

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

X Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

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

Т. 3

Сборник материалов

Новосибирск
СГГА
2014

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН,
директор Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
М. И. Эпов

Доктор геолого-минералогических наук, академик,
председатель Президиума Кемеровского научного центра СО РАН, Кемерово
А. Э. Конторович

Академик РАН, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
М. В. Курленя

Кандидат геолого-минералогических наук,
генеральный директор ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск
А. С. Ефимов

Руководитель Регионального агентства по недропользованию
по Сибирскому федеральному округу, Новосибирск
А. И. Неволько

Профессор, проректор по научной
и инновационной деятельности СГГА, Новосибирск
В. А. Середович

Кандидат геолого-минералогических наук,
учёный секретарь ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск
С. П. Зайцев

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. Т. 3. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 209 с.

ISBN 978-5-87693-712-4 (т. 3)

ISBN 978-5-87693-698-1

ISBN 978-5-87693-697-4

В сборнике опубликованы материалы X Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014», представленные на Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-87693-712-4 (т. 3)

ISBN 978-5-87693-698-1

ISBN 978-5-87693-697-4

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2014

ОПРОБОВАНИЕ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ 3D-ИНВЕРСИИ ДАНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО (БОРНОВСКОГО) ПРИБЛИЖЕНИЯ

Александр Николаевич Шейн

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

Владимир Сергеевич Могилатов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)330-96-02, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

В работе тестируется алгоритм томографической инверсии, основанный на приближенном (борновском) 3D-моделировании нестационарного электромагнитного поля. Для тестирования используются синтетические данные полученные программой для моделирования процесса становления над трехмерными средами Modem3D. Показана состоятельность и работоспособность алгоритма томографической инверсии.

Ключевые слова: математическое моделирование, зондирование становлением поля, томографическая инверсия.

TEST OF TOMOGRAPHIC INVERSION OF TEM-DATA BY APPROXIMATE (BORN) 3D MODELLING

Alexandr N. Shein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Prosp., PhD, Research Scientist, tel. (383)333-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Vladimir S. Mogilatov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Prosp., Doctor of Technical Sciences, Main Research Scientist, tel. (383)330-96-02, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

Evgeniy Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptuyuga Prosp., Research Scientist, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Head of laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

The paper presents test of tomographic inversion of transient electromagnetic data. Inversion based on approximate (Born) 3D modelling. Synthetic transient induction responses used for test-

ing. This data were obtained by program Modem3D for calculating transient electromagnetic field. It was shown consistency and availability of algorithm tomographic inversion.

Key words: mathematic modeling, transient electromagnetic sounding, tomographic inversion.

В настоящее время в разработке программных средств трёхмерного моделирования в задачах электроразведки, в том числе для нестационарных электромагнитных полей, достигнуты большие успехи. Однако практическая интерпретация данных зондирования становлением (ЗС), как правило, производится в рамках горизонтально-слоистой модели геологической среды. Переход к трёхмерной инверсии данных осложняется тем, что даже прямое моделирование электромагнитных полей в сложно построенных средах требует больших временных и вычислительных ресурсов. Поэтому потребность в быстром решении обратных трёхмерных задач подвигает к использованию приближённых методов, например, с помощью линейной томографической инверсии в рамках борновского приближения.

В предыдущих работах проводилось тестирование алгоритма приближённого расчёта нестационарного электромагнитного поля, основанного на теории возмущений [1,2]. Тестирование программы для приближённого расчёта переходных характеристик – MAG3D выполнялось путем сравнения с точными трёхмерными расчётами методом конечных элементов (Modem3D, авторы Кремер И.А, Иванов М.И.). Сопоставление результатов моделирования позволило определить ограничения приближения и послужило обоснованием для использования программы MAG3D в томографической инверсии. В данной работе представлены результаты тестирования созданной на основе MAG3D программы томографической инверсии.

Линеаризованная прямая задача для прямоугольной области с возмущённой проводимостью (программа MAG3D) позволяет свести решение обратной задачи к решению системы линейных уравнений, связывающей полевые сигналы с теоретическими. Очевидно, что нужно использовать большее число данных, нежели число неизвестных. В условиях, когда система переопределена, решение обратной задачи становится устойчивей. Для решения системы линейных уравнений использовалась процедура минимизации с помощью метода наименьших квадратов. В итоге создана программная система, которая позволяет проводить томографическую инверсию для определенного количества разбиений, в заданной области.

Первое, что необходимо сделать – это проверить созданную программу на поиск известного решения. Для этого мы сгенерируем синтетические данные программой MAG3D. Алгоритм расчета этой программы (борновское приближение) используется в программе для томографической инверсии, поэтому решение обратной задачи для такого набора данных должно привести к положительному результату. Иначе, созданную программу можно считать неверно написанной.

Для тестирования была выбрана модель 1 (рис. 1). Это двухслойная среда ($\rho_1 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1 = 1000 \text{ м}$, $\rho_2 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) с погружённым в неё объектом с удельным сопротивлением $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и размерами $2000 \times 1500 \times 300 \text{ м}$. Центр аномалии-параллелепипеда смещен на 1250 м по оси Y , а верхняя кромка находится на глубине 300 м . На рисунке 1 нанесена система измерения: окружность – это источник радиусом 564 м (эквивалент квадратной петли со стороной 1000 м), а точки – это точечные приемники: приемники расположены с шагом 500 м , где $-500 < X < 500$, $-1000 < Y < 1000$. Такая система измерений использовалась для получения синтетических кривых становления программами MAG3D и Modem3D, которые были использованы для тестирования созданной программы для томографической инверсии.

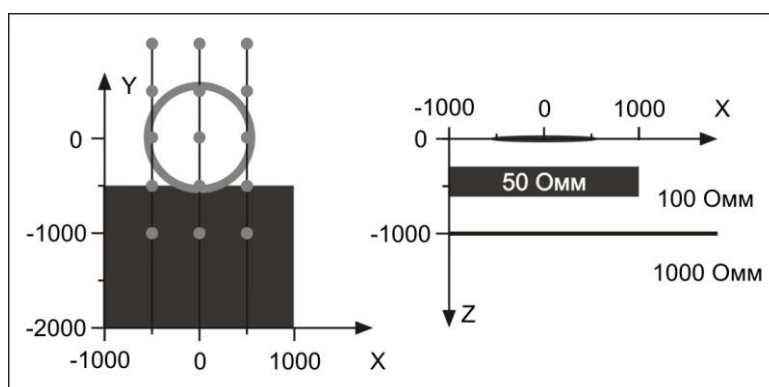


Рис. 1. Модель 1 для тестирования программы томографической инверсии

Чтобы выполнить инверсию, необходимо подготовить набор (матрицу) аномальных полей для каждого из приемников. Выходными параметрами программы будут – возмущения проводимости i -ой области по отношению ко вмещающей среде. Эти возмущения могут быть представлены графически в виде раскрашенной томографической сетки, где яркостью цвета обозначена величина возмущения (чем темнее, тем больше). На рис. 2, таким способом представлено восстановление модели 1, где использовались синтетические данные, полученные программой MAG3D.

В качестве референтной модели была выбрана двухслойная модель: $h_1 = 1000 \text{ м}$, $\rho_1 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_2 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Томографическое разбиение проводилось по глубине в пределах залегания нашего объекта, т.е. $-600 < Z < -300$. Сетка в плоскости XY располагалась в таких пределах, чтобы аномальный объект находится в центре: $-2000 < X < 2000$; $-3500 < Y < 1000$. Здесь представлены 2 случая томографической сетки 8×6 и 8×12 (рис. 2). Таким образом мы с помощью томографической инверсии восстанавливаем слой толщиной 300 м . На рис. 2 представлены восстановленные возмущения проводимости для каждого из элементов томографической сетки (вид сверху). Окружностью представлен источник в виде круговой петли радиусом 564 м , сеть точечных приемников обозначена точками и контур восстанавливаемого объекта. Модель восстанавливается хо-

рошо в обоих случаях. Стоит отметить, что край объекта, находящийся ближе к источнику восстанавливается лучше. Это связано с меньшей чувствительностью метода к данным удаленной от источника области восстановления. Проведенные численные эксперименты позволяют сделать вывод, что восстановление объекта по синтетическим данным, полученным программой MAG3D, происходит удовлетворительно, а программу инверсии можно признать эффективной.

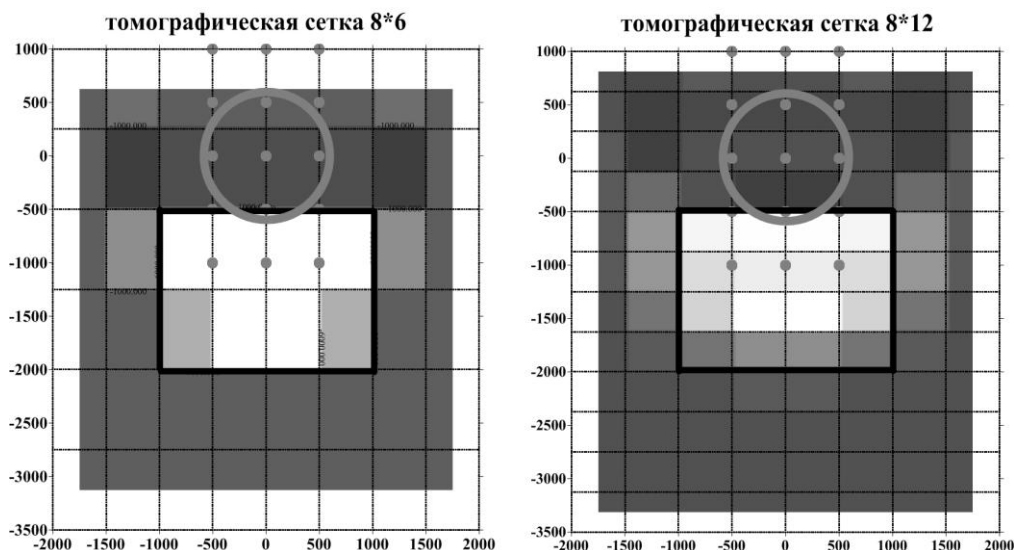


Рис. 2. Графическое представление результатов томографической инверсии по сетке 8x6 (слева) и 8x12 (справа), где синтетические данные получены программой MAG3D. Окружность – источник, точки – сеть приемников, прямоугольник – контур объекта

Следующим шагом было восстановление объекта с использованием синтетических данных полученных программой трехмерного моделирования Modem3D. Мы рассчитали массив данных для аномального поля. С помощью программы для томографической инверсии получили набор возмущений проводимости по отношению ко вмещающей среде для элементов томографической сетки. Для инверсии используется такая же область: $-600 < Z < -300$; $2000 < X < 2000$; $-3500 < Y < 1000$. И этот набор представляем в графическом виде. На рисунке 3 представлены результаты томографической инверсии по сетке 8x12 (рис. 3, слева), где в качестве синтетических данных используются расчеты программой Modem3D. В отличие от первого случая (рис. 2), здесь объект восстанавливается не так хорошо. Это может быть связано как с использованием приближенной инверсии, так и неоптимальной сетью наблюдения. Такой результат всё же можно считать удовлетворительным: и хотя контур восстанавливается не очень чётко, тем не менее целевой объект выделяется.

Чтобы проверить, действительно ли выбранная сеть наблюдений является неоптимальной, изменим её, сдвинув имеющиеся приемники вниз по координа-

те Y . Таким образом, сеть приемников окажется над объектом (рис. 3, точки). С помощью программы Modem3D для каждого из приемников рассчитано аномальное поле и составлена матрица для обращения. Все параметры модели и томографическая сетка остаются неизменными. Далее вычисляется набор возмущений проводимости по отношению ко вмещающей среде для каждого из элементов томографической сетки и представляется в графическом виде (рис. 3, справа). При таком расположении приемной сети точность восстановления границ объекта возрастает: все элементы с аномально низкими возмущениями укладываются в контур восстанавливаемого объекта (рис. 3). Однако, объект все еще остается «размытым», что дает повод для дальнейшего более глубокого исследования.

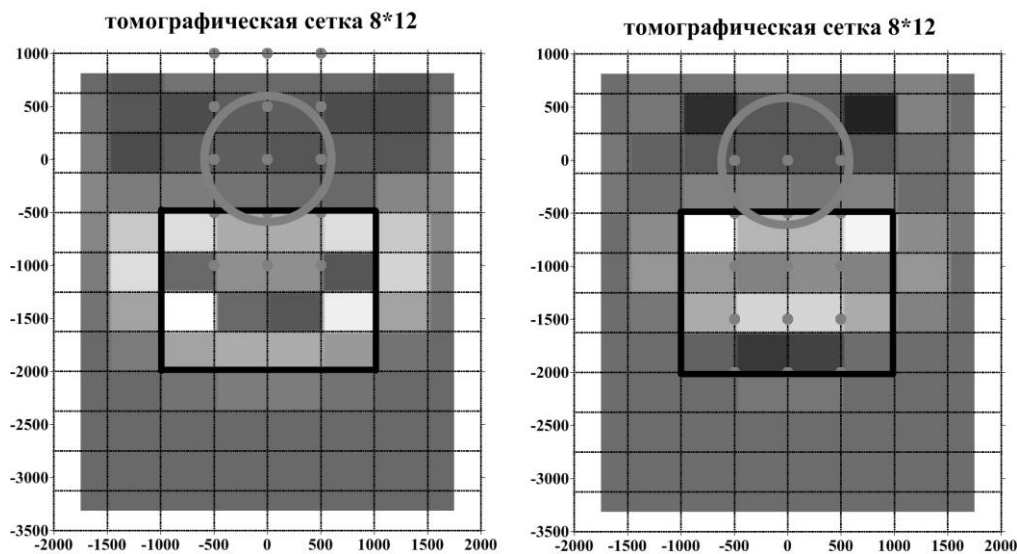


Рис. 3. Графическое представление результатов томографической инверсии по сетке 8×12 для двух наборов приемников, где синтетические данные получены программой Modem3D. Окружность – источник, точки – сеть приемников, прямоугольник – контур объекта

Выводы:

Тестирование программы томографической инверсии на синтетических данных, полученных программой для моделирования нестационарного электромагнитного сигнала над трехмерными средами Modem3D, показывает состоятельность и работоспособность предложенного и реализованного алгоритма инверсии данных зондирований становлением поля в случае сложнопостроенных сред;

Программы для томографической инверсии требует дальнейшей доработки, а ее совместное использование с Modem3D позволит совершенствовать предлагаемый алгоритм, выявлять и устранять особенности, а в случае практического применения выбирать оптимальную систему наблюдений.

Авторы благодарят И.А. Кремера и М.И. Иванова за предоставленную возможность использовать программу Modem3D для научных расчётов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеин А.Н., Могилатов В.С., Антонов Е.Ю. Оценка возможностей приближенного (борновского) 3D моделирования для томографической инверсии данных зондирований становлением [электронный ресурс] // Материалы VI Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013. URL: http://emf.ru/ems2013/section1/Шеин_Могилатов_Антонов.pdf (дата обращения 10.10.2013)
2. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. Учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск: 2002. - 208 с.
3. Шеин А.Н. Особенности программы для расчёта нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах Modem3D // Материалы Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т.2 / Старооскольский филиал ФГЮОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кирилица». – Старый Оскол, – 2013. –с. 99-104.

© А. Н. Шеин, В. С. Могилатов, Е. Ю. Антонов, 2014