления основных закономерностей поведения изучаемого параметра на поверхности земных недр этого оказалось достаточным.

Примеры распределений по секущим ЭЖД профилям, полученные с применением формул (7), (7') и (8), (8'), изображены на рис. 1 – 3. Они показывают:

1) графики параметра  $\rho_{k,mc}^i(x)$  каждый в отдельности и все вместе, довольно хорошо отражают заданные свойства геологической среды. Но надо отметить, что кривые  $\rho_{k,mc}^x(x)$ , соответствующие перпендикулярной к рельсам составляющей напряженности электрического поля (рис. 2а, 3а), заметно рельефнее, чем кривые  $\rho_{k,mc}^y(x)$ , соответствующие параллельной рельсам ее составляющей (рис. 2б, 3б). Это, очевидно, объясняется различным влиянием на их поведение, так называемых, действующих разностей, которых у электроразведочной установки, осуществляемой при измерении помех от ЭЖД, целых два. Один – опреде-

ляется расстояниями между положительными и отрицательными полюсами источника «полезных» сигналов, другой – расстояниями от пункта измерения до точек стекания (натекания) тока рельсового пути. Действие первого разности, по-видимому, сильнее проявляется на профильных распределениях значений  $\rho_{k,mc}^y$ , действие второго – на профильных распределениях значений  $\rho_{k,mc}^x$ . Следовательно, кривые  $\rho_{k,mc}^x(x)$  лучше подходят для изучения изменений электропроводности земных недр по вертикали, а кривые  $\rho_{k,mc}^y(x)$ , в связи с тем, что они над горизонтально-однородными разрезами более пологие, лучше подходят для изучения этих изменений по латерали.



**Рис. 1.** Результаты расчетов величины  $\rho_{k,mc}^i$  (Ом·м) по ортогональным ЭЖД профилям; сплошные линии – кривые кажущегося сопротивления при направлении измерительной установки  $MN$  перпендикулярно рельсовому пути ( $\rho_{k,mc}^x$ ), пунктир – кривые кажущегося сопротивления при направлении измерительной установки  $MN$  параллельно рельсовому пути ( $\rho_{k,mc}^y$ ); параметры модели источника поля: питание электровозов одностороннее,  $l_0=10$  км,  $k=0,2$  км<sup>-1</sup>; координаты пунктов измерения:  $x_m=x$  (км),  $y_m=0,8$  км,  $z_m=0$ ; параметры геоэлектрического разреза: двухслойное полупространство,  $\rho_1=1$  Ом·м,  $\eta=d_1$  (км),  $\rho_2=100$  Ом·м; шифр кривых –  $\eta=d_1$

2) распределения  $\rho_{k,mc}$  вдоль профилей, перпендикулярных преимущественному направлению ЭЖД, нанесенные на бланки с двойной логарифмической шкалой, внешне очень похожи на палеточные двухслойные и трехслойные кривые  $\rho_k$  (Заборовский, 1963) вертикального электрического зондирования.

На них четко выделяются положительные (геоэлектрический разрез типа  $K$ , рис. 2) и отрицательные (геоэлектрический разрез типа  $H$ , рис. 3) экстремумы, различные асимптоты (например,  $\rho_1$ ) и прочие атрибуты (рис. 1-3). Значит, обсуждаемые теоретические и соответствующие им практические кривые  $\rho_{k,mc}$  можно интерпретировать как на качественном, так и на количественном уровне, причем некоторые приемы интерпретации могут, безусловно, быть такими же, как и в методе ВЭЗ.

3) на прилегающих к ЭЖД территориях при каждом конкретном значении  $l_0$  (координата места изменения тяговой на-

грузки электровозов) существуют области благоприятные и неблагоприятные для представления данных измерения помех от ЭЖД в виде распределений параметра  $\rho_{k,mc}^{ij}$  ( $i=x, y; j=x, y, z$ ). К первым – относятся те из них, на которых расположены экстремумы импульсов  $\Delta E_i, \Delta H_j$ , ко вторым – те, на которых расположены промежутки между упомянутыми экстремумами. Это, вероятно, объясняется наличием мест перехода через нуль у составляющих  $\Delta E_x, \Delta E_y$  и составляющих  $\Delta H_x, \Delta H_y, \Delta H_z$  (Вишневу, 2007, рис. с. 42, 43), где выделение полезных сигналов (из-за их относительной малости) должно быть весьма затруднительным. Нечто подобное можно сказать и по поводу расчетов соответствующих  $\rho_{k,mc}$ . Однако в случаях, когда кривые  $\rho_{k,mc}^{ij}$  получаются построенными с большими погрешностями, целесообразно использовать кривые  $\rho_{k,mc}^{zj}, \rho_{k,mc}^{zz}$  либо  $\rho_{k,mc}^{iz}$  ( $z$  – символ проекций векторов  $E$  и  $H$  на горизонтальную плоскость  $xOy$  или дневную поверхность), т.к. величины  $\Delta E_z, \Delta H_z$  на любом профиле наблюдений точек перехода через нуль не имеют.

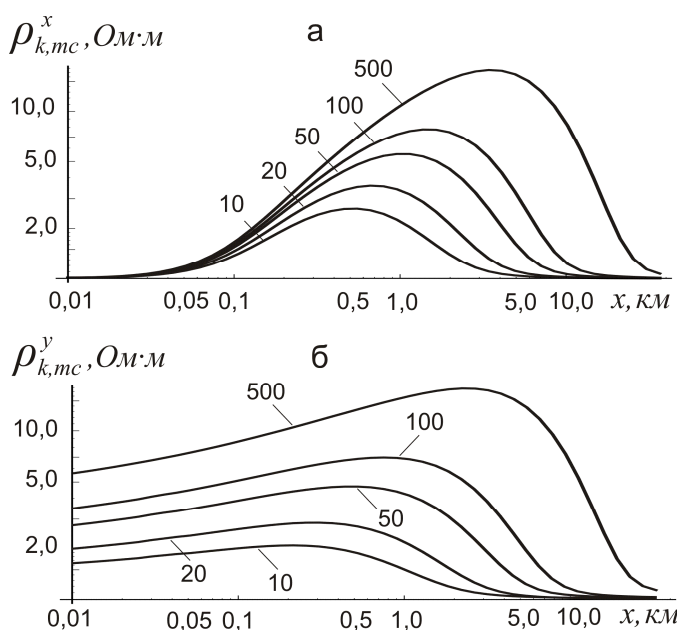
4) графики  $\rho_{k,mc}^x(x)$  обладают асимптотами  $\rho_1$  (которыми являются прямые  $\rho=\rho_1$ , параллельные осям абсцисс), а  $\rho_{k,mc}^y(x)$  ими не обладают, но кривые  $\rho_{k,mc}^y(x)$  значительно ближе к ЭЖД выходят на свои экстремумы (см. расположение максимумов на рис. 2б, 2а и минимумов на рис. 3б, 3а), что при некоторых обстоятельствах является весьма существенным.

### Выводы

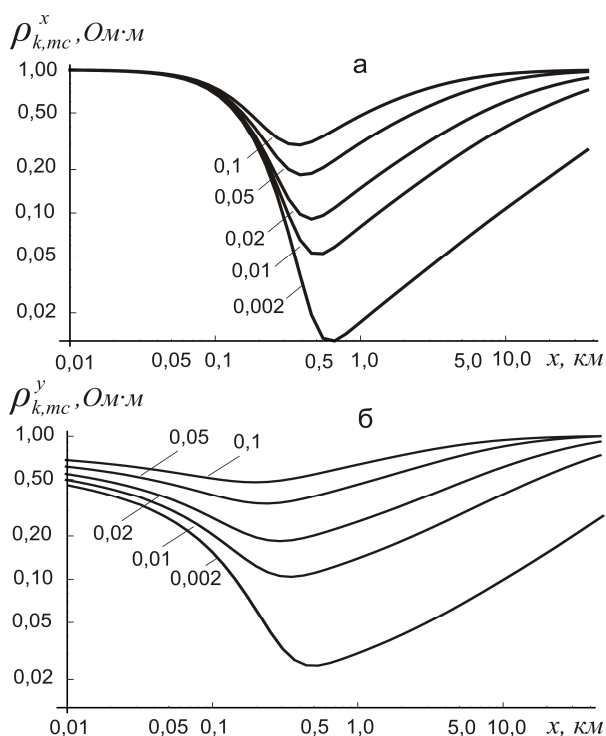
Из вышеизложенного следует:

а) представление данных измерения импульсных помех от электрической железной дороги в виде распределений параметра кажущегося сопротивления является вполне осуществимым и весьма полезным методическим приемом, потому что позволяет (по крайней мере, при стечении благоприятных обстоятельств) производить интерпретацию этих данных, как на качественном, так и на количественном уровне;

б) использование кривых  $\rho_{k,mc}$  должно, вероятно, привести в дальнейшем к значительному расширению круга производст-



**Рис. 2.** Результаты расчетов величины  $\rho_{k,mc}^i$  (Ом·м) по ортогональным ЭЖД профилям: а – кривые  $\rho_{k,mc}^x$ , б – кривые  $\rho_{k,mc}^y$ ; параметры модели источника поля: питание электровозов двухстороннее, расстояние между соседними тяговыми подстанциями  $L=20$  км,  $k=0,25$  км<sup>-1</sup>,  $l_0=5$  км; координаты пунктов измерения:  $x_m=x$  (км),  $y_m=3$  км,  $z_m=0$ ; параметры модели геологической среды: трехслойное полупространство, геоэлектрический разрез типа  $K$ ,  $\rho_1=1$  Ом·м,  $d_1=0,1$  км,  $\mu=\rho_2/\rho_1$ ,  $d_2=0,25$  км,  $\rho_3=1$  Ом·м; шифр кривых –  $\mu=\rho_2/\rho_1$



**Рис. 3.** Результаты расчетов величины  $\rho_{k,mc}^i$  (Ом·м) по ортогональным ЭЖД профилям: а – кривые  $\rho_{k,mc}^x$ , б – кривые  $\rho_{k,mc}^y$ ; параметры модели источника поля: питание электровазов двухстороннее, расстояние между соседними тяговыми подстанциями  $L=20$  км,  $k=0,25$  км<sup>-1</sup>,  $l_0=5$  км; координаты пунктов измерения:  $x_m=x$  (км),  $y_m=3$  км,  $z_m=0$ ; параметры модели геологической среды: трехслойное полупространство, геоэлектрический разрез типа Н,  $\rho_1=1$  Ом·м,  $d_1=0,1$  км,  $\mu=\rho_2/\rho_1$ ,  $d_2=0,25$  км,  $\rho_3=1$  Ом·м; шифр кривых –  $\mu=\rho_2/\rho_1$

венных 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, т.к. другие методы электроразведки там зачас-

тую неприменимы.

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

### Литература

Вишнев В.С. Об использовании поля тяговой сети электрической железной дороги для электроразведки / УНЦ АН СССР. Свердловск, 1989. 27 с. Деп. в ВИНТИ, № 4380 – В89.

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

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. С. 35-47.

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

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