

В. В. Плоткин, Е. В. Поспеева, В. В. Потапов, А. А. Заплавнова*

Оценки искажений кривых магнитотеллурического зондирования в авроральной зоне при неоднородности первичного поля

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) применяется для изучения неоднородных глубинных структур электропроводности Земли. В отличие от средних широт, где применимо представление первичного источника поля плоской волной, в авроральной зоне из-за близости ионосферных токовых струй первичное поле является неоднородным. Это может приводить к дополнительным искажениям кривых МТЗ. В работе предлагается вариант метода оценки величины этих искажений. По данным проекта BEAR оценены погрешности кривых МТЗ, получаемых в экспериментах вблизи авроральной зоны.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, неоднородность первичного поля в авроральной зоне, проект BEAR

V. V. Plotkin, E. V. Pospeeva, V. V. Potapov, A. A. Zaplavnova*

Estimates of Distortions of Magnetotelluric Sounding Curves in the Auroral Zone with Heterogeneity of the Primary Field

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, , Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Abstract. Magnetotelluric sounding (MTS) is used to study heterogeneous deep structures of the Earth's electrical conductivity. Unlike the middle latitudes, where the representation of the primary source of the field by a plane wave is applicable, in the auroral zone, due to the proximity of ionospheric current jets, the primary field is heterogeneous. This can lead to additional distortions of MTS curves. The paper proposes a variant of the method for estimating the magnitude of these distortions. According to the BEAR project, the errors of MTS curves obtained in experiments near the auroral zone were estimated.

Keywords: magnetotelluric sounding, heterogeneity of the primary field in the auroral zone, the BEAR project

Введение

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) применяется для изучения неоднородных глубинных структур электропроводности Земли [1, 2]. При интерпретации данных МТЗ обычно считается, что среда возбуждается вертикально падающей плоской волной. Однако в случаях близости к авроральным зонам, где на ионосферных высотах существуют токовые струи повышенной амплитуды, вполне реально возбуждение среды неоднородным вдоль земной поверхности электромагнитным полем.

Возникают вопросы, насколько сильно сказывается неоднородность источника на регистрируемых кривых МТЗ, можно ли учесть эту часть поля при интерпретации данных, следует ли изменить условия эксперимента и регистрации поля.

В частности, с использованием синхронной регистрации компонент поля в трех или более пунктах доступны алгоритмы пространственной фильтрации и бимодальное представление электромагнитного поля [3]. Вместо рассмотрения стандартных кривых в этой ситуации при интерпретации данных МТЗ можно также исследовать связи между пространственными распределениями компонент электромагнитного поля на земной поверхности [4].

Однако для таких подходов необходим сложный и затратный эксперимент с синхронной площадной регистрацией данных большим количеством пунктов наблюдений. Можно упомянуть лишь несколько проведенных экспериментов, например, проекты IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects, <http://space.fmi.fi/image>), EMSCOPE (Electro Magnetic Earth Scope) [8] и BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research [7]).

В качестве альтернативы в данной работе предлагается более простой вариант оценки погрешностей кривых МТЗ в авроральной зоне, обусловленных пространственной неоднородностью первичного поля.

Алгоритм оценок погрешностей определения кривых МТЗ

Для определения кривых МТЗ на практике по стандартной методике обрабатываются зарегистрированные в данном пункте временные ряды вариаций пяти компонент электромагнитного поля [6]. Переход к кривым МТЗ вызван необходимостью учета временной изменчивости первичного источника.

Уместно отметить, что для определения кривых МТЗ необходимо иметь значения амплитуд временных спектров при двух независимых поляризациях электромагнитного поля. С этой целью можно, например, воспользоваться данными двух или нескольких сеансов наблюдений с последующим усреднением получаемых результатов. При отсутствии помех временная изменчивость первичного источника не оказывает какого-либо влияния на эти результаты, в чем нетрудно удостовериться с помощью численного моделирования. Присутствие помех приводит к погрешностям кривых МТЗ, зависящих от их уровня.

Временную изменчивость первичного источника также можно учесть, анализируя на полигоне разности спектров компонент полей в пунктах МТЗ. Справедливо предположить, что в течение одного или нескольких сеансов наблюдений в исследуемой среде каких-либо заметных изменений не происходит. Тогда временная изменчивость регистрируемых спектров (при низком уровне помех) обусловлена лишь нестабильностью первичного поля.

Весьма существенно, что разности спектров в пунктах могут быть также критерием наличия пространственной неоднородности первичного поля. Если первичное поле источника характеризуется пространственной изменчивостью (заметно изменяется по латерали, например, в авроральных широтах вблизи мощных токовых струй, или при сравнительно больших размерах полигона), воз-

никает вопрос, как можно по разностям спектров в пунктах различить неоднородность источника и латеральную неоднородность среды.

С помощью численного моделирования с 3D моделями среды нами было установлено, что, если источник - вертикально падающая плоская волна даже с изменяющейся во времени амплитудой, указанные разности спектров заметно уменьшаются. Кроме того, в этом случае кривые МТЗ по данным любых двух сеансов оказываются одними и теми же. Для их определения справедливы стандартные подходы, и поведение кривых МТЗ зависит лишь от неоднородной структуры электропроводности в среде.

Однако при временной и пространственной изменчивости первичного источника поля, разности спектров в пунктах изменяются как по времени, так и по форме отображающих зависимость от периода кривых. По результатам расчетов для источника в виде плоской волны предлагается определять кривые МТЗ в сеансах, когда указанные разности спектров между пунктами минимальны (практически совпадают). Можно считать, что в таких сеансах источником является плоская волна, а кривые МТЗ отображают лишь неоднородности среды. Поскольку все же полного совпадения разностей спектров достигнуть не удастся, разброс полученных кривых отображает влияние неоднородности источника и может служить как их погрешности.

Для проверки проведено численное моделирование с 3D-средой [5]. Наряду с плоской волной в источнике учтена его неоднородность линейной зависимостью компоненты H_x магнитного поля вдоль оси абсцисс (ось OX направлена на север, ионосферная токовая струя направлена вдоль широтного круга по оси OY). Как и должно быть, первичное поле такого источника для непроводящей атмосферы на поверхности среды удовлетворяет условию $(rot \mathbf{H})_z = 0$.

Амплитуда плоской волны задавалась с увеличением пропорционально временному периоду (по аналогии с экспериментальными данными), а величина градиента H_x - одинаковой амплитуды на разных периодах, но со случайными отклонениями по нормальному закону. Установлено, что неоднородность источника в поведении кривых МТЗ не проявляется, если перепад H_x на полигоне не превышает амплитуду плоской волны.

Это подтверждает высказанное предположение о выборе определения кривых МТЗ и их погрешностей по данным сеансов, в которых разности спектров между пунктами не превышают уровня помех. Источником в таких сеансах предполагается плоская волна, а кривые МТЗ отображают скорее неоднородную структуру среды, а не первичного поля.

Результаты оценок погрешностей кривых МТЗ в эксперименте ВЕАР и их обсуждение

Проведено опробование предлагаемого алгоритма по данным 1998 года проекта ВЕАР на Балтийском щите. Было выбрано три пункта (рис. 1а) с синхронной регистрацией пяти компонент электромагнитного поля (интервал дискретизации 2 сек) и обработаны данные 324 скользящих сеансов продолжительностью 10 часов со сдвигом начала на один час. Для последующего усреднения получа-

емых результатов в каждом сеансе вычислялись временные спектры вариаций трех компонент геомагнитного поля и двух горизонтальных компонент электрического поля. Полученные амплитуды для 50 временных периодов в диапазоне от 4 до 36000 сек, равномерно распределенных по логарифмической шкале, являлись исходными данными для последующей обработки описываемым алгоритмом.

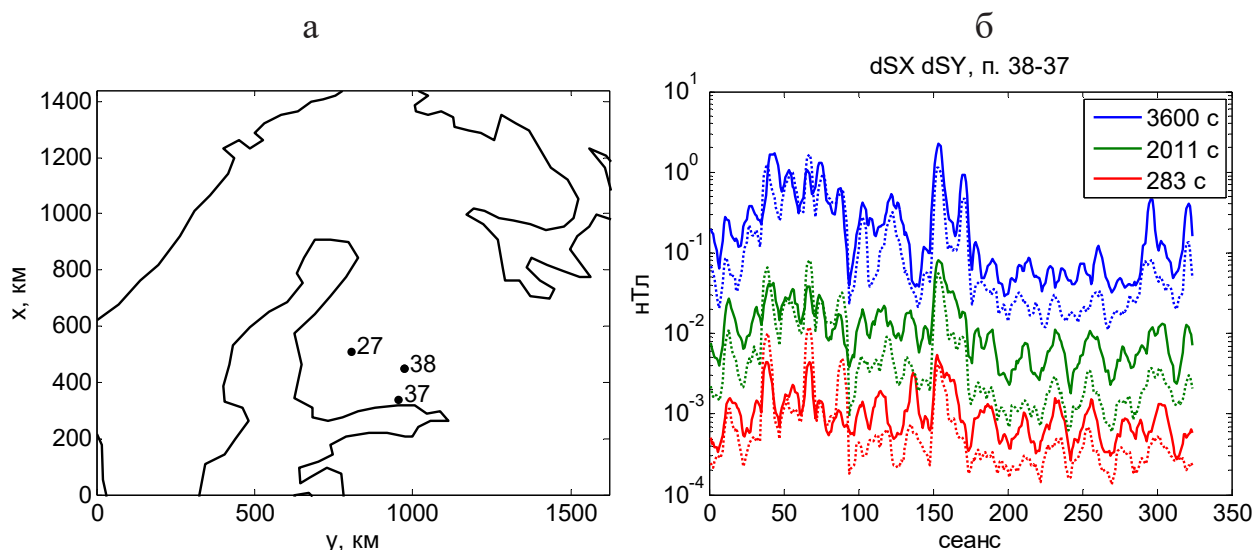


Рис. 1. Расположение выбранных пунктов в эксперименте BEAR на Балтийском щите (а) и модули разностей временных спектров по данным пунктов 37 и 38 в разных сеансах (б). Сплошные линии и пунктир одного цвета – разности спектров X и Y компонент соответственно.

На рис. 1б для примера представлены разности спектров X и Y компонент между пунктами 37 и 38 на трех временных периодах, вычисленные во всех скользящих сеансах. Поскольку сдвиг между началами сеансов составлял один час, ось абсцисс совпадает с временной шкалой. В частности, можно наблюдать суточную вариацию обсуждаемых разностей спектров и увеличение амплитуд разностей спектров с периодом.

Для сравнения на рис. 2 представлены разности спектров, полученные по данным о вариациях X - компоненты между всеми выбранными пунктами. Как видно, разности спектров X -компоненты между пунктами 37-27 и 38-27 практически совпадают. В то же время разности спектров между этими пунктами и пунктами 38-37 заметно отличаются. Поскольку это отличие в разных сеансах изменяется, можно говорить о временной нестабильности первичного источника и наличии его широтной зависимости.

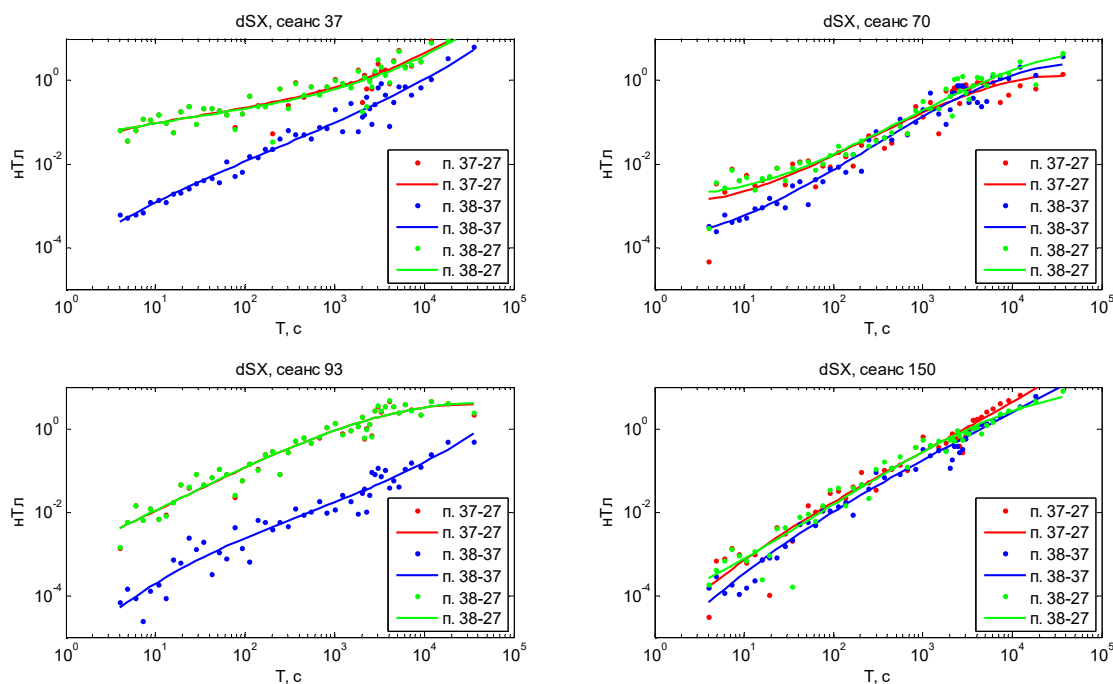


Рис. 2. Разности спектров X -компоненты между wybranными пунктами для нескольких сеансов (точками показаны значения разностей на всех временных периодах, сплошными линиями их аппроксимация полиномом).

Можно предположить, что, когда в сеансах все разности практически одинаковы (с учетом уровня помех), поле первичного источника в них близко к полю вертикально падающей плоской волны и влияние неоднородности источника не столь велико.

Установлено несколько сеансов с близкими разностями спектров во всех пунктах. При относительной величине разностей меньше 1% имеется 30 сеансов, а при близости меньше 0.5% всего 7 сеансов. Вычисленные по этим сеансам кривые кажущихся сопротивлений также совпадают с некоторым разбросом (поскольку отличия источника от плоской волны в них все-таки неодинаковы). На рис. 3 представлены средние значения и их с.к.о. для всех обсуждаемых кривых. Следует подчеркнуть, что эти кривые соответствуют “полигону”, представленному тремя wybranными пунктами. Показанные с.к.о. кривых кажущихся сопротивлений представляют оценки по максимуму погрешностей их определения, вызванных неоднородностью первичного источника.

Вероятно, есть и другой вариант получения оценок – выбор сеансов со слабо отличающимися кривыми кажущихся сопротивлений, но он требует более сложного алгоритма отбора сеансов для обработки данных.

Теоретически также возможен вариант синхронной регистрации данных на полигоне несколькими пунктами, аппроксимации электромагнитного поля на поверхности и решения обратной задачи на основе согласования полученных рас-

пределений электрического и магнитного полей [9]. Но для этого нужно заметно большее количество пунктов наблюдений, что не всегда возможно.

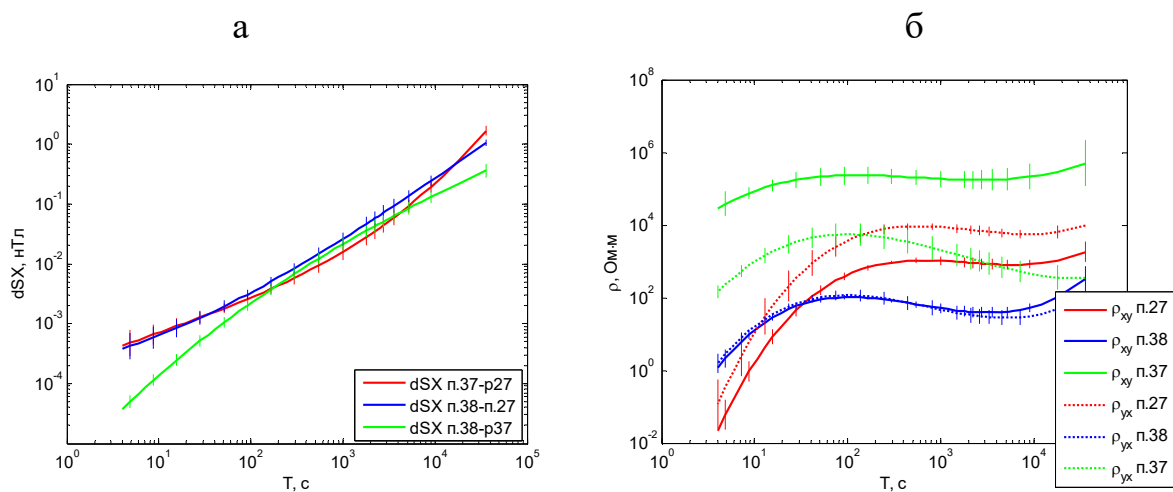


Рис. 3. Усредненные по 7 сеансам разности спектров X -компоненты между выбранными пунктами (а) и кривые кажущихся сопротивлений (б) (сплошными линиями показаны средние кривые, вертикальными отрезками с.к.о. на нескольких временных периодах).

Заключение

В авроральной зоне, где на ионосферных высотах существуют токовые струи повышенной амплитуды, реально возбуждение среды неоднородным вдоль земной поверхности первичным электромагнитным полем. Это может стать причиной дополнительных искажений при регистрации кривых МТЗ.

Нами предложен простой вариант оценки погрешностей определения кривых МТЗ, вызванных пространственной неоднородностью первичного поля. С этой целью на полигоне можно анализировать разности спектров компонент полей в пунктах МТЗ.

Показано, что определение кривых МТЗ и оценки погрешностей следует проводить по данным сеансов, в которых разности спектров между пунктами не превышают уровня помех, так как в них первичное поле источника является близким к полю плоской волны. Поэтому получаемые кривые МТЗ отображают лишь неоднородную структуру среды, а не первичного поля.

С использованием предлагаемой методики и данных проекта BEAR оценены погрешности кривых МТЗ, получаемых в экспериментах вблизи авроральной зоны.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0024.

В работе использованы экспериментальные данные международного проекта BEAR. Авторы благодарят всех участников Рабочей группы BEAR за возможность работать с этими данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. - М.: Научный мир, 2009. - 668 с.
2. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. – 320 с.
3. Плоткин В.В. Синхронное магнитотеллурическое зондирование при латерально неоднородном возбуждении среды // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 10 – С. 1919-1930.
4. Плоткин В.В., Белинская А.Ю., Гаврыш П.А. Применение нелокальных функций отклика для обработки данных магнитотеллурического зондирования на Балтийском щите // Геология и геофизика. – 2009. - Т. 50. - № 9. С. 1049-1057.
5. Плоткин В.В., Потапов В.В. Магнитотеллурическое зондирование в Арктике с использованием станции на дрейфующей льдине (численный эксперимент) // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63 – № 8 – С. 1167-1181.
6. Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра, 1985. – 136 с.
7. Korja T. BEAR—Baltic Electromagnetic Array Reseach // EUROPROBE News. – 1998. - № 12, <http://www.geofys.uu.se/eprobe/Publicat/news12/news12.html>
8. Schultz A. EMScope: A continental scale magnetotelluric observatory and data discovery resource // Data Sci. J. – 2009. -V. - 8. P. 6 - 20.
9. Плоткин В.В. Зона влияния неоднородности среды и поля при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 1 – С. 140-149.

© В. В. Плоткин, Е. В. Поспеева, В. В. Потапов, А. А. Заплавнова, 2024