

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕНЗОРНОМ ВАРИАНТЕ МЕТОДА РМТ-К

© 2022 г. А. А. Шлыков¹, *, А. К. Сараев¹, **

¹СПбГУ, Институт наук о Земле, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a.shlykov@spbu.ru

**E-mail: a.saraev@spbu.ru

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

После доработки 15.02.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Рассмотрены различные варианты создания “вращающегося” поля для реализации тензорного варианта метода РМТ-К. Выполнен анализ изменения направления поляризации высокочастотного электромагнитного поля заземленного провода, используемого в качестве источника в методе РМТ-К, в зависимости от частоты и параметров провода. Результаты моделирования и полевого эксперимента показывают, что даже для случая одной генераторной линии направление горизонтальной поляризации электромагнитного поля существенно меняется на частотах выше 100 кГц. Однако направление поляризации электрического и магнитного полей в этом случае остается постоянным во времени и использования одной генераторной линии недостаточно для тензорных измерений. При использовании двух взаимно перпендикулярных генераторных линий реализация тензорных измерений возможна при последовательном подключении генератора то к одной, то к другой линии. При одновременном подключении двух независимых генераторов с одинаковыми частотами выходного тока к двум линиям из-за неидентичности линий и заземлений создается “вращающееся” поле на частотах десятки-сотни килогерц. Для создания “вращающегося” поля на частотах ниже 10 кГц целесообразно использовать два одновременно работающих генератора с несколько различной частотой выходного тока. Рассмотренные варианты создания “вращающегося” поля и реализации тензорных измерений обеспечивают получение одинаковых значений компонент тензора импеданса и вектора Визе–Паркинсона.

Ключевые слова: радиоманнитотеллурические зондирования с контролируемым источником, высокочастотное электромагнитное поле, “вращающееся” поле, поляризация.

DOI: 10.31857/S0002333722050258

ВВЕДЕНИЕ

Метод радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником (РМТ-К) является относительно новым методом электро-разведки [Bastani, 2001; Сараев и др., 2014]. Частотный диапазон метода 1–1000 кГц позволяет изучать геоэлектрический разрез в диапазоне глубин от первых метров до 100–150 м. В методе РМТ-К используются источники магнитного типа – горизонтальный магнитный диполь или вертикальная петля [Bastani, 2001] и электрического типа – горизонтальный электрический диполь или заземленный провод [Сараев и др., 2014].

Работы методом РМТ-К чаще проводятся в скалярном варианте. Скалярный вариант подразумевает использование одного источника (заземленного провода или петли) с измерением двух горизонтальных компонент электромагнитного поля. В случае использования заземленного провода измеряют электрическую компоненту

вдоль провода и магнитную вкрест этого направления. При использовании вертикальной петли ориентировка измеряемой электрической компоненты поля параллельна плоскости петли, а магнитной – перпендикулярна петле. В процессе обработки данных вычисляют одну компоненту тензора импеданса (скалярную величину).

Для более достоверной интерпретации данных метода РМТ-К в горизонтально-неоднородных средах и получения полной информации о геоэлектрическом разрезе необходимо проведение тензорных измерений и оценки полного тензора импеданса. Расчет тензорной передаточной функции, возможен в случае измерения электромагнитного поля с переменным во времени направлением поляризации [Семенов, 1980]. Единичный источник электромагнитного поля, такой как петля или заземленный провод, имеют стационарную во времени поляризацию первичного электромагнитного поля.

Для создания поля с переменной во времени поляризации обычно применяют два разнонаправленных источника, работающих попеременно [Wannamaker, 1997; Bastani 2001]. В этом случае генератор подключается по очереди к одной и другой генераторной линии или петле. Поле, регистрируемое приемником, имеет различную ориентировку в разные моменты времени. Таким образом создается электромагнитное поле с кусочно-постоянным направлением поляризации. Данные измерений, выполненных на одной и той же частоте, но с различными источниками, обычно обрабатывают как единое измерение.

Помимо последовательного включения источников с одинаковой частотой тока добиться “вращения” поля можно использованием токов с несколько отличающимися частотами в каждом из генераторов при их одновременной работе. В этом случае период изменения направления суммарного поля будет пропорционален разности периодов токов в каждом из генераторов. При этом изменение направления поляризации суммарного поля будет непрерывным во времени.

В случае использования высоких частот, как в методе РМТ-К, и генераторной линии длиной в сотни метров–километры длина волны тока в проводе становится сопоставимой или меньше длины самого провода. В этом случае на амплитуду и фазу регистрируемого поля будет существенно влиять распределение силы тока вдоль провода, которая в свою очередь будет определяться распределенными параметрами провода, такими как погонные сопротивление, емкость и индуктивность. Возникающие в проводе волновые эффекты также будут оказывать влияние на направление поляризации электромагнитного поля.

Рассмотрению особенностей поляризации различных вариантов высокочастотных источников электрического типа с использованием заземленных проводов посвящена данная статья.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Рассмотрим два взаимно перпендикулярных провода, подключенных к двум независимым генераторам переменного тока, работающим на частотах f и $f + \Delta f$ соответственно. Пусть момент первого источника равен $\mathbf{A} = [A_x, 0, 0]$, а второго – $\mathbf{B} = [0, B_y, 0]$. Зависимость от времени примем в виде $e^{+i\omega t}$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. Проанализируем изменения угла поворота большой оси эллипса поляризации суммарного горизонтального электрического или и магнитного поля обоих источников. Угол поворота эллипса поляризации θ вычисляется по формуле [Вешев, 1980]:

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\cos(\varphi_Y - \varphi_X) |X| |Y|}{|X|^2 - |Y|^2} \right), \quad (1)$$

где X и Y – компоненты соответствующего суммарного поля в направлении осей x и y , а φ_X и φ_Y – фазы этих компонент. Угол θ отсчитывается от оси x к оси y .

На рис. 1 показан результат простого численного эксперимента – расчета зависимости от времени угла θ суммарного поля взаимно перпендикулярных источников при различных отношениях амплитуд моментов $|\mathbf{A}|/|\mathbf{B}|$. При этом начальные фазы были приняты равными нулю, а частоты равными 500.0 и 500.5 Гц соответственно. Очевидно, что период изменения угла равен разности периодов в каждом из двух источников: в данном случае 2 с. При этом чем ближе значения модулей моментов каждого из источников, тем больше амплитуда изменения угла θ , достигающая 90° в предельном случае равенства модулей моментов в обоих источниках. Таким образом можно заключить, что при близких моментах взаимно перпендикулярных источников для выполнения тензорных измерений вполне достаточно единичного измерения при одновременно работающих генераторах, если длительность измерения равна или больше половины разности периодов изменения тока в каждом из источников: в данном случае 1 с.

Рассмотрим волновые эффекты в генераторной линии, связанные с тем, что длина волны тока в проводе сопоставима или меньше длины самого провода. Основываясь на теории длинных линий [Егорова, Сапожников, 1981], можно записать выражения для какой-либо компоненты электромагнитного поля, создаваемого заземленным проводом:

$$M = \int_a^b I(x) m(x) dx, \quad (2)$$

где: M – компонента электрического или магнитного поля генераторной линии в точке измерения; $I(x)$ – комплексная сила тока в точке провода с координатой x ; $m(x)$ – значение той же компоненты электрического или магнитного поля, рассчитанное для точечного горизонтального электрического диполя, помещенного в точку x на проводе.

Комплексное значение силы тока в любой точке провода может быть рассчитано по следующей формуле:

$$I(x) = I_{out} \left(\cosh(\gamma x) - \sinh(\gamma x) \frac{Z_{in}}{Z_w} \right), \quad (3)$$

где: I_{out} – выходная сила тока генератора (А); Z_w – волновой импеданс провода (Ом); Z_{in} – входной импеданс провода (Ом); γ – постоянная распространения тока в проводе (1/км).

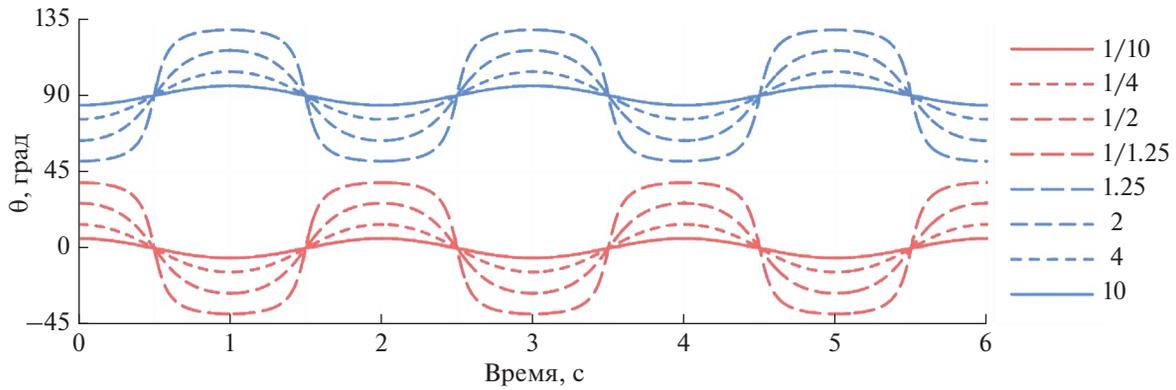


Рис. 1. Зависимость от времени угла θ суммарного поля взаимно перпендикулярных источников с частотами тока 500 и 500.5 Гц при различных отношениях амплитуд моментов $|A|/|B|$. Значения отношений моментов показаны в легенде.

Указанные параметры определяются формулами:

$$Z_{in} = Z_w \frac{R_g + Z_w \operatorname{tgh}(\gamma l)}{Z_w + R_g \operatorname{tgh}(\gamma l)}; \quad Z_w = \sqrt{Z/Y}; \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY}.$$

В приведенных формулах $Z = R + i\omega L$ — полное погонное сопротивление провода (Ом); $Y = G + i\omega C$ — полная погонная проводимость провода (См); l (км) — длина соответствующего плеча генераторной линии между генератором и заземлением с сопротивлением R_g (Ом). Погонные емкость C , проводимость изоляции G и индуктивность L рассчитываются по следующим формулам [Вешев, 1980]:

$$C = \frac{\varepsilon \times 24.13 \times 10^{-9}}{\log_{10}(hr + \sqrt{hr^2 - 1})},$$

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta + G_0 \quad (5)$$

$$L = \left[1 - i1.57 + 2 \operatorname{lg} \left(\frac{1.12}{|k_1| r} \right) - i2.67 |k_1| h \right] \times 10^{-4},$$

где: R — погонное сопротивление металлической части провода (Ом/км); G — погонная проводимость изоляции провода (См/км); G_0 — погонная проводимость изоляции провода на постоянном токе (См/км); C — погонная емкость провода, лежащего на земле (Ф/км); L — погонная индуктивность (Гн/км); ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; h — высота провода над землей (мм); r — радиус металлической части провода (мм); k_1 — волновое число земли; ω — круговая частота.

Для численного моделирования в данной статье использована программа расчета электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в 1D-модели среды с учетом влияния то-

ков смещения в земле и воздухе по алгоритму, описанному в работе [Шлыков, Сараев, 2014] без дополнительных упрощений и приближений. В данном алгоритме интегрирование поля горизонтального электрического диполя вдоль линии провода производится адаптивным методом Гаусса с относительной точностью не хуже 0.1%. При моделировании удельное сопротивление воздуха принималось равным 10^{12} Ом · м, а земли 50 Ом · м. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха принималась равной 1, а земли 4. При расчете электрического поля производилось дополнительное интегрирование вдоль приемной линии длиной 10 м и ориентированной вдоль оси x (вдоль генераторной линии).

Рассмотрим пример для единичного провода длиной 600 м, лежащего на поверхности однородного полупространства. Генератор подключен к проводу нагрузки асимметрично (около одного из заземлений) и сопротивление каждого из заземлений равно 50 Ом. Выходной ток примем равным 1 А. Рисунок 2 иллюстрирует распределение реальной и мнимой частей комплексной силы тока вдоль провода на различных частотах. Как видно на рис. 2, реальная часть силы тока на частоте 1 кГц практически идентична значению на выходе генератора для каждой точки на проводе. Мнимая часть на расстоянии 500 м от генератора принимает значение около 0.1 А, что приводит к сдвигу фазы тока в линии относительно выходной фазы силы тока генератора примерно на 6° . На частоте 10 кГц реальная часть силы тока в линии на расстоянии 500 м уменьшается до половины выходной силы тока генератора, а мнимая часть нарастает по модулю примерно до 0.9 А. На частоте 100 кГц отчетливо видны осцилляции с длиной волны порядка 310 м, а на частоте 1 МГц мы видим сильно затухающие по направлению к заземлениям осцилляции с длиной волны около 33 м.

Следует отметить, что частота 1 кГц часто используется в низкочастотной электроразведке

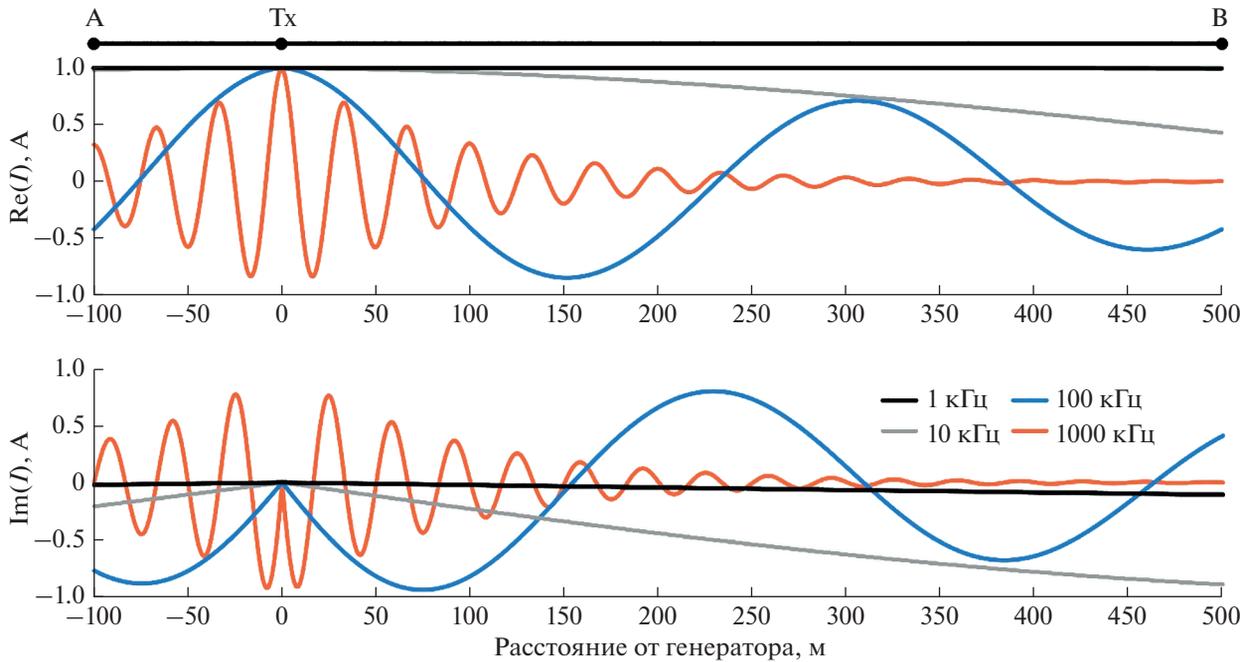


Рис. 2. Распределение реальной и мнимой частей комплексной силы тока вдоль провода длиной 600 м с асимметричным включением генератора на различных частотах.

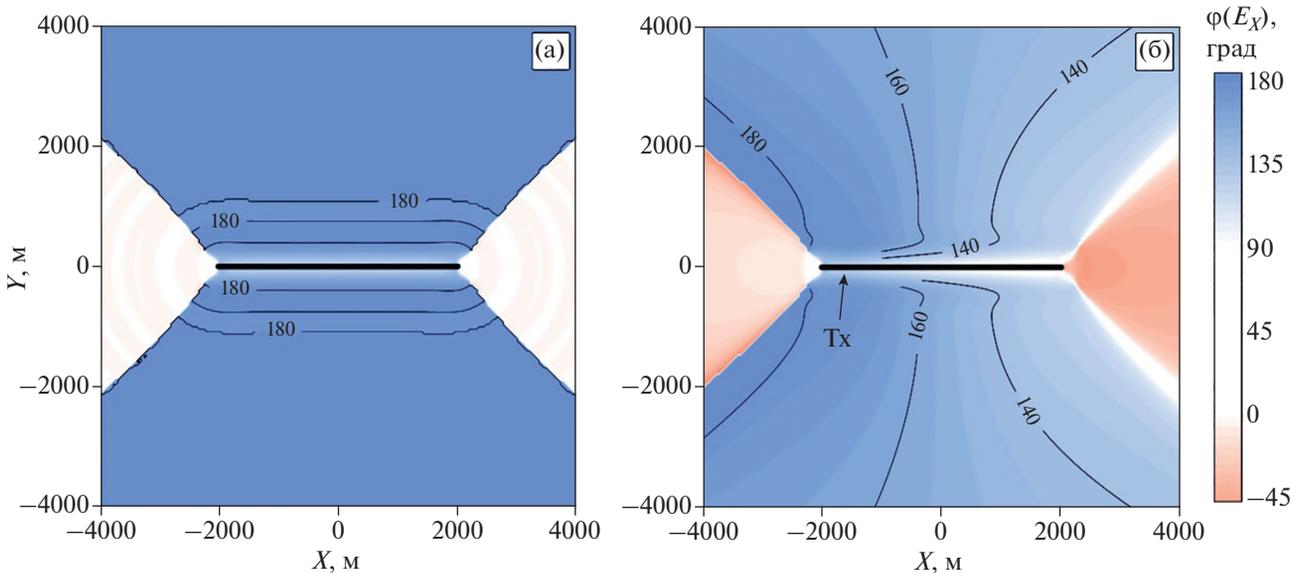


Рис. 3. Карты фазы компоненты E_x поля заземленного провода длиной 4 км над однородным полупространством с удельным сопротивлением $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на частоте 1 кГц: (а) – при мгновенном распространении тока вдоль провода; (б) – с учетом распределенной комплексной силы тока вдоль провода. Генераторная линия показана черной линией в центре. Стрелкой показано положение генератора.

при работах с генераторными линиями длиной в несколько километров. При тех же параметрах провода и заземлений, что и в рассмотренном выше примере, но с увеличением длины провода до 4 км, фаза компоненты E_x вдоль генераторной линии относительно фазы выходного тока генератора, при учете распределенной комплексной силы

тока вдоль провода, будет существенно отличаться от значения, ожидаемого в предположении мгновенного распространения тока вдоль провода (рис. 3).

В случае одинаковой силы тока в каждой точке провода фаза компоненты E_x достаточно быстро выходит на асимптоту дальней зоны (180° в эква-

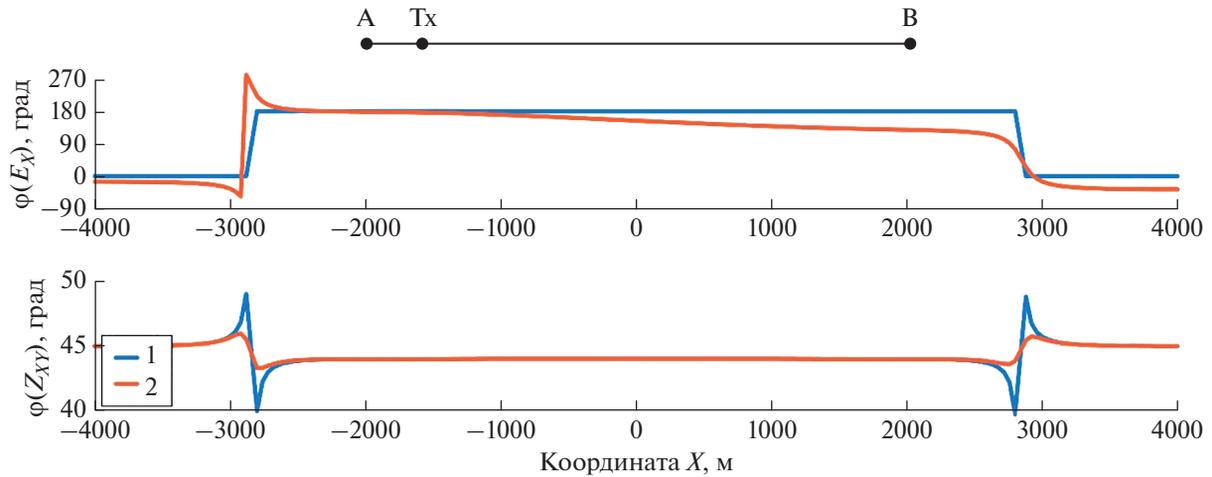


Рис. 4. Графики фазы компоненты E_X и импеданса Z_{XY} поля заземленного провода длиной 4 км над однородным полупространством с удельным сопротивлением $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на частоте 1 кГц по профилю $Y = 1000 \text{ м}$ (см. рис. 3): 1 – при мгновенном распространении тока вдоль провода; 2 – с учетом распределенной комплексной силы тока вдоль провода.

ториальной области и 0° на оси источника) и больше не меняется. В случае распределенной силы тока, которая будет иметь место в реальности, фаза компоненты E_X меняется при перемещении точки измерения вдоль провода генераторной линии на 50° от места подключения генератора до удаленного заземления. Аналогично себя ведет и фаза компоненты H_Y . Поэтому фаза поверхностного импеданса $Z_{XY} = E_X/H_Y$ будет практически свободна от волновых эффектов в проводе (рис. 4). Амплитуды электрического и магнитного поля в значительно меньшей степени подвержены влиянию волновых эффектов в проводе. При этом амплитуда поверхностного импеданса будет также свободна от влияния волновых процессов в проводе.

Оценим, как меняется угол поворота большой оси эллипса поляризации горизонтального электрического и магнитного поля с частотой при увеличении роли волновых эффектов в проводе для генераторных линий различной длины. Рассмотрим генераторные линии длиной 100, 300 и 1000 м, расположенных вдоль оси x при положении генератора в начале координат у одного из заземлений. Точка измерения расположена в экваториальной области генераторных линий на расстоянии 400 м от них напротив точки подключения генератора. Схема численного эксперимента приведена на рис. 5а. Результаты моделирования показаны на рис. 5б–5в для электрического поля θ_E и магнитного поля θ_H соответственно.

Для короткой генераторной линии длиной 100 м горизонтальное электрическое поле ориентировано близко к направлению генераторной линии вплоть до частоты 100–200 кГц, а с дальнейшим ростом частоты наблюдаются осцилляции углов

θ_E в пределах от -40° до $+10^\circ$. С увеличением длины генераторной линии частота, на которой ориентировка поля начинает отличаться от низкочастотного случая, смещается в сторону низких частот: 40–60 кГц для линии длиной 300 м и 8–10 кГц для линии длиной 1000 м. При этом отметим, что в случае генераторной линии длиной 1000 м в диапазоне частот 50–380 кГц ориентировка горизонтального электрического поля близка к диагональному направлению относительно провода (около 30° – 45°), а при дальнейшем повышении частоты это направление ориентировки поля резко меняется на направление, близкое к перпендикулярному относительно провода (65° – 70°). Все особенности ориентировки горизонтального электрического поля повторяются для магнитного поля и ортогональность горизонтальных электрической и магнитной компонент не нарушается.

Под влиянием волновых процессов в проводе направление поляризации электрического и магнитного поля хоть и меняется с частотой, но остается постоянным во времени. Поэтому использование одной генераторной линии недостаточно для проведения тензорных измерений.

Ниже на примере результатов полевого эксперимента показано, каким образом волновые эффекты в проводе влияют на направление поляризации суммарного поля системы из двух взаимно перпендикулярных проводов с подключенными независимыми генераторами переменного тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для анализа изменения поляризации поля высокочастотного поля, создаваемого заземленным проводом, мы использовали аппаратуру, описан-

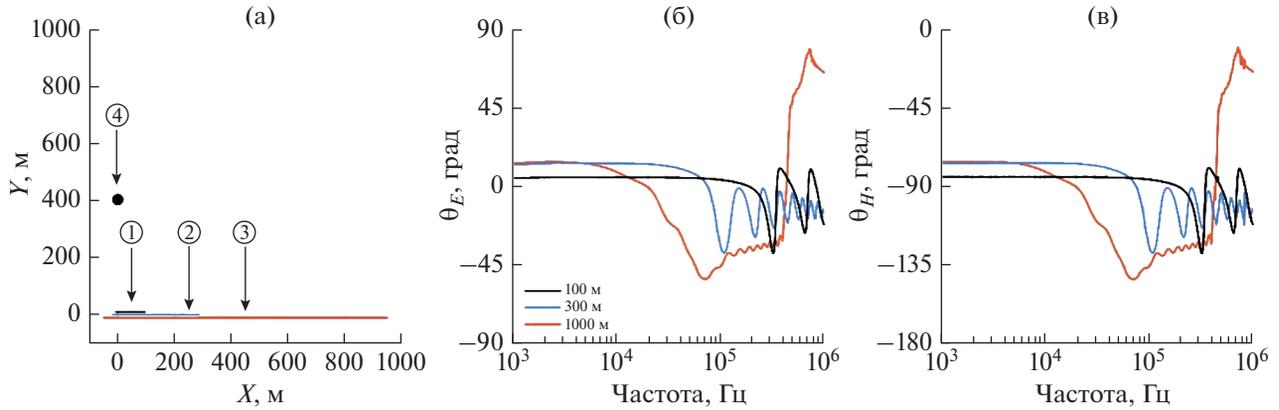


Рис. 5. Зависимости угла поворота большой оси эллипса поляризации горизонтального электрического и магнитного поля для генераторных линий различной длины: (а) — схема численного эксперимента (1 — генераторная линия длиной 100 м; 2 — генераторная линия длиной 300 м; 3 — генераторная линия длиной 1000 м; 4 — точка измерения); (б) — зависимость для электрического поля в точке измерения для генераторных линий различной длины; (в) — то же самое для магнитного поля.

ную в работе [Сараев и др., 2014]. При проведении полевых экспериментов были использованы два генератора и две пары взаимно перпендикулярных заземленных генераторных линий. В первой паре каждая линия имела длину 200 м, во второй — 600 м. Для минимизации влияния помех измерения проводились вблизи источников. Схема измерений показана на рис. 6. Ввиду того, что генератор создает ток в форме прямоугольного меандра, мы использовали только три основные частоты генератора: 0,5, 5 и 50 кГц. Результирующий

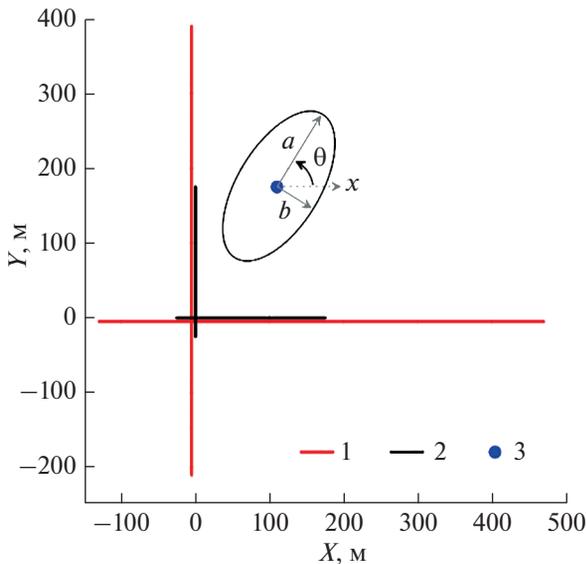


Рис. 6. Схема полевого эксперимента: 1 — генераторные линии длиной 600 м; 2 — генераторные линии длиной 200 м; 3 — точка измерения. Вокруг точки измерения схематически показаны элементы эллипса поляризации: a — большая полуось, b — малая полуось, θ — угол поворота большой полуоси.

спектр имеет 9 нечетных гармоник на декаду для каждой из основных частот.

Мы сравнивали три различных подхода к генерации тока. Первый — последовательное подключение генератора к двум линиям. Вторым — одновременное подключение двух генераторов к двум линиям на одинаковой частоте. Третий — одновременное подключение двух генераторов к двум линиям с небольшим сдвигом основной частоты на втором генераторе относительно первого. Для последнего варианта мы использовали частоты 0,50000 и 0,50001 кГц, 5,000 и 5,001 кГц, 50,0 и 50,1 кГц.

На рис. 5 было показано, что поле от единичного заземленного провода существенно меняет направление поляризации горизонтального поля на высоких частотах. Для повышения наглядности результатов полевого эксперимента и анализа только изменения угла поворота эллипса поляризации во времени далее будем анализировать параметр $\Delta\theta_E$, показывающий отклонение направления поляризации электрического поля в конкретный момент времени от среднего направления поляризации за все время измерения. Рис. 7 иллюстрирует вариации этого параметра в зависимости от частоты и времени измерения для случая одновременно включенных генераторов с одинаковой частотой. На частотах 1,5–9,5 кГц амплитуда осцилляций направления поляризации горизонтального электрического поля лежит в пределах ± 15 – 20° , однако период этих осцилляций довольно большой: около 50 с для частоты 9,5 кГц и более 100 с для 1,5 кГц, что вряд ли может быть применено на практике.

На частотах 15–95 кГц амплитуда осцилляций лежит в пределах ± 10 – 20° с периодом 6 с и менее. На частотах 150–950 кГц амплитуда осцилляций составляет около $\pm 90^\circ$ и скорость враще-

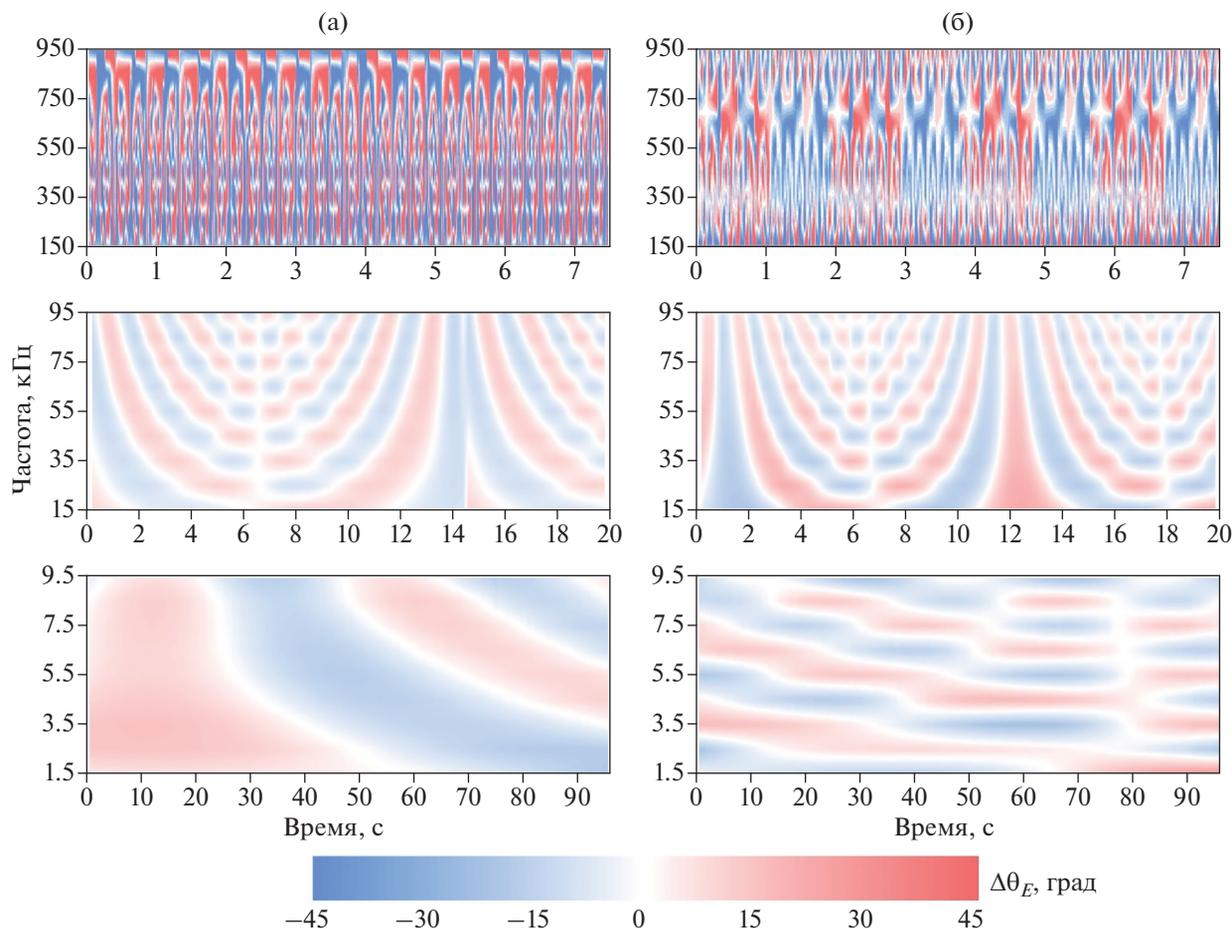


Рис. 7. Измеренный динамический спектр угла ориентировки большой оси эллипса поляризации горизонтального электрического поля относительно его среднего направления на конкретной частоте для одинаковых частот в генераторных линиях: (а) — генераторные линии длиной 200 м; (б) — генераторные линии длиной 600 м. На каждом из двух генераторов заданы одинаковые частоты.

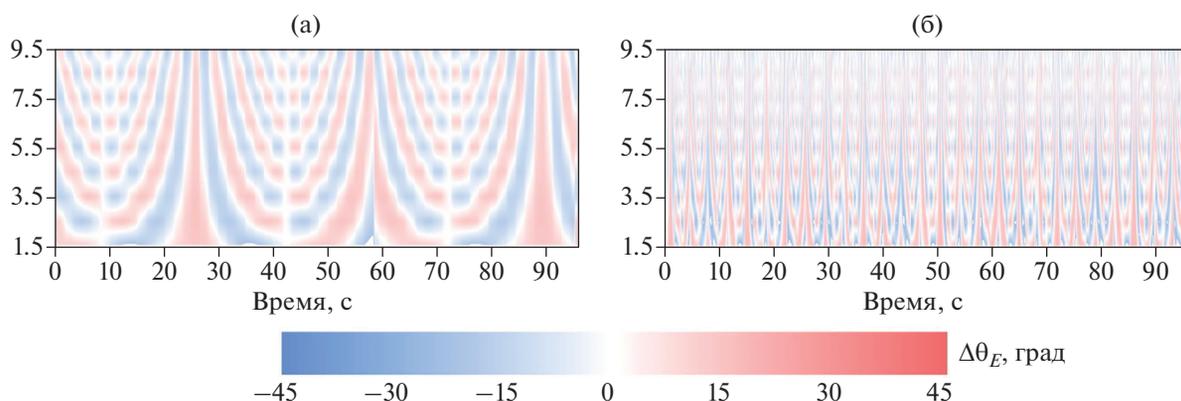


Рис. 8. Измеренный динамический спектр угла ориентировки большой оси эллипса поляризации горизонтального электрического поля относительно его среднего направления на конкретной частоте для частот с незначительным сдвигом частот в разных генераторных линиях: (а) — генераторные линии длиной 200 м; (б) — генераторные линии длиной 600 м. На первом генераторе задана частота 0.5 кГц, на втором — 0.5001 кГц.

ния очень велика. Для каждой частоты более длинный источник дает более значительную амплитуду осцилляций и меньший период вращения поля.

Небольшой сдвиг частоты двух генераторов на 0.02% для частоты 0.5 кГц (0.5000 и 0.5001 кГц) приводит к осцилляциям ориентировки горизонтального электрического поля в диапазоне частот

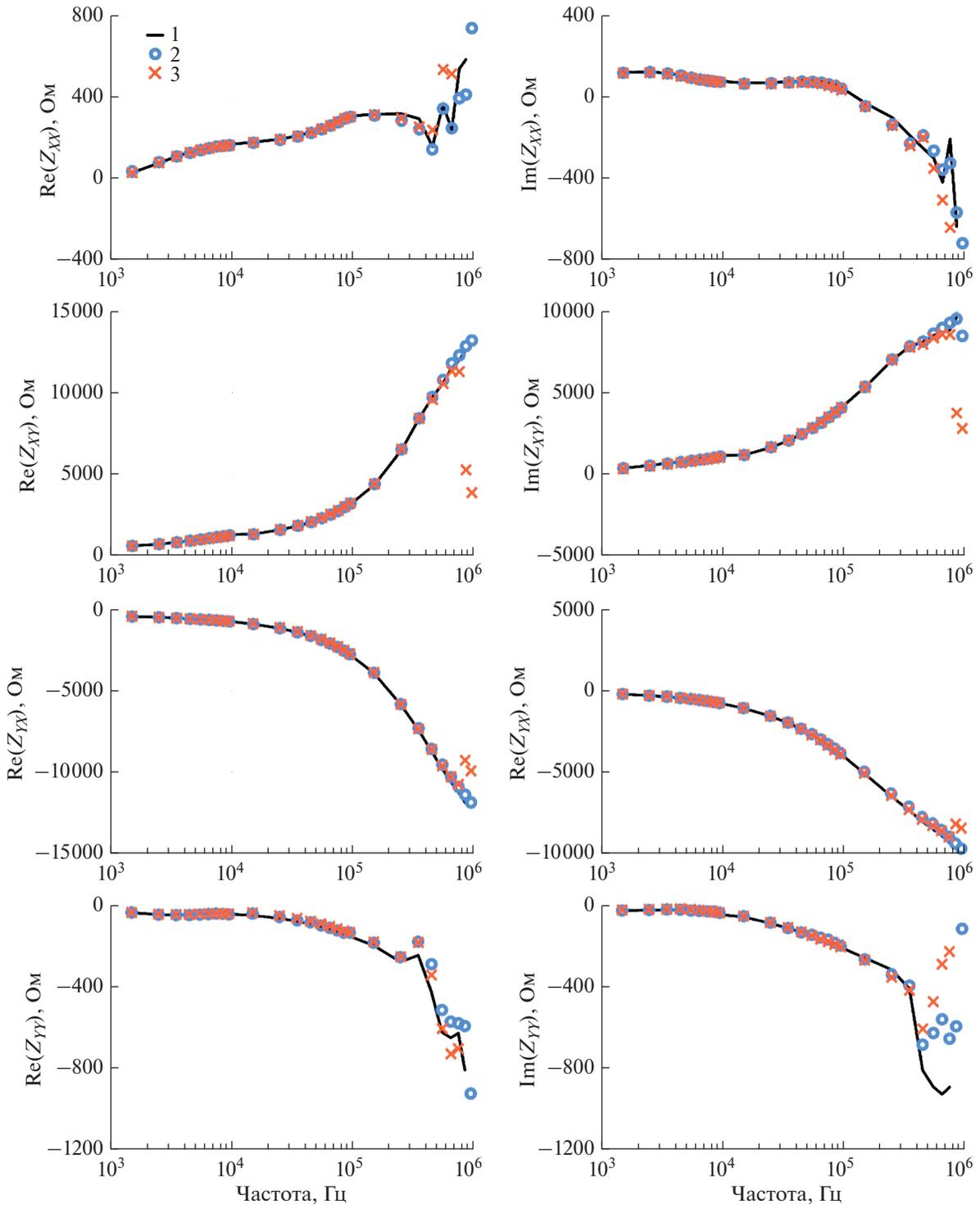


Рис. 9. Сравнение компонент тензора импеданса, вычисленных при различных вариантах генерации тока: 1 – последовательная работа с одним генератором; 2 – одновременная работа двумя генераторами на одинаковой частоте; 3 – одновременная работа двумя генераторами с несколько отличными частотами.

1.5–9.5 кГц с амплитудой $\pm 15\text{--}20^\circ$ и периодом около 10 с для генераторных линий длиной 200 м и 2–3 с для генераторных линий длиной 600 м (рис. 8). Этого вполне достаточно для практиче-

ского применения при проведении тензорных измерений.

Кроме того, полевой эксперимент демонстрирует, что при таком варианте генерации тока пе-

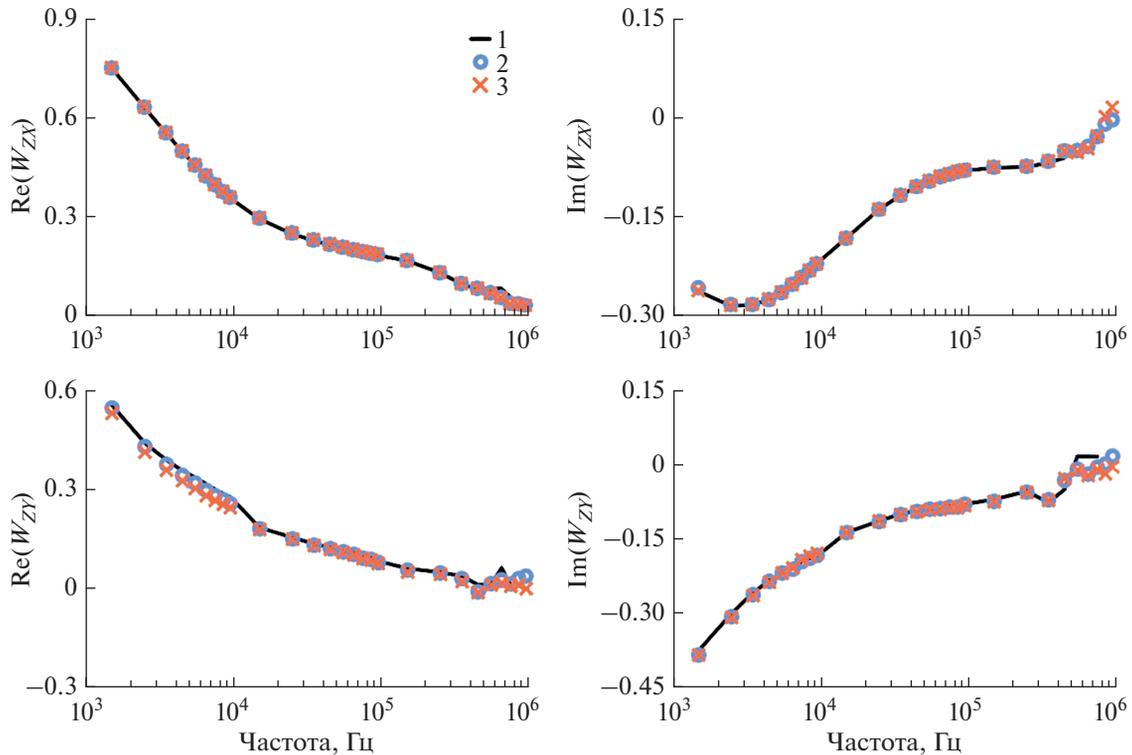


Рис. 10. Сравнение компонент вектора Визе–Паркинсона, вычисленных при различных вариантах генерации тока: 1 – последовательная работа с одним генератором; 2 – одновременная работа двумя генераторами на одинаковой частоте; 3 – одновременная работа двумя генераторами с несколько различными частотами.

риод изменения направления поляризации суммарного поля зависит не только от разности частот в генераторах, но и от длины генераторных линий: с увеличением длины уменьшается период изменения угла θ .

Для более высоких частот динамические спектры угла θ не приведены ввиду их малой наглядности. Это связано с аппаратными ограничениями генератора ГТС-1. Конечный шаг по частоте не позволяет задать две достаточно близкие частоты в интервалах единицы-десятки килогерц так, чтобы период вращения поля укладывался в период измерения небольшое количество раз. Ввиду этого, при обработке таких данных искусственно уменьшается частотное разрешение укорочением длины окна преобразования Фурье для того, чтобы сигнал двух генераторов на старших гармониках не расходился на два отдельных пика на соседних частотах.

В обоих рассмотренных случаях (использование одинаковых частот или частот с небольшим сдвигом) из-за наличия разницы в частотах или при одинаковых частотах из-за неидентичности генераторных линий и заземлений суммарное поле меняет направление своей поляризации.

При сравнении результатов экспериментов для разных вариантов генерации тока: последова-

тельное подключение генератора к двум линиям, одновременная работа двух генераторов на одинаковой частоте, одновременная работа двух генераторов на различающихся частотах, были выполнены расчеты компонент тензора импеданса и вектора Визе–Паркинсона. Установлено, что результаты расчетов практически не зависят от способа генерации тока (рис. 9, рис. 10).

Значительное отклонение оценок компонент тензора импеданса Z_{XY} и Z_{YX} на частотах 850–950 кГц в случае использования несколько различных частот связано с упомянутой выше особенностью генератора ГТС-1. Старшие гармоники частот 50.0 и 50.1 кГц отличаются даже при искусственном уменьшении частотного разрешения и итоговые оценки оказываются неверными. Однако на практике это не является проблемой, так как для высоких частот (сотни килогерц) достаточно использования одинаковых частот на обоих генераторах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения тензорной передаточной функции необходимо иметь данные измерений электромагнитного поля с переменным во времени направлением поляризации. В методах низкочастотных электромагнитных зондирований с кон-

тролируемыми источниками обычно используют две разнонаправленные заземленные линии с генератором тока, подключаемым то к одной, то к другой линии. Мы рассмотрели особенности поляризации высокочастотного электромагнитного поля генераторной линии применительно к тензорному варианту метода РМТ-К. На основе численного анализа и полевых экспериментов показано, что направление поляризации высокочастотного поля линии существенно зависит от частоты и длины провода. Для единичного провода на частотах более 100 кГц поле вращается на десятки-сотни градусов. Однако направление поляризации электрического и магнитного поля в этом случае остается постоянным во времени, и использование одной генераторной линии недостаточно для тензорных измерений.

При использовании в высокочастотном методе РМТ-К двух взаимно перпендикулярных генераторных линий возможно применение стандартного подхода с последовательным подключением генератора на одной частоте к двум линиям и реализацией тензорных измерений. При одновременном подключении двух генераторов с одинаковыми частотами к двум линиям, как показали полевые эксперименты, из-за неидентичности линий и заземлений создается “вращающееся” поле в диапазоне частот десятки-сотни килогерц. На частотах ниже 10 кГц более практично использовать небольшой сдвиг по частоте между двумя генераторами, порядка 0.02%, что приводит к значительному ускорению вращения поля.

Рассмотренные варианты создания “вращающегося” поля в методе РМТ-К: использование двух генераторных линий и двух генераторов, работающих на одинаковой частоте или с небольшим сдвигом по частоте, позволяют получать результаты, аналогичные результатам реализации тензорного варианта на основе последовательно включения двух источников и обработки дан-

ных как единого измерения, за более короткое время измерения. По результатам измерений при разных вариантах генерации тока в двух генераторных линиях: последовательное включение генератора, одновременная работа двух генераторов на одинаковой частоте или на различающихся частотах, были выполнены расчеты компонент тензора импеданса и вектора Визе–Паркинсона. Установлено, что результаты практически не зависят от способа генерации тока.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (номер проекта 21-47-04401) и Ресурсного центра “Геомодель” СПбГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вешев А.В.* Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2е изд. Л.: Недра. 1980. 391 с.
- Егорова Л.В., Сапожников Б.Г.* Алгоритм расчета поля заземленного и незаземленного кабеля, расположенного на поверхности двуслойной среды. Методы разведочной геофизика. Теория и практика интерпретации в рудной геофизике. 1981. С. 18–28.
- Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А.* Метод радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником // Геофизика. 2014. № 1. С. 18–25.
- Семенов В.Ю.* Обработки данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра. 1985. 133 с.
- Шлыков А.А., Сараев А.К.* Волновые эффекты в поле высокочастотного горизонтального электрического диполя // Физика Земли. 2014. № 2. С. 100–113.
- Bastani M.* EnviroMT – A New Controlled Source/Radio-Magnetotelluric System. Acta Universitatis Upsaliensis. 2001. 179 p.
- Wannamaker Ph.E.* Tensor CSAMT survey over the Sulphur Springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, U.S.A. Part I: Implications for structure of the western caldera // Geophysics. 1997. № 2. P. 451–465.

Polarization of a High-Frequency Electromagnetic Field in the Tensor CSRMT Method

A. A. Shlykov^{a,*} and A. K. Saraev^{a,**}

^a*Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

**e-mail: a.shlykov@spbu.ru*

***e-mail: a.saraev@spbu.ru*

The paper considers different modes of producing a “rotating” field for the implementation of the tensor CSRMT method. We analyzed changes in the direction of polarization of a high-frequency electromagnetic field of a grounded wire used as a source in the CSRMT method, depending on the frequency and wire parameters. Modelling results and field experiments show that even with single transmitter’s wire the direction of horizontal polarization of the electromagnetic field varies significantly at frequencies above 100 kHz. However, in this case the direction of polarization of the electric and magnetic fields remains constant in time, and single transmitter’s wire is not sufficient for tensor measurements. When two mutually perpendicular transmitter’s wires are used, tensor measurements become possible by connecting the transmitter to one

and then to the other wire consequently. If two independent transmitters with identical output current frequencies are simultaneously connected to two wires, a “rotating” field is produced at frequencies of a ten to hundred kilohertz as a result of the non-identity of the lines and groundings. To produce a “rotating” field at frequencies below 10 kHz, it makes sense to use two transmitters running in parallel with a slightly different output current frequency. The analyzed modes of producing a “rotating” field and performing tensor measurements provide identical values of components of the impedance tensor and the Wiese-Parkinson vector.

Keywords: controlled-source radiomagnetotellurics, high-frequency electromagnetic field, rotating field, polarization