

ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

МАРЧУКОВСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ – 2018

Труды

Международной конференции

"Вычислительная математика и математическая геофизика"

посвященной 90-летию со дня рождения

академика А. С. Алексева

8-12 октября 2018 г.

Академгородок, Новосибирск, Россия

УДК 519.6

ББК 22.19

Труды Международной конференции "Вычислительная математика и математическая геофизика", посвященной 90-летию со дня рождения академика А. С. Алексеева. Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск. 8–12 октября 2018 г. 446 стр.

Целью Международной конференции "Вычислительная математика и математическая геофизика", посвященной 90-летию со дня рождения академика А. С. Алексеева, является привлечение специалистов по численному анализу, прикладной математике и вычислительным технологиям к обсуждению актуальных вопросов математики и математического моделирования, а также вопросов практического применения современных численных методов. Основные темы конференции: методы решения дифференциальных уравнений, задач вычислительной алгебры и аппроксимации; методы Монте-Карло и численное статистическое моделирование; математическое моделирование задач физики атмосферы и океана и задач охраны окружающей среды; вычислительные задачи геофизики; моделирование систем информатики и параллельные супервычисления; активная сейсмология, геоинформатика и дистанционное зондирование; обратные задачи в геофизике; высокопроизводительные вычисления в науках о Земле.

Конференция проводится при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-01-20086 Г)
и Новосибирского государственного университета

При поддержке

Новосибирского государственного университета
Регионального математического центра НГУ
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирского отделения Российской академии наук
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
Правительства Новосибирской области
Мэрии города Новосибирска
Института вычислительной математики РАН
Института вычислительного моделирования СО РАН
Института вычислительных технологий СО РАН
Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН
Института систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН

Информационная поддержка

Пресс-служба СО РАН

Сайт конференции: <http://conf.nsc.ru/msr18>

ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МНОГОРАЗНОСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ Q-TRANS

М. А. Корсаков¹, М. И. Эпов^{1,2}, А. Н. Шеин¹, Е. Ю. Антонов¹

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск*

УДК 550.837

Решение обратных задач наземной электроразведки в рамках горизонтально-слоистой модели среды зачастую становится ресурсоёмким процессом и напрямую зависит от количества интерпретируемых кривых. В то же время, достоверность восстановления геоэлектрического разреза повышается, при использовании большего количества данных. В статье рассматриваются результаты обработки данных импульсных электромагнитных зондирований с системой наблюдений, аналогичной используемой в сейсморазведке. Установка, состоит из множества приёмных датчиков, расположенных на одной линии слева и справа относительно генераторной петли (источника), и, образующих таким образом, две приёмные косы. Анализ данных, полученных такой установкой, осуществлялся на основе трансформации нестационарных электромагнитных зондирований в волновую область [1, 2]. В программе Q-Trans используется алгоритм (на основе SVD разложения), для решения интегрального уравнения, правой частью которого являются данные индукционных импульсных зондирований, а искомая подынтегральная функция удовлетворяет волновому уравнению.

Ключевые слова: нестационарное электромагнитное зондирование, наземная электроразведка, волновая трансформанта.

Введение

Методом исследования геологической среды, который рассматривается в данной работе, является нестационарное электромагнитное зондирование. В качестве источника используется незаземлённая квадратная петля, по которой течёт постоянный ток. В некоторый момент времени ток в петле полностью выключается. В соответствии с законом индукции в нижнем проводящем немагнитном полупространстве возникают вторичные вихревые токи. С течением времени они распространяются вниз и захватывают все большую часть проводящей среды. При этом их плотность уменьшается вследствие постепенного перехода электромагнитной энергии в тепловую. Вихревые токи порождают вторичное переменное магнитное поле. На дневной поверхности расположены приёмные квадратные рамки. Переменный во времени магнитный поток наводит регистрируемую в рамках электродвижущую силу (ЭДС). Её временная развёртка называется кривой зондирования. Она является исходной для последующей инверсии и определения пространственного распределения удельного электрического сопротивления ($\mathcal{U}\mathcal{E}\mathcal{C}$) в изучаемой среде.

Традиционно цель зондирования заключается в определении вертикальной неоднородности $\mathcal{U}\mathcal{E}\mathcal{C}$ исследуемой среды. Поэтому горизонтально-слоистая модель является базовой для инверсии. Для зондирований наиболее часто используется установка, включающая генераторную токовую петлю и приёмные рамки (либо соосные, либо вынесенные за генераторный контур). Зависимости ЭДС от времени трансформируются в кажущиеся сопротивления (по модели однородного полупространства). Иногда используются зависимости кажущейся проводимости от кажущейся глубины (по модели однородной тонкой проводящей пластины). Такая методика эффективна, если среда слабо изменяется по горизонтальному простиранию (латерали).

Если изучаемая среда является латерально неоднородной, описанный выше подход становится неэффективным. Действительно, вихревое электрическое поле пересекает негоризонтальные границы, на которых появляются поверхностные электрические заряды. Сигналы, порождаемые поверхностными зарядами на

неподвижных границах, существенно отличаются от сигналов, обусловленных свободно распространяющимися вихревыми токами. В этом случае выгодно использовать установки, обеспечивающие синхронные измерения на профиле или площади. В статье исследованы возможности нестационарных зондирований при изучении латерально неоднородных сред. Предложено использовать трансформацию измеренных на профиле нестационарных сигналов, подчиняющихся уравнению диффузии, в решения волнового уравнения [3]. Такой подход позволяет учесть в одной величине синхронные сигналы, измеренные на профиле, и выявить информацию о латеральной неоднородности среды.

1 Трансформация диффузионных сигналов в волновую область

Для преобразования э.д.с. (производной по времени от потока магнитной индукции) воспользуемся отображением пространства решений уравнения диффузии V в пространство решений волнового уравнения U [1–6]. Выражения преобразований, связывающих «волновое» решение U и производную по времени магнитной индукции, которая соответствует ЭДС, измеряемой приёмными датчиками, имеет вид:

$$B(t) = \sqrt{\frac{\alpha}{4\pi t^3}} \int_0^{\infty} U(q) q e^{-\frac{aq^2}{4t}} dq \quad (1)$$

$$\frac{\partial B_z(t)}{\partial t} = \sqrt{\frac{\alpha}{16\pi t^5}} \int_0^{\infty} U(q) q \left[\frac{aq^2}{2t-3} \right] e^{-\frac{aq^2}{4t}} dq \quad (2)$$

Здесь $B_z(t)$ — вертикальная компонента магнитной индукции, $U(q)$ — её псевдволновая трансформанта, параметр — аналог времени в пространстве U . При преобразовании (1)–(2) остаётся неопределённость в выборе переменной приведённого времени. Её доопределение может быть выполнено исходя из физических или каких либо иных соображений. Для нахождения псевдволновой трансформанты необходимо решить обратную задачу с интегральным оператором. Известно, что её решение с экспоненциально затухающим (при возрастании аргумента q) ядром является неустойчивым и необходимо использовать различные методы регуляризации. Проблемы регуляризации решения интегрального уравнения (1) подробно описаны в диссертационной работе [7]. Он обосновал и применил для данных CSEM (Controlled Source ElectroMagnetic) SVD-регуляризацию и регуляризацию Тихонова с различными параметрами.

2 Численное моделирование и трансформация синтетических данных

Рассмотрим двухслойную вмещающую среду. Верхний слой, представляющий собой осадочных пород с удельным электрическим сопротивлением $\rho_1=100$ Ом·м и мощностью $h=200$ м. Подстилающее полупространство, представляющее собой консолидированный фундамент, имеет удельное электрическое сопротивление $\rho_1=2000$ Ом·м. В статье рассмотрена трёхмерная модель типа кимберлитовой трубки, расположенной во вмещающей среде. Кимберлитовая трубка расположена в нижнем полупространстве. Она представляет собой усечённый конус. Его верхняя кромка есть эллипс с полуосями 250 м и 500 м, приуроченный к кровле фундамента. Угол наклона боковой поверхности конуса к основанию равен 60° . Высота трубки составляет 200 м, её удельное электрическое сопротивление 100 Ом·м. Для данной геоэлектрической модели рассчитывались сигналы, измеряемые установкой, показанной на рис. 1. Установка состоит из квадратной генераторной петли и выносных приёмных рамок, расположенных по профилю, проходящему через центр генераторной петли. Расстояние между приёмными рамками равно 25 м. Точки измерения расположены симметрично относительно центра генераторной петли. Число точек измерения с каждой стороны равно 40 (всего 80). Измерительная система перемещалась по профилю, пересекающему центр неоднородности под углом 30° к меньшей полуоси эллипса с шагом 50 м. Протяжённость профиля составила 2600 м. Центр профиля совпал с центром неоднородности (кимберлитовой трубки).

Прямая задача электромагнитных зондирований решалась векторным методом конечных элементов на неструктурированной трёхмерной тетраэдральной сетке. Интегрирование по времени выполнялось с применением неявной схемы Кранка-Николсона второго порядка точности. Для моделирования индуцированного электромагнитного поля в квазистационарном приближении использовалась программа MODEM 3D [8].

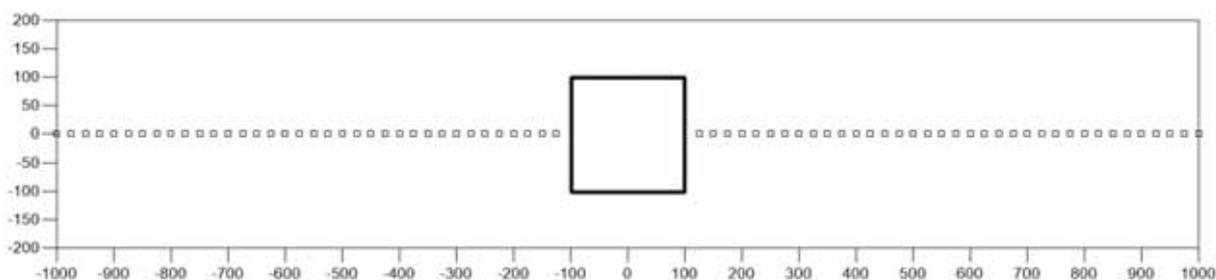


Рис. 1: Многоразносная система наблюдения

Тестирование на горизонтально–слоистых моделях с простыми по форме неоднородностями показало, что трёхмерные расчёты выполняются с необходимой для дальнейшей трансформаций точностью.

Трансформация ЭДС в волновую область осуществлялась с помощью программы Q-Trans, разработанной в ИНГГ СО РАН [9]. На рис. 2–6 представлены основные этапы преобразования данных ЗС программой Q-Trans. На рис. 2 показан набор графиков зондирования (зависимость э.д.с. от времени), зарегистрированных многоразносной установкой.

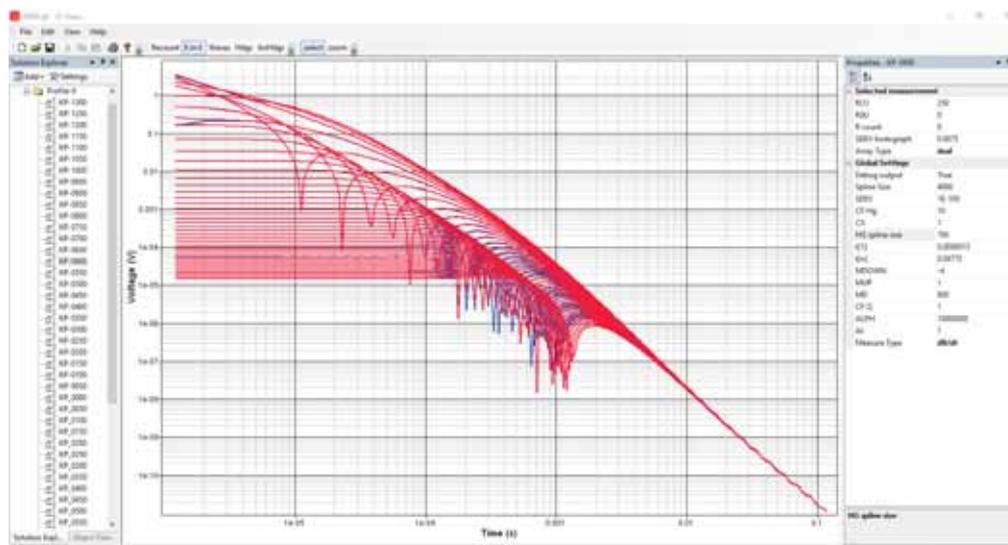


Рис. 2: Графики ЭДС многоразносных индукционных импульсных зондирований (синий цвет графика — левая коса приёмников, красный — правая)

На рис. 3 приведены результат трансформации кривых индукционных импульсных зондирований в волновую область. В результате пересчёта кривых импульсных электромагнитных зондирований в волновую область получается набор графиков трансформант в зависимости от приведённого времени. Они представляются в виде набора трасс, соответствующих разносам приёмных датчиков в измерительной установке. Определяя значение приведённого времени, при котором трансформанта достигает абсолютного максимума на каждой трассе (разнос), строятся левый и правый годографы (зависимость разноса от времени максимума). Они соответствуют приёмным косам, расположенным слева и справа от генераторной петли. На рис. 4 приведены левый и правый годографы.

На рис. 5 показан аномальный годограф. Он равен относительной разности графиков правого и левого годографов (в процентах). Как было сказано выше, выполнялось моделирование профильных измерений. Многоразносная измерительная система перемещалась по профилю, проходящему через центр целевого объекта, в нашем случае это кимберлитовая трубка. Крайнее правое и крайнее левое (на оси профиля) положение установки было -1300 и $+1300$ м относительно центра трубки. Шаг системы измерений по профилю составлял 50 м. Таким образом мы получаем 53 пикета на профиле, для которых есть возможность построить аномальный годограф.

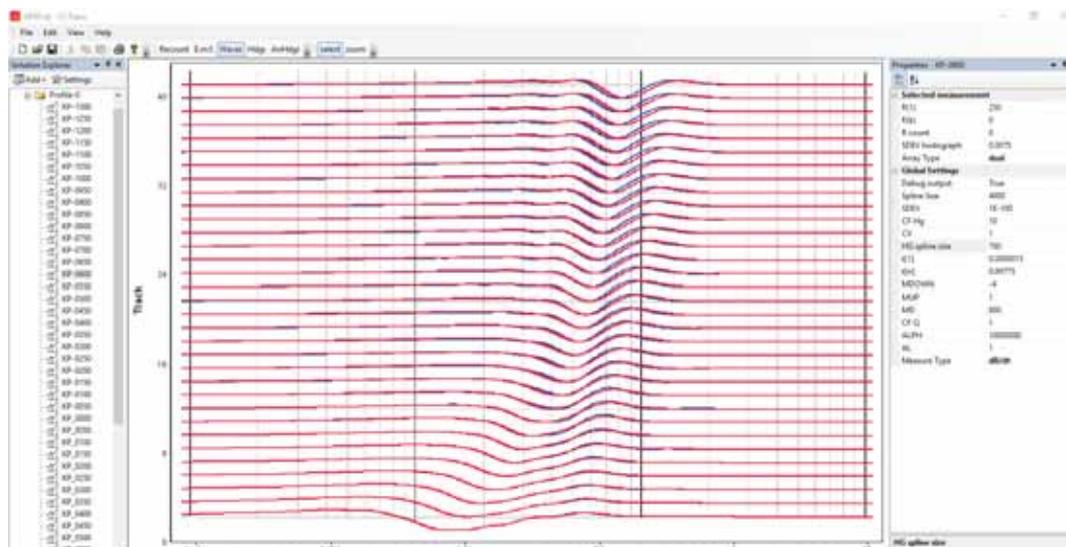


Рис. 3: Волновые трансформации данных индукционных импульсных зондирований

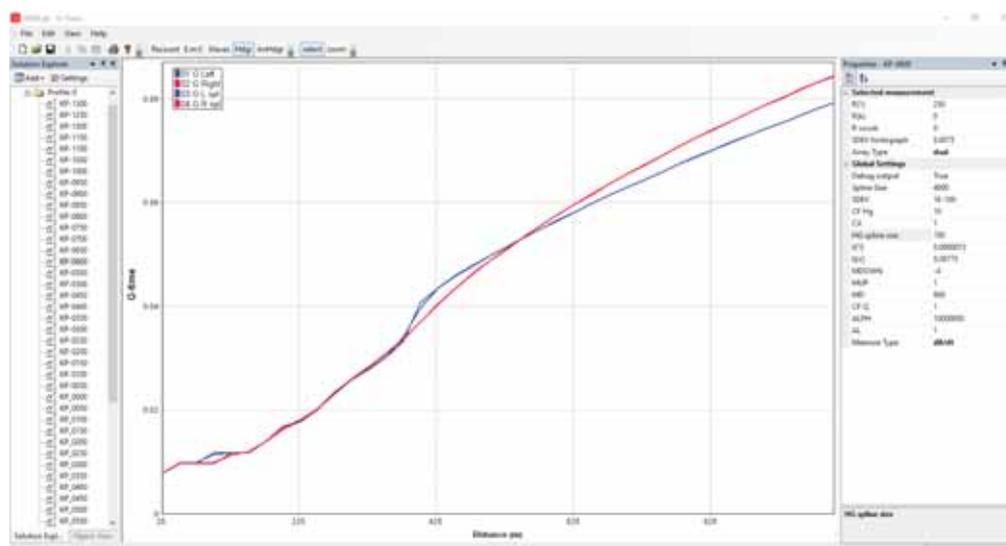


Рис. 4: Левый и правый годографы

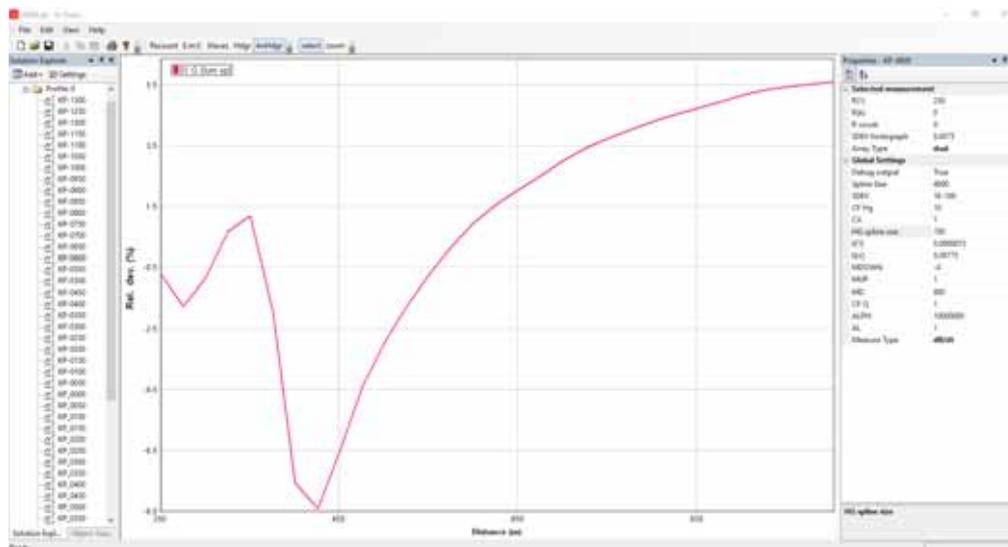


Рис. 5: График относительного отклонения левого и правого годографов в зависимости от разносов приёмных датчиков.

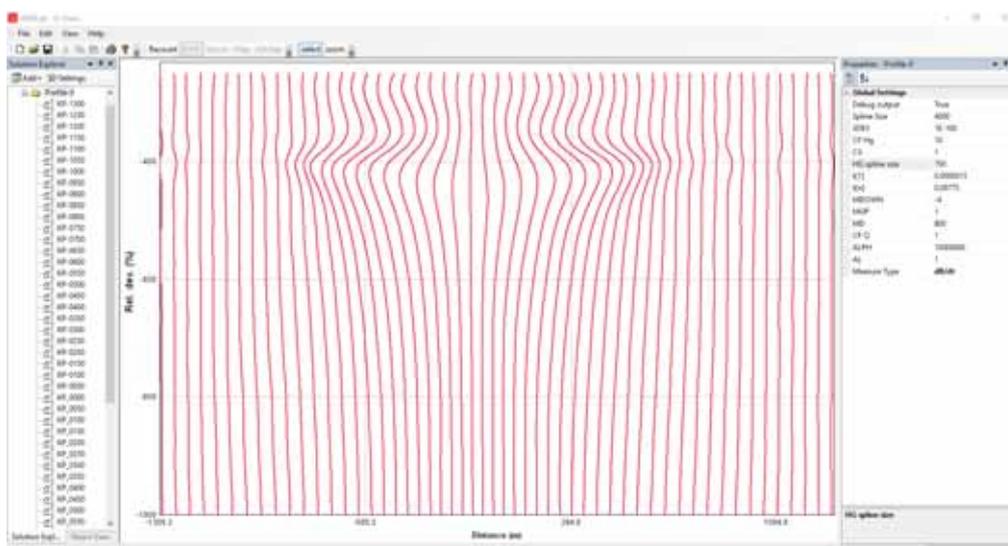


Рис. 6: Функция пространственного распределения аномальных годографов $g(x, r)$.

Откладывая по оси абсцисс координату источника на профиле, а по вертикальной оси разности приёмных датчиков, можно построить семейство аномальных годографов. Сведём их воедино и получим функцию g двух переменных x (координата центра петли) и r (расстояние от центра петли до текущей точки измерения), как показано на рис. 6. Как видно из рисунка, аномальные годографы, полученные для установки с правым и левым плечами приемных кос, имеют разную полярность аномалий относительно центра неоднородности. На рис. 7 представлен результат пространственного интегрирования данных с рис. 6 по оси абсцисс. Этот стандартный приём визуализации позволяет преобразовать разнополярные аномальные области в однополярную с максимумом, приуроченным к центру неоднородности.

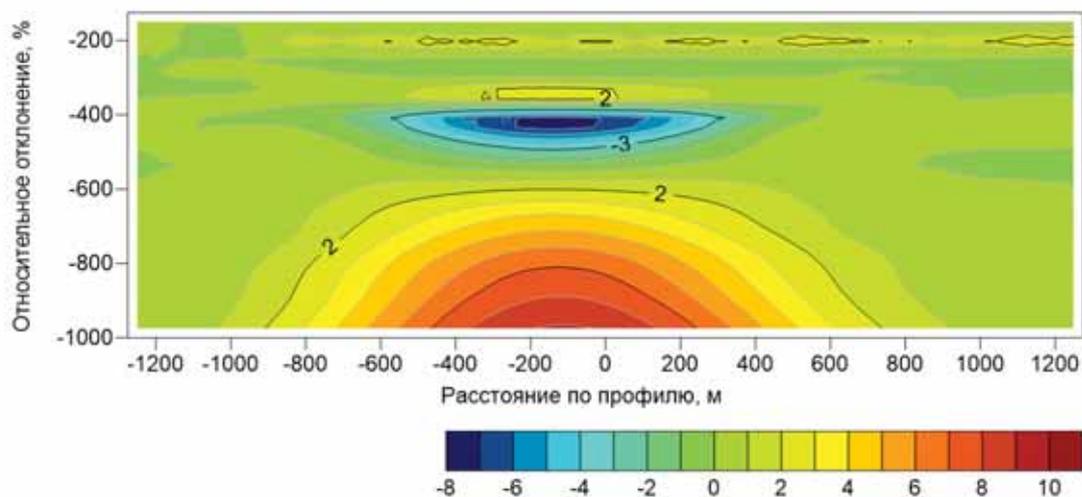


Рис. 7: Карта изолиний аномальных годографов, проинтегрированных по координатам источников

3 Результаты

Разработана программа Q-Trans для преобразования сигналов, измеряемых методом индукционных импульсных зондирований в волновую область.

Заключение

Рассмотрена модель геологической среды, содержащая локальное слабо проводящее тело, имитирующее кимберлитовую трубку и исследованы возможности ее картирования традиционными средствами интерпретации данных импульсных индукционных зондирований. Установлено, что для эффективного выделения местоположения объекта необходима плотная профильная (или площадная) системы наблюдения. Показана возможность эффективного картирования целевого объекта с помощью псевдо-сейсмической трансформанты электромагнитного сигнала.

Список литературы

- [1] Kunetz G. Processing and interpretation of magnetotelluric soundings. Geophysics, 1972, v. 37, pp. 1005–1021.
- [2] Резницкая К.Г. Связь между решениями задачи Коши для уравнений различных типов и обратные задачи. В кн.: Математические проблемы геофизики. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1974, вып. 5. ч. I. с. 55 - 62.
- [3] Грецков 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.

- [4] Lee K.H., Liu G., Morrison H. F. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive media. *Geophysics*, 1989, v. 54, pp. 1180–1192.
- [5] Lee K.H., Xie G.. A new approach to imaging with low-frequency electromagnetic fields. *Geophysics*, 1993, v. 58, pp. 780–796.
- [6] Levy S., Oldenburg D., Wang J. Subsurface imaging using magnetotelluric data. *Geophysics*, 1988, v. 53, pp. 104–117.
- [7] Swidinsky A. Transient Electromagnetic Modelling and Imaging of Thin Resistive Structures: Applications for Gas Hydrate Assessment. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Physics University of Toronto, 2011, 255 p.
- [8] Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И Программное обеспечение Модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Записки Горного института — 2009. — Т. 183. — С. 242 — 245.
- [9] Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Корсаков М.А., 2018, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619483 «Q-Trans» (Заявка №2018616209 от 14.07.2018, дата госрегистрации в Реестре программ для ЭВМ 07.08.2018).

*Михаил Александрович Корсаков — мл. науч. сотр. Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН;
e-mail: acidmk@yandex.ru*

*Михаил Иванович Эпов — д.т.н., академик РАН, глав. науч. сотр. Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; Новосибирский государственный университет;
e-mail: eповmi@ipgg.sbras.ru*

*Шеин Александр Николаевич — ст. науч. сотр. Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН;
e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru*

*Евгений Юрьевич Антонов — д.ф.-м.н., глав. науч. сотр. Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН;
e-mail: antonovey@ipgg.sbras.ru*

Дата поступления — 20 сентября 2018 г.