

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ
И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Т. 4

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
А. Э. Конторович

Доктор технических наук, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
М. И. Энов

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии
и геофизики СО РАН, Новосибирск
И. Н. Ельцов

Кандидат технических наук, директор Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
А. С. Кондратенко

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор
Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики
и минерального сырья, г. Новосибирск
М. Ю. Смирнов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск
А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля
2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторож-
дений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов
в 6 т. Т. 4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 335 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» (секция «Гео-
логическое, геофизическое и геохимическое обеспечение поиска и разведки полезных
ископаемых. Геотехнологии. Геоэкология»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

ПСЕВДОВОЛНОВЫЕ ТРАНСФОРМАНТЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СРЕДАХ С НАКЛОННЫМИ ГРАНИЦАМИ

Михаил Иванович Эпов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, тел. (383)330-13-81, e-mail: EpovMI@ipgg.sbras.ru

Александр Николаевич Шеин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)330-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Глеб Андреевич Грецов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант, инженер, e-mail: Greckov.Gleb@gmail.com

В работе приведены результаты волновой трансформации данных нестационарных электромагнитных зондирований в проводящих средах с наклонными границами. Исходные сигналы для отладки процедур трансформации были смоделированы с использованием программного комплекса MODEM3D. Построены годографы псевдодолновых трансформант. Рассмотрено поведение тороидальных вихревых токов в геоэлектрической модели с наклонной границей.

Ключевые слова: нестационарные электромагнитные зондирования, псевдодолновые трансформанты, Q -преобразование, трехмерная прямая задача, годограф.

PSEUDOWAVE TRANSFORMATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC FIELD IN MEDIUMS WITH INCLINED BOUNDARIES

Mikhail I. Epov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Academician SB RAS, Senior Researcher, phone: (383)330-13-81, e-mail: EpovMI@ipgg.sbras.ru

Alexandr N. Shein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Laboratory for Geoelectrics, phone: (383)333-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Gleb A. Gretskov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, Engineer, e-mail: Greckov.Gleb@gmail.com

The paper presents the results of wave transformation of the transient electromagnetic soundings in mediums with inclined boundaries. Input responses for the checkout of transformation procedure was modelled using MODEM3D software package. Hodographs of pseudowave

transformants are constructed. The behavior of toroidal vertical currents in the geoelectrical model with inclined boundary was considered.

Key words: transient electromagnetic soundings, pseudowave transform, Q -transform, three-dimensional direct problem, hodograph.

В разведочной геофизике широко применяется метод нестационарных электромагнитных зондирований (ЗС), основанный на изучении временных разверток откликов от импульсного токового возбуждения проводящих геологических сред. При этом для восстановления структуры среды применяется широкий спектр процедур инверсии компонент магнитной индукции, измеренных на дневной поверхности. В этой связи оказываются чрезвычайно полезными различные трансформации измеренных сигналов в кажущиеся удельные электрические сопротивления (УЭС) ρ_{τ} или зависимости кажущейся продольной проводимости S_{τ} от кажущейся глубины H_{τ} . Поскольку за последнее десятилетие многократно возросла производительность вычислительных машин, стало возможным создание процедур преобразования сигнала, описывающегося уравнением диффузии, в трансформанты, удовлетворяющие волновому уравнению (псевдоволновые трансформанты). Применение этого преобразования позволяет не только составить достоверное представление о строении исследуемого геологической среды, но и дополнять традиционные методы интерпретации.

Для прямого моделирования переходных процессов диффузии электромагнитных полей от замкнутых токовых контуров в проводящих средах использовалась программа MODEM3D [1]. Соответствующая прямая задача в квазистационарном приближении решается векторным методом конечных элементов на неструктурированной трехмерной тетраэдральной сетке. Интегрирование по времени выполняется с применением неявной схемы Кранка – Николсона второго порядка точности.

Для преобразования данных ЗС в волновую область воспользуемся отображением пространства решений уравнения диффузии V в пространство решений волнового уравнения U . Это можно выполнить, используя преобразование Лапласа [2, 3]:

$$B(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \int_0^{\infty} q e^{\frac{-q^2}{4t}} U(q) dq. \quad (1)$$

В этом интегральном уравнении B – составляющая магнитной индукции переходного процесса, $U(q)$ – ее псевдоволновая трансформанта, q^2 – аналог времени (приведенное время) в пространстве U . При преобразовании (1) остается неопределенность в выборе постоянной масштабирования приведенного времени. Ее доопределение может быть выполнено исходя из физических или каких-либо иных соображений. Для нахождения псевдоволновой трансформанты необходимо решить обратную задачу с интегральным оператором. Известно,

что ее решение с экспоненциально затухающим при возрастании аргумента q ядром является неустойчивым и необходимо использовать различные методы регуляризации.

Проблемы регуляризации решения интегрального уравнения (1) описаны во многих работах [4–6]. Для более точного вычисления псевдодолновых трансформант в работе [7] описан алгоритм субрегуляризации. Был рассмотрен альтернативный подход, основанный на так называемом обратном Q -преобразовании. В результате получаются трансформанты, удовлетворяющие стандартной системе волновых уравнений.

В статьях [8, 9] рассмотрены примеры псевдодолновых трансформант нестационарной ЭДС в типичных горизонтально-слоистых моделях. Однако такой модельной базы недостаточно при изучении пространственно (латерально) неоднородных геологических сред. Особенно это относится к средам с наклонными границами. В этом случае распределение и временная эволюция вихревых токов осложняются появлением поверхностных зарядов на этих границах и изменением степени затухания вторичных электромагнитных откликов во времени и пространстве. В результате инверсии таких данных в результирующей среде могут появляться ложные объекты или ее восстановленная структура будет далека от истинной [10].

Были рассмотрены контрастные геоэлектрические модели с наклонной плоской границей, выходящей на плоскую дневную поверхность и разделяющей два проводящих немагнитных полубесконечных сектора с УЭС 5 и 100 Ом·м соответственно. Углы наклона границы составляют 30° , 45° и 60° .

Введем декартову систему координат с началом в точке пересечения дневной поверхности, наклонного контакта и линейного профиля. Ось X совпадает с линейным профилем, а ось Z направлена вертикально вниз. На рис. 1, 2 показаны в вертикальном сечении (XOZ) распределения 10 %-ной окрестности максимальной амплитуды электрического поля в различные моменты времени после выключения тока в источнике, вычисленные в программе MODEM3D. Источник показан оранжевым прямоугольником.

Как известно, после мгновенного выключения постоянного тока силой 1 А, текущего в генераторной петле, под дневной поверхностью возникает аналогичный по форме тороидальный токовый вихрь. С течением времени он распространяется вглубь и вширь проводящего полупространства, изменяя свою конфигурацию и амплитуду в зависимости от пространственного распределения УЭС в среде. При этом интенсивность наведенных вихревых токов снижается за счет перехода части электромагнитной энергии в джоулево тепло. Рассмотрим поведение этих токов в среде с наклонной границей 45° .

На рис. 1 видно, что до момента времени $t = 4,5$ мс электрический вихрь в виде тороида с квазикруговым сечением распространяется так же, как в однородном полупространстве с УЭС 100 Ом·м (первая фаза распространения). Как неоднократно указывалось в литературе, линии перемещения центров электрического вихря наклонены под углом примерно $\pm 26^\circ$ к дневной поверхности. После вышеуказанного момента времени проявляется влияние наклонной гра-

ницы (вторая фаза распространения). Оно выражается в существенном уменьшении глубины левого центра электрического вихря и его дальнейшем распространении так же, как в полупространстве с УЭС 5 Ом·м. Отметим при этом, что скорости погружения центров электрических вихрей уменьшаются: для левого центра – с $4 \cdot 10^5$ м/с до 10^5 м/с (100 Ом·м) и с $5,2 \cdot 10^4$ м/с до $0,35 \cdot 10^4$ м/с (5 Ом·м); для правого центра – с $4 \cdot 10^5$ м/с до $0,53 \cdot 10^5$ м/с. Таким образом, если в первой фазе распространения центры электрических вихрей лежат в горизонтальной плоскости, то во второй фазе они лежат в плоскости, наклоненной в сторону менее проводящей среды.

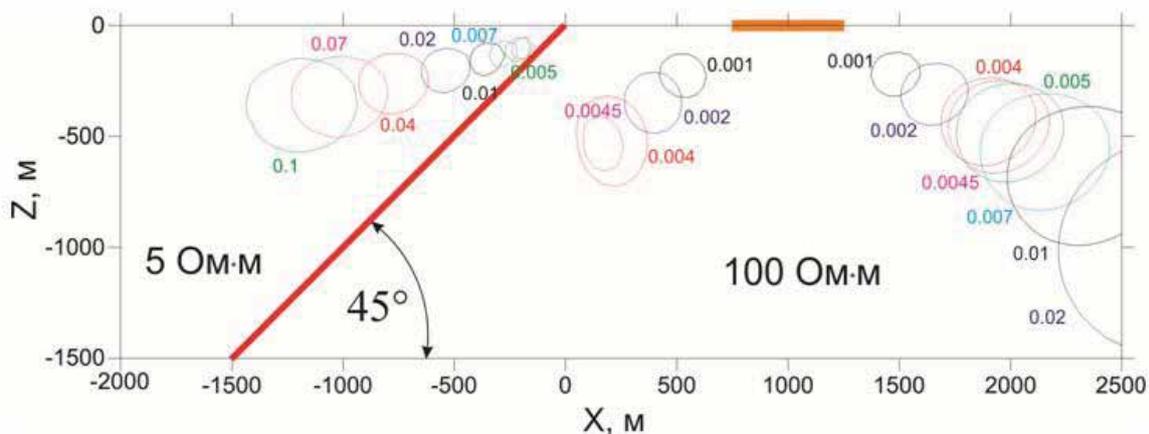


Рис. 1. Изолинии 10 %-ной окрестности максимальной амплитуды электрического поля. Источник над средой с УЭС 100 Ом·м

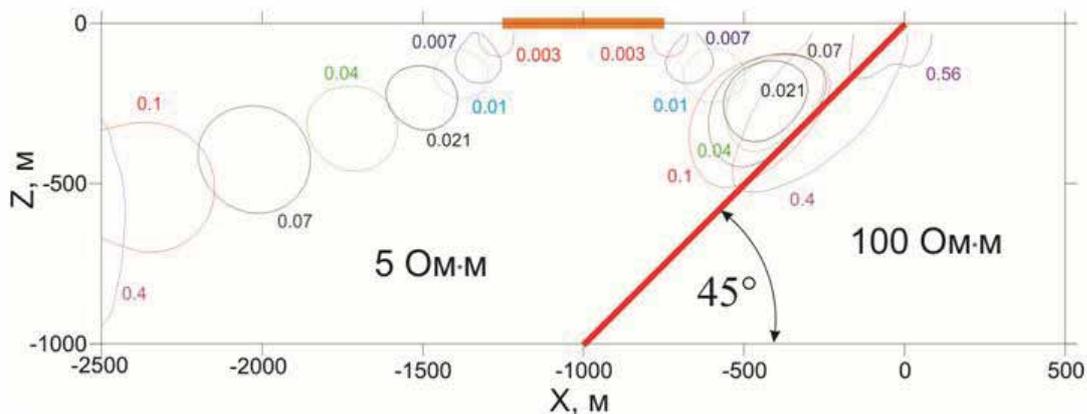


Рис. 2. Изолинии 10 %-ной окрестности максимальной амплитуды электрического поля. Источник над средой с УЭС 5 Ом·м

На рис. 2, где источник располагается над сектором модели с УЭС 5 Ом·м, наблюдается существенно отличная картина. Видно, что до момента времени $t = 4,5$ мс левая часть электрического вихря распространяется так же, как в од-

нородном полупространстве с УЭС 5 Ом·м (первая фаза распространения). Отметим при этом, что скорость погружения левого центра уменьшается с $5,2 \cdot 10^4$ м/с до $0,35 \cdot 10^4$ м/с, тогда как на траекторию движения правого центра уже с ранних времен ($t = 7$ мс) начинают влиять поверхностные заряды, индуцированные на наклонной границе. Во второй фазе распространения правый центр электрического вихря движется вдоль наклонного контакта, медленно диффундируя в слабопроводящий сектор.

Таким образом, использование для решения задач инверсии таких кинематических характеристик, как скорости распространения электрических вихрей, не представляется возможным из-за их сильной изменчивости от времени.

Для моделирования нестационарного электромагнитного поля в программе MODEM3D была выбрана поверхностная установка, содержащая один источник 500×500 м и набор приемников, квадратных контуров размером 100×100 м, расположенных на линейном профиле с шагом 50 м, перпендикулярном наклонной границе. Источник представляет собой квадратный токовый контур со стороной 500 м и расположен на поверхности среды с высоким УЭС (100 Ом·м). Центр наиболее удаленного приемника находится на расстоянии 6 000 м от источника.

После расчета ЭДС (электродвижущей силы) в описанной выше системе измерения в соответствии с (1) для установки с фиксированным разносом были вычислены псевдодолновые трансформанты в зависимости от приведенного времени. Алгоритм расчетов описан в работах [8, 9]. На рис. 3 слева показан их сводный набор для многоразносной установки.

Похожая картина наблюдается для границы с наклоном 45° (рис. 3, справа). При этом экстремумы псевдодолновых трансформант изменяют свое положение при переходе приемников через наклонную границу (разнос 3 000 м).

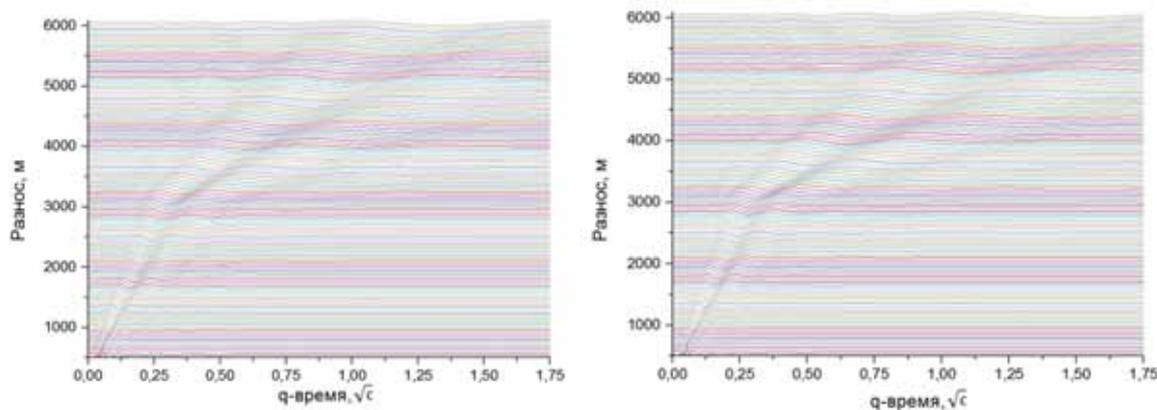


Рис. 3. Рассчитанные псевдодолновые трансформанты (слева угол границы 30° , справа – 45°)

Построим годографы псевдодолновых трансформаций (рис. 4), связав q -время его экстремума (ось ординат) и расстояние между источником с каж-

дым приемником (ось абсцисс). На годографах отчетливо выделяется координата выхода контакта на поверхность – 3000 м. Левые части годографов (от 500 до 3000 м) для сред с различным углом наклона границы одинаковы и совпадают с годографом на поверхности проводящего полупространства с УЭС 100 Ом·м. После перехода приемников через границу годографы для различных углов расходятся между собой, при этом угол его наклона возрастает с увеличением наклона границы.

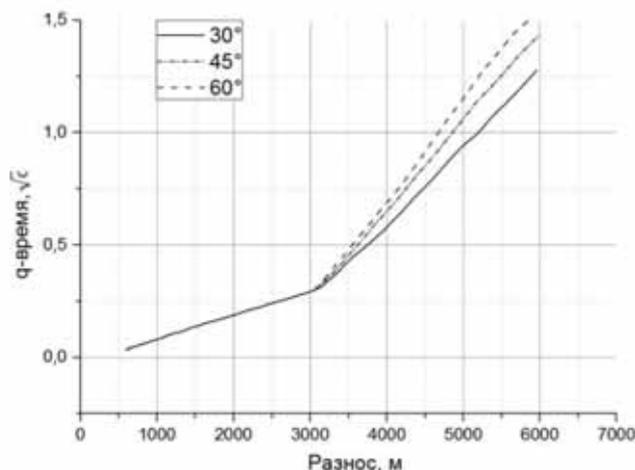


Рис. 4. Годографы в среде с наклонной границей (шифр кривых – угол наклона)

На рис. 5 показаны две зеркальные расстановки источника и приемников относительно линии выхода контакта на поверхность, а также соответствующие псевдодолновые трансформанты. Красными линиями выделено место выхода наклонного контакта на дневную поверхность.

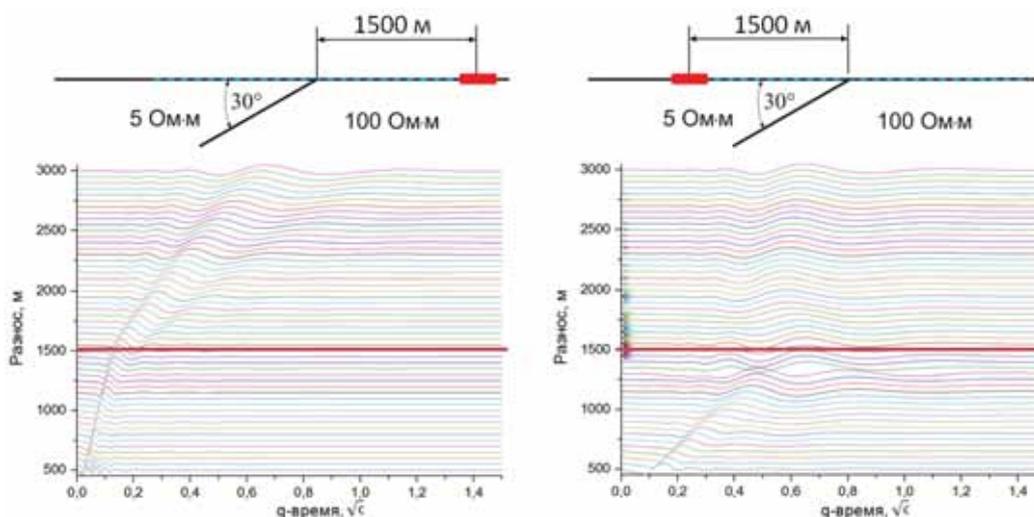


Рис. 5. Рассчитанные псевдодолновые трансформанты (источник располагается в 1 500 м (слева или справа) от места выхода наклонного контакта на поверхность)

Рассмотрим ту же самую модель с добавлением относительно маломощных (100 м) наносов с УЭС 50 Ом·м. На рис. 6 показаны псевдоволновые трансформанты.

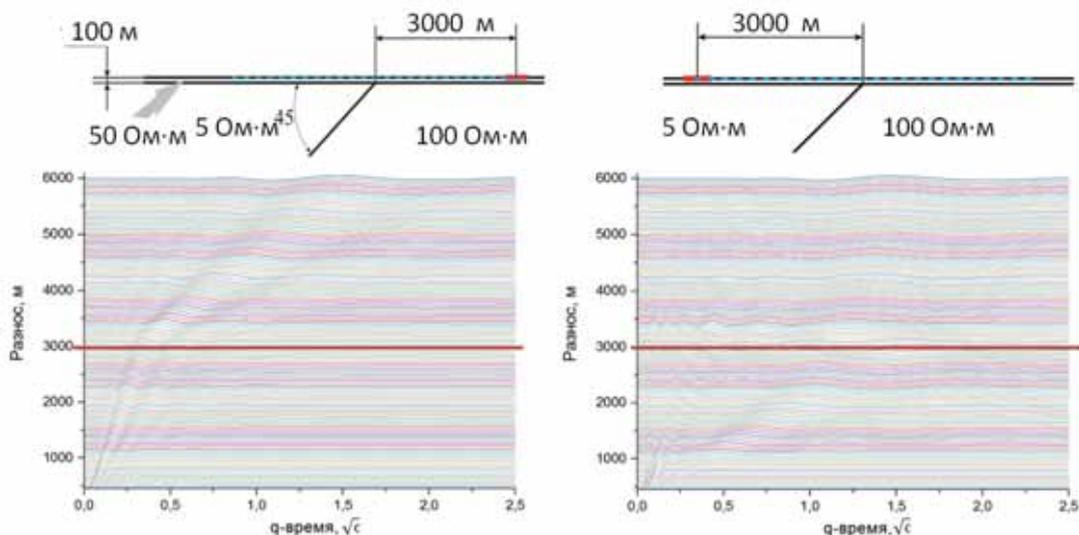


Рис. 6. Рассчитанные псевдоволновые трансформанты (источник располагается в 3 000 м слева или справа от места выхода наклонного контакта на поверхность)

Наносы практически не влияют на определение места выхода наклонного контакта, если источник расположен над высокоомным сектором среды. Если же источник находится на поверхности более проводящего сектора, то выход контакта под наносы становится практически незаметным.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Вторичные вихревые токи, индуцированные в проводящей среде после отключения источника, представляют собой замкнутые тороидальные структуры. Центры их сечений движутся в среде со скоростью, зависящей от времени, что не позволяет их использовать при инверсии в качестве кинематических характеристик.

Введение псевдоволновых трансформаций позволяет получать годографы из данных метода ЗС, зарегистрированных на линейных профилях. Наборы псевдоволновых трансформаций, построенные в координатах «разнос-приведенное время», позволяют даже на качественном уровне выделить линию выхода наклонного контакта на дневную поверхность. Перекрывающие наносы ослабляют максимумы псевдоволновых трансформаций и снижают возможность точной локализации линии выхода наклонной границы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программное обеспечение Модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации / М. И. Иванов, В. А. Катешов, И. А. Кремер, М. И. Эпов // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 242–245.

2. Lee S., Memechan G. A. Phase-field imaging: the electromagnetic equivalent of seismic migration // *Geophysics*. – 1987. – № 52(5). – P. 678–693.
3. Lee K. H. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive medium // *Geophysics*. – 1989. – N 54(9). – P. 1180–1192.
4. Lee K. H., Xie G. A new approach to imaging with low-frequency electromagnetic fields // *Geophysics*. – 1993. – N 58. – P. 780–796.
5. Gershenson M. Simple interpretation of time-domain electromagnetic sounding using similarities between wave and diffusion propagation // *Geophysics*. – 1997. – N 62(3). – P. 763–774.
6. Li X., Xue G., Yin C. Migration imaging of the transient electromagnetic method. – Beijing: Science Press, 2016. – 139 p.
7. Xue G. Q., Bai C. Y., Li X. Extracting virtual reflection wave from TEM data based on regularizing method // *Pure appl. Geophys.* – 2012. – N 69(7). – P. 1269–1282.
8. Грецов Г. А., Эпов М. И., Антонов Е. Ю. Алгоритмы и программы для преобразования данных зондирования становлением поля в пространство решений волнового уравнения // *Вопросы естествознания*. – 2016. – № 1 (9). – С. 115–119.
9. Грецов Г. А., Эпов М. И., Антонов Е. Ю. Волновые трансформанты нестационарного электромагнитного поля в проводящих средах // *Геология и геофизика*. – 2017. – Т. 58, № 6. – С. 924–934.
10. Аппроксимация субвертикальной границы в задачах импульсных электромагнитных зондирований / Н. В. Штабель, М. И. Эпов, Е. Ю. Антонов, М. А. Корсаков // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55, № 1. – С. 108–118.

REFERENCES

1. Programnoe obespechenie Modem 3D dlja interpretacii dannyh nestacionarnyh zondirovanij s uchjotom jeffektov vyzvannoj poljarizacii / M. I. Ivanov, V. A. Kateshov, I. A. Kremer, M. I. Jepov // *Zapiski Gornogo instituta*. – 2009. – Т. 183. – S. 242–245.
2. Lee S., Memechan G. A. Phase-field imaging: the electromagnetic equivalent of seismic migration // *Geophysics*. – 1987. – № 52 (5). – P. 678–693.
3. Lee K. H. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive medium // *Geophysics*. – 1989. – № 54 (9). – P. 1180–1192.
4. Lee K. H., Xie G. A new approach to imaging with low-frequency electromagnetic fields // *Geophysics*. – 1993. – N 58. – P. 780–796.
5. Gershenson M. Simple interpretation of time-domain electromagnetic sounding using similarities between wave and diffusion propagation // *Geophysics*. – 1997. – N 62(3). – P. 763–774.
6. Li X., Xue G., Yin C. Migration imaging of the transient electromagnetic method. – Beijing: Science Press, 2016. – 139 p.
7. Xue G. Q., Bai C. Y., Li X. Extracting virtual reflection wave from TEM data based on regularizing method // *Pure appl. Geophys.* – 2012. – N 69 (7). – P. 1269–1282.
8. Greckov G. A., Jepov M. I., Antonov E. Ju. Algoritmy i programmy dlja preobrazovanija dannyh zondirovanija stanovleniem polja v prostranstvo reshenij volnovogo uravnenija // *Voprosy estestvoznaniya*. – 2016. – № 1 (9). – S. 115–119.
9. Greckov G. A., Jepov M. I., Antonov E. Ju. Volnovye transformanty nestacionarnogo jelektromagnitnogo polja v provodjashhих sredah // *Geologija i geofizika*. – 2017. – Т. 58, № 6. – S. 924–934.
10. Аппроксимация субвертикальной границы в задачах импульсных электромагнитных зондирований / Н. В. Штабель, М. И. Эпов, Е. Ю. Антонов, М. А. Корсаков // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55, № 1. – S. 108–118.

© М. И. Эпов, А. Н. Шеин, Г. А. Грецов, 2018