DOI: 10.25698/UGV.2018.3.2.11 УДК 550.837

О ВОЗМОЖНОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ГЛУБИННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИМПУЛЬСНЫМИ ТОКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

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

Аннотация. Рассмотрена методика полевых и камеральных работ электрической разведки недр импульсными токами тяговой сети железной дороги. На практическом примере установлено, что эти токи могут быть использованы для изучения проводящих зон глубоких горизонтов земной коры.

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

ON THE POSSIBILITY OF IMPLEMENTATION OF DEEP ELECTRICAL SENSING OF THE EARTH BY PULSE CURRENTS OF THE ELECTRIC RAILWAY

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

Abstract. The technique of field and cameral work of electric subsoil exploration by impulse currents of traction network of the railway is considered. In a practical example, it is established that these currents can be used to study the conducting zones of the deep horizons of the earth's crust.

Railway, noise, impulses, useful signal, model, parameters, field, curves of apparent resistance.

Введение

Магнитотеллурические исследования на Урале показывают, что поле импульсных токов электрической железной дороги (ЭЖД), возникающее при изменении режимов движения (энергопотребления) электровозов, уверенно регистрируется серийной геофизической аппаратурой до удалений от рельсов на 15–30 и более километров. Значит, его можно применять не только в методе блуждающих токов, то есть в варианте профилирования, но и в варианте геометрического зондирования, причем, значительных глубин.

Попытки использования тяговой сети стальной магистрали в качестве мощного электроразведочного источника уже имели место. Так, например, в 1969 г. во Франции для изучения глубинного геоэлектрического разреза была задействована железнодорожная ветка г. Париж – г. Тулуза. Измерения велись на расстояниях от рельсов десятки – первые сотни километров, а ЭЖД считалась заземленным электрическим диполем с осью AB = 20 км и силой тока I – 500 ампер. Оказалось, что кажущееся электрическое сопротивление горных пород на разносе r в 50 км составляло 5000 Ом·м, при r = 115 км – 20000 Ом·м и так далее, монотонно увеличиваясь с глубиной проникновения зондирующего сигнала (Mennir, 1969).

Полученные результаты может и вполне вероятные, но аппроксимация ЭЖД дипольным источником, особенно на близких и средних удалениях от рельсов, является очень грубым приближением к действительности. Поэтому рассматриваемый способ электроразведки не нашел широкого распространения.

В СССР в 1990 году были изданы методические указания по применению контактной подвески дороги в качестве активного электроразведочного источника (Эненштейн и др., 1990). Они предусматривали коммутацию нескольких секций контактного провода в одну длинную линию, подсоединение ее к специально смонтированным в стороне от рельсового пути заземлениям и съемку поля по методике ЗС-ЛЭП (зондирование становлением с использованием линии электропередачи).

Однако такие работы сопряжены с длительными перерывами в движении поездов и с большими финансовыми затратами, что, безусловно, сильно сдерживало их осуществление.

Нами установлено (Вишнев и др.,

1987, Вишнев, 2012), что из совокупности измерений техногенного поля ЭЖД можно выделять однотипные по структуре пространственного распределения (полезные) сигналы, которые поддаются преобразованию в кривые кажущегося сопротивления и могут интерпретироваться как на качественном, так и на количественном уровне.

Исходной моделью источника этих сигналов предложено 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. Модель предельно проста и, если принять, что соответствующий участок рельсового пути прямолинейный, неветвящийся и равномерно заземленный, а поле установившееся, легко поддается алгоритмизации (Вишнев, 2012).

В процессе разработки методики использования в электроразведке сигналов, выделяемых из помех от ЭЖД, в одном из полевых экспериментов они были зарегистрированы на расстояниях от рельсов до 27 километров (Вишнев, 2003), а еще раньше подобные сигналы измерялись на Урале и на удалениях вплоть до 60 километров (Ковалевский и др., 1961).

Цель статьи – выяснение возможности изучения с помощью техногенного поля ЭЖД проводящих зон в фундаменте земной коры.

В ее основу положены экспериментальные данные, полученные попутно с производством многочисленных электроразведочных исследований Уральской палеозойской геосинклинали методом магнитотеллурического зондирования.

Суть эксперимента

Опытные работы по применению помех от ЭЖД в электроразведке выполнялись на Южном Урале, вблизи пересечения Троицким профилем ГСЗ (глубинного сейсмического зондирования) железнодорожной ветки г. Троицк – г. Карталы (рис. 1, цветная вкладка).

Измерения техногенного поля проводились над зоной контакта Еманжелинско-Бородиновского синклинория Восточно-Уральского прогиба земной коры с Троицко-Кенгусайским мегантиклинорием Зауральского поднятия и над зоной чередования сильно вытянутых в северо-северо-восточном направлении антиклинальных и синклинальных структур его западной части, перекрытых неравномерной по мощности толщей слабо измененных мезозойско-кайнозойских рыхлых отложений. Палеозойское консолидированное, основание исследуемой территории, подвергнуто значительным дислокациям и изобилует разного рода разрывными нарушениями (Геология СССР, 1969), часть из которых была выделена впервые только по гравимагнитным данным (в частности, глубинный разлом на рис. 1 (цветная вкладка), условное изображение 20 (*б*)) и нуждалась в подтверждении (Огаринов, 1973).

Использовались импульсные помехи, возникающие при изменении тяговой нагрузки электровозов. В связи с чем перед началом полевых измерений проведена рекогносцировка соответствующего отрезка рельсового пути, расположенного между подстанциями Саламат и Бускуль. В качестве места, где поезда вынуждены ускоряться или притормаживать, то есть изменять режима энергопотребления (движения), инициируя мощные электромагнитные импульсы, выбраны подъездные пути к железнодорожному мосту через реку Верхний Тогузак.

Измерение помех производилось синхронно двумя комплектами магнитотеллурической аппаратуры МТЛ-71. Один из них все время наблюдений работал в точке, расположенной, примерно, в 600 метрах на запад от упомянутого моста (долговременный или базисный пункт), второй – на точках профиля, идущего вдоль полевых дорог (рядовые пункты), соединяющих селения Алексеевка (на востоке) и Бородиновка (на западе).

Регистрировались две составляющие электрического (E_x, E_y) и три составляющие магнитного (H_x, H_y, H_z) поля, а также

время, направление и особенности движения (ускорение, торможение и пр.) поездов на подступах к мосту. Сведения об особенностях прохождения железнодорожных составов фиксировались визуально и заносились в полевой журнал в виде фраз «09 ч 12 мин – электропоезд с севера, тормозится» или «17 ч 34 мин – товарняк с юга, ускоряется», и т. п. Наблюдение за деятельностью ЭЖД осуществлялось оператором станции МТЛ-71 базисного пункта. Время работы на ближних к дороге рядовых пунктах составляло 1,5–2 ч, на дальних – 3–5 ч).

Эксперимент был направлен, в основном, на выяснение возможности выделения из совокупности измерений помех от ЭЖД однотипных по структуре источника, так называемых полезных сигналов. Геологическая эффективность осуществляемых исследований на тот момент не являлась первостепенной. В связи с чем, сеть наблюдения техногенного поля была нерегулярной, привязка точек его измерения – не инструментальной. Это позволяло экономить время и средства, затрачиваемые на выполнение экспедиционной части эксперимента. Тем не менее, из имеющихся наблюдений поля ЭЖД можно извлечь и геологическую информацию.

При обработке полевых материалов производилось сопоставление данных долговременного (д) и каждого рядового (р) пунктов. По меткам временных каналов магнитотеллурических станций и записям полевого журнала отбирались импульсы, соответствующие моментам прохождения поездов по подъездным путям железнодорожного моста через реку Верхний Тогузак, и снимались их амплитуды. Вычислялись отношения взаимно перпендикулярных составляющих импульсов базисного пункта ($\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$, $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$), ранжировались и разбивались на интервалы. Подсчитывалось количество N соответствующих отношений, входящих в тот или иной интервал, и строились графики (гистограммы) их распределений (рис. 2). Оказалось, что каждая гистограмма имеет только по одному сильно выделяющемуся экстремуму. Причем, максимум на гистограмме рис. 2, *а* образуется теми же импульсами, что и на гистограмме рис. 2, *б*. Это вселяет уверенность, что входящие в экстремумы гистограмм импульсы базисного пункта и соответствующие им импульсы рядовых пунктов возбуждены в моменты, когда распределения токовых приращений в тяговой сети ЭЖД были идентичными. То есть структура источника отобранных импульсов – одна и та же. Чтобы привести их еще и к одинаковой его интенсивности, построены графики зависимостей $\Delta E_{ip}(\Delta H_{jp})$, $\Delta E_{ip}(\Delta H_{jд})$, $\Delta E_{гр}(\Delta H_{гр})$, $\Delta E_{гр}(\Delta H_{гд})$, где $i = x, y$; $j = y, x$; г – символ проекции векторов E и H на горизонтальную плоскость.

Выяснилось, что полученные графики на каждом пункте представляют собой прямые линии, идущие из начала координат (пример на рис. 2, *в*). Значит, тангенсы углов наклона этих прямых к осям абсцисс есть не что иное, как электромагнитные сигналы, источник которых и по структуре и по интенсивности один и тот же.

Выделенные из помех сигналы были пересчитаны в значения кажущегося со-

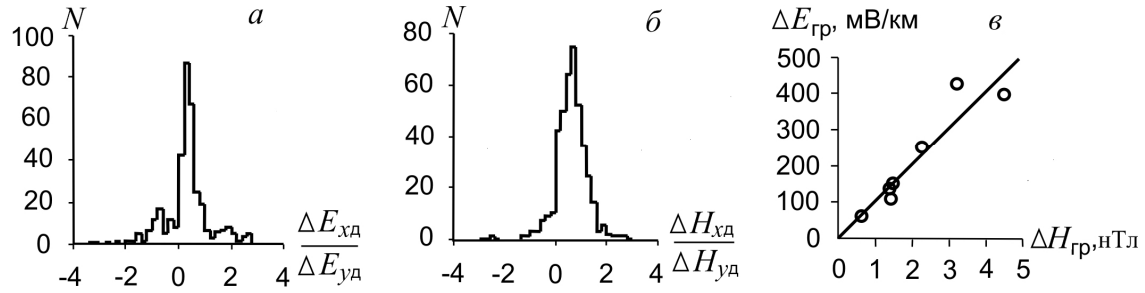


Рис. 2. Результаты обработки полевых материалов.
Гистограммы отношений:
а – $\Delta E_{хд}/\Delta E_{уд}$; *б* – $\Delta H_{хд}/\Delta H_{уд}$;
в – пример приведения полезных сигналов к одной и той же интенсивности источника

противления $\rho_{к,тс}$ (тс – тяговая сеть) по формуле (Вишнев, 2012):

$$\rho_{к,тс}^{ij} = \frac{G_j}{P_i} \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta H_j},$$

где ΔE_i – электрические составляющие полезных сигналов, измеренные в рядовых пунктах наблюдения; ΔH_j – магнитные составляющие полезных сигналов, измеренные в базисном или в тех же рядовых пунктах, что и электрические; P_i, G_j – величины, играющие роль коэффициентов электроразведочной установки, куда входят параметры модели источника полезных сигналов и координаты пунктов наблюдения; Δ – символ импульса электромагнитного поля.

Пересчет сопровождался заданием модели источника полезных сигналов. Для этого был взят топографический планшет масштаба 1:100 000 с нанесенной сетью полевых работ. Из местоположения станции Саламат в сторону станции Бускуль проведена прямая, совпадающая с преимущественным направлением железной дороги. На нее перенесены тяговые подстанции и предполагаемый пункт изменения режима энергопотребления электровозов. Из условного обозначения тяговой подстанции Саламат восстановлен перпендикуляр к этой прямой. Перпендикуляр стал осью *x,* а прямая линия, имитирующая железнодорожное полотно, – осью *y* декартовой системы координат, связанной с моделью источника. Эта система координат использована далее для определения (снятия с планшета) параметров L, l_0 и координат (x, y) пунктов наблюдения, входящих в формулу расчета кривых $\rho_{к.тс}$. Величина k найдена путем минимизации разности экспериментального и расчетного значений отношения составляющей H_z к составляющей H_y поля базисного пункта.

Известно (Вишнев, 2012), что, используя полезные сигналы $\Delta E_{ур}/\Delta H_{хд}$, $\Delta E_{ур}/\Delta H_{хр}$, $\Delta E_{гр}/\Delta H_{гд}$, $\Delta E_{гр}/\Delta H_{гр}$, $\Delta E_{хр}/\Delta H_{уд}$, $\Delta E_{хр}/\Delta H_{ур}$, можно построить несколько типов кривых кажущегося сопротивления. Некоторые из них ($\Delta E_{ур}/\Delta H_{хд}$, $\Delta E_{ур}/\Delta H_{хр}$, линия *MN* измерительной установки электрического поля ΔE – вдоль преимущественного направления ЭЖД) лучше подходят для изучения изменения электропроводности геологической среды по горизонтали, другие ($\Delta E_{хр}/\Delta H_{уд}$, $\Delta E_{хр}/\Delta H_{ур}$, *MN* – поперек ЭЖД) – по вертикали. В работе (Вишнев и др., 2014) были рассмотрены кривые $\rho_{к,тс}^{г} = (G_р^{г} / P_р^{г})\Delta E_{гр} / \Delta H_{гр}$, расположенные над восточной и западной частями профиля наблюдения. Они позволили разграничить исследуемый массив горных пород на участки с повышенной и пониженной электропроводностью, уточнив, тем самым, стартовую модель геоэлектрического разреза, необходимую для двухмерной интерпретации данных глубинного магнитотеллурического зондирования по Троицкому профилю ГСЗ. Рассмотрим, как ведут себя в тех же условиях кривые $\rho_{к,тс}^{x}$, в частности, над западной частью профиля, где консолидированные породы Уральской геосинклинали выходят на дневную поверхность.

Обсуждение результатов

Кривые $\rho_{к,тс}^{x} = (G_д^{y} / P_р^{x})\Delta E_{хр} / \Delta H_{уд}$ и $\rho_{к,тс}^{x} = (G_р^{y} / P_р^{x})\Delta E_{хр} / \Delta H_{ур}$ изображены на рис. 3 (шифр 1 и 2).

Эти кривые, построенные в двойном логарифмическом масштабе, показывают, что, кроме сведений об изменении электропроводности (σ) изучаемого массива горных пород в горизонтальных направлениях (чередование минимумов и максимумов, совпадающих с выходами низкоомных и высокоомных геологических образований на дневную поверхность), в них содержатся сведения об изменении σ и в вертикальном направлении. Действительно, если бы удельное электрическое сопротивление геологической среды монотонно росло с глубиной, то значения $\rho_{к,тс}^{x}$ с удалением от ЭЖД колебались (согласно теоретическим представлениям) вдоль прямой, идущей под углом 45 градусов к оси абсцисс, а точки мысленно проведенной осредненной кривой, начиная с расстояний примерно 3–4 км от источника поля, отклоняются вниз от этой линии все больше и больше. Значит на глубине, существенно превышающей 1 километр, есть электриче-

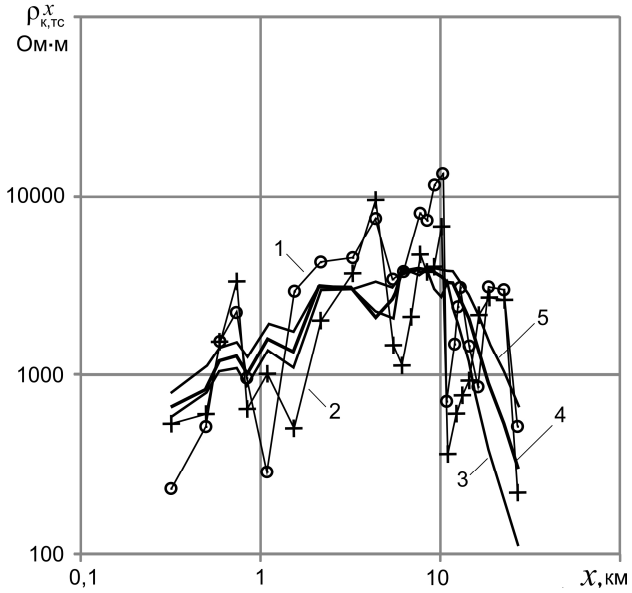


Рис. 3. Результаты интерпретации данных измерения поля токов ЭЖД:
1, 2 – практические кривые, соответственно $\rho^x_{к,тс} = (G^y_д / P^x_р)\Delta E_{хр} / \Delta H_{уд}$ и $\rho^x_{к,тс} = (G^y_р / P^x_р) \times \Delta E_{хр} / \Delta H_{ур}$; 3, 4, 5 – теоретические кривые $\rho^x_{к,тс}$.
Параметры модели источника поля:
L = 21,4 км; l_0 = 2,15 км; k = 0, 22 км$^{-1}$.
Геоэлектрические разрезы:
3 – ρ_1= 400 Ом·м, ρ_2 = 8000 Ом·м, ρ_3 = 50 Ом·м, h_1 = 200 м, h_2 = 2 км;
4 – ρ_1 = 400 Ом·м, ρ_2 = 8000 Ом·м, ρ_3 = 50 Ом·м, h_1 = 250 м, h_2 = 2,5 км;
5 – ρ_1 = 400 Ом·м, ρ_2 = 8000 Ом·м, ρ_3 = 50 Ом·м, h_1 = 300 м, h_2 = 3 км

ский проводник. Формальная интерпретация кривой $\rho^x_{к,тс}$ в рамках одномерной геоэлектрической модели методом подбора с помощью ЭВМ (других, к сожалению, интерпретационных способов подобных кривых пока не разработано) показывает, что изучаемый геоэлектрический разрез трехслойный, с проводящим основанием. Согласно теоретической кривой под шифром 4 (см. рис. 3), удельное электрическое сопротивление геологических образований первого слоя (ρ_1) составляет примерно 400 Ом·м (очевидно, среднее значение ρ коры выветривания коренных пород), глубина его подошвы (h_1) – около 200 метров. Те же параметры второго слоя, соответственно равны 8000 Ом·м и 2,0 километра. Удельное электрическое сопротивление третьего слоя – 50 Ом·м.

Полученные численные величины, в силу уже упоминавшихся упрощений и неточностей, вероятно, далеки от истинных, но несомненно, что на некой глубине среди высокоомных пород консолидированного основания земной коры района исследований залегает какой-то проводящий объект. Попробуем разобраться, чему он может соответствовать.

Согласно геологической карте Урала (см. рис. 1), наш профиль пересекает несколько, в том числе и глубинных, разломов. По сейсмическим данным отражающие площадки, отождествляемые там с Карталинской разломной зоной, падают на запад под углами 30–40 градусов и прослеживаются до глубин примерно 40 км. В выходах на поверхность разломы представлены милонитами, меланжированными серпентинитами и другими продуктами тектонической переработки (Иванов, 1998; Дьяконова и др., 2007). Разрушенные породы подвергаются физико-химическим преобразованиям интенсивнее, чем целики, и в силу обводненности, а также других денудационных факторов, их электрическое сопротивление на много ниже электрического сопротивления консолидированных пород. Рассматриваемый профиль простирается примерно вдоль линии падения разломной зоны. Вероятно, эта зона и выделяется на кривых $\rho^x_{к,тс}$ в виде проводящего основания.

Заключение

Из изложенного выше ясно, что техногенное поле ЭЖД вполне подходит для обнаружения коровых проводников, но по представленным данным нельзя определить ни угол падения, ни мощность обнаруженной проводящей зоны, так как железная дорога на данном участке идет примерно параллельно глубинным разломам, а профиль пролегает приблизительно в крест их простиранию. В рамках слоистой модели земной коры этот случай для определения даже угла падения проводящей зоны по результатам применения излагаемой методики весьма неблагоприятен.

Однако на Урале есть железнодорожные ветки, пересекающие регион с запада на восток. Глубинные же разломы земной коры простираются примерно с севера на

юг на многие десятки и даже сотни километров. Наблюдая техногенное поле ЭЖД по нескольким секущим широтную дорогу профилям, можно получить сведения и о мощности (*H*), и об угле падения (α) и о глубине залегания (*h*) соответствующей разломной зоны. Но при имеющемся математическом обеспечении интерпретации кривых $\rho_{к,тс}$ значения *h* и *H* будут относительными. Для определения их истинных величин нужно (на базе имеющегося решения задачи о поле точечного источника тока в присутствии наклонного проводящего пласта) создать новый вариант математического обеспечения метода.

Однако угол α (в предлагаемом эксперименте) получится истинным и без дополнительных разработок. Кроме того, по этим данным (также без дополнительных разработок) можно, вероятно, выяснить выполаживаются или не выполаживаются глубинные разломы по мере их погружения, что очень важно для геотектоники.

Работа выполнена (*частично*) *при поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН*, *проект № 15-5-5-38.*

Литература

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.

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

Вишнев В.С., *Дьяконова А.Г., Сурина О.В*. Использование полей-помех электрифицированной железной дороги при электроразведочных исследованиях // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 3. С. 103–109.

Вишнев В.С., Дьяконова А.Г., Журавлева Р.Б. Способ геоэлектроразведки. А. с. СССР № 1582160, 1987.

Дьяконова А.Г., Иванов К.С., Астафьев П.Ф., Вишнев В.С., Коноплин А.Д. Геоэлектрические особенности строения земной коры и верхней мантии Южного Урала // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 10. С. 1086–1095.

Геология СССР. М.: Недра, 1969. Т. XII. Ч. I. Кн. 2. 302 с.

Иванов К.С. Основные черты геологической истории (1,6–0,2 млрд лет) и строения Урала: Дис. … доктора геол.-мин. наук. ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 1998. 252 с.

Ковалевский И.В., Микерина Н.В., Новыш В.В., Городничева О.П. Изучение блуждающих токов от электрифицированной железной дороги и характер их затухания в районе Южного Урала // Геомагнетизм и аэрономия. 1961. Т. 1. № 5. С. 825–829.

Огаринов И.С. Строение и районирование Земной коры Южного Урала. М.: Наука, 1973. 85 с.

Эненштейн Б.С., Мхеидзе Б.Д., Лекиашвили Р.И. Методические указания по использованию тяговой сети электрифицированной железной дороги для исследования глубинного геолого-геофизического строения Земли. Тбилиси, 1990. 35 с.

Mennir J. Soutage electrique de la crounte terrestre utilisant les courants de retour industries // Compte Rendu Akad. Sci. 1969. № 6 V. 268, ser. Act. B. P. 514–516.