УДК 550.837

КРИВЫЕ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОИСТЫХ СРЕД В МЕТОДЕ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ ПРИ НЕТОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ КООРДИНАТ ПУНКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

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

Аннотация. Приведены результаты расчетов кривых кажущегося сопротивления ($\rho_{k,mc}$) метода разведки недр блуждающими токами электрической железной дороги для случая бесконечно длинного, равномерно заземленного, неветвящегося рельсового пути, лежащего на горизонтально-однородном слоистом геоэлектрическом разрезе, при ошибках задании координат точек наблюдения. Установлены пределы отклонения упомянутых координат от истинных значений, соблюдение которых не сказывается на точности построения практически значимых отрезков экспериментальных кривых $\rho_{k,mc}$.

Кривые, кажущееся сопротивление, погрешность, железная дорога, расчет, графики.

APPARENT RESISTIVITY CURVES OF A LAYERED MEDIUM IN THE STRAY CURRENT METHOD WITH INEXACT COORDINATE VALUES OF THE SURVEY POINTS

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

Abstract. Results of apparent resistivity curves calculations ($\rho_{k,mc}$) of the stray current prospecting method of electric railway for a case infinitely long, uniformly earthed, unbranched tracks lying on horizontally homogeneous layered geoelectric section, with inexact coordinate dimensioning of the survey points are presented. Deviation limits of the mentioned coordinates from the true values are established, the observance of which doesn't affect accuracy of construction of practically significant experimental curves segments $\rho_{k,mc}$.

Curves, apparent resistivity, accuracy, railway, calculation, graphs.

Введение

Настоящая работа является продолжением работы (Вишнев, 2011), в которой рассмотрено влияние погрешностей в параметрах модели источника полезного сигнала, выделяемого из совокупности измерений техногенного импульсного поля электрической железной дороги (ЭЖД), на кривые $\rho_{k,mc}$ (ρ_k – кажущееся сопротивление, *mc* – тяговая сеть).

Координаты точек наблюдения ($x_м$, $y_м$), входящие в формулы для расчета $\rho_{k,mc}$, отсчитываются от осей *X*, *Y*, *Z*, связанных с выше упомянутой моделью (Вишнев, 2007; 2010). Следовательно, их значения могут отличаться от значений, адекватных самому источнику.

Ниже выявляются величины ошибок (Δx, Δy) в $x_м$ и $y_м$, обеспечивающие получение данных обработки полевых материалов методом блуждающих токов (МБТ), пригодных как для качественной, так и для количественной интерпретации.

Определение допустимых отклонений в координатах точек наблюдения поля ЭЖД производилось путем сравнения теоретических трехслойных и двухслойных кривых $\rho_{k,mc}$, рассчитанных с точным и неточным значением одной из них, а также обеих одновременно. Расчеты выполнялись по формулам, опубликованным в работах (Вишнев, 2007; 2010; 2011), с помощью ПК Intel Core 2 Quad и пакета программ компьютерной математики – Mathematic 7. Результаты использованы при усовершенствовании методики полевых работ некоторой модификации МБТ, условно обозначенной аббревиатурой МЭПЖД (метод электроразведки полем железной дороги), основы которой изложены в работах (Вишнев, 1989; 1996).

Результаты вычислений

1. Влияние ошибок координаты $x_м$ на вид кривых $\rho_{k,mc}$

Примеры расчета кривых $\rho^{ij}_{k,mc}$ ($i = x, y$; $j = y, x$; где y – параллельно, x – перпенди-

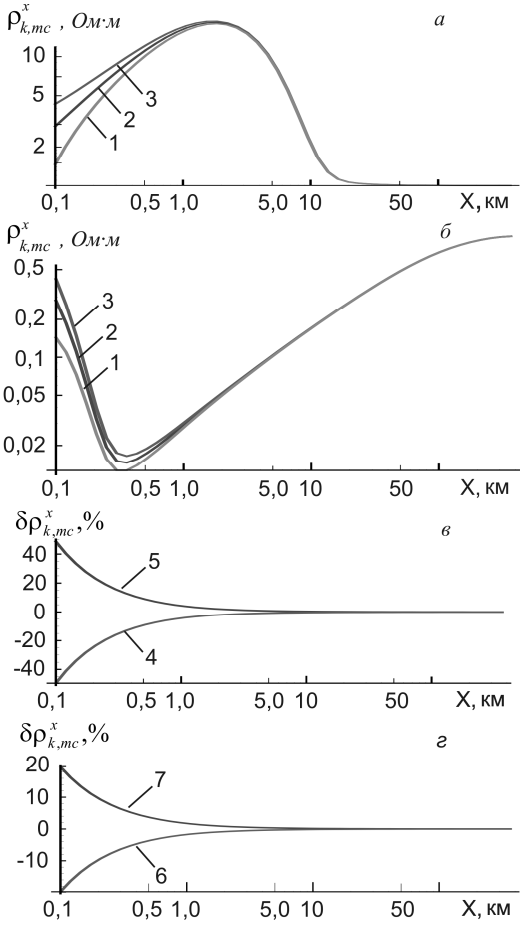


Рис. 1. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления и графиков относительных погрешностей значений $\rho^x_{k,mc}$ при ошибке задания координаты $x_м$ пунктов наблюдения: *а* – кривые для трехслойного геоэлектрического разреза типа «*К*»: ρ_1=1 Ом·м; h_1= 0,05 км; ρ_2= 100 Ом·м; h_2= 0,5 км; ρ_3= 1 Ом·м; h_3=∞ км; *б* – то же для разреза типа «*Н*»: ρ_1=1 Ом·м; h_1= 0,05 км; ρ_2= 0,01 Ом·м; h_2= 0,5 км; ρ_3= 1 Ом·м; h_3= ∞ км (1 – при Δx = -0,05 км; 2 – при Δx=0 км; 3 – при Δx = +0,05 км); *в*, *г* – графики относительных погрешностей значений $\rho^x_{k,\grave{o}\tilde{n}}$ (4 – при Δx=-0,05 км; 5 – при Δx = +0,05 км; 6 – при Δx = -0,02 км; 7 – при Δx = +0,02 км). Параметры модели источника БТ и координаты точек расчета: l_0 = 7 км; $k = (r_p/r_n)^{1/2}$ = = 0,14 км$^{-1}$; L = 20 км; x = (0,1–365) км; y = 5 км

кулярно преимущественному направлению ЭЖД), искаженных неточностями координаты $x_м$, изображены на рис. 1, 2.

Рассматривая рисунки, нетрудно заметить, что все кривые $\rho^{ij}_{k,mc}$ с заниженными (шифр 1) или завышенными (шифр 3) значениями $x_м$ отличаются от их идеального хода (шифр 2), но эти отличия даже при Δx = ±50 м значительны только на крайних левых ветвях, т.е. до удалений от ЭЖД не свыше 1,0 км. Однако практика электроразведочных работ показывает, что обеспечить задание сети наблюдений поля ЭЖД в методе МБТ (или, точнее, в методе ЭПЖД) можно, в большинстве случаев, с гораздо меньшей ошибкой, чем ±50 м, например, ±20 м. При этом интервал больших погрешностей $\rho^{ij}_{k,mc}$ сокращается до первых 500 м от ЭЖД (рис. 1г; 2г).

Значит, реальные ошибки задания координаты $x_м$ (такие, как 10, 20 и 50 м) фатального препятствия трансформации данных измерения помех от ЭЖД в кривые $\rho^{ij}_{k,mc}$ не представляют. Кроме того, при детальном

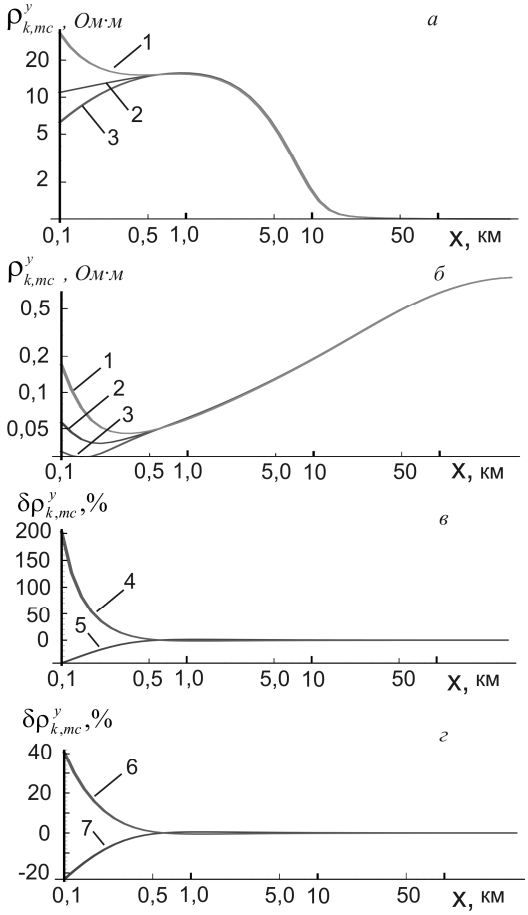


Рис. 2. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления (1 – при Δx = -0,05 км; 2 – при Δx = 0 км; 3 – при Δx = +0,05 км) и графиков относительных погрешностей значении $\rho^y_{k,mc}$ (4 – при Δx = = -0,05 км; 5 – при Δx = +0,05 км; 6 – при Δx = -0,02 км; 7 – при Δx= +0,02 км) при ошибке задания координаты $x_м$ пунктов наблюдения. Параметры модели источника и разрезов см. рис. 1

исследовании рис. 1, 2 нетрудно заметить, что отклонения искаженных значений $\rho^{x}_{k,mc}$, соответствующие отрицательным и положительным погрешностям Δx, по модулю примерно равны и имеют разные знаки. Следовательно, произведя измерения в симметричных относительно направления ЭЖД пунктах местности и вычислив среднеарифметические распределения $\rho^{x}_{k,mc}$, можно (в ряде практических экспериментов) значительно снизить величину $\delta\rho^{x}_{k,mc}$ на всем профиле измерений.

2. Особенности кривых $\rho^{ij}_{k,mc}$ в случае ошибочных значений координаты $y_м$

Примеры расчета кривых $\rho^{ij}_{k,mc}$, искаженных погрешностями координаты $y_м$, изображены на рис. 3, 4. Из их анализа вытекает, что общий ход осложненных распределений $\rho^{ij}_{k,mc}$ (кривые 1, 3), даже при относительной ошибке $(\Delta y/y_м)\cdot 100\ \% = 10\ \%$ (что при $y_м = 5$ км составляет 500 м), остается подобным ходу неосложненных (кривые 2 рис. 3*а*, *б*; 4*а*, *б*). Но неточные $\rho^{x}_{k,mc}$ на расстояниях 0,5–10,5 км, а $\rho^{y}_{k,mc}$ – на расстояниях 0,3–2,5 км от ЭЖД несколько отклоняются от точных (при Δy = -500 м – в сторону увеличения, при Δy = +500 м – в сторону уменьшения), достигая погрешности чуть большей +2 % (графики 4) и -2 % (графики 5 рис. 3*в*; 4*в*). Но это намного лучше стандартной точности (5–10 %) полевых электроразведочных измерений. В случае же уменьшения Δy до ±200 м (графики 7, 6 рис. 3*г*; 4*г*), эти погрешности снижаются до десятых долей процента.

Следовательно, даже отягощенные значительными ошибками координаты $y_м$, кривые кажущегося сопротивления метода ЭПЖД (если соблюдены прочие условия) можно использовать для изучения геоэлектрического разреза как по вертикали, так и по горизонтали.

3. Кривые $\rho_{k,mc}$ при совместных ошибках в координатах $y_м$ и $x_м$

Из сопоставления рис. 1 – 4 между собой ясно, что экстремальные искажения распределений $\rho^{ij}_{k,mc}$ погрешностями параметров $x_м$, и $y_м$ располагаются на различных участках расчетного профиля. Однако

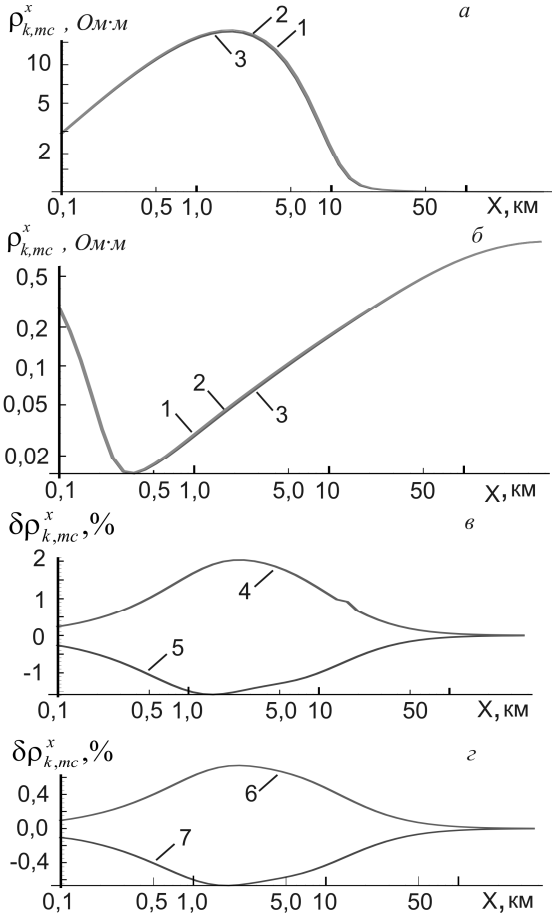


Рис. 3. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления (1 – Δy = -0,5 км; 2 – Δy = 0 км, 3 – Δy = +0,5 км) и графиков относительных погрешностей значений $\rho^{x}_{k,mc}$ при ошибке задания координаты $y_м$ пунктов наблюдения (4 – при Δy = -0,5 км; 5 – Δy = +0,5 км; 6 – Δy = -0,2 км; 7 – Δy = +0,2 км). Параметры модели источника и разрезов см. рис. 1

при уменьшении длины секции контактного провода (L) они частично перекрываются. Выясним, каковы их максимальные суммарные значения.

Иллюстративный материал, соответствующий случаю, когда заданы ошибки в обеих координата, приведен на рис. 5, 6.

Рассматривая рис. 5, 6, видим, что при погрешности Δx не более 20 м, а Δy не более нескольких первых десятков процентов от величины $y_м$ (в случае рис. 5, 6 – 40 %) осложненные кривые $\rho^{ij}_{k,mc}$ практически везде, за исключением ближних к ЭЖД 5–10 сотен метров, совпадают с неосложненными.

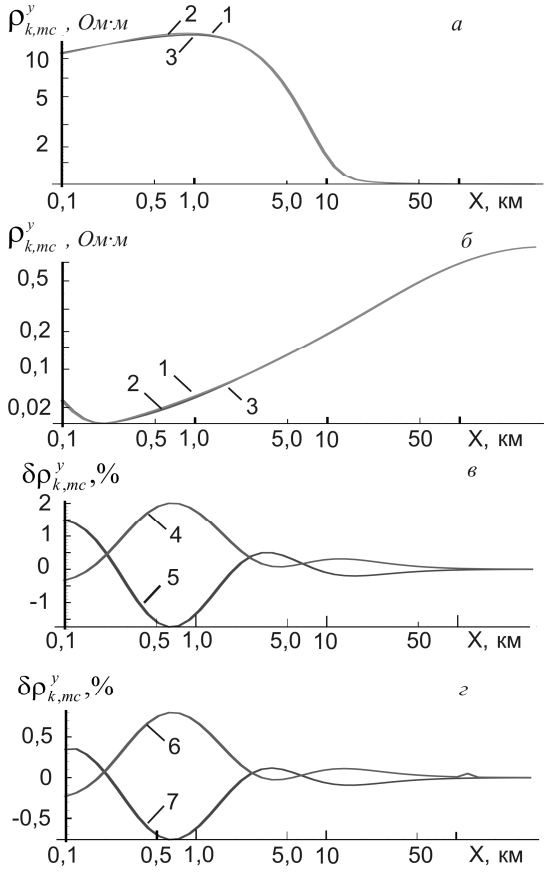


Рис. 4. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления (1 – при Δy = -0,5 км; 2 – Δy = 0 км; 3 – Δy = +0,5 км) и графиков относительных погрешностей значений $\rho^{y}_{k,mc}$ при ошибке задания координаты $y_м$ пунктов наблюдения (4 – при Δy = -0,5 км; 5 – Δy = +0,5 км; 6 – Δy = -0,2 км; 7 – Δy = +0,2 км). Параметры модели источника и разрезов см. рис. 1

Значит, из-за незнания точных значений координат $x_м$, и $y_м$ преобразование данных измерения помех от ЭЖД в параметр кажущееся сопротивление не может ухудшить геологическую информативность метода БТ.

Отсюда напрашивается вывод: для того, чтобы все участки (за исключением ближних к ЭЖД нескольких сотен метров) профильных распределений $\rho^{ij}_{k,mc}$ можно было интерпретировать количественно, координата $y_м$ должна определяться с погрешностями не более 20–30 % от ее значений, а $x_м$ – с погрешностями до первых десятков метров, обеспечить которые вполне возможно.

4. Зависимость искажений кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ от типа слоистого геоэлектрического разреза при неточных значениях координат пунктов измерения

Изучение всевозможных отклонений осложненных кривых $\rho^{ij}_{k,mc}$ от нормального хода показало, что графики распределения относительных ошибок $\delta\rho$ % при одних и

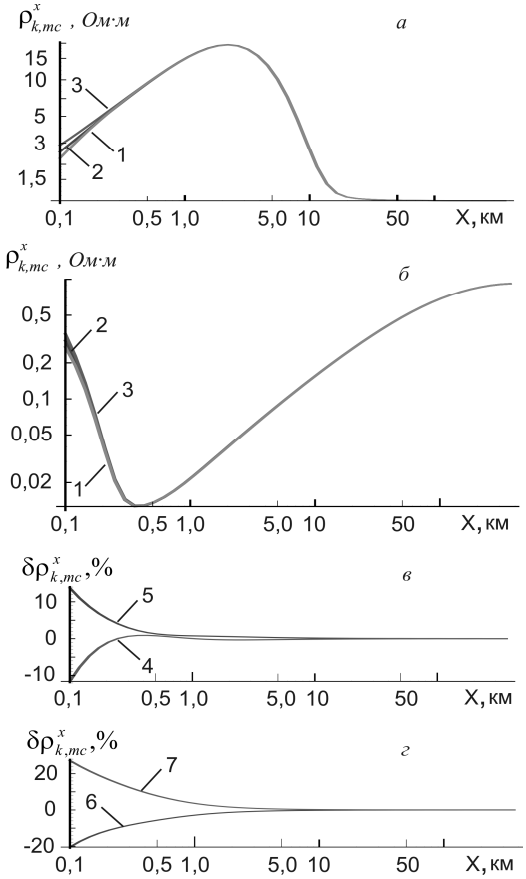


Рис. 5. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления и графиков относительных погрешностей значений $\rho^{x}_{k,mc}$ при ошибках задания координат $x_м$ и $y_м$ пунктов наблюдения: *а*, *б* – кривые для трехслойных геоэлектрических разрезов типа «*К*» и «*Н*» (1 – при Δx = -0,02 км; Δy = -0,1 км; 2 – Δx = 0,0 км; Δy = 0,0 км; 3 – Δx = +0,02 км; Δy = +0,1 км); *в*, *г* – графики относительных погрешностей значений $\rho^{x}_{k,mc}$ (4 – при Δx = -0,02 км; Δy = -0,1 км; 5 – Δx = +0,02 км; Δy = +0,1 км; 6 – Δx = -0,02 км; Δy = +0,1 км; 7 – Δx = +0,02 км; Δy = -0,1 км). Параметры модели источника БТ и координаты точек расчета: l_0 = 0,35 км; k = 0,14 км$^{-1}$; L = 1,0 км, высота подвеса контактного провода (h) – 0,006 км; x = (0,1–365) км; y = 0,25 км. Параметры разрезов см. рис. 1

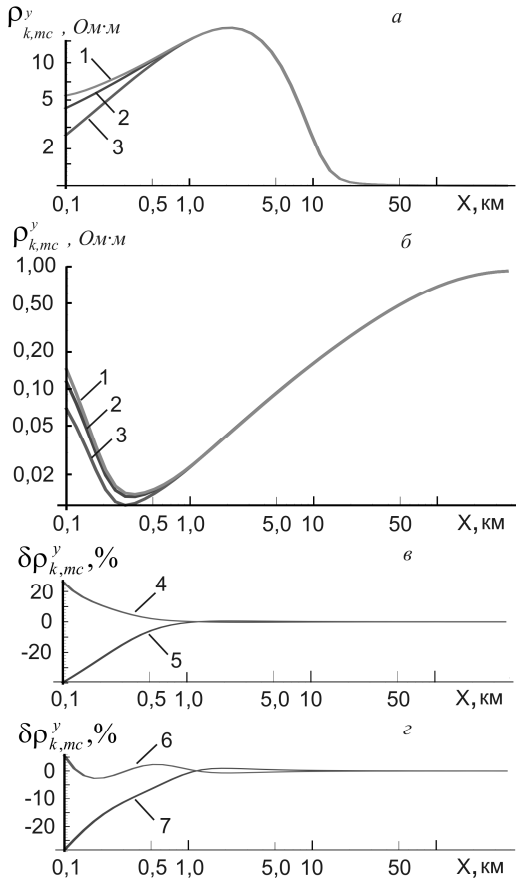


Рис. 6. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления и графиков относительных погрешностей значений $\rho^{y}_{k,mc}$ при ошибках задания координат $x_м$ и $y_м$ пунктов наблюдения: *а*, *б* – кривые $\rho^{y}_{k,mc}$ для трехслойных геоэлектрических разрезов типа «*K*» и «*H*» (1 – при Δx = -0,02 км; Δy = -0,1 км; 2 – Δx = 0,0 км; Δy = 0,0 км; 3 – Δx = +0,02 км; Δy = +0,1 км); *в*, *г* – графики относительных погрешностей значений $\rho^{y}_{k,mc}$ (4 – при Δx = -0,02 км; Δy = -0,1 км; 5 – Δx = +0,02 км; Δy = +0,1 км; 6 – Δx = -0,02 км; Δy = +0,1 км; 7 – Δx = +0,02 км; Δy = -0,1 км). Параметры модели источника см. рис. 5, параметры разрезов см. рис. 1

тех же условиях возбуждения (т.е. одних и тех же L, l_0, k, Δx, Δy, где L, l_0, k – параметры модели источника) различных горизонтально-однородных геологических сред в мельчайших подробностях совпадают. Иначе говоря, являются одинаковыми как, например, для разрезов типа «*K*», так и для разрезов типа «*H*», «*A*» или «*Q*». Это позволило распределения 4 (5) для кривых 1 (3) разрезов типа «*K*» и «*H*» изобразить на рис. 1, 2, 3, 4, 5, 6 в совмещенном виде. То же относится и к графикам 6, 7 упомянутых рисунков, т.к. искажения кривых $\rho^{ij}_{k,mc}$, возникающие за счет погрешностей Δx, Δy, от типа слоистого геоэлектрического разреза не зависят.

Заключение

Подводя итоги, необходимо отметить:

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

2. Ошибками Δx искажаются, в основном, левые ветви $\rho^{ij}_{k,mc}(x)$, а ошибками Δy – средние части ближней к ЭЖД трети расчетного профиля.

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

4. Выявленные требования к точности величин $x_м$, $y_м$ довольно мягки и, в благоприятных случаях постановки метода ЭПЖД, вполне выполнимы.

5. Из анализа полученных материалов 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 нескольких сотен метров, практически не влияя (в случае горизонтально-однородного геоэлектрического разреза) на качество полевого материала.

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

Литература

Вишнев В.С. Об использовании поля тяговой сети электрической железной до-

роги для электрозондирования // Электрометрические исследования на Урале. Свердловск, 1989. С. 2–27. Рукопись деп. в ВИНИТИ № 4380-89.

Вишнев В.С. Исследование возможности использования блуждающих токов железной дороги для получения количественных геоэлектрических характеристик: Дис. … канд. техн. наук. Института геофизики УрО РАН. Екатеринбург, 1996. 101 с.

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.