

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА 3D МОДЕЛИ ГЛУБИННЫХ РАЗЛОМОВ

Т.К. Бурахович, О.В. Гищук, Т.И. Причепий

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32,
г. Киев, 03680, Украина, e-mail: burahovich@ukr.net, perest-olga@ukr.net, sharapann@ukr.net*

На основе теоретического 3D моделирования природного низкочастотного электромагнитного поля получены магнитотеллурические функции отклика в рамках представления импеданса как в классическом виде – тензорном, так и в скалярном. Показано, что наклон субвертикального проводника наиболее ярко проявляется в соотношении уровня кривых ρ_k и ρ_ζ (приподнятые и опущенные), направленных поперек структуры, относительно уровней локально-нормальной кривой и кривой вдоль проводника. В последней сложнее определить пространственное положение аномалии, его возможно обнаружить только по частотному сдвигу минимума и только непосредственно над проводником. Фазовые кривые импеданса, направленные поперек аномальной структуры, несут информацию об относительном изменении ρ_k .

Ключевые слова: глубинный разлом, теоретическое 3D моделирование, кажущееся удельное электрическое сопротивление, метод скалярного импеданса.

Введение. Целью геоэлектрических исследований обычно является определение геометрии структуры и физического состояния вещества Земли. Решение этих задач опирается на оценки контрастов удельной электрической проводимости (σ) в пределах моделей, которые описывают местоположение и геометрию литологических и, особенно, тектонических границ. Электрическое сопротивление (или его обратная величина – σ) в земных породах изменяется в пределах 10 порядков. По данным магнитотеллурических (МТ) исследований в континентальной земной коре величина σ обычно изменяется на 3–4 порядка. Такой широкий диапазон изменения физических свойств (например, в сравнении с сейсмическими скоростями или плотностью пород) вызван разными причинами и природой образования проводников. Некоторые из них, например сульфиды металлов и графит, имеют исключительно высокую величину σ и при незначительном содержании, но в случае их полной связности могут образовывать аномалии, которые четко влияют на распределение МТ-полей.

Графитизированные глубинные зоны разломов докембрийского фундамента проявляются в виде интенсивных локальных аномалий (единицы омметров при фоне 5–10 тыс. Ом·м, даже если объемное содержание графитового вещества составляет около 1%), формирующих протяженные региональные аномалии [5]. В качестве источника рассматриваются тонкие протяженные углеродистые пленки на границах зерен пород, сформировавшиеся на глубинах 3–5 км в период активных тектонических движений за счет поступления углеродсодержащих флюидов.

Магнитовариационные (МВ) исследования [4] показали, что локальные аномалии литосферы Воронежского кристаллического массива простран-

ственно и генетически связаны с активными зонами разломов (Обоянским, Белгородско-Михайловским, Лосевско-Мамонским и др.) и обусловлены либо нижнепротерозойскими вулканогенно-осадочными образованиями, выполняющими наложенные структуры (в значительном объеме это породы карбонатно-терригенно-углеродистой и черносланцевой формаций), либо интенсивной насыщенностью высокоминерализованным флюидом.

При изучении глубинного строения Балтийского щита методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) было показано [6], что почти каждая зона разломов выражена большим понижением сопротивления на глубине ~5–10 км. Но эпицентры проводящих областей смещены от выходов разломов на поверхность в юго-западном направлении.

Один из основных результатов 3D моделирования строения Украинского щита (УЩ) по данным МТЗ и магнитовариационного профилирования (МВП) – выявление субвертикальных низкоомных аномалий вдоль протяженных зон разломов, например, Брусилковского, Звенигородско-Братского, Субботско-Мошоринского, Тальновского, Первомайского, Кировоградского, Западно-Ингулецкого, Криворожско-Кременчугского, Азово-Павлоградского, Центрально-Приазовского, Грузско-Еланчикского и др. Природа аномалий повышенной величины σ на глубинах до 2,5 км обусловлена наличием ассоциации минералов (сульфидов, графита) в зонах метасоматической проработки пород, что приводит к образованию рудной минерализации (уран, золото, редкие металлы). Аномалии повышенной проводимости σ в земной коре на глубинах 5–30 км и верхах верхней мантии 50–120 км, вероятнее всего, отражают следы воздействия современных мантийных флюидов.

В работе [3] приведены оценки протяженности, ширины, направления глубинных зон разломов УЩ и угла их падения: Первомайский (190×25 км, падение северо-восточное, $60-70^\circ$), Тальновский (450×15 км, наиболее вероятное падение юго-восточное, 80°), Кировоградский (100×25 км, около 90°), Ядлов-Трактемировский (более $200 \times 15-18$ км, падение юго-восточное, $80-85^\circ$), Немировский (285×13 км) и др.

В одном из первых теоретических исследований учета влияния проводящих зон разломов на результаты МТЗ в рамках 2D представлений [8] показано, что флюидонасыщенные или графитсодержащие зоны разломов образуют проводящие каналы, которые пересекают непроводящую литосферу, обеспечивая вертикальное перераспределение теллурического тока (H -поляризация). Включается более или менее мощный механизм, нормализующий МТ-поле, искаженное приповерхностными неоднородностями осадочного чехла. Этот же механизм повышает чувствительность МТ-поля к коровым и мантийным проводящим зонам. Проводящие зоны разломов определяют эффективность МТЗ.

В работе [7] описаны результаты сравнения 2D и 3D моделей среды, содержащей вертикальные тектонические зоны разломов, и исследовано влияние на МТ-поле соотношения ширины и длины структуры.

Целая глава посвящена результатам 2D моделирования глубинных зон разломов в монографии [1]. Обычно считается, что эффект каналирования (когда плотность аномального тока в проводящем канале во много раз больше, чем в окружающей среде) является трехмерным. Коровые слои, зоны разломов и осадочная толща образуют замкнутый проводящий контур.

Таким образом, исследования даже элементарных тел в 3D случае существенно осложняются. С точки зрения интерпретации полезно рассмотреть некоторые вопросы, связанные с чувствительностью МВ- и МТ-функций отклика, например, к объекту высокой электропроводности типа регионального глубинного разлома с различным углом наклона.

3D модели и анализ расчета электромагнитных полей. В настоящей статье для расчетов использован пакет программного обеспечения трехмерного моделирования низкочастотных электромагнитных полей Mtd3fwd [12].

МВ- и МТ-параметры рассчитываются исходя из модели источника первичного поля в виде плоской поперечно-магнитной электромагнитной низкочастотной волны, которая на границе земля-воздух рассматривается как вертикально падающая. Модель среды представляется горизонтально-слоистой, на фоне которой располагается аномалия электропроводности. Примем в качестве фона одномерный разрез со следующими параметрами:

$\rho_1 = 1000$ Ом·м, $h_1 = 160$ км; $\rho_2 = 600$ Ом·м, $h_2 = 40$ км; $\rho_3 = 250$ Ом·м, $h_3 = 50$ км; $\rho_4 = 100$ Ом·м, $h_4 = 70$ км; $\rho_5 = 50$ Ом·м, $h_5 = 80$ км; $\rho_6 = 20$ Ом·м, $h_6 = 100$ км; $\rho_7 = 10$ Ом·м, $h_7 = 100$ км; $\rho_8 = 5$ Ом·м, $h_8 = 160$ км; $\rho_9 = 1$ Ом·м, $h_9 = 200$ км; $\rho_{10} = 0,1$ Ом·м, $h_{10} = \infty$ км.

Типичные параметры разломов УЩ [3] стали примером для построения 3D моделей электропроводящих структур (с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 10$ Ом·м) длиной 500 км, шириной 20 км, с верхней кромкой на поверхности (0 км), нижней – на глубине 50 км, под разными углами наклона – 90° (М90), 60° (М60), 45° (М45), 30° (М30), 15° (М15) на фоне $\rho_n = 1000$ Ом·м. Была сформирована область, состоящая из более 24 000 параллелепипедов с длинами сторон от 2 до 50 км. В соответствии с направлением осей ($x \times y \times z$) расположены ячейки в количестве ($52 \times 42 \times (10-12)$), каждая из которых характеризуется однородным ρ . Горизонтальные размеры ячеек на окраинах области моделирования большие для более точного описания затухания аномальных полей. Вертикальные размеры ячеек изменялись от 2 до 20 км. Аномальный объект и его границы описывались ячейками в 2 км (в районе анализируемого профиля). Такое сложное описание модели дает возможность получить точные значения переходных функций импеданса (Z) и магнитных параметров (для периода геомагнитных вариаций $T = 1$ с точность составляет менее 1 %). Для каждой модели проведены расчеты электрической и магнитной компонент МТ-поля для $T = 0, 1; 1; 10; 100; 1000; 10\ 000$ с. Анализ электромагнитных функций отклика проведен вдоль центрального профиля вкострости простирающейся структуры.

Первая часть – расчет и анализ комплексных индукционных типперов W – рассмотрена в публикации [2]. Показано, что отклонения в величине W модели М90 от наклонных М60 и М30 составляют 10 и 30 % соответственно. К сожалению, результаты моделирования не дали ожидаемых позитивных оценок, таких, какие были приведены в работе [11], и интерпретационные зависимости [2] нельзя считать универсальными. Сделан вывод о том, что при построении 3D моделей реальных геологических сред можно с определенной долей уверенности использовать проводящие глубинные зоны разломов в виде субвертикальных структур.

Второй части – расчету и анализу МТ-функций отклика – посвящена данная статья.

Аномалии E_x (направление поперек продольной структуры) имеют гальваническую природу. Низкоомный проводник проявляется в виде разрыва E_x от 0,1 до 1,2 над краями разлома (в симметричных точках ± 12 км относительно центра) и минимального экстремума (в интервале профиля от -9 до $+9$ км), значение которого уменьшается в 6 раз (от 0,175 до 0,03) с увеличением T от 0,1 до 10 000 с (рис. 1, вставка). Максимальные боковые экстремумы в этом же диапазоне T возрастают на 13 % (с

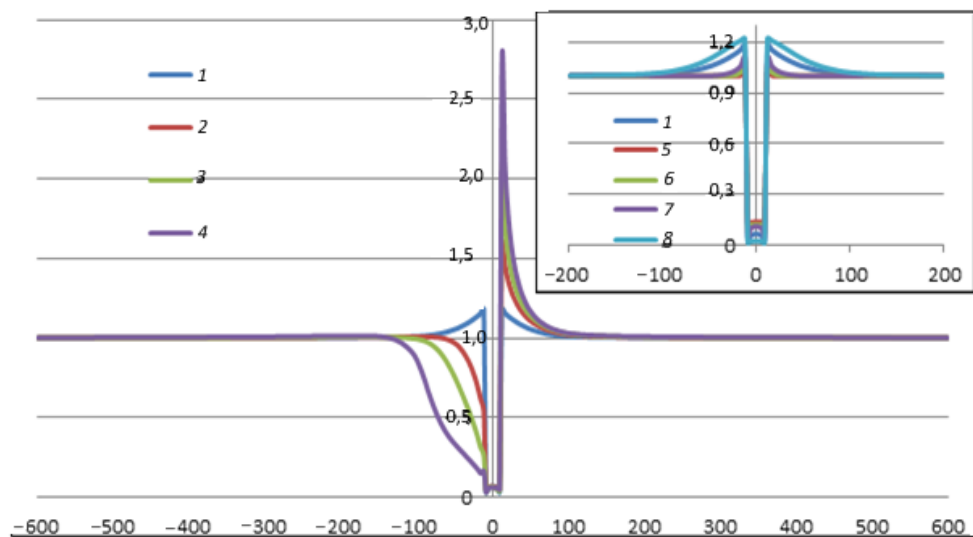


Рис. 1. Изменение компоненты E_x , нормированной на нормальное поле E_x^N для $T = 100$ с. Модели: 1 – M90; 2 – M60; 3 – M45; 4 – M30; вставка – модель M90 на T , с: 5 – 0,1; 6 – 1; 7 – 10; 8 – 10 000. Горизонтальная ось – километры

Fig. 1. Variation E_x component, normalized to the normal field E_x^N $T = 100$ s. Models: 1 – M90; 2 – M60; 3 – M45; 4 – M30; paste – model M90 on T , s: 5 – 0,1; 6 – 1; 7 – 10; 8 – 10 000. The horizontal axis – kilometers

1,05 до 1,2). Аномалия E_x затухает вдоль профиля симметрично, с понижением частоты расстояние, на котором исчезают боковые экстремумы, увеличивается от 20 до 54 км. Экстремумы поля E_x связаны с перераспределением поперечного тока вследствие разной толщины скин-слоя (отличие составляет два порядка) в разломе и в окружающей среде (так называемый краевой эффект).

На $T = 100$ с графики компоненты E_x электромагнитного поля для моделей M60, M45, M30 не симметричны относительно центра модели (рис. 1). Правая часть профиля, которая расположена не над наклонными структурами, характеризуется практически одинаковой формой графиков, затухание аномалии (до уровня 1,1) начинается на расстоянии 32 км, различие (почти в 2,5 раза) только в величине максимальных значений в точке 12 км, которые достигают 1,18 для M90 и 2,73 для M30. Центральная часть профиля ($-10 \div +10$ км) характеризуется минимальными значениями 0,05 для всех моделей. В левой части профиля форма графика в зависимости от наклона проводника изменяется от вогнутой (M60 и M45) до выпуклой (M30). Перепад уровня графика между точками -9 и -12 км составляет почти 40 (M90), 20 (M60), 10 (M45), 5 (M30) раз. Интенсивность компоненты E_x зависит от угла наклона зоны разломов. Если для модели M60 она затухает на расстоянии 50 км, то для модели M30 – более 100 км.

Аномалии E_y (направление вдоль проводящей структуры) и H_x имеют индукционную природу. Разлом проявляется в виде минимумов E_y (рис. 2, вставка) и максимумов H_x (рис. 3, вставка). С увеличением T в точке максимума поля уменьшаются: E_y – почти на 40 % (с 1,38 до 0,87), H_x – около

3 раз (от 2,78 до 1,1). Экстремумы H_x поля отражают деконцентрацию продольных токов в краях зоны разломов (горизонтальный скин-эффект). За пределами низкоомного разлома скорость затухания аномалий E_y и H_x разная, и с увеличением T уменьшается. На $T = 100$ с (максимумы E_y и H_x) расстояния, на которых исчезают аномалии полей, отличаются более чем в 3 раза (до 100 и более 300 км соответственно). Аномалии поля исчезают, когда выполняется условие $h_{eff} \gg 20$ км (ширина разлома) на $T = 10\ 000$ с.

Электрическая компонента E_y , направленная вдоль проводящей структуры, для разных моделей имеет сходные графики (см. рис. 2). Их экстремумы смещены относительно центра в сторону наклона проводника на 5 (M60), 12 (M45), 24 км (M30), а значения отличаются только в 1,2 раза. В соответствующей ей магнитной компоненте H_x наблюдаются максимумы (см. рис. 3), которые также смещены относительно центра модели, но только на 7 км в сторону наклона проводника (M45, M30), их значения уменьшаются почти на 20 % по отношению к рассчитанной модели M90. Графики H_x асимметричны, в правой части значения аномального магнитного поля (только для наклонных моделей) ниже на 20–24 % (на расстоянии до 40 км от центра для модели M30). Обратное соотношение характерно для левой части профиля, уменьшение значений на 23 % наблюдается уже на расстоянии 80 км.

Анализ магнитотеллурических функций отклика.

Сравним кривые кажущегося удельного сопротивления (ρ_k), направленные поперек (ρ_{xy}) и вдоль (ρ_{yx}) проводящей структуры модели M90, полученные между точками ± 10 км над зоной разломов, с локально-нормальной кривой (ρ_n), характеризую-

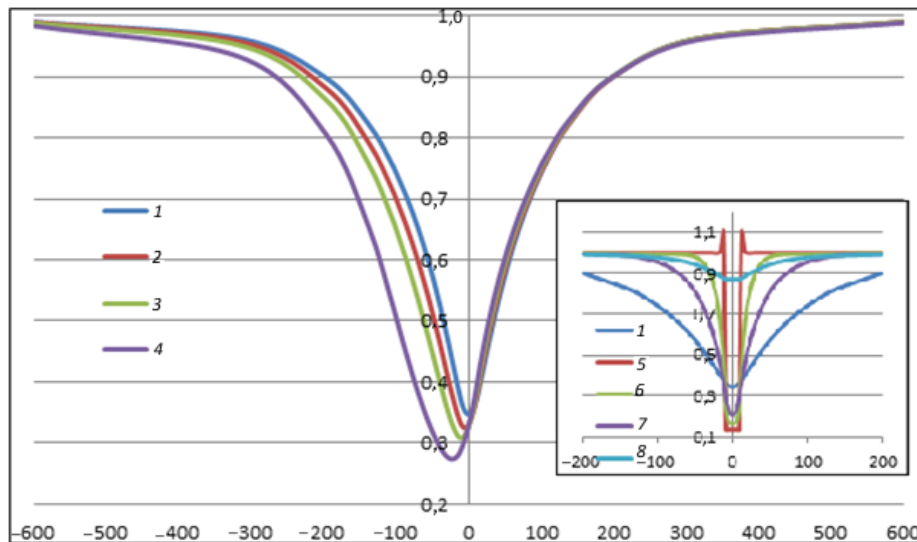


Рис. 2. Изменение компоненты E_y (ТМ мода), нормированной на нормальное поле E_y^N . Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 2. Variation E_y component (TM mode), normalized to the normal field E_y^N . Conventions refer to Fig. 1

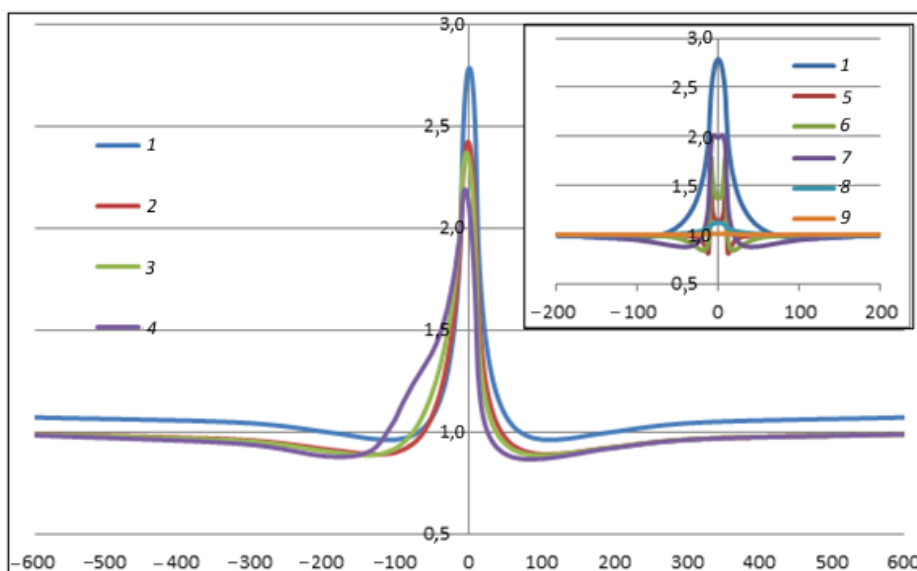


Рис. 3. Изменение компоненты H_x (ТМ мода), нормированной на нормальное поле H_x^N . Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 3. Variation H_x component (TM mode), normalized to the normal field H_x^N . Conventions refer to Fig. 1

щей горизонтально-слоистую вмещающую среду (рис. 4). Эффективная глубина проникновения электромагнитного поля Земли меньше полуширины разлома: $h_{\text{eff}} \leq 5000$ м на $T < 50$ с. На этих периодах уровень кривых МТЗ менее 20 Ом·м, что почти на 2 порядка ниже ρ_n . При наличии неоднородности токи естественным образом перераспределяются, появляются избыточные токи и заряды, взаимодействующие между собой. Если кривая ρ_{xy} наиболее чувствительна к проводнику возле внутренней границы раздела, то кривая ρ_{yx} — в центральной точке аномальной структуры с минимумом на $T = 10$ с. На $50 < T < 200$ с кривые ρ_{yx} начинают расходиться (на $T \approx 200$ с h_{eff} соответствует ширине зоны разлома), и с этого диапазона T различие

между ними составляет 3 порядка, причем величина ρ_{yx} приближается к ρ_n . Кривые ρ_{xy} гальванически сдвинуты относительно ρ_n по оси ρ_k во всем частотном диапазоне на 2–3 порядка (рис. 4, а). Кривые ρ_{yx} подвержены индукционному эффекту (рис. 4, б), связанному с перераспределением токов между вмещающей средой и аномальным объектом, и по мере приближения к границе раздела минимум вылаживается.

За пределами проводника гальванический эффект отсутствует и кривая ρ_{xy} в точках далее ± 12 км равна ρ_n во всем частотном диапазоне. А индукционный эффект максимально проявляется на кривых ρ_{yx} в виде минимума на T от 10 до более 100 с и постепенно убывает с удалением от центра

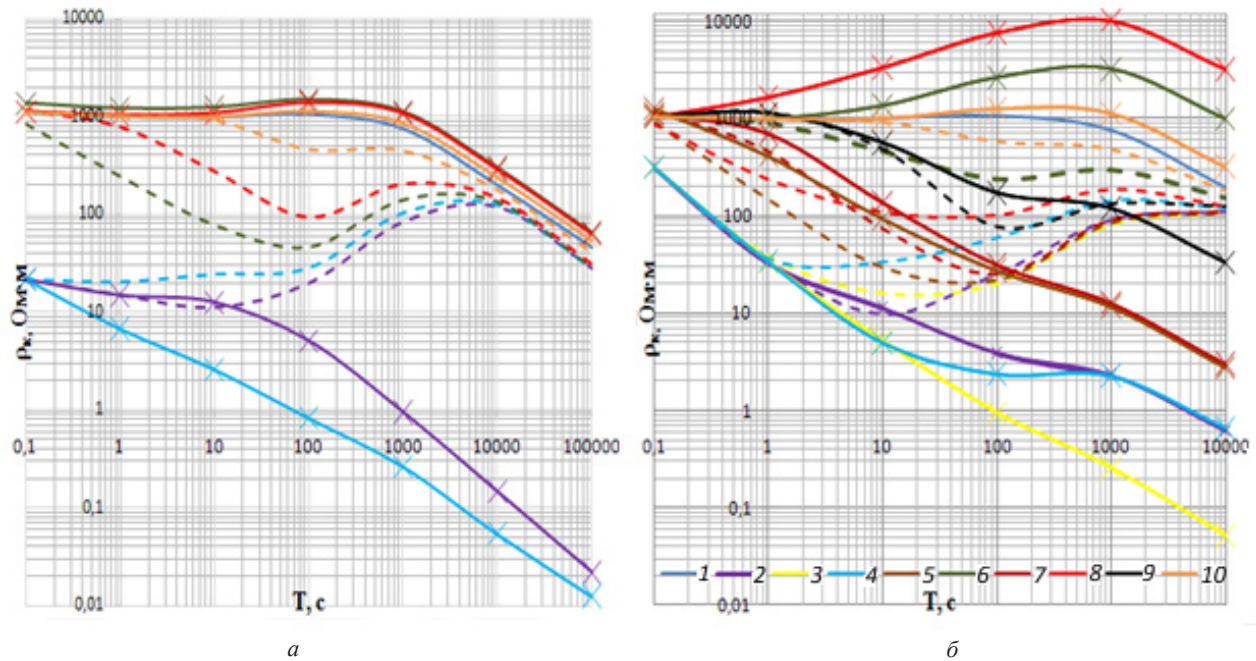


Рис. 4. Амплитудные кривые ρ_k , направленные поперек (сплошные линии) и вдоль (штриховые линии) проводящей структуры моделей М90 (а) и М30 (б) и полученные в точках профиля: 1 – локально-нормальная кривая ρ_n ; 2 – 0 км; 3 – 9 км (М30); 4 – ± 9 км (М90) и -9 км (М30); 5 – 12 км (М30); 6 – ± 12 км (М90) и -12 км (М30); 7 – 20 км (М30); 8 – ± 20 км (М90) и -20 км (М30); 9 – 62 км (М30) и ± 62 км (М90); 10 – -62 км (М30)

Fig. 4. Amplitude curves ρ_k , directed across (solid line) and along (dotted line) the conductive structure models М90 (а) and М30 (б), obtained in points of profile: 1 – the locally normal curve ρ_n ; 2 – 0 km; 3 – 9 km (M30); 4 – ± 9 km (M90) and -9 km (M30); 5 – 12 km (M30); 6 – ± 12 km (M90) and -12 km (M30); 7 – 20 km (M30); 8 – ± 20 km (M90) and -20 km (M30); 9 – 62 km (M30) and ± 62 km (M90); and 10 – -62 km (M30)

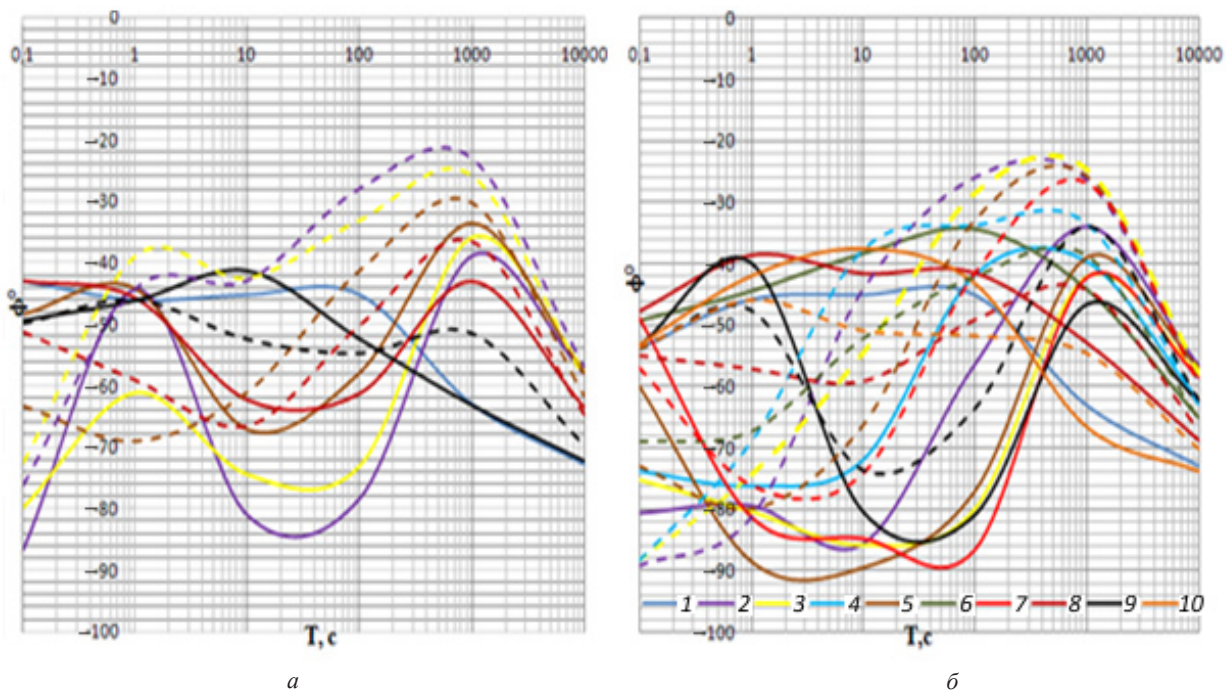


Рис. 5. Фазовые кривые Z, направленные поперек (сплошные линии) и вдоль (штриховые линии) проводящей структуры моделей М90 (а) и М30 (б). Условные обозначения см. на на рис. 4

Fig. 5. Phase Z curves, directed across (φ_{xy} – solid line) and along (φ_{yx} – dotted line) the conductive structure models М90 (а) and М30 (б). Conventions refer to Fig. 4

модели. Даже на расстоянии 62 км отличие от ρ_n составляет около 500 Ом·м на $T = 200$ с. И только на T порядка 10 000 с и более ($h_{\text{эф}} = 160$ км) кривые ρ_{yx} приближаются к ρ_n , характеризующему окружающую среду.

Проанализируем кривые ρ_k , полученные в точках наблюдения справа (нормальное распределение – с глубиной) и слева (над наклонной проводящей структурой) от центра модели М30 (рис. 5). Как и для М90, в интервале профиля ± 10 км наблюдает-

ся наименьший уровень кривых МТЗ, который на $T = 0,1$ с составляет 30–40 Ом·м, что более чем в 30 раз ниже $\rho_n = 1000$ Ом·м и в 2 раза выше значений ρ_k для М90. С увеличением T кривые ρ_k расходятся и в левой, и в правой частях профиля сложным образом. Так, уровень ρ_{xy} по мере приближения слева к центру зоны разлома увеличивается, а справа — уменьшается, т. е. по разные стороны от центра проводника кривые ρ_{xy} слева сброшены почти на 3 порядка, а справа — взброшены на один (по отношению к ρ_n) гальваническим эффектом. Уровень всех кривых ρ_{yx} ниже ρ_n . Различие в форме — ярко выраженные минимумы по мере удаления от центра проводника смещаются в область больших T , от 10 до более 100 с (в пункте +62 км), что естественно, так как с погружением проводника увеличивается глубина концентрации теллурических токов. И если на $T=100$ с отличия от ρ_n в пункте –62 км составляют более одного порядка, то в пункте +62 км — менее чем 2 раза. На $T > 10\,000$ с все ρ_{yx} приближаются к ρ_n .

Фазовые кривые Z (φ_k) моделей М90 и М30 (рис. 5) соответствуют амплитудным кривым ρ_k (см. рис. 4). Наиболее отчетливо проводящий разлом (М90) проявляется яркими минимумами (от -60° до -80°) на $T = 10$ и 100 с кривых φ_{xy} как над ним, так и за его пределами более чем в 20 км от центра модели. И только в пункте ± 62 км кривые φ_k отличаются от локально-нормальной φ_n не более чем на $\pm 10^\circ$ в зависимости от частотного диапазона. Мигрирующий в область больших T минимум кривых φ_{yx} зависит от положения точки исследования относительно центра модели ($\pm 12, \pm 20, \pm 62$ км), при этом трудно объяснить величину и конфигурацию кривых φ_{yx} непосредственно над аномальной структурой, хотя на $T = 1$ с зоны контакта с разными ρ проявляются локальными минимумами -61° (точки ± 9 км) на фоне $45-46^\circ$, характеризующем как нормальные, так и аномальную части модели. На $T > 1000$ с практически все кривые φ_k начинают сходиться, но при этом их уровень выше φ_n на 10° . В правой части профиля модели М30 на расстоянии 20 км и более от ее центра наибольшее влияние аномальная структура оказывает на кривые φ_{yx} на $T \leq 10$ с. В центре ± 10 км информацию несут обе кривые φ_k , при этом аномальные эффекты больше проявляются на кривой φ_{xy} (минимум на уровне -80° на $T < 100$ с). Напомним, что в левой части профиля именно под ней располагается наклонный проводник, с удалением от центра модели информацию о нем несут уже не только кривые, направленные поперек проводящего разлома, но и кривые φ_{yx} , ориентированные вдоль него. При этом такие изменения на фоне кривой φ_n , как наличие минимумов и сдвиг их в частотном диапазоне, наиболее четко проявляются именно на кривой φ_{xy} . Во-первых, уровень последней достигает порядка -90° , что почти на 10° ниже, чем у кривой φ_{yx} , и,

во-вторых, диапазон T , на котором он проявляется, шире.

В отличие от классических представлений [1] в работе В.Н. Шумана [10] предложено нелокальное векторное тождество импедансного типа для гармонического электромагнитного поля на поверхности сферической Земли, на основе которого выведена система точных скалярных уравнений, определяющих эту поверхность.

Согласно [9], определение скалярных параметров ζ и ξ более естественно с точки зрения сохранения классической схемы МТЗ и разработки способов обработки и инверсии данных наблюдений, так как не связано с типом возбуждающего (падающего) поля:

$$\zeta = \frac{-E_y H_x e^{i(\varphi_{E_y - H_x})} + E_x H_y e^{i(\varphi_{E_x - H_y})}}{H_x^2 + H_y^2},$$

$$\xi = \frac{E_y H_y e^{i\varphi_{E_y}} + E_x H_x e^{i(\varphi_{E_x} + \varphi_{H_x})}}{H_x^2 + H_y^2}.$$

Легко показать, что, если классическое граничное условие Леонтовича

$$\mathbf{E}_t = Z(\mathbf{H}_t^* \times \mathbf{n})$$

выполняется, то скалярный параметр ζ равен Z , а $\xi = 0$.

Скалярные параметры ζ и ξ зависят от электромагнитных характеристик среды и типа распространяющегося в ней электромагнитного возмущения.

Скалярный параметр ζ существенно зависит от поляризации первичного МТ-поля и степени неоднородности проводимости среды в окрестности точки наблюдения. Он испытывает влияние гальванических и индукционных искажений, величины которых отличаются от локально-нормальных значений в точке определения. Скалярный параметр ξ характеризует степень отличия реального поля от модели плоской однородной волны, он отличен от нуля только при $H_n \neq 0$ и $E_n \neq 0$, что свидетельствует о наличии двух мод и указывает на неправомочность пренебрежения горизонтальными градиентами МТ-поля.

Первые расчеты скалярных параметров ζ и ξ на основе соотношений электродинамики материальных сред, которые учитывают неоднородность внешнего источника и сферическую симметрию Земли, для численных моделей элементарных проводящих структур рассмотрены в статье [9].

Проанализируем величины $|\zeta|$ и $|\xi|$, рассчитанные, как и в работе [9], от рассмотренных выше электромагнитных полей с применением метода скалярных импедансов. В данной работе показано, что для моделей с линейно поляризованным полем, какими являются М30, М90, где угол поляризационного направления составляет $\gamma = \pi/2$, справедливо следующее: если $|\xi|^2 = 0$, то $|\zeta|^2 = |Z_{xy}|^2$.

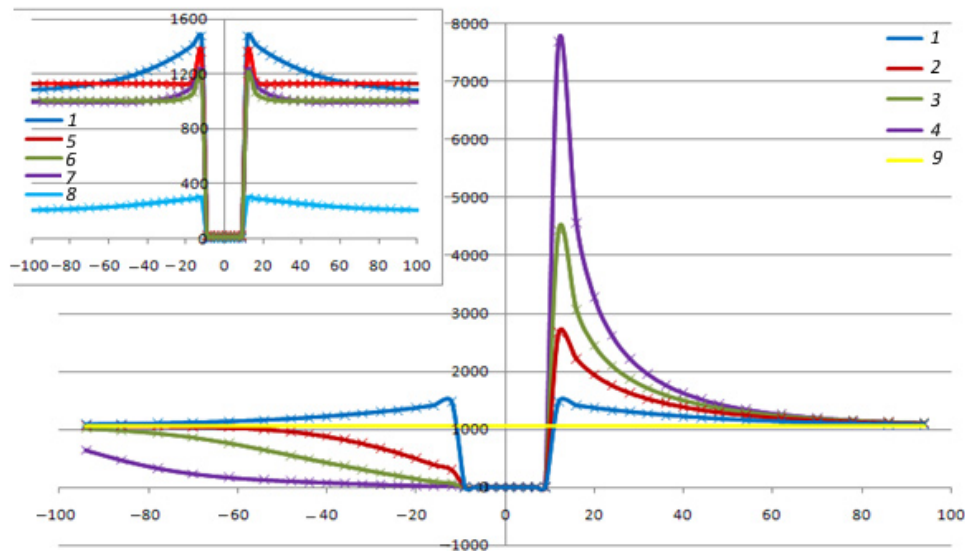


Рис. 6. Графики ρ_k , направленные поперек (ρ_{xy} – сплошная линия), и ρ_ζ (крестики) для $T = 100$ с. Модели: 1 – M90, 2 – M60, 3 – M45, 4 – M30; вставка – модель M90 на T , с: 5 – 0,1, 6 – 1, 7 – 10, 8 – 10 000; 9 – локально-нормальная кривая ρ_n . Горизонтальная ось – километры

Fig. 6. Charts apparent resistivity, directed across (ρ_{xy} – solid line) and ρ_ζ (crosses) for $T = 100$ s. Models: 1 – M90, 2 – M60, 3 – M45, 4 – M30; paste – model M90 on T , s: 5 – 0,1, 6 – 1, 7 – 10, 8 – 10 000; 9 – the locally normal curve ρ_n . The horizontal axis – kilometers

На практике достаточно, чтобы величина $|\zeta|$ была на 2–3 порядка меньше величины $|\zeta|$.

Это справедливо для всех рассчитанных моделей и на всех T геомагнитного поля. Так, величина $|\zeta|$ над всей аномалией электропроводности изменяется до 0,3, в то время как $|\zeta|$ не превышает даже 0,001 и то только над локальными участками в переходных поперечных краевых зонах проводника. Таким образом, появляется возможность перейти к вычислению параметра $\rho_\zeta = |\zeta|^2 / \omega \mu_0$, некоторому аналогу ρ_k , определяемому по тензору Z .

Совершенно очевидно, что относительную величину наклона модельного объекта, а также направление наклона кривые величин ρ_ζ и ρ_{xy} визуально отражают. Симметричный график для M90 существенно отличается от графиков M30–M60 (рис. 6), что позволяет на этапе качественной интерпретации данных говорить о том, какой вид зон разломов эти модели представляют – прямой или наклонный.

Можно видеть, что значения и поведение величины ρ_ζ (поляризация поперек проводящей структуры) на рис. 4, 6 идентичны кривым ρ_k , а именно ρ_{xy} . Следует напомнить, что ρ_ζ вычисляется, в отличие от ρ_k , по данным только одной поляризации поля.

Выводы. Наклон субвертикального проводника наиболее ярко проявляется в соотношении уровня (приподнятые и опущенные) кривых ρ_k и ρ_ζ , направленных поперек проводящей структуры, как относительно локально-нормальной, так и при ориентации кривой вдоль проводника. В последней сложнее определить пространственное положение аномалии, его возможно обнаружить только по частотному сдвигу минимума и только непосредствен-

но над проводником. Фазовые кривые импеданса также несут информацию об относительном изменении удельного электрического сопротивления и наиболее чувствительны к ней именно кривые, направленные поперек аномальной структуры.

Список библиографических ссылок

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 680 с.
2. Бурахович Т.К., Гишук О.В., Причепий Т.И. Магнитовариационные функции отклика 3D модели глубинных разломов. *Матеріали XV Міжнародної конференції з геоінформатики "Теоретичні та прикладні аспекти"* (Київ, 11–13 травня 2016). К.: ВАГ, 2016. Тезис 9673. 4 с. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. К.: Феникс, 2005. 572 с.
4. Груздев В.Н., Жаворонкин В.И. Коровые аномалии глубинной электропроводности Воронежского кристаллического массива. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2015. № 1. С 94–101.
5. Кашкевич М.П. Геофизический образ графитизированных глубинных разломов: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Санкт-Петербург, 2000. 124 с.
6. Ковтун А.А. Электропроводность коры по данным магнитотеллурических исследований. *Соросовский образовательный журнал*. 1997. № 10. С. 111–117.
7. Кузнецов А.Н., Егоров И.В., Хонькина В.А. Результаты трехмерного численного моделирования для моделей, учитывающих вертикальные тектонические разломы; сравнение с двумерным моделированием. *I Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли (Москва, 10–15 ноября 2003)*. М.: МАКС Пресс, 2003. 21 с.
8. Куликов В.А. Влияние глубинных проводящих разломов на результаты МТЗ: дис. ... канд. физ.-

мат. наук. URL: <http://earthpapers.net/vliyanie-glubinnyh-provodyaschih-razlomov-na-rezultaty-mtz> (дата обращения: 20.05.2016).

9. Причепий Т.И. Визуализация данных МТЗ по способу скалярных импедансов для численных моделей элементарных проводящих структур. *Геофизический журнал*. 2014. Т. 36, № 3. С. 132–145.
10. Шуман В.Н., Савин М.Г. Математические модели геоэлектрики. К.: Наук. думка, 2011. 240 с.

11. Ermolin E., Ingerov O., Ingerov I. et. al. Mapping of vertical conductive bodies by MVP, EMS-2011. St. Petersburg, Russia, 2011, Abstracts. V. 2. P. 245–249.
12. Macki Randall L., Torquil Smith J., Theodore R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 1994. V. 29, iss. 4. P. 923–935.

Поступила в редакцию 28.10.2016 г.

МАГНІТОТЕЛУРИЧНІ ФУНКЦІЇ ВІДГУКУ 3D МОДЕЛІ ГЛИБИННИХ РОЗЛОМІВ

Т.К. Бурахович, О.В. Гищук, Т.І. Причепий

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна, e-mail: burakhovich@ukr.net, perest-olga@ukr.net, sharapann@ukr.net

На підставі теоретичного 3D моделювання природного низькочастотного провідника електромагнітного поля отримано магнітотелуричні функції відгуку в рамках зображення імпедансу як у класичному вигляді – тензорному, так і скалярному. Показано, що нахил субвертикального провідника найяскравіше проявляється у співвідношенні рівня кривих ρ_k і ρ_ζ (підняті й опущені), спрямованих поперек провідної структури щодо рівня локально-нормальної кривої та рівня кривої вздовж провідника. В останній складніше визначити просторове положення аномалії, його можливо виявити тільки за частотним зсувом мінімуму і лише безпосередньо над провідником. Фазові криві імпедансу, що напрямлені поперек аномальної структури, несуть інформацію про відносну зміну ρ_k .

Ключові слова: глибинний розлом, теоретичне 3D моделювання, позірний питомий електричний опір, метод скалярних імпедансів.

MAGNETOTELLURIC RESPONSE FUNCTION OF 3D MODEL OF DEEP FAULTS

T.K. Burakhovich, O.V. Hishchuk, T.I. Prichepy

Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 32, Palladin Ave., Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: burakhovich@ukr.net, perest-olga@ukr.net, sharapann@ukr.net

Purpose. The purpose of the paper is to calculate and analyze magnetovariation and a magnetotelluric response function of the 3D object type of high conductivity regional deep fault with different angles. The authors obtained the presentation of the impedance both as a classical-tensor, and a scalar one.

Design/methodology/approach. For calculations we used a software package of 3D modeling low-frequency electromagnetic fields, Mtd3fwd.

Findings. We have found that the deviation of the actual components of a comprehensive induction tipper of model M90 from M60 and M30 is 10% and 30%, respectively. It is concluded, with some degree of certainty, that it is possible to use leading deep faults in subvertical structures to build 3D models of real geological environments. Values ρ_ζ and ρ_k (at polarization of telluric current across the top structure) stand for the relative value of the slope and the tilt direction of the modeled object, which were obtained from the scalar and tensor impedances. The values and behavior of curves ρ_ζ are identical to curves ρ_k , namely ρ_{xy} . Unlike ρ_k , ρ_ζ was calculated according to only one field polarization.

Practical value/implications. The deep fault with different tilt angles M90–M30 is most evident in the ratio of curves ρ_k (raised and lowered) directed transverse to the top structure, both relative to the level of a locally normal curve, and the level curve along the conductor. In the latter, it is difficult to determine the spatial position of anomalies, which may only be detected by the frequency shift minimum, and only directly above the conductor. The curves of phase impedance also signal relative changes in the apparent electrical resistance, with the curves directed transverse to the anomalous structure being most sensitive to it.

Keywords: deep fault, theoretical 3D modeling, conventional electrical resistivity, method scalar impedance.

References:

1. Berdichevskiy M.N., Dmitriev V.I. Modeli i metody magnitotelluriki. Moscow: Nauchnyy mir, 2009, 680 p. [in Russian].
2. Burakhovich T.K., Hishchuk O.V., Prichepy T.I. Magnetovariational response functions 3D models of deep faults. *15th EAGE International Conference on Geoinformatics "Theoretical and Applied Aspects"*. - May 11-13, 2016, abstracts [CD-ROM]. Kiev: VAG, 2016, abstract no. 9673, 4 p. [in Russian].

3. Gintov O.B. Field tectonophysics and its application in the study of the deformation of the crust Ukraine. Kiev: Feniks, 2005, 572 p. [in Russian].
4. Gruzdev V.N., Zhavoronkin V.I. Deep crustal anomalies of the electrical conductivity for the Voronezh crystalline massif. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 1, pp. 94-101 [in Russian].
5. Kashkevich M.P. Geophysical image of graphitized deep faults: Dissertation of the candidate of geological-mineralogical sciences. St. Petersburg, 2000, 124 p. [in Russian].
6. Kovtun A.A. The electrical conductivity of the crust according to magnetotelluric investigations. *Soros Educational Journal*, 1997, no. 10, pp. 111-117. [in Russian].
7. Kuznetsov A.N., Egorov I.V., Khon'kin V.A. The results of three-dimensional numerical simulation models, taking into account the vertical tectonic faults; comparison with two-dimensional modeling. *I All-Russian school-seminar with electromagnetic sounding of the Earth: Moscow, 10-15 November 2003*. Moscow, AM: MAKS Press, 2003, 21 p. [in Russian].
8. Kulikov V.A. Influence of deep conductive faults results MTS. : Dissertation ... of the candidate of physical and mathematical sciences. URL: <http://earthpapers.net/vliyanie-glubinyh-provodyaschih-razlomov-na-rezultaty-mtz> (Accessed 20 May 2016) [in Russian].
9. Prichepy T.I. Visualizing of MTS data by the method of scalar impedances for numerical models of elementary conducting structures. *Geophysical journal*, 2014, vol. 36, no. 3, pp. 132-145 [in Russian].
10. Shuman V.N., Savin M.G. Mathematical models geoelectrics. Kiev, Naukova Dumka, 2011, 240 p. [in Russian].
11. Ermolin E., Ingerov O., Ingerov I. et al. Mapping of vertical conductive bodies by MVP, EMS-2011. St. Petersburg, Russia, 2011. Abstracts, vol. 2, pp. 245-249.
12. Macki Randall L., Torquil Smith J., Theodore R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 1994, vol. 29, no. 4, pp. 923-935.

Received 28/10/2016