



Метод радиоманнитотеллурических зондирований (часть 1): история развития и теоретические основы метода

Приведены общие сведения об истории развития и становления относительно молодого радиоманнитотеллурического (РМТ) метода и его модификаций. Рассматриваются теоретические основы метода РМТ при измерении электромагнитных полей удаленных радиостанций и контролируемых источников (модификация РМТ-К), а также их отличия от естественных полей, используемых в классической магнитотеллурике. В кратком обзоре показано, что методы РМТ и РМТ-К являются представителями «высокочастотной» магнитотеллурики. При этом они обладают всеми преимуществами классических МТ-методов с хорошо проработанными теоретическими основами, разработанными программами обработки и методами интерпретации данных.

1. История развития РМТ методов

Навигационные и широкоэвещательные сверхдлинноволновых радиостанции активно вводились в строй начиная с Первой Мировой Войны и в достаточном количестве рассредоточены практически по всему миру. Сигналы этих радиостанций мощностью сотни киловатт распространяются на значительное расстояние — до 10000 км. В середине прошлого века возникла идея использования полей удаленных радиостанций сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона (10-30 кГц) для изучения электрических свойств горных пород в естественном залегании. В результате появились такие методы, как: радиокомпарирования и пеленгации (радиокип или СДВ-радиокип (СДВР) [Гордеев и др., 1981], в зарубежной литературе метод назван Very Low Frequency (VLF и VLF-R) [Fisher et al., 1983; McNeil, Labson, 1991]), а также методы радиоэлектромагнитного профилирования и зондирования (РЭМП, РЭМЗ) [Вешев, 1980].

Первоначально выполнялось электропрофилрование с регистрацией полей радиостанций СДВ диапазона на одной – двух частотах в наземном и аэроварианте. Проводились измерения угла наклона эллипса поляризации магнитного поля, его горизонтальной или вертикальной компонент. Позднее начал применяться подход, реализованный в методе магнитотеллурических зондирований (МТЗ), с регистрацией горизонтальных компонент электрического и магнитного полей с целью определения поверхностного импеданса (Рис. 1).

Со временем аппаратура совершенствовалась, измеряемый частотный диапазон электромагнитного поля расширялся в область более высоких частот [Парфентьев, Пертель, 1991; Turberg et al., 1994, Bastani, 2001; Tezkan, Saraev, 2008]. К середине 1990-х годов была разработана аппаратура, позволяющая регистрировать сигналы радиостанций не только СДВ-диапазона (300-1000 кГц), но и длинноволнового (30-300 кГц) диапазона. Это

позволило расширить возможности метода СДВР — выполнять электрические зондирования (РЭМП, РЭМЗ).

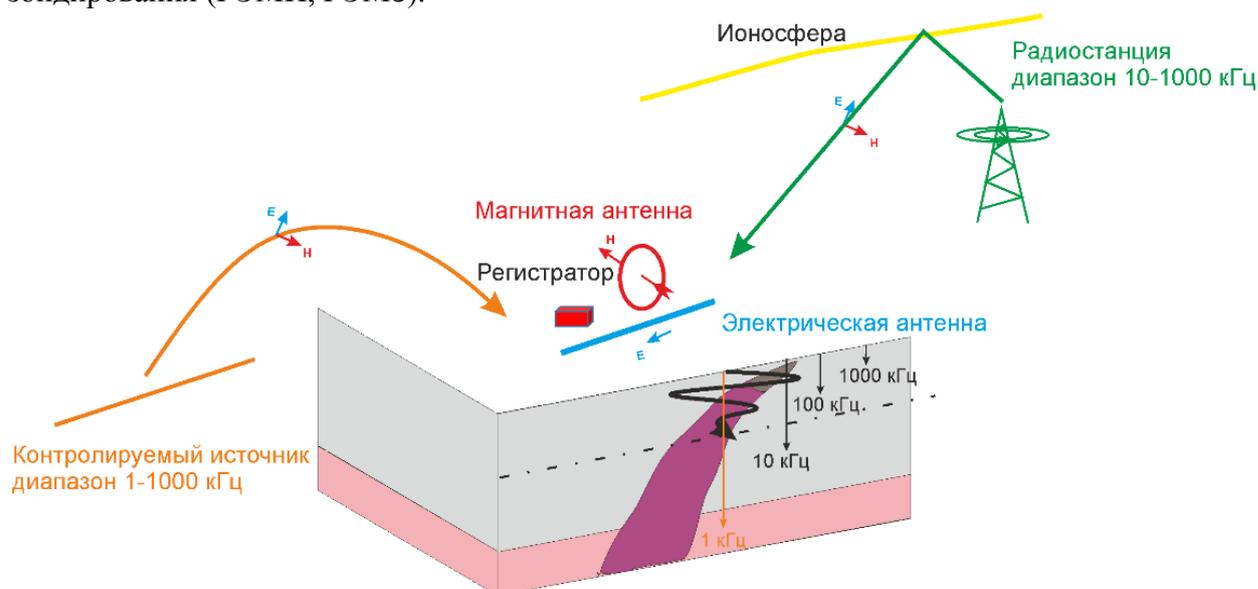


Рис. 1. Принцип РМТ и РМТ-К зондирований.

В настоящее время методика проведения работ методом СДВР или РЭМЗ практически совпадает с МТЗ. Основным отличием между РЭМЗ и МТЗ является диапазон частот регистрации сигналов (10 – 250-1000 кГц (РЭМЗ) и 0.001 – 100 Гц (МТЗ)). По этой причине РЭМЗ стали называть «метод радиоманнитотеллурических зондирований» или РМТ, где корень «радио» указывает на диапазон частот регистрации сигналов. Таким образом, методы РМТ являются представителями «высокочастотной» магнитотеллурики.

Одним из ограничений применения метода РМТ является то, что в определенных районах мира сигналов от удаленных радиостанций крайне мало. Кроме того, при регистрации сигналов от широковещательных радиостанций ДВ – СДВ диапазонов измеряемый частотный диапазон ограничен снизу 11 кГц, сверху — 1000 кГц. В этом варианте глубинность исследований методом РМТ часто не превышает первых десятков метров, что сильно сужает область его применения. Это являлось основным стимулом развития модификации метода РМТ, использующей контролируемый источник поля — вертикальный, горизонтальный электрический или магнитный диполь. Использование контролируемого источника позволило расширить рабочий диапазон частот от 1 до 1000 кГц [Bastani, 2001]. В результате появилась новая модификация метода РМТ с контролируемым источником (РМТ-К или controlled source tensor magnetotellurics (CSTM)).

Расширение частотного диапазона от 1 до 1000 кГц позволило увеличить глубину исследования примерно в три раза, а также дало возможность проводить полноценные зондирования в любых районах мира [Saraev et al., 2017]. Методы РМТ и РМТ-К в России успешно применяются для решения различных геологических задач уже более 10 лет.

2. Теоретические основы

Физические основы магнитотеллурических (МТ) и РМТ методов одинаковы при проведении измерений электромагнитного поля на значительном удалении от радиостанции (в так называемой *дальней или волновой зоне* источника $|k_1|r \gg 1$, где k_1 — волновое число среды, r — расстояние до источника). В этом случае электромагнитные

волны, распространяющиеся по волноводу Земля – ионосфера, формируют электромагнитное поле, схожее по структуре с естественными полями, используемыми в МТ-методах. По этой причине развитие МТ-методов, совершенствование методики обработки и инверсии получаемых данных способствует развитию и РМТ-методов.

2.1. Поверхностный импеданс

Поверхностный импеданс (\mathbf{Z}) — это отношение горизонтальных взаимно-перпендикулярных компонент электрического (E_x, E_y) и магнитного (H_x, H_y) полей:

$$Z_{i,j} = \frac{E_i}{H_j}, \quad (1)$$

где $i, j = x, y$.

В общем случае формула, описывающая поверхностный импеданс на границе полупространства, имеет сложный вид. Однако на некотором расстоянии от радиостанции (в *дальней зоне*) электромагнитное поле источника можно аппроксимировать полем плоской вертикально падающей волны (как и в методе МТЗ [Бердичевский и Дмитриев, 2009]). В этом случае поверхностный импеданс зависит от свойств нижнего полупространства и может быть выражен простым соотношением [Бердичевский, 2009]:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \mathbf{Z}\mathbf{H} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В горизонтально-слоистой (1D) среде тензор \mathbf{Z} вырождается в скаляр, так как главные компоненты тензора поверхностного импеданса $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, а дополнительные компоненты $Z_{xy} = -Z_{yx}$.

В двумерно-неоднородной (2D) среде, применив преобразование поворота тензора импеданса вдоль направления неоднородности, его главные компоненты опять вырождаются: $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, в то время как $Z_{xy} \neq Z_{yx}$. Таким образом, электромагнитное поле в двумерно-неоднородных средах разделяется на две независимые компоненты или моды: ТМ-мода (Transverse Magnetic Mode) или Н-поляризованное поле (электрическое поле направлено вдоль неоднородности) и ТЕ-мода (Transverse Electric Mode) или Е-поляризованное поле (электрическое поле направлено вкrest неоднородности) [Бердичевский, 2009].

Таким образом, учитывая симметрию тензора \mathbf{Z} , на практике рассчитывают значения модулей импеданса $|Z_{xy}|$ и $|Z_{yx}|$ как отношение взаимно ортогональных модулей горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей:

$$|Z_{xy}| = \left| \frac{E_x}{H_y} \right|, \quad (3)$$

$$|Z_{yx}| = \left| \frac{E_y}{H_x} \right|. \quad (4)$$

Кажущиеся удельные электрические сопротивления ρ_z^{xy} и ρ_z^{yx} с учетом выражений (3), (4) рассчитываются по следующим формулам:

$$|\rho_k^{xy}| = \frac{1}{2\pi f \mu_0} |Z_{xy}|^2, \quad (5)$$

$$|\rho_k^{yx}| = \frac{1}{2\pi f \mu_0} |Z_{yx}|^2, \quad (6)$$

где f – частота (Гц), μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Кроме того, при анализе МТ-данных используется фаза импеданса φ_Z , определяемая как арктангенс отношения мнимой ($Im(Z)$) и вещественной ($Re(Z)$) частей компонент тензора \mathbf{Z} :

$$|\varphi_Z^{xy}| = \varphi_{Ex} - \varphi_{Hy} = \text{atan} \left[\frac{Im(Z_{xy})}{Re(Z_{xy})} \right], \quad (7)$$

$$|\varphi_Z^{yx}| = \varphi_{Ey} - \varphi_{Hx} = \text{atan} \left[\frac{Im(Z_{yx})}{Re(Z_{yx})} \right]. \quad (8)$$

Частотные зависимости $|\rho_k^{xy}|$, $|\rho_k^{yx}|$, $|\varphi_Z^{xy}|$, $|\varphi_Z^{yx}|$ являются кривыми зондирования, на основе которых восстанавливают геоэлектрический разрез в точке наблюдения.

В трёхмерно-неоднородных средах (3D) дополнительно изучается вертикальная составляющая магнитного поля H_z , которая равна нулю в горизонтально-слоистых средах.

Связь вертикальной и горизонтальных компонент магнитного поля определяется формулой:

$$H_z = \mathbf{W}\mathbf{H} = [W_{zx} \ W_{zy}] \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где \mathbf{W} – вектор Визе-Паркинсона или «типпер», W_{zx} , W_{zy} – компоненты «типпера».

Анализ поведения компонент «типпера», широко развитый в теории магнитовариационных и МТ-зондирований [Бердичевский и Дмитриев, 2009], позволяет локализовать пространственное положение 3D неоднородностей в плане и разрезе, так же применим и для данных РМТ-зондирований.

2.2. Глубина исследования

В методах РМТ и РМТ-К глубина исследования (d), выраженная в метрах, определяется частотой электромагнитного поля (f) и удельным электрическим сопротивлением пород нижнего полупространства (ρ):

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}. \quad (10)$$

На практике также используется эффективная глубина проникновения электромагнитного поля (h_{eff}) [Бердичевский, 2009]:

$$h_{eff} = \frac{d}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Наибольшая глубина изучения разреза обеспечивается в модификации РМТ-К. Для метода РМТ-К в настоящее время нижняя граница рабочего диапазона ограничена 1 кГц (при $\rho = 200 - 500$ Ом·м, $d = 200 - 350$ м), для метода РМТ — регистрируемым сигналом СДВ-радиостанций — 11 кГц (при $\rho = 200 - 500$ Ом·м, $d = 60 - 100$ м).

3. Особенности электромагнитных полей, используемых в методах РМТ и РМТ-К

В классических МТ-методах электромагнитное поле плоской падающей волны имеет круговую или эллиптическую поляризацию. По этой причине ориентировка измерительной установки (взаимно ортогональных электрических и магнитных антенн) не имеет особого значения, так как применение операции вращения к измеренному тензору \mathbf{Z} на этапе обработки позволяет разделить его компоненты на две независимые моды (в 2D среде). В методах РМТ и РМТ-К зондирований оценка того, какой моде принадлежат измеренные компоненты тензора \mathbf{Z} достаточно условна, потому что электромагнитные поля

удаленных радиостанций имеют линейную, а не круговую или эллиптическую поляризацию. Поэтому в методе РМТ измеряется не тензор импеданса \mathbf{Z} (как в МТ методах), а его две независимые скалярные компоненты Z_{xy} и Z_{yx} [McNeil & Labson, 1991; Tezkan, 2008]. При этом оценка компонент импеданса (E_x и H_y либо E_y и H_x) по результатам измерений сигнала от какой-либо радиостанции возможна при условии, что ориентация одной из двух ортогональных электрических приемных линий совпадает с пеленгом на радиостанцию (допускается отклонение $\pm 20^\circ$). Последнее условие определяет основные методические особенности проведения работ методами РМТ и РМТ-К по сравнению с МТ методами.

Отмеченные особенности методики проведения зондирований отражены на рисунке 2, где схематически показаны диаграмма направленности и расположение рабочих планшетов контролируемого источника типа – электрический диполь.

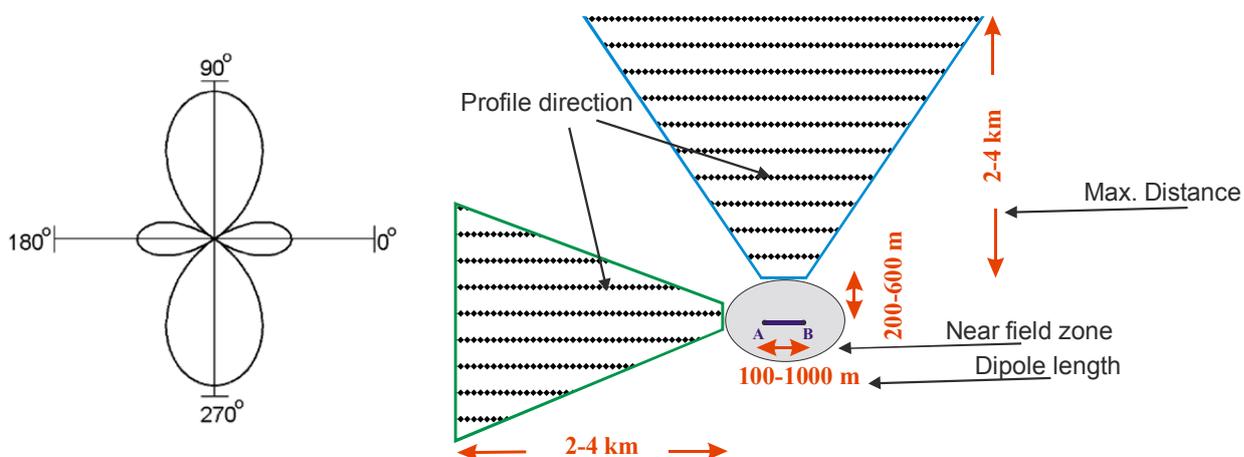


Рис. 2. Диаграмма направленности (а) и рабочие планшеты контролируемого источника (б) типа – «электрический диполь».

Заключение

Методы РМТ и РМТ-К являются представителями «высокочастотной» магнитотеллурики, обладающими всеми преимуществами классических МТ-методов с хорошо проработанными теоретическими основами, разработанными программами обработки и интерпретации данных. Глубина исследования методов РМТ и РМТ-К для большей части территории России составляет около 30 м и 100 – 150 м соответственно.

Список литературы

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.
3. Гордеев С.Г., Седельников Е.С., Тархов А.Г. Электроразведка методом радиокип // М.: Недра, 1981, 132 с.
4. Парфентьев П.А., Пертель М.И. Прибор для измерения поверхностного импеданса в СДВ-СВ диапазоне в волноводе Земля-Ионосфера // Алма-Ата, Гылым, 1991. 133-135.
5. Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Метод радиомангнитотеллурических зондирований с контролируемым источником // Геофизика, 2014. № 1. С. 18-25.
6. Шлыков А.А. Сараев А.К. Волновые эффекты в поле высокочастотного горизонтального электрического диполя // Физика Земли, 2014, № 2. С. 100-113.
7. Bastani M. Enviro-MT – A New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System. Acta Universitatis Upsaliensis: 2001. 179 p.
8. McNeil, J.D., Labson, V.F. Geological mapping using VLF radio fields// M.N. Nabighian (ed.), Electromagnetic methods in applied Geophysics, 1991. V.3, SEG, 521-640.
9. Saraev A., Simakov A., Shlykov A., Tezkan B.. Controlled source radiomagnetotellurics: A tool for near surface investigation in remote regions // Journal of Applied Geophysics 146 (2017) 228–237.
10. Tezkan B., 2008. Radiomagnetotellurics. Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology / Reinhard Kirsch (ed.), Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 295-318.
11. Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: application to near surface investigations, Near Surface Geophysics, 2008, 245-252.
12. Turberg, P., Müller, I., and Flury, F., 1994, Hydrogeological investigation of porous environments by radiomagnetotelluric-resistivity (RMT-R, 12–240 kHz), Journal of Applied Geophysics 31, 133–143.