

Санкт-Петербургский государственный университет

Материалы
12-ой международной школы-конференции

ПРОБЛЕМЫ ГЕОКОСМОСА

Санкт-Петербург, Петергоф

8-12 октября 2018 г.

Ответственные редакторы:

Н.Ю. Бобров, Н.В.Золотова, А.А. Костеров, Т.Б. Яновская

Санкт-Петербург 2018

УДК 550.8; 551
ББК 26.3
П78

П78 **Проблемы геокосмоса.** Материалы 12-й международной школы-конференции. Санкт-Петербург, Петергоф. 8–12 октября 2018 г. / Отв. редакторы: Н. Ю. Бобров, Н. В. Золотова, А. А. Костеров, Т. Б. Яновская. — СПб.: Изд-во ВВМ, 2018. — 385 с.

ISBN 978-5-9651-1207-4

Об измерении вертикальной компоненты электрического поля при магнитотеллурическом зондировании

В. В. Плоткин⁽¹⁾, В. С. Могилатов⁽¹⁾

1 - Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН («ИНГГ СО РАН»), 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. ак. Коптюга, 3,
Телефон: 73833332905, e-mail: PlotkinVV@ipgg.sbras.ru;
Телефон: 73833309602, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Аннотация.

При магнитотеллурическом зондировании (МТЗ) обычно регистрируются вариации пяти компонент электромагнитного поля. При стандартном подходе в эксперименте определяют передаточные функции - соотношения между горизонтальными компонентами электрического и магнитного полей. Признаком отклонений от базовой модели служит пятая регистрируемая компонента - вертикальная компонента магнитного поля. При сложном геоэлектрическом строении среды и наличии искажений кривых МТЗ на практике возникают трудности при интерпретации данных. Для повышения достоверности получаемых результатов при решении обратной задачи и большей информативности МТЗ предлагается дополнительно выполнять регистрацию вертикальной компоненты электрического поля в среде. Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными по этой компоненте при решении обратной задачи весьма желательно. Сейчас для регистрации ее вариаций применяется метод измерения разности потенциалов, возникающей на вертикальной линии, погруженной в среду (водоем). На суше для этого необходимо бурить или использовать уже имеющиеся скважины, что затруднительно. Предлагается применить для регистрации вертикальной компоненты круговой электрический диполь (КЭД). Сейчас КЭД успешно применяется как излучатель в методах электромагнитного зондирования. Используется его особенность возбуждать в плоско-слоистой среде одну только ТМ-моду, электрическое поле которой имеет вертикальную компоненту. На практике круговой электрический диполь обычно реализуется восемью длинными радиальными линиями. Учитывая указанную особенность, КЭД можно использовать и как приемную систему МТЗ для регистрации вариаций поля ТМ-моды. В работе анализируются возможности его использования при МТЗ.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, круговой электрический диполь, вертикальная компонента электрического поля

Введение

При проведении магнитотеллурического зондирования (МТЗ) обычно регистрируются вариации пяти компонент электромагнитного поля. Это связано с тем, что в основе метода лежит модель Тихонова-Каньяра: горизонтально-слоистая среда, возбуждаемая вертикально падающей плоской волной. При стандартном подходе в эксперименте определяют передаточные функции - соотношения между горизонтальными компонентами электрического $E_{x,y}$ и магнитного $H_{x,y}$ полей. Признаком отклонений от базовой модели служит пятая регистрируемая компонента – вертикальная компонента магнитного поля H_z .

Поскольку электропроводность атмосферы $\sigma_a \sim 10^{-14}$ См/м весьма мала, и выполняется условие непрерывности поперечного тока, получается, что на границе с атмосферой вертикальная компонента E_z электрического поля обращается в нуль, и нет необходимости в ее регистрации. Поэтому обычно так и происходит.

Однако в реальном случае компонента E_z обращается точно в нуль лишь на самой границе и постепенно затухает по направлению к ней в прилегающем скин-слое. Более того, если среда в толще этого слоя является анизотропной, компонента E_z может быть отличной от нуля и на самой границе,

поскольку поперечный ток в этой ситуации не обязательно совпадает с компонентой E_z по направлению.

С другой стороны, чтобы в эксперименте определить компоненту E_z (как и компоненты $E_{x,y}$), производится регистрация разности потенциалов на линии конечной длины. Можно утверждать, что на практике в любом случае указанная разность потенциалов будет всегда отличаться от нуля и зависеть от длины линии.

Учитывая, что при решении обратной задачи для трехмерной среды компонента E_z для каждой текущей модели также будет определяться, для большей достоверности получаемых результатов сравнение расчетных значений с экспериментальными данными по E_z весьма желательно. При сложном геоэлектрическом строении среды и наличии искажений кривых МТЗ на практике возникают трудности при интерпретации данных. Если не учесть возможные искажения, вполне вероятны недостоверные результаты такой интерпретации: латеральные приповерхностные неоднородности могут быть восприняты как глубинные «проводящие» слои.

Для устранения возникающих трудностей разрабатываются различные алгоритмы обработки данных и нестандартные варианты проведения МТЗ. Регистрация вертикальной компоненты E_z могла бы стать одним из таких вариантов. Интересна также работа [1], в которой предложено проводить пространственное усреднение горизонтальных компонент электрического поля с помощью регистрации этих компонент протяженными линиями вдоль исследуемого профиля (electromagnetic array profiling).

В связи с этим вызывает интерес анализ возможностей регистрации вертикальной компоненты E_z с помощью кругового электрического диполя (КЭД), располагаемого на дневной поверхности. Конфигурация КЭД предложена еще в работе [2] как питающая установка для индукционной электроразведки с контролируемыми источниками. Сейчас КЭД успешно применяется как излучатель в методах электромагнитного зондирования [3]. Используется его особенность возбуждать в плоскостой среде одну только ТМ-моду, электрическое поле которой имеет вертикальную компоненту. Поскольку магнитное поле ТМ-моды в непроводящей атмосфере равно нулю, при регистрации данных на земной поверхности исключается вклад прямого поля, а все наблюдаемые вариации магнитного поля связаны лишь с отклонениями от плоскостой среды.

Идеальная схема стороннего тока и реальный источник представлены на рис. 1. На практике круговой электрический диполь обычно реализуется восемью длинными радиальными линиями. Учитывая упомянутую особенность, КЭД можно использовать и как приемную систему МТЗ для регистрации вариаций поля ТМ-моды, а именно, вертикальной компоненты электрического поля E_z в среде под пунктом зондирования. Сейчас для регистрации вариаций E_z применяется метод измерения разности потенциалов на вертикальной линии, погруженной в водоем [см., например, 4-5]. На суше для этого необходимо бурить или использовать уже имеющиеся скважины, что затруднительно. Поэтому поиск новых способов регистрации E_z представляет большой интерес. Следует отметить также важность получения новых экспериментальных результатов по вариациям E_z для многих

областей геофизики. В данной работе анализируются возможности применения КЭД с этой целью при проведении МТЗ.

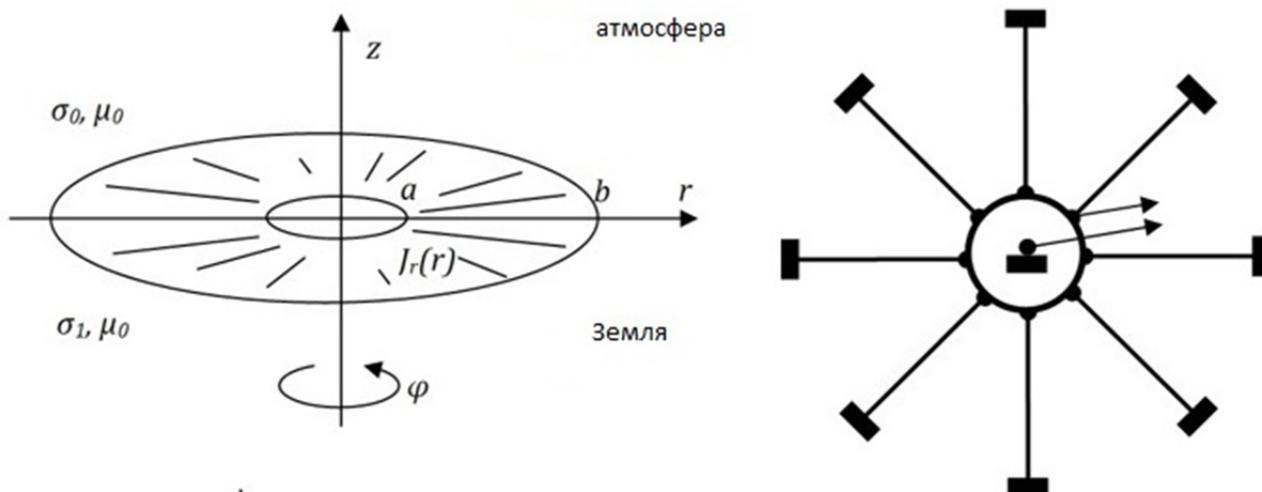


Рис. 1. - Идеальный (слева) и реальный (справа) круговой электрический диполь.

Результаты численных расчетов потенциалов U_z и $U_{КЭД}$

Установлено [3], что на практике при использовании КЭД в качестве излучателя, достаточно 8 линий, равномерно распределенных по азимуту. Чтобы использовать КЭД как приемное устройство, необходимо определить соотношение разностей потенциалов U_z и $U_{КЭД}$ на выбранных устройствах. Радиус КЭД – важная характеристика, на практике определяющая их соотношение. Влияние различных факторов при использовании КЭД в качестве регистратора в МТЗ можно исследовать с помощью численного моделирования.

Для численных расчетов использовалась модель поля на основе метода Треффца [6], учитывающая искажения кривых МТЗ, вызванные трехмерной неоднородностью среды. Рассмотрим результаты расчетов для модели среды, представленной семью слоями с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 25, 50, 100, 1000, 10, 1000 и 1 Ом·м (сверху вниз) и мощностями соответственно 0.1, 0.1, 0.1, 15, 10, 45 и 15 км и подстилающей средой 100 Ом·м (рис. 2а). Такой нормальный геоэлектрический разрез включает два проводящих слоя – коровый на глубинах 15-25 км и мантийный на глубинах 70-85 км. Три поверхностных слоя с мощностями 0.1 км можно применить для моделирования искажений кривых МТЗ. В частности, было подробно изучено влияние отдельной неоднородности, присутствующей во втором сверху слое (рис. 2б). Предполагалось, что МТЗ проводится на полигоне с размерами 30x30 км, в центре которого находится КЭД. Его радиальные лучи показаны на рис. 3б прямыми линиями. При расчете с помощью численной модели на основе метода Треффца каждый из семи слоев представляется 49 одинаковыми параллелепипедами с высотой, равной мощности слоя и горизонтальными сечениями с размерами 4.29x4.29 км (по 7 параллелепипедов вдоль каждой из горизонтальных осей координат), внутри которых среда однородна. В каждом параллелепипеде используются решения уравнений Максвелла в виде поперечных встречных волн, распространяющихся вдоль каждой из осей координат. С учетом поляризации всего в каждом параллелепипеде имеется 12 таких волн, неизвестные амплитуды

которых находятся решением общей системы уравнений, полученных из условий сшивки тангенциальных компонент полей на всех гранях упомянутых параллелепипедов, а также из граничных условий.

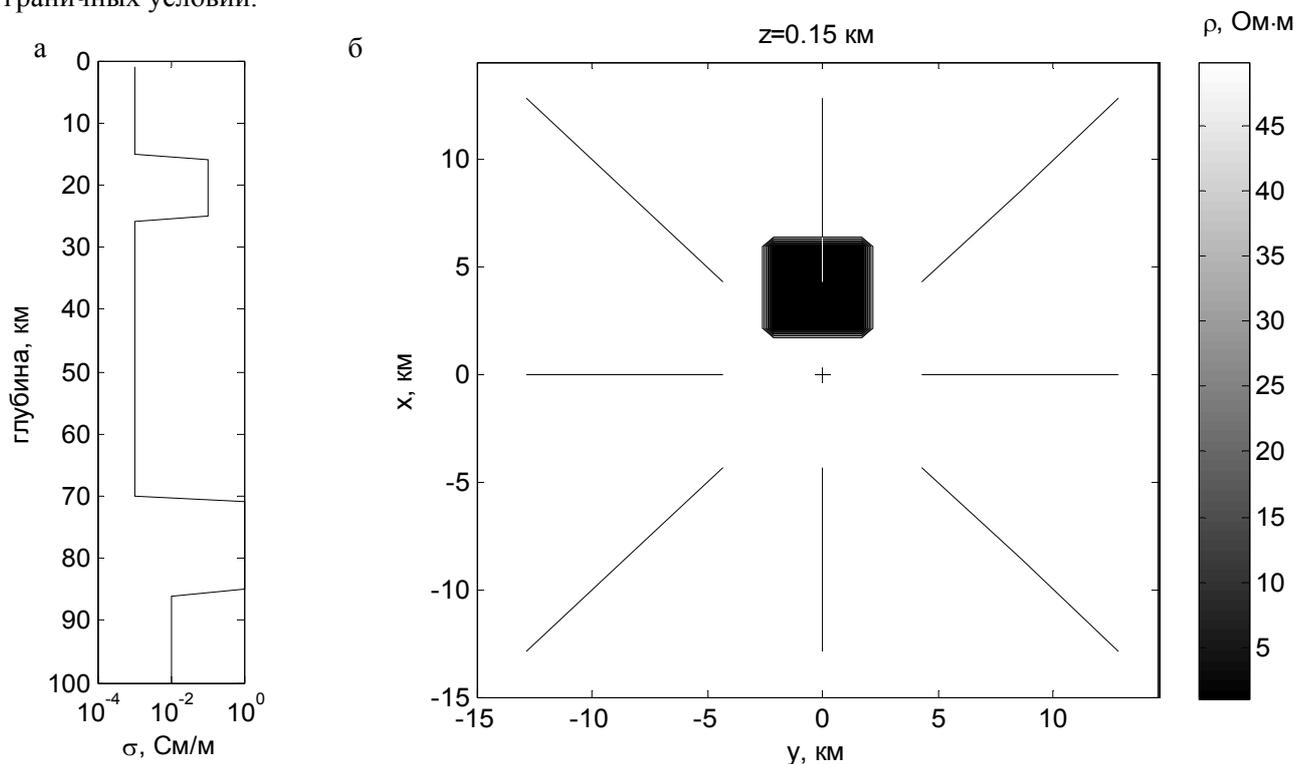


Рис. 2. - Трехмерная модель среды: а – нормальный глубинный разрез, б – горизонтальное сечение приповерхностного латерально неоднородного слоя. Показаны радиальные линии КЭД на поверхности, крестиком помечен его центр.

По найденным амплитудам волн рассчитываются все компоненты электромагнитного поля в центрах параллелепипедов и на земной поверхности. Разности потенциалов U_z и $U_{КЭД}$ определяются далее интегралами от продольных компонент электрического поля, соответственно, вдоль вертикальной и радиальных регистрирующих линий. Для вычисления компонент тензора импеданса расчеты повторяются для двух независимых поляризаций вертикально падающей на среду плоской волны. Разности потенциалов U_z и $U_{КЭД}$ также находятся для каждой из двух независимых поляризаций первичной волны. Для данной модели среды речь идет о разностях потенциалов, отличных от нуля при заданной конфигурации КЭД относительно неоднородности и соответствующих выбранной поляризации магнитного поля первичной волны вдоль оси OY с амплитудой 1 нТл.

На рис. 3 приведены кривые кажущихся сопротивлений, полученные для центра полигона при выбранной модели среды для двух разных значений УЭС в неоднородности. Как видно, в присутствии неоднородности во втором сверху слое (рис. 2б) возникают заметные гальванические искажения: на больших временных периодах кривые кажущихся сопротивлений ρ_{xy} и ρ_{yx} сдвинуты по оси ординат относительно нормальной кривой ρ_l . Чем более проводящей является неоднородность и меньше УЭС в ней, тем больше становится этот сдвиг.

На рис. 4 приведены рассчитанные зависимости разностей потенциалов U_z и $U_{кэд}$ в центре полигона от периода (крестик на рис. 2б). Расчеты выполнены для разных наборов значений параметров латеральной неоднородности: УЭС в ней - ρ_n , объемной проводимости - $r_0^2 \Sigma_0$ и удаления центра неоднородности от центра КЭД - r_n .

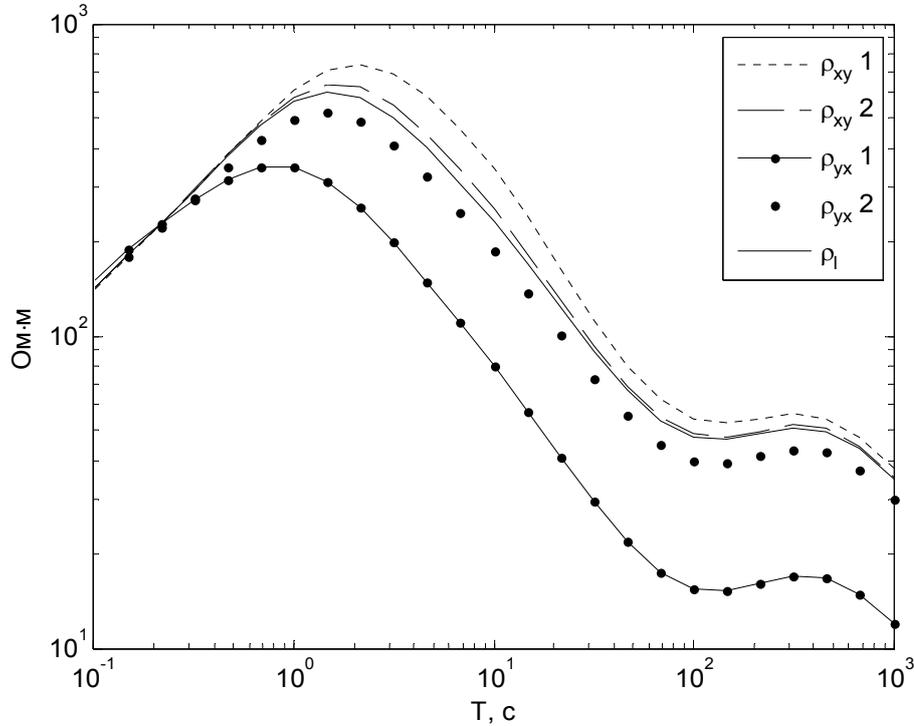


Рис. 3. - Кривые кажущегося сопротивления ρ_{xy} и ρ_{yx} в центре для двух значений УЭС ρ_n в неоднородности (1 - $\rho_n=1$ Ом·м, 2 - $\rho_n=10$ Ом·м, ρ_l - нормальная кривая для фоновой среды).

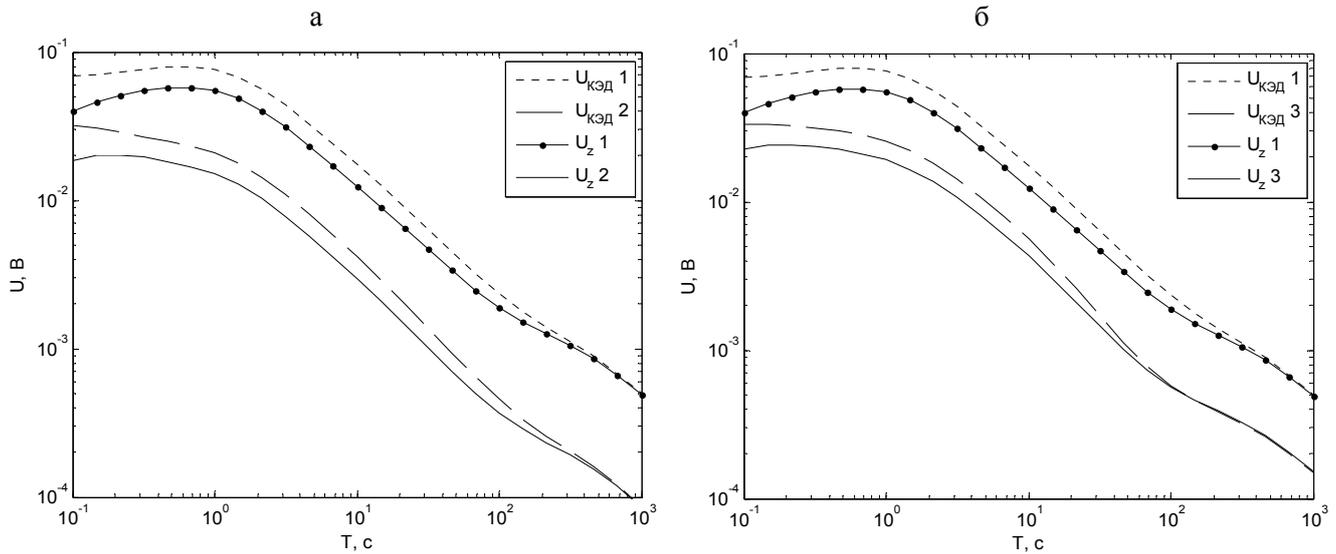


Рис. 4. - Кривые разностей потенциалов, возникающих на вертикальной линии в центре - U_z и суммарно на всех радиальных линиях КЭД - $U_{кэд}$ для разных параметров латеральной неоднородности: объемной проводимости $r_0^2 \Sigma_0$ и удаления r_n центра неоднородности от центра КЭД. а 1 - $\rho_n=1$ Ом·м, $r_n=4.29$ км, $r_0^2 \Sigma_0=1.84 \cdot 10^9$ См·м², 2 - $\rho_n=10$ Ом·м, $r_n=4.29$ км, $r_0^2 \Sigma_0=1.84 \cdot 10^8$ См·м², б 1 - $\rho_n=1$ Ом·м, $r_n=4.29$ км, $r_0^2 \Sigma_0=1.84 \cdot 10^9$ См·м², 3 - $\rho_n=1.1$ Ом·м, $r_n=1.43$ км, $r_0^2 \Sigma_0=1.84 \cdot 10^9$ См·м².

Рис. 4а отображает изменения кривых в зависимости от УЭС неоднородности при одинаковых остальных параметрах. Чем больше эти отклонения УЭС от фона, тем большими становятся величины потенциалов U_z и $U_{КЭД}$. Вследствие контролируемых отличий реального КЭД от идеального (по количеству и длинам радиальных линий) появляется смещение между кривыми U_z и $U_{КЭД}$ по оси ординат. На рис. 4а отображены кривые после снятия такого смещения на больших временных периодах. С этой целью все значения кривых $U_{КЭД}$ увеличены в 3.5 раз. Отметим, что этот коэффициент один и тот же для разных значений УЭС в неоднородности и при одинаковых остальных условиях. Как видно, небольшие различия между кривыми U_z и $U_{КЭД}$ остаются на коротких временных периодах. Это подтверждается при анализе данных идеального КЭД.

С приближением центра неоднородности при сохранении величины ее объемной проводимости $r_0^2 \Sigma_0$ совпадение кривых U_z и $U_{КЭД}$ наблюдается на увеличенном диапазоне больших периодов (рис. 4б). Кривые для случая 3 получены в расчетах с изменениями параметров - для полигона 10x10 км, величины УЭС в неоднородности $\rho_n=1.1$ Ом·м и прочих равных условиях. Коэффициент нормировки кривых $U_{КЭД}$ для случая 3 оказался равным 1.12.

Выводы

- 1) Для повышения достоверности получаемых результатов и в целях большей информативности МТЗ предлагается дополнить регистрацию вариаций поля данными по компоненте E_z , применяя с этой целью круговой электрический диполь (КЭД).
- 2) В случае идеального КЭД регистрируемая им разность потенциалов $U_{КЭД}$ полностью совпадает с разностью потенциалов U_z , регистрируемой вертикальной линией в среде, если толщина скин-слоя много больше характерного размера латеральных неоднородностей (на низких частотах или больших временных периодах).
- 3) Проведено численное моделирование применения КЭД для горизонтально-слоистой среды. Вследствие контролируемых отличий реального КЭД от идеального по количеству и длинам радиальных линий наблюдается смещение между кривыми U_z и $U_{КЭД}$ по оси ординат. Коэффициент смещения не зависит от значений УЭС в неоднородности при одинаковых остальных условиях.
- 4) Измеряемая с помощью КЭД разность потенциалов эквивалентна разности потенциалов, возникающей на длинной вертикальной линии в центре КЭД. На практике это означает возможность регистрировать разность потенциалов вдоль вертикальной линии без бурения необходимой для нее скважины.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00095).

Список литературы

1. Torres-Verdin C., Bostick F.Jr. Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics: electromagnetic array profiling (EMAP) // *Geophysics*, 1992, v. 57, № 4, p. 603—622.

2. Могилатов В.С. Патент РФ N 1062631. Способ геоэлектроразведки. 1982. Опубликовано 23.12.83. Бюл. N 47.
3. Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика. Новосибирск, НГУ, 2014, 180 с.
4. Мороз Ю. Ф., Мороз Т. А., Буглова С. Г. Вертикальная и горизонтальные составляющие электротеллурического поля на озере Байкал и их связь с электропроводностью среды // Физика Земли, 2008, № 3, с. 73-83.
5. Шнеер В. С., Гайдаш С. П., Трофимов И. Л., Коротаев С. М., Кузнецова Т. В., Цирульник Л. Б., Панфилов А. И., Буднев Н. М., Миргазов Р. Р. Долговременные наблюдения вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал (первые результаты) // Физика Земли, 2007, № 4, с. 71-75.
6. Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика, 2015, т. 56(7), с. 1381-1390.