

## Влияние расположенного в трёхслойной модели среды приповерхностного локального объекта на результаты МТЗ; опыт математического моделирования

А.Д. Каринский<sup>1</sup>, Д.С. Даев

<sup>1</sup>Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), akarinski@mail.ru.

---

### АННОТАЦИЯ

В опубликованных нами ранее работах было дано обоснование применению приближённого подхода к определению понятия "область пространства, оказывающая существенное влияние на результаты измерений" и приведены результаты 3D- моделирования применительно к некоторым электрическим и электромагнитным методам геофизики. В этой работе представлены полученные на основе применения такого подхода результаты математического моделирования для метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в случае, когда имеющий изометричную форму и малые размеры объект  $\Delta V$  расположен в верхнем слое трёхслойной модели проводящего полупространства. Электромагнитное поле в отсутствие объекта  $\Delta V$  - линейно-поляризовано. Показано то, какое влияние объект  $\Delta V$  оказывает на частотные зависимости некоторых величин, вычисляемых в методе МТЗ.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование; локальный объект; моделирование

---

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемы, связанные с моделированием влияния "горизонтальной неоднородности" среды на результаты магнитотеллурических зондирований, рассмотрены в ряде работ, например, в статье [Бердичевский, Яковлев, 1989] и других. В монографии [Бердичевский, Дмитриев, 2009] искажения результатов МТЗ, вызванные локальными приповерхностными неоднородностями были названы "ρ-эффектом".

В работе [Каринский, Даев, 2012] было дано обоснование приближённому подходу к определению понятия "область пространства, оказывающая основное влияние на результаты электрических и электромагнитных методов геофизики". Сравнение получаемых результатов с данными, приведенными в работах [Loke, Dahlin, 2002], [Dahlin, Zhou, 2004] для электроразведки методом сопротивлений, подтвердило правомерность применения этого подхода. Затем в работах [Каринский и др., 2014, а], [Каринский и др., 2016], [Каринский, Даев, 2017] и других было показано то, как этим подходом можно воспользоваться для моделирования влияния локальных объектов на результаты электроразведки методом сопротивлений и каротажа КС. В статье [Каринский и др., 2014 б] было показано то, какое влияние такой объект, расположенный в верхнем слое двухслойной модели проводящего

полупространства, может оказывать на результаты МТЗ. Заданным, кроме модели среды, являлось первичное поле - плоская, линейно поляризованная гармоническая волна, падающая на проводящее полупространство по направлению нормали (и оси  $Z$  декартовых координат) к его границе. При соответствующем выборе направлений осей  $X$ ,  $Y$  для электрической и магнитной составляющих первичного электромагнитного поля, а также для поля в горизонтально-слоистой модели среды, имеем  $\mathbf{E} = \mathbf{1}_x \cdot E_x$ ,  $\mathbf{H} = \mathbf{1}_y \cdot H_y$ .

### МЕТОДЫ

Ниже приведены результаты численных расчётов для случая, когда модель проводящего немагнитного полупространства трёхслойная (рисунок 1, а). Наиболее интересные (и практически значимые) результаты моделирования ρ-эффекта при МТЗ нами были получены для кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_T$ , а также - для отношения амплитуд вертикальной и горизонтальной компонент магнитной составляющей  $\mathbf{H}$  электромагнитного поля. Поэтому ниже, на рисунках 2, 3, приведены результаты моделирования для этих величин.

Известно, что при МТ-зондированиях определяют компоненты электрической ( $\mathbf{E}$ ) и магнитной ( $\mathbf{H}$ ) составляющих электромагнитного поля на границе "земля - воздух" (плоскость  $z=0$  в модели на рисунке 1). При обработке результатов измерений получают частотные зависимости амплитуд и начальных фаз

компонент  $E_x, E_y, H_x, H_y, H_z$ . Ориентированные по направлению осей  $X, Y, Z$  индукционные датчики, служащие для измерения компонент магнитного поля  $\mathbf{H}$ , имеют небольшие размеры. Можно принять допущение, что измеряемые при помощи таких датчиков сигналы пропорциональны соответствующим компонентам поля  $\mathbf{H}$  в центрах датчиков, расположенных вблизи центра  $O$  измерительной установки. Но предназначенные для определения компонент  $E_x, E_y$  электрического поля измерительные линии  $MN$  имеют большую протяжённость. Длины линий  $MN$  могут значительно превышать линейные размеры локальных объектов  $\Delta V$ , влияющих на результаты МТЗ. Поэтому для определения влияния таких объектов на данные МТЗ нами были проведены расчёты для компонента поля  $\mathbf{H}$  и для напряжения  $E_{MN}$  электрического поля  $\mathbf{E}$  в линии  $M_1N_1$  (рисунок 1, б). Затем, на основе полученных путём интегрирования результатов расчётов напряжения  $E_{MN}$  мы определяли компоненту  $E_x = E_{MN} / l_{MN}$ , где  $l_{MN}$  - длина измерительной линии  $MN$ . Применение такого, не самого простого, подхода связано с тем, что для указанного выше первичного поля в горизонтально-слоистой модели среды электрическое (а также и магнитное) поле одинаково во всей плоскости  $S$  ( $z=0$ ) и одинаково в пределах каждой плоскости  $z=const$ , но в присутствии локального объекта это далеко не так.

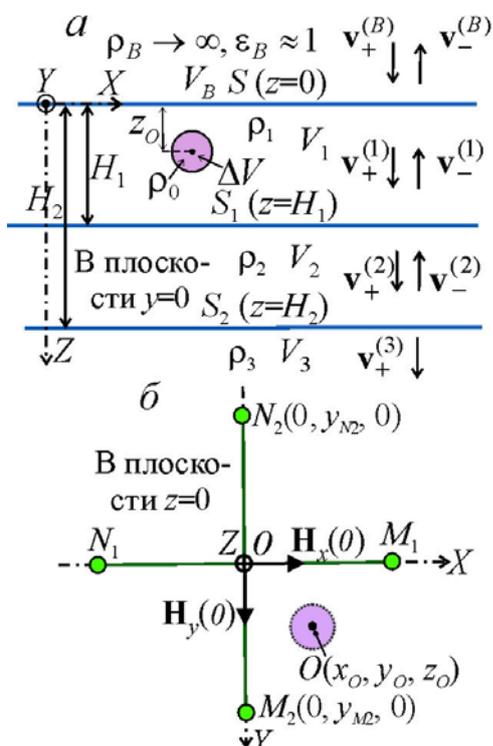


Рисунок 1. Модель среды и установки МТЗ

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На следующих двух рисунках будут

представлены только те результаты численных расчётов, которые были получены при следующих параметрах модели. Объект  $\Delta V$  имеет форму шара с радиусом 3 м, а его удельное электрическое сопротивление  $\rho_0 \ll \rho_1$  (см. рисунок 1, а). Координата  $z$  (глубина) центра  $O$  объекта:  $z_0=4$  м. Глубины горизонтальных границ:  $H_1=100$  м,  $H_2=1000$  м. Длины линий  $MN$  равны 20 м (см. рисунок 1, б).

На рисунке 2 показаны зависимости определяемого в методе МТЗ по результатам измерений кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_T$  от квадратного корня из периода  $T$ . Значения  $\rho_T$  определены по модулю импеданса  $|Z_{xy}| = |E_x| / |H_y|$ , где  $|E_x|, |H_y|$  - амплитуды компонент  $E_x, H_y$  в плоскости  $S$  (при  $z=0$ ). Чёрным цветом на рисунке 2 показаны трёхслойные кривые зондирования для 1D- модели среды - в отсутствие объекта  $\Delta V$ . Другие кривые получены для 3D - модели среды в присутствии объекта  $\Delta V$ . При  $x_0=7$  м эпицентр  $O$  объекта  $\Delta V$  находится в пределах измерительной линии  $M_1N_1$ , а при  $x_0=13$  м - вне этой линии на расстоянии 3 м от неё (см. рисунок 1).

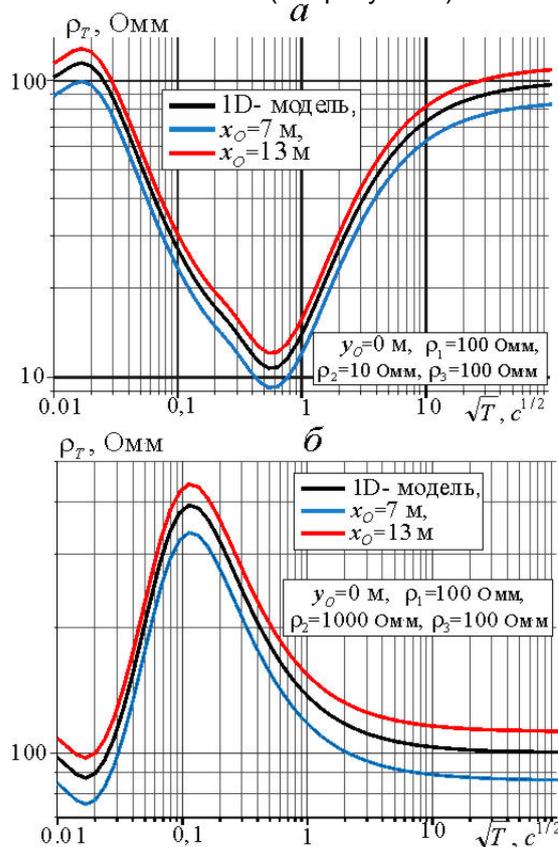


Рисунок 2. Зависимости кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_T$  от  $T^{1/2}$

На рисунках 2, а, б видно, что относительное влияние приповерхностного локального объекта  $\Delta V$  на кажущееся удельное

электрическое сопротивление  $\rho_T$  практически не зависит от периода  $T$  (и от частоты  $f=1/T$ ). Это, подтверждает высказанное в монографии [Бердичевский, Дмитриев, 2009] и некоторых других работах утверждение о том, что обусловленное присутствием локальной неоднородности аномальное электрическое поле при  $\rho$ -эффекте имеет преимущественно кулонову (гальваническую) природу. С этим согласуются также следующее. Как показали результаты моделирования, присутствие объекта  $\Delta V$  практически не влияет на аргумент импеданса  $\text{Arg}(Z_{xy})$  и, следовательно, на разности начальных фаз  $\Delta\varphi(Z_{xy})=\varphi(E_x)-\varphi(H_y)$  компонент суммарного поля при  $z=0$ . Это возможно лишь в том случае, когда индукционная составляющая аномального электрического поля, обусловленная влиянием объекта  $\Delta V$ , пренебрежимо мала по сравнению с кулоновой составляющей этого поля.

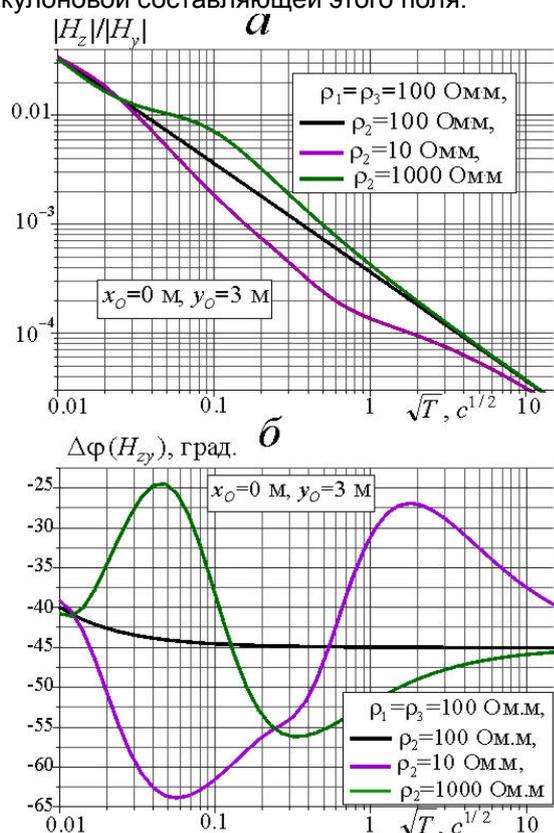


Рисунок 3. Зависимости отношения амплитуд  $|H_z|/|H_y|$  (а) и разности фаз  $\Delta\varphi(H_{zy})$  (б) от  $T^{1/2}$

На рисунке 3, а показана зависимость отношения амплитуд  $|H_z|/|H_y|$  вертикальной и горизонтальной компонент магнитного поля  $\mathbf{H}$  от квадратного корня из периода  $T$ . Обратим внимание на то, что при тех моделях первичного ЭМ поля и среды, при которых были проведены численные расчёты, в отсутствии объекта  $\Delta V$  вертикальная компонента  $H_z=0$ . Как видно на рисунке 3, а, отношение амплитуд  $|H_z|/|H_y|$

убывает с ростом периода колебаний  $T$ . Отметим, что зависимости  $|H_z|/|H_y|$  от  $T^{1/2}$  на рисунке 3, а монотонны, а при  $\rho_1=\rho_2=\rho_3$  (в двойном логарифмическом масштабе) эта зависимость близка к линейной. По-видимому, зависимости  $|H_z|/|H_y|$  от  $T^{1/2}$  могут служить критерием того, что на результаты МТЗ оказывает (либо не оказывает) влияние присутствие локальных объектов  $\Delta V$ .

Дополнительную информацию для выявления такого влияния, может дать зависимость от  $T^{1/2}$  разности фаз  $\Delta\varphi(H_{zy})$  компонент  $H_z$  и  $H_y$  (а в общем случае также  $\Delta\varphi(H_{zx})$ ). Пример зависимости разности фаз  $\Delta\varphi(H_{zy})$  от аргумента  $T^{1/2}$  приведен на рисунке 3, б.

На этом рисунке видим, что зависимости  $\Delta\varphi(H_{zy})$  от  $T^{1/2}$  имеют значительные различия при  $\rho_1=\rho_2=\rho_3$ ,  $\rho_1<\rho_2>\rho_3$  и  $\rho_1>\rho_2<\rho_3$ . Возможно, такие зависимости могут не только быть критерием того, что на результаты МТЗ оказывают влияние локальные объекты  $\Delta V$ , но также послужить для (независимой от результатов измерений характеристик электрического поля  $\mathbf{E}$ ) оценки соотношений между удельными электрическими сопротивлениями  $\rho$  слоёв с горизонтальными границами. Это может быть актуальным в тех случаях, когда проведение измерений напряжений  $E_{MN}$  электрического поля в методе МТЗ является затруднительным из-за проблем с заземлением электродов  $M$  и  $N$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бердичевский М. Н., Яковлев А. Г. Аналитическая модель магнитотеллурического зондирования, искаженного эффектом S. // Физика Земли. 1989, № 9, с. 82–88.
- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. М. Научный мир, 2009. 680 с.
- Каринский А. Д., Даев Д. С. Об областях пространства, существенно влияющих на результаты измерений в электромагнитных методах. // Геофизика. 2012, № 6, С. 42-53.
- Каринский А. Д., Даев Д. С., Мазитова И. К. Математическое моделирование С-эффекта и Р-эффекта в методах сопротивлений электроразведки. // Геофизика. 2014, № 1, С. 36-45.
- Каринский А. Д., Даев Д. С., Красносельских А. А., Мазитова И. К. Математическое моделирование влияния приповерхностных

А.Д. Каринский, Д.С. Даев. Влияние расположенного в трёхслойной модели среды приповерхностного локального объекта на результаты МТЗ; опыт математического моделирования

локальных неоднородностей на результаты магнитотеллурических зондирований. // Геофизика. 2014, № 6, С. 62-70.

Каринский А. Д., Даев Д. С., Мазитова И. К., Юдин М. Н. Математическое моделирование влияния локальных объектов на результаты методов сопротивлений электроразведки. Международная научно-практическая конференция "Теория и практика разведочной и промысловой геофизики", г. Пермь, 24–26 ноября 2016 г. Доклады, с. 122- 126.

Каринский А. Д., Даев Д. С. Влияние локальных объектов на результаты электроразведки методом сопротивлений; опыт математического моделирования. // Геофизика. 2017, № 1, С. 35-44.

Dahlin T. and Zhou B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. // Geophysical Prospecting. 2004, Vol. 52, - Pp. 379–398.

Loke M.H. and Dahlin T. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. // Journal of Applied Geophysics, 2002 , Vol. 49, Pp. 149–162.