УДК 550.837

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ В МЕТОДЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ БЛУЖДАЮЩИМИ ТОКАМИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

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

Аннотация. Выполнены расчеты профильных распределений основных и дополнительных информационных величин метода электроразведки блуждающими токами электрической железной дороги. Рассмотрены преимущества их совместного анализа.

Железная дорога, импульсы, полезный сигнал, модель, параметры, поле, кривые кажущегося сопротивления.

INFORMATION PARAMETERS OF ELECTRICAL PROSPECTING METHOD BY STRAY CURRENTS OF THE RAILWAY TRACTION NETWORK

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

Abstract. Calculations of profile distributions of the basic and additional information parameters of electrical prospecting method by stray currents of the railway are executed. Advantages of their joint analysis are considered.

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

Введение

В стандартном варианте метода блуждающих токов (МБТ), применяемом на территориях или вблизи шахт и рудников, имеющих откаточные средства на электрической тяге, для геологического картирования и разведки электронопроводящих залежей полезных ископаемых, результаты обработки экспериментальных материалов представляют, как правило, в виде графиков величины

$$\psi = \Delta E(\Delta t)_{\text{р}} / \Delta E(\Delta t)_{\text{д}},$$

где $\Delta E(\Delta t)_{\text{р}}$ и $\Delta E(\Delta t)_{\text{д}}$ – изменения напряженности поля за время Δt, соответственно, в подвижной (рядовой) и неподвижной (базисной или долговременной) приемной линии (Инструкция…, 1984). Однако профильные и площадные распределения ψ во многих случаях не отвечают требованиям практики геофизических работ, так как непригодны для количественного истолкования. Чтобы выявить более подходящие интерпретационные параметры метода, которые бы подошли и при использовании в геологии апериодического импульсного поля магистральных (междугородних) электрических железнодорожных веток, и – поля электрических железнодорожных веток горнодобывающих предприятий, нами были осуществлены соответствующие теоретические и экспериментальные изыскания (Вишнев, 1989; Вишнев, и др., 1990; Вишнев и др., 1995). Полученные результаты (кратко) сводятся к следующему:

1. Из совокупности измерений апериодических импульсных помех, наводимых электрической железной дорогой (ЭЖД) в моменты изменения режимов энергопотребления электровозов, можно выделять однотипные по морфологии пространственного распределения (полезные) сигналы.

2. Источник полезных сигналов достаточно простой и, если использовать только квазиустановившуюся часть их амплитуд, легко поддается математическому описанию.

3. Электрические составляющие импульсного поля ЭЖД в квазиустановившемся режиме 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 этих исследований был создан новый электроразведочный метод (Вишнев, 1989; 2012), условно обозначенный аббревиатурой МЭПЖД – метод элек-

троразведки полем железной дороги. В нем измеряют (на рядовых и базисном пунктах наблюдения) кроме электрических (как в МБТ) еще и магнитные составляющие помех, выделяют однотипные по структуре источника сигналы и преобразуют их в величины кажущегося сопротивления ($\rho_к$), профильные распределения которых (кривые $\rho_к$) можно интерпретировать количественно. В процессе разработки теоретических основ метода выявилось некоторое количество отличных от ψ информационных параметров, в том числе:

$$\rho_{к,x} = \frac{G_{y\,р}}{P_{x\,р}} \frac{\Delta E_{x\,р}}{\Delta H_{y\,р}}, \quad \rho_{к,y} = \frac{G_{хр}}{P_{ур}} \frac{\Delta E_{ур}}{\Delta H_{хр}},$$

$$\rho'_{к,y} = \frac{G_{хд}}{P_{ур}} \frac{\Delta E_{ур}}{\Delta H_{хд}}, \quad \rho'_{к,x} = \frac{G_{уд}}{P_{хр}} \frac{\Delta E_{хр}}{\Delta H_{уд}},$$

$$F'_i = P_{iд} \frac{\Delta E_{iр}}{\Delta E_{iд}}, \; q_i = G_{jр} \frac{\Delta E_{iр}}{\Delta H_{jр}}, \; q'_i = G_{jд} \frac{\Delta E_{iр}}{\Delta H_{jд}},$$

а также $\gamma_i = \Delta E_{iр}/\Delta H_{jр}$, $\gamma'_i = E_{iр}/\Delta H_{jд}$. Где для случая, например, двухстороннего питания электровозов и прямолинейного участка ЭЖД имеем

$$P_{хм} = \frac{k}{4\pi}\left[\int_0^{l_0} Q_1 \frac{x_м}{R^3} + \int_{l_0}^{L} Q_2 \frac{x_м}{R^3} + \int_{-\infty}^{0} Q_3 \frac{x_м}{R^3} + \int_{L}^{\infty} Q_4 \frac{x_м}{R^3}\right] dl,$$

$$P_{yм} = \frac{k}{4\pi}\left[\int_0^{l_0} Q_1 \frac{(y_м - l)}{R^3} + \int_{l_0}^{L} Q_2 \frac{(y_м - l)}{R^3} + \right.$$

$$\left. + \int_{-\infty}^{0} Q_3 \frac{(y_м - l)}{R^3} + \int_{L}^{\infty} Q_4 \frac{(y_м - l)}{R^3}\right] dl,$$

$$G_{yм} = \frac{k}{8\pi}\left[\int_0^{l_0} Q_1 \frac{x_м}{r^2} + \int_{l_0}^{L} Q_2 \frac{x_м}{r^2} + \int_{-\infty}^{0} Q_3 \frac{x_м}{r^2} + \int_{L}^{\infty} Q_4 \frac{x_м}{r^2}\right] dl,$$

$$G_{xм} = \frac{-k}{8\pi}\left[\int_0^{l_0} Q_1 \frac{y_м - l}{r^2} + \int_{l_0}^{L} Q_2 \frac{y_м - l}{r^2} + \right.$$

$$\left. + \int_{-\infty}^{0} Q_3 \frac{y_м - l}{r^2} + \int_{L}^{\infty} Q_4 \frac{y_м - l}{r^2}\right] dl + J_x,$$

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

$$- \frac{(y_м - l_0)(1 - l_0/L)}{[x_м^2 + (y_м - l_0)^2 + h^2]^{1/2}} -$$

$$\left. - \frac{(y_м - l_0)(l_0/L)}{[x_м^2 + (y_м - l_0)^2 + h^2]^{1/2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{(y_м - L)(l_0/L)}{[x_м^2 + (y_м - L)^2 + h^2]^{1/2}}\right\},$$

$$Q_1 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{+kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

$$Q_2 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{-kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

$$Q_3 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{+kl} + e^{+kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

$$Q_4 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{-kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{-kl_2},$$

$$l_1 = l - l_0, \quad l_2 = l - L,$$

$$r = \left[x_м^2 + (y_м - l)^2\right]^{\frac{1}{2}},$$

$$R = \left[x_м^2 + (y_м - l)^2 + z_м^2\right]^{\frac{1}{2}}, \; k = (r_р/r_п)^{1/2}.$$

Здесь j=x, y, z; i=y, x; $x_м$, $y_м$, $z_м$ – прямоугольные декартовы координаты пикетов измерительной сети с началом в точке подсоединения к рельсам одной из питающих электровоз (Э) тяговых подстанций, в частности А, осью y, направленной от А к Э, осью z – по вертикали вниз; h – высота подвеса контактного провода; l – текущая координата железнодорожного полотна (при x = 0, l = y, при $z_м$ = 0, R = r); Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – доли токов утечки различных участков рельсового пути; $P_{iм}$ и $G_{jм}$ – величины, характеризующие геометрию электрической и магнитной компоненты поля ЭЖД; J_x – часть $G_{xм}$, обусловленная токами секции контактного провода: $\rho_{к,x}$ – кажущееся удельное сопротивление геоэлектрического разреза по измерениям линией MN перпендикулярной, $\rho_{к,y}$ – кажущееся удельное сопротивление по измерениям линией MN параллельной преимущественному направлению дороги; L – длина секции контактного провода; l_0 – координата места изменения тяговой нагрузки электровозов; $r_р$ и $r_п$ – погонные сопротивления рельсов и перехода рельс – земля (грунт); $\Delta E_{iр}$, $\Delta H_{jд}$, $\Delta H_{jр}$ – составляющие векторов напряженности электрического и магнитного поля в прямоугольной системе координат, связанной с моделью ЭЖД; М – точка земной по-

верхности; р – символ рядового, д – базисного (долговременного) пункта наблюдения (м = р или м = д).

Статья посвящена выяснению информационных возможностей их профильных распределений.

1. *Кривые* $\rho_{к,x}$, $\rho_{к,y}$ ***и*** $\rho'_{к,x}$, $\rho'_{к,y}$ (1)

Значения параметров (1), как было предложено в работе (Вишнев, 1989), находятся путем умножения полезных сигналов $\Delta E_i/\Delta H_j$, выделяемых из совокупности измерений импульсных помех от тяговой сети железной дороги, на величины G_j / P_i, играющие роль коэффициентов электроразведочной установки.

При точном задании модели источника кривые (1) рис. 1 а, б и 2 а, б, шифр 2 отражают только особенности геоэлектрического разреза, при неточном задании (шифр 1, 3) – еще и модельные несоответствия, влияние которых распределяется вдоль профиля наблюдения неравномерно, и области искажений легко принять за локальные аномалии. Чтобы выяснить, возможно ли их отличать от реальных аномалий посмотрим как ведут себя другие информационные параметры.

2. ***Профильные распределения*** $q'_x(x)$, $q'_y(x)$, $F'_x(x)$, $F'_y(x)$, $q_x(x)$, $q_y(x)$

Кривые $F_i'(x)$ и $q_i'(x)$ для трехслойных геоэлектрических разрезов типа «*K*» и «*H*» приведены на рис. 3 и 4.

На рис. 5 (шифр 2) даны истинные очертания профильных распределений $\Delta E_{x\text{р}}(x)$, $\Delta E_{y\text{р}}(x)$, содержащих сведения о тех же разрезах при возбуждении тяговым током ($I_\text{т}$), равным одному амперу. (Действительно, при точных значениях параметров модели источника и токе $I_\text{т}$= =1 А в математическом выражении $q_i = G_{j\text{р}} \cdot \Delta E_{i\text{р}} / \Delta H_{jp}$, где $\Delta H_{jp} = I_\text{т} \cdot G_{j\text{р}}$ величина ΔH_{jp} численно равна $G_{j\text{р}}$, значит (без учета единиц измерения) $\Delta E_{i\text{р}} = q_i$).

Рисунки показывают, что форма графиков $F_i'(x)$ и $q_i'(x)$ абсолютно идентична форме $\Delta E_{i\text{р}}(x)$ даже, если параметры модели источника (L, l_0 и k) исследуемого поля заданы с ошибками, так как в формулах расчета кривых $F_i'(x)$ и $q_i'(x)$ сигналы $\Delta E_{i\text{р}}(x)/\Delta E_{i\text{д}}$ ($\Delta E_{i\text{р}}(x)/\Delta H_{j\text{д}}$) на всех пунктах сети наблюдений поля ЭЖД умножаются на одни и те же константы. То есть, ошибки задания (определения) величин L, l_0 и k влияют (при изображении в логарифмическом масштабе) только на уровень параллельного смещения $F_i'(x)$ и $q_i'(x)$ по оси ординат.

Кривые $q_i(x)$ (рис. 5, шифр 1, 3), как и $\rho_{к,i}$ и $\rho'_{к,i}$, искажаются и по уровню и по форме.

Следовательно, сравнивая $\rho_{к,i}$, $\rho'_{к,i}$, q_i и F_i', q_i', можно увидеть, какие части распределений $\rho_{к,i}$, $\rho'_{к,i}$, q_i отражают модельные несоответствия, а какие геоэлектрические аномалии.

3. *Некоторые особенности кривых* $\rho_{к,i}$ ***и*** $\rho'_{к,i}$, q_i ***и*** q_i'

Анализируя выше приведенные формулы, замечаем, что если базисный пункт метода ЭПЖД находится на профиле наблюдений, то кривые $\rho_{к,i}$ и $\rho'_{к,i}$, q_i и q_i' при любых модельных ошибках должны в нем иметь (попарно) одинаковые значения. Если модельные погрешности сведены к нулю, то такое совпадение должно соблюдаться и в остальных пунктах.

Значит, для уменьшения модельных искажений профильных распределений $\rho_{к,i}$ и $\rho'_{к,i}$, q_i и q_i' нужно, приближая параметры модели источника полезного сигнала МЭПЖД к оптимальным значениям, пытаться достичь наиболее полного попарного совпадения этих распределений.

Рассмотрим как осуществляется данная процедура на теоретическом материале.

4. *Пример корректировки кривых* $\rho_{к,i}$ ***и*** $\rho'_{к,i}$, q_i ***и*** q_i'

Устранение искажений кривых $\rho_{к,i}$ и $\rho'_{к,i}$, q_i и q_i', возникших за счет ошибок задания модельных параметров целесообразно, вероятно, вести, руководствуясь таблицей рис. 6. В ней показаны, где за счет погрешности того или иного параметра могут происходить максимальные искажения той или иной кривой.

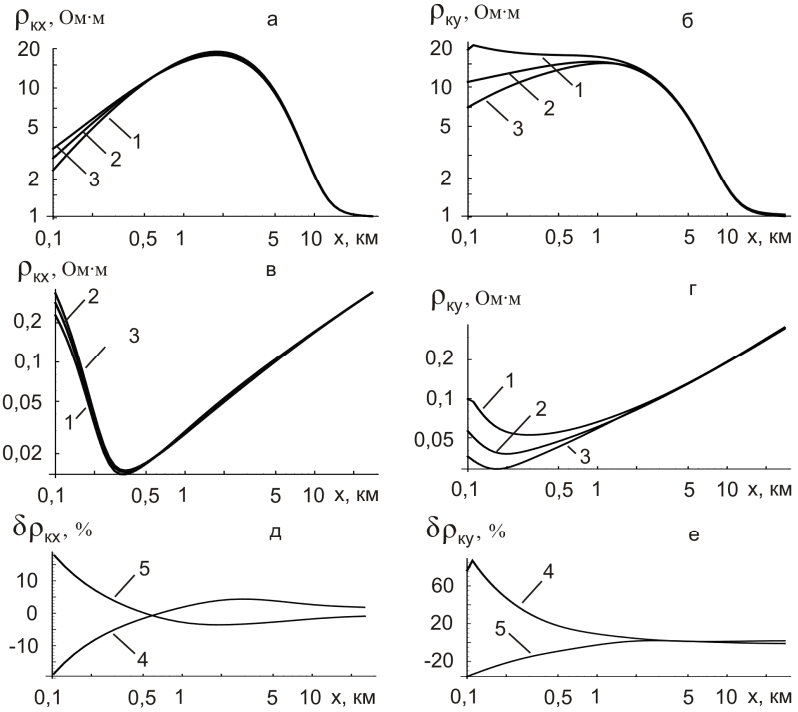

Рис. 1. Особенности хода «поперечных» $\rho_{к,x}(x)$ и «продольных» $\rho_{к,y}(x)$ кривых кажущегося сопротивления и графиков их погрешностей при ошибках задания длины секции контактного провода ($L\pm\Delta L$), координаты места изменении режимов энергопотребления электровозов ($l_0\pm\Delta l$), корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс–земля ($k\pm\Delta k$) и координат пунктов наблюдения ($x_м\pm\Delta x$, $y_м\pm\Delta y$). а, б – трехслойный геоэлектрический разрез типа «*K*» (ρ_1=1 Ом·м, d_1=0,05 км, ρ_2=100 Ом·м, d_2=0,5 км, ρ_3=1 Ом·м, d_3= ∞ км); в, г – трехслойный геоэлектрический разрез типа «*H*» (ρ_1=1 Ом·м, d_1=0,05 км, ρ_2=0,01 Ом·м, d_2=0,5 км, ρ_3=1 Ом·м, d_3= ∞ км); 1–при ΔL= –1 км, Δl_0=+1 км, Δk= = –0,028 км$^{-1}$, Δx= –0,02 км, Δy= –0,2 км; 2–при ΔL=0 км, Δl_0=0 м, Δk=0 км$^{-1}$, Δx=0 км, Δy=0 км; 3–при ΔL=1 км, Δl_0= –1 км, Δk=0,028 км$^{-1}$, Δx=0,02 км, Δy=0,2 км; д, е – графики относительных погрешностей значений $\rho_{кi}(x)$: 4–при ΔL= –1 км, Δl_0=1 км, Δk= – 0,028 км$^{-1}$, Δx= –0,02 км, Δy= –0,2 км; 5–при ΔL=1 км, Δl_0= = –1 км, Δk=0,028 км$^{-1}$, Δx=0,02 км, Δy=0,2 км. Параметры модели источника БТ и координаты точек расчета: $l_0\pm\Delta l_0$=7,0$\pm\Delta l_0$ км, $k\pm\Delta k$=0,14$\pm\Delta k$ км$^{-1}$, $L\pm\Delta L$=20,0$\pm\Delta L$ км, x=(0,1–27,7)$\pm\Delta x$ км, y=5,0$\pm\Delta y$ км

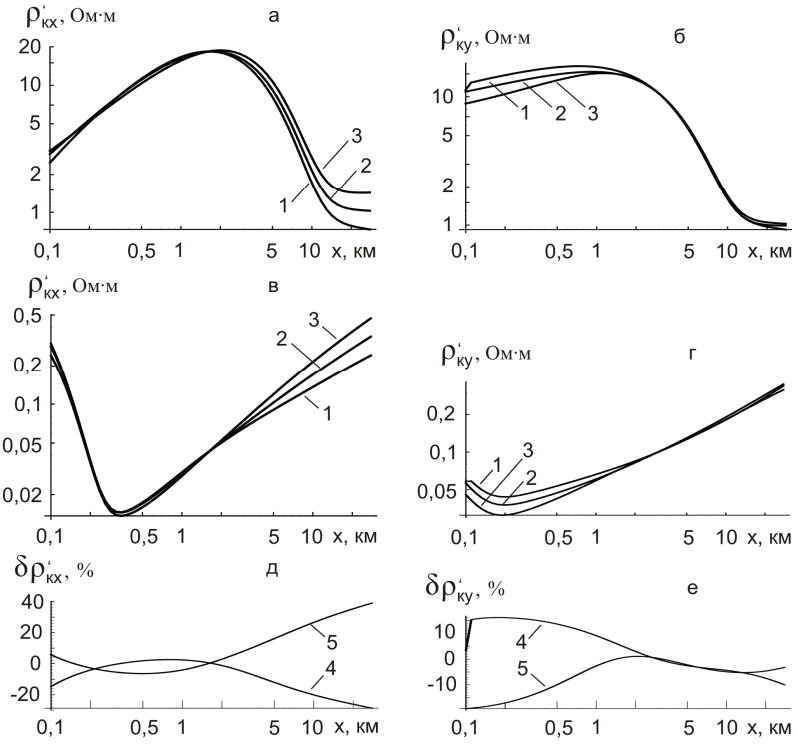

Рис. 2. Особенности хода «поперечных» и «продольных» кривых параметра $\rho'_{к,i}$ и графиков их погрешностей при тех же условиях расчета и той же последовательности обозначений, что на рис. 1

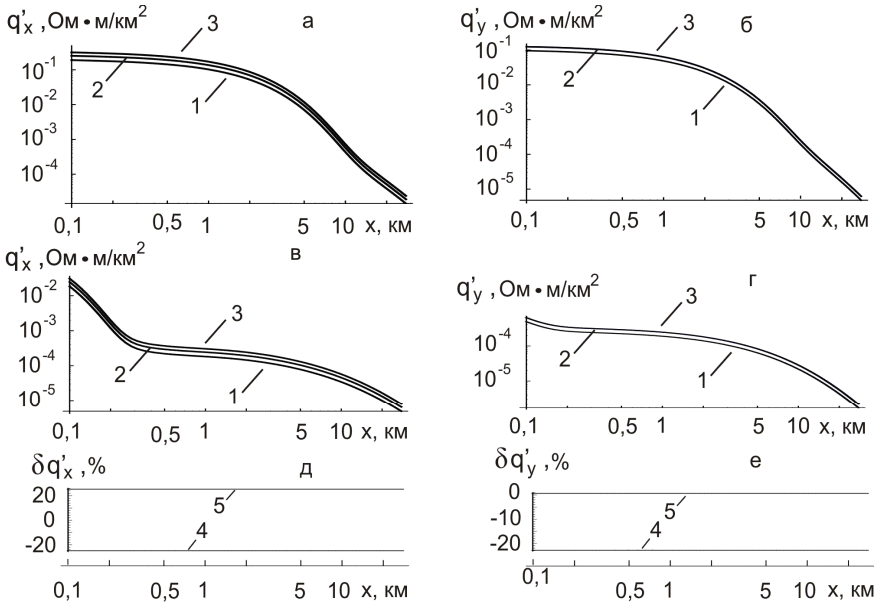

Рис. 3. Особенности хода «поперечных» и «продольных» кривых параметра $q_i^{'}$ и графиков их погрешностей при тех же условиях расчета и той же последовательности обозначений, что на рис. 1

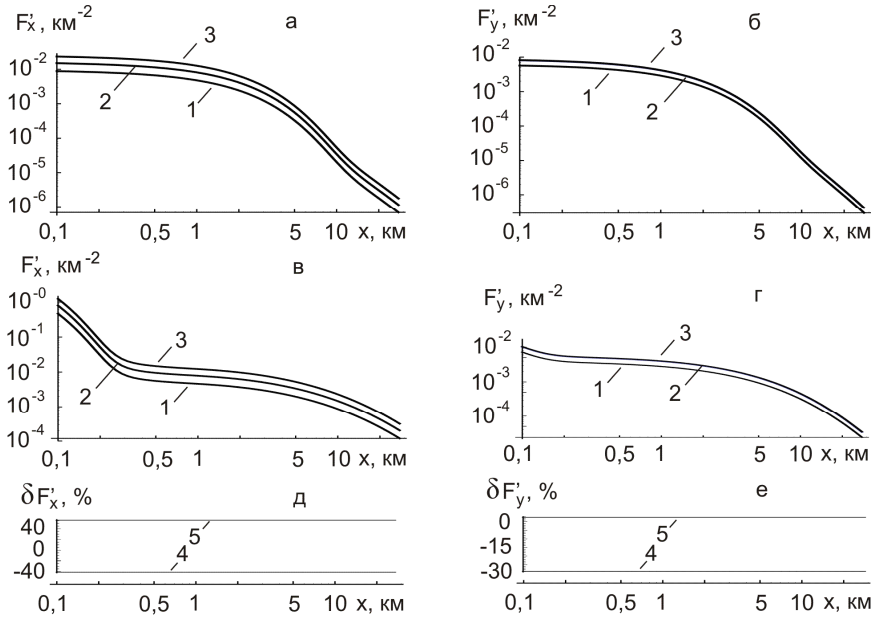

Рис. 4. Особенности хода «поперечных» и «продольных» кривых параметра $F_i^{'}$ и графиков их погрешностей при тех же условиях расчета и той же последовательности обозначений, что на рис. 1

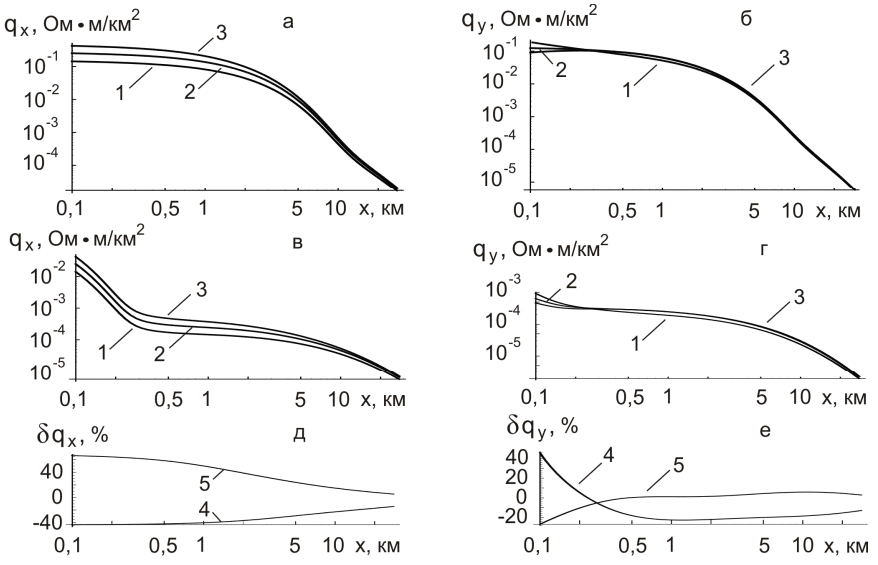

Рис. 5. Особенности хода «поперечных» и «продольных» кривых параметра q_i и графиков их погрешностей при тех же условиях расчета и той же последовательности обозначений, что на рис. 1

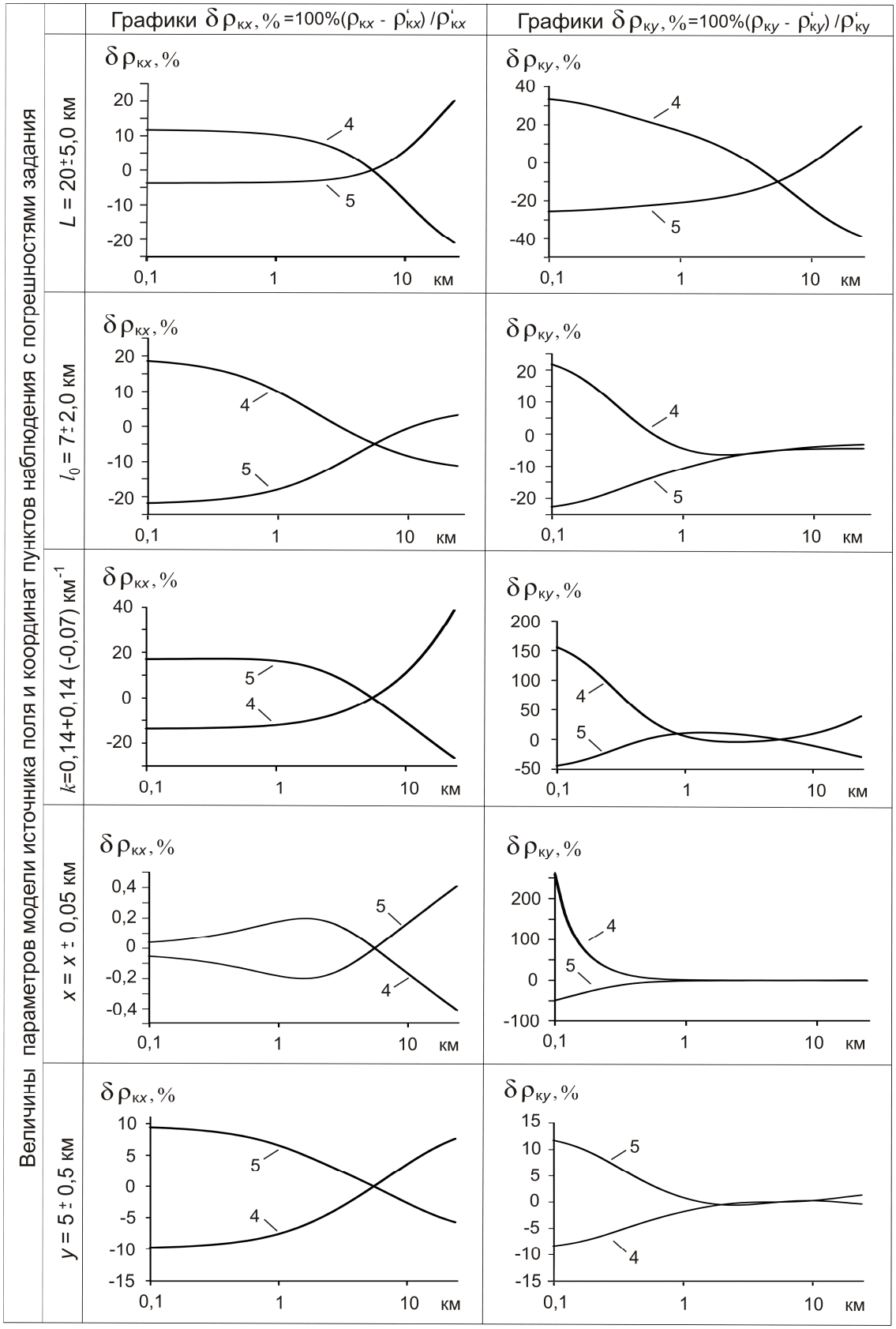

Рис. 6. Таблица графиков относительных отклонений величин $\rho_{к,x}$, $\rho_{к,y}$ от величин $\rho'_{к,x}$, $\rho'_{к,y}$ при введении отрицательных (4) и положительных (5) ошибок в один из параметров L, l_0, k и в одну из координат (x, y) пунктов наблюдения

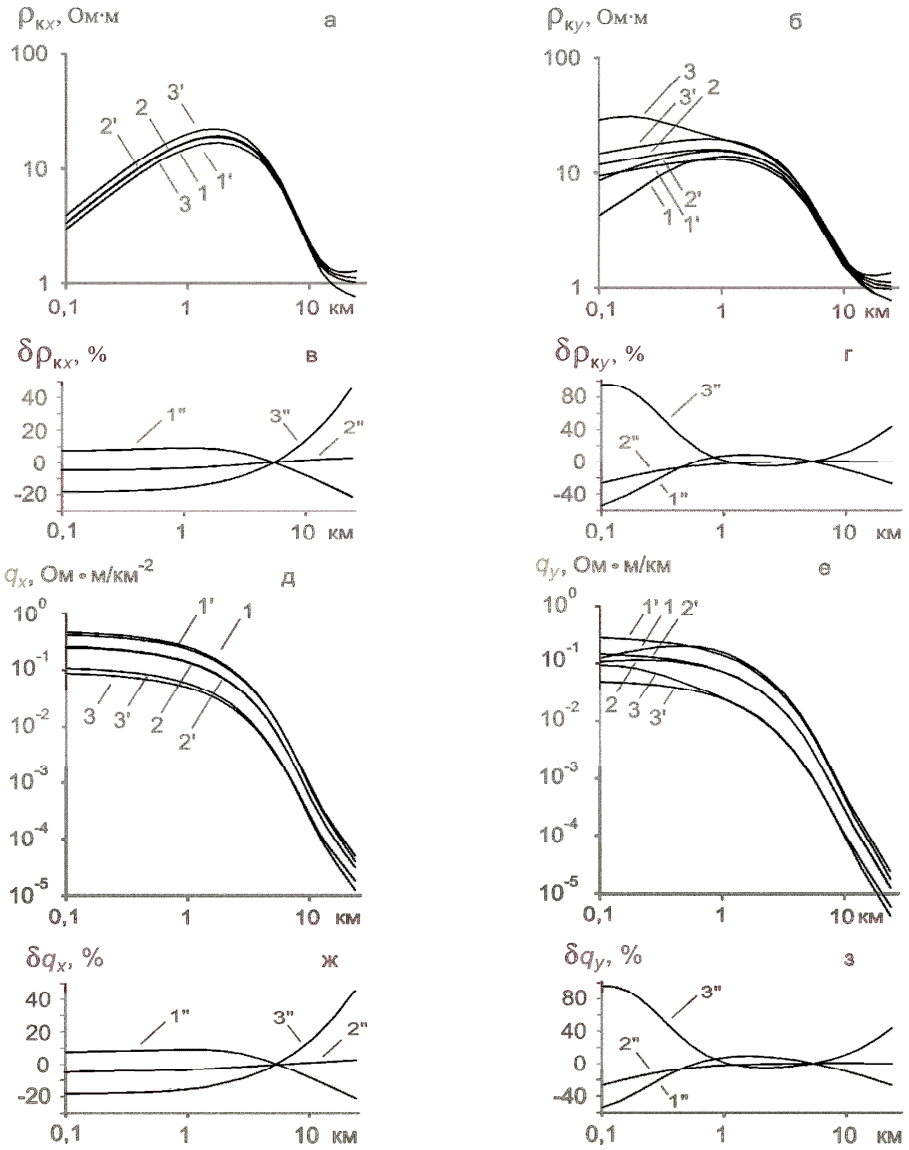

Рис. 7. Пример корректировки профильного хода величин $\rho_{к,i}q_i$, осложненных большой ошибкой задания параметра k. а, б – $\rho_{к,x}$, $\rho'_{к,x}$, $\rho_{к,y}$, $\rho'_{к,y}$; д, е – q_x, q'_x, q_y, q'_y (1, 1’ – исходные; 2, 2’ – уточненные; 3, 3’ – контрольные кривые); в, г, ж, з – графики относительных отклонений этих величин (1”, 2”, 3” – для Δk, равного 0,14, 0,01, –0,07 км$^{-1}$); ΔL=+0,5 км, Δl_0=+0,1 км, Δx=+0,01 км, Δy= –0,2 км. Геоэлектрический разрез (тип «*K*») и модель источника БТ те же, что в описании рис. 1. Шифр со штрихом у профильных распределений $\rho'_{к,x}$ и q'_x

Допустим, что кривые под шифром 1 и 1’ рис. 7 являются исходными. Сравнивая их, мы видим: кривые $\rho_{к,y}$ и $\rho'_{к,y}$ сильно расходятся на ближних к ЭЖД пунктах измерения, а кривые $\rho_{к,x}$ и $\rho'_{к,x}$ – на дальних. Обращаясь к рис. 6, замечаем, что такие расхождения могут быть вызваны неточностью задания параметра k. Варьируя его значением, добиваемся наилучшего совпадения кривых $\rho_{к,i}$ и $\rho'_{к,i}$, q_i и q'_i (шифр 2, 2’).

Сближение кривых $\rho_{к,i}$ с $\rho'_{к,i}$, q_i с q'_i, а также спрямление графиков их взаимных отклонений (шифр 1”, 2”), сигнализируют, что новая величина параметра k более подходящая, чем предыдущая. При этом кривые $\rho_{к,i}$, $\rho'_{к,i}$ и q_i изменяются и по уровню и по форме, а q'_i только по уровню.

Следовательно, применяя упомянутую процедуру поочередно к каждому модельному параметру (L, l_0, k), можно повысить качество материалов, предназначенных для интерпретации данных измерения метода ЭПЖД.

Заключение

Рассматривая рисунки 1–5 (шифр 1, 2, 3), видим, что особенности геоэлектрического разреза в той или иной степени отражаются на каждом из них.

Однако лучше всего они заметны на кривых $\rho_{к,i}$ и $\rho'_{к,i}$. Действительно, по особенностям распределений $\rho_{к,i}$ и $\rho'_{к,i}$ можно в благоприятных случаях легко определить тип геоэлектрического разреза, а по их асимптотам и некоторые его численные характеристики, например суммарную продольную проводимость осадоч-

ного чехла.

Значит, главная польза параметров q_i, $F_i^{'}$, $q_i^{'}$ состоит в том, что они помогают оценить и устранить модельные искажения кривых $\rho_{к,i}$ и $\rho_{к,i}^{'}$, хотя q_i и $q_i^{'}$ пригодны и к количественному истолкованию.

Работа выполнена (частично) при финансовой поддержке УрО РАН конкурсной программы фундаментальных исследований № 12-Т-5-1020.

Литература

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

Вишнев В.С., Дьяконова А.Г., Журавлева Р.Б. Способ геоэлектроразведки. А.С. 1582160, Б.И. № 28. 1990.

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.

Вишнев В.С. Приемы полевых и камеральных работ в методе электроразведки блуждающими токами тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. 2012. № 2(20). С. 14–30.

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