УДК [550.837.211 + 550.83.017]

С.В. Зайцев[1]

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ДЛЯ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Обсуждается несколько примеров применения трехмерной инверсии данных магнитотеллурического зондирования с использованием суперкомпьютера «Ломоносов». Продемонстрирована эффективность выбранного подхода инверсии для нескольких реальных геологических объектов. Каждый объект относится к разному классу задач — от поиска мелких рудных тел до региональной разведки углеводородов. Но все эти объекты объединяет большой объем измерений, для инверсии которых требуется огромное количество времени и ресурсов. Использование 3D-инверсии с высокопроизводительным вычислительным комплексом позволяет получить качественный результат решения широкого круга задач за приемлемое время.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, трехмерная инверсия, суперкомпьютер «Ломоносов».

When switching to 3D inversion of MT data, the requirement for computer technology is significantly increased. In this paper we will discuss a few examples of 3D inversion of electromagnetic geophysical field data with the usage of “Lomonosov” supercomputer and show its effectiveness on several geological objects. Each object is associated with a variety of problems: from search for shallow ore to regional hydrocarbon exploration. But all these objects contain a large volume of measurements obtaining qualitative results for which requires a huge amount of time. So that the use of 3D inversion with a high-performance computational complex makes it possible to obtain a qualitative result of solving a wide range of problems.

Key words: magnetotelluric, three-dimensional inversion, supercomputer “Lomonosov”, geophysics.

Введение. В большинстве случаев двумерная (2D) инверсия магнитотеллурических (МТ) данных используется для решения коммерческих задач, тогда как трехмерную (3D) инверсию не так часто применяют в подобных проектах. Это связано с тем, что большинство коммерческих исследований выполняют на нерегулярной сети профилей, проектируемых под геологическую обстановку, и 2D-инверсия позволяет получать результаты на очень подробной модельной сетке даже при использовании персонального компьютера. Но повсеместное использование 2D-инверсии МТ-данных часто неоправданно, может привести к ошибкам в результирующей модели из-за трехмерных искажений МТ-данных [Ledo, 2005]. Трехмерные искажения могут быть вызваны телами как вблизи рабочей зоны, так и непосредственно в ней. В этом случае каждый профиль или даже пикет требует тщательного анализа для выбора стратегии инверсии, которая позволяет получить результат с наименьшим искажением. Конечно, можно использовать 3D-инверсию для единичного профиля, как показано в работе [Иванов и Пушкарев 2010], для исключения 3D-искажений, но этот подход здесь не рассматривается.

Выходом из этой ситуации может быть использование трехмерной инверсии с небольшим размером ячейки и полным набором данных. Но в коммерческих компаниях среди исследователей наблюдается некоторый скептицизм, связанный с использованием 3D-инверсии на реальных объектах: можно ли получить хорошее разрешение результирующей модели; сопоставимо ли время, потраченное на 3D-инверсию, со временем, в течение которого будет выполняться 2D-инверсия, где границы применимости трехмерной инверсии в терминах решаемых задач?

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо накопить базу для решения обратной задачи на реальных объектах, которая продемонстрировала бы эффективность трехмерной инверсии и ее возможности. При выборе таких объектов следует учитывать несколько правил: во-первых, возможность проверить результаты и сравнить их с данными других методов геофизики или геологией; во-вторых, объекты должны быть нацелены на решение геолого-геофизических задач разного масштаба для понимания возможных ограничений применяемой технологии.

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант; *e-mail*: zay.ser.vl@gmail.com

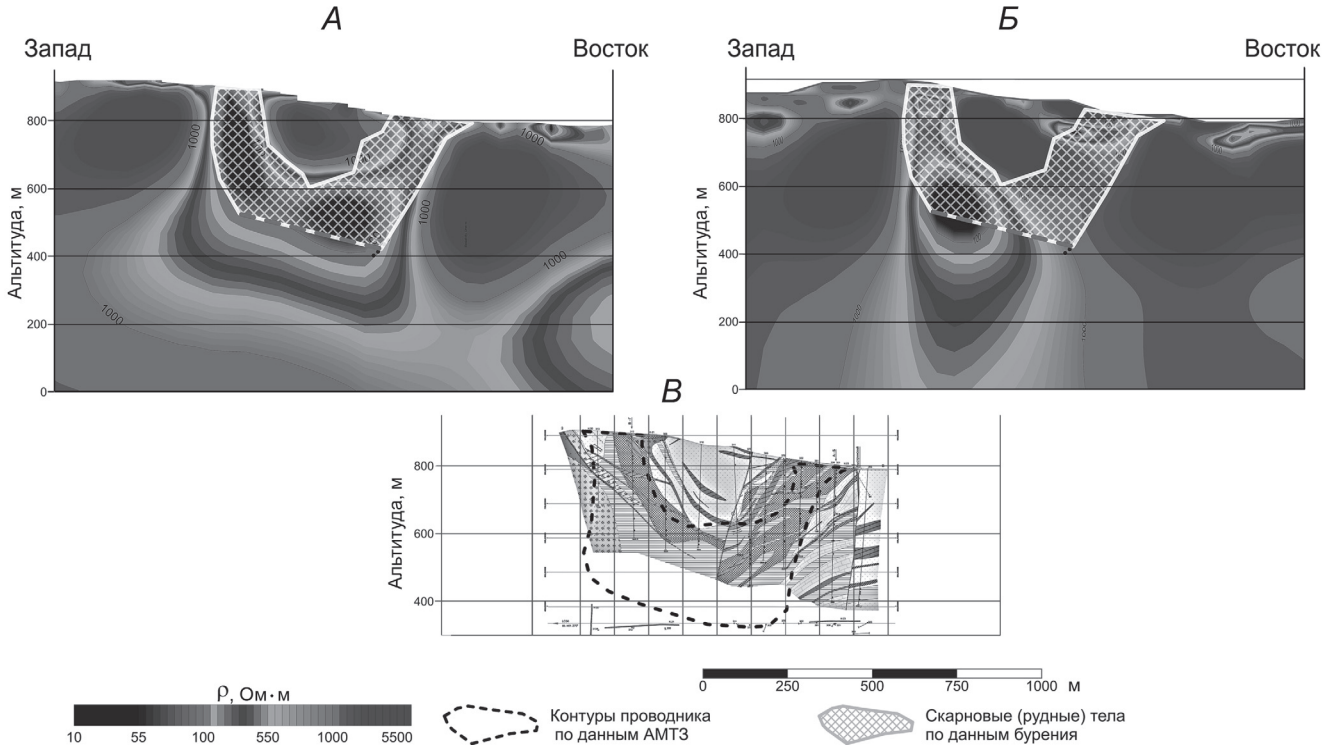

Рис. 1. Сравнение результатов инверсии данных АМТЗ по одному профилю: *А* — результат 3D-инверсии; *Б* — результат 2D-инверсии; *В* — геологическая модель по данным бурения

Рассмотрим применение 3D-инверсии МТ-данных для двух типов объектов, которые удовлетворяют этим условиям: рудное месторождение (Быстринский район, Забайкальский край) и нефтегазовая провинция в Боливии. На этих объектах будет показана эффективность и возможность применения трехмерной инверсии МТ-данных.

Методика исследований. Рассмотрим решение обратной регуляризированной задачи электромагнитных (ЭМ) методов, сводящейся к минимизации функционала невязки

$$\Phi(m,d) = (d - f(m))^T C_d^{-1} (d - f(m)) + \nu(m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0), \quad (1)$$

для восстановления распределения параметров модели m, которое удовлетворит полевым данным d. В (1) C_d^{-1} отвечает ошибкам данных (C_d — их весам); $f(m)$ определяет решение прямой задачи; m_0 — априорная модель, первоначальное приближение или медианная модель; ν — стабилизатор решения обратной задачи; C_m определяет сглаживание модели. Решение прямой задачи ЭМ методов выполняется с помощью метода конечных разностей, т.е. исследуемая область разбивается на кубы конечного размера.

Для контроля качества результатов инверсии используется *nRMS* — стандартное квадратичное отклонение, нормированное на ошибки данных.

Для решения поставленной задачи использован программный код ModEM [Kelbert et al., 2014]. Основное преимущество кода ModEM — возможность использовать параллельные подходы к вычислению прямых и обратных задач с применением технологии интерфейса передачи сообщений (*Message Passing Interface*, *MPI)*, что значительно сокращает время, затрачиваемое на поиск решений обратной задачи, поскольку она для каждого периода рассчитывается независимо. Другой важный инструмент исследования — суперкомпьютерный комплекс «Ломоносов». Его максимальная производительность составляет 2962,3 терафлопс (TFLOPS), самый мощный на сегодняшний день в России [www.top500.org]. Более важный параметр для вычисления на суперкомпьютере — число используемых CPU, так как для оптимального распараллеливания процесса инверсии необходимо $2 \cdot N+1$ вычислительных узлов, где N — число периодов. Так как на всех исследуемых объектах число периодов составляло не более 30, то все вычисления выполнялись на 64-х CPU.

Был использован стандартный подход к определению ошибок данных: процент от $\sqrt{(Z_{xy} \cdot Z_{yx})}$, где Z_{xy} и Z_{yx} — главные компоненты тензора импеданса. Следуя данным статьи [Miensopust, 2017], сглаживание определялось в ModEM как матрица ковариации, выбранная в направлениях $X=Y=0{,}3$ и $Z=0{,}4$. В качестве стартовых моделей использовано однородное полупространство с сопротивлением, зависящим от априорной информации.

Результаты исследований и их обсуждение. ***Быстринское скарновое месторождение Cu-Fe.*** Первый пример — применение 3D-инверсии для разведки полезных ископаемых на Быстринском рудном месторождении. Эта область выбрана из-за

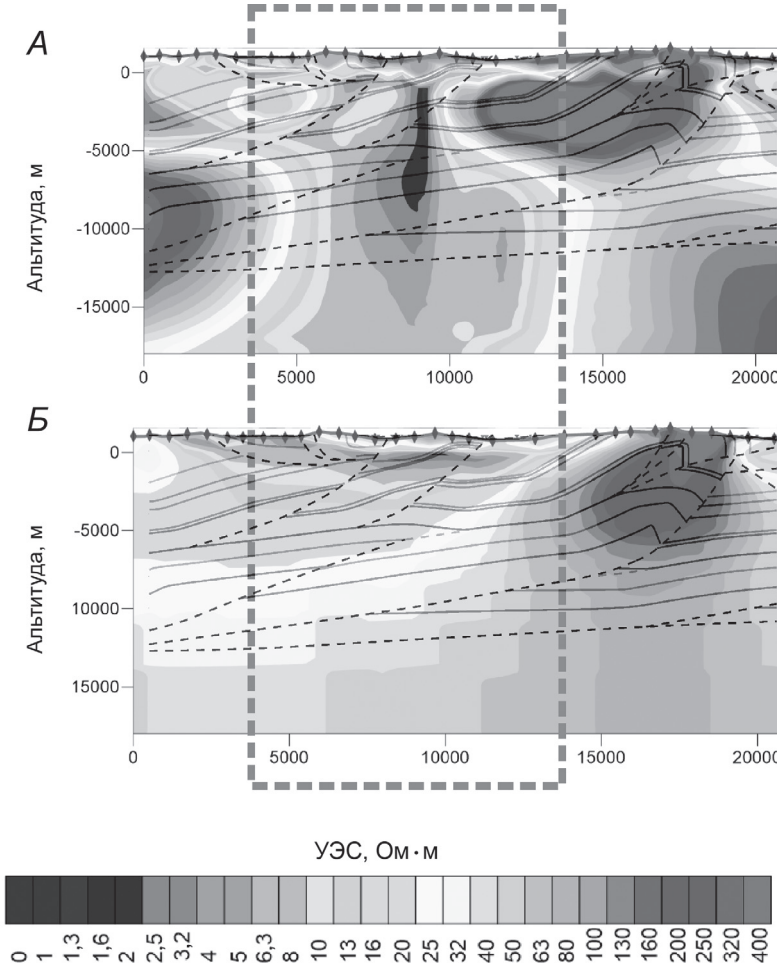

Рис. 2. Сравнение результатов 2D бимодальной инверсии (*А*) и 3D инверсии (*Б*) с границами, выделенными по сейсморазведке. Зона наибольших трехмерных искажений выделена серой штриховой линией

того, что для нее известна геологическая модель по данным бурения, которая позволяет оценить качество полученных результатов.

Инверсия выполнена для 546 станций АМТЗ (период вариаций T <1 с) только для основных компонент тензора импеданса. Уровень ошибок компонент Z_{xy} и Z_{yx} выбран равным 5%. Горизонтальный размер сетки разбиения модели составлял 50×50 м, что позволяет получить хорошее разрешение по горизонтали (2—3 ячейки между пикетами). Поскольку задача состояла в обнаружении тел на глубине несколько сотен метров, вертикальный размер первой ячейки составлял 10 м. Затем его увеличили с геометрическим коэффициентом от 1,1 до глубины 1,5 км, далее до 40 км с коэффициентом 2. Общий размер сетки составляет 60×85×40 ячеек. Потребовалось 46 ч для вычисления 51-й итерации с ошибкой (nRMS) 1,87.

Сравнение моделей удельного электрического сопротивления (рис. 1), полученных по результатам инверсии и бурения, показывает, что границы рудных тел можно определить с высоким разрешением вплоть до глубины 800—1000 м, но по результатам 2D-инверсии невозможно успешно определить нижнюю границу рудного тела из-за 3D-искажений. Успешное применение методов МТ потенциально может уменьшить объем дорогостоящих буровых работ.

Региональные работы по поиску углеводорода, Боливия. Более сложный пример 3D-инверсии — региональные исследования, направленные на поиски нефтегазовых ловушек в горах Боливии, а также уточнение глубинного геологического строения региона. На рис. 2 показано сравнение результатов 3D- и 2D-инверсии в области с сильными трехмерными искажениями на больших периодах, вызванными ошибкой выбора размерности интерпретационной модели. На глубине более 4 км видно, что 2D-инверсия «затягивает» проводник на глубину, тогда как 3D-инверсия явно восстанавливает положение проводящей синклинали, что согласуется с результатами интерпретации сейсморазведки. Чтобы получить качественный результат (nRMS <1,8) 3D-инверсии на 360 станциях для 21 периода, потребовалось 49 ч вычислений. В то же время 2D-инверсия выполнялась в несколько этапов по каждому профилю для устранения 3D-искажений и занимала больше времени. На рис. 3 представлена трехмерная модель УЭС, построенная для исследуемого района работ по результатам 3D-инверсии.

Заключение. Таким образом, с использованием современных алгоритмов 3D-инверсии и высокопроизводительной вычислительной системы за короткое время (сопоставимое с

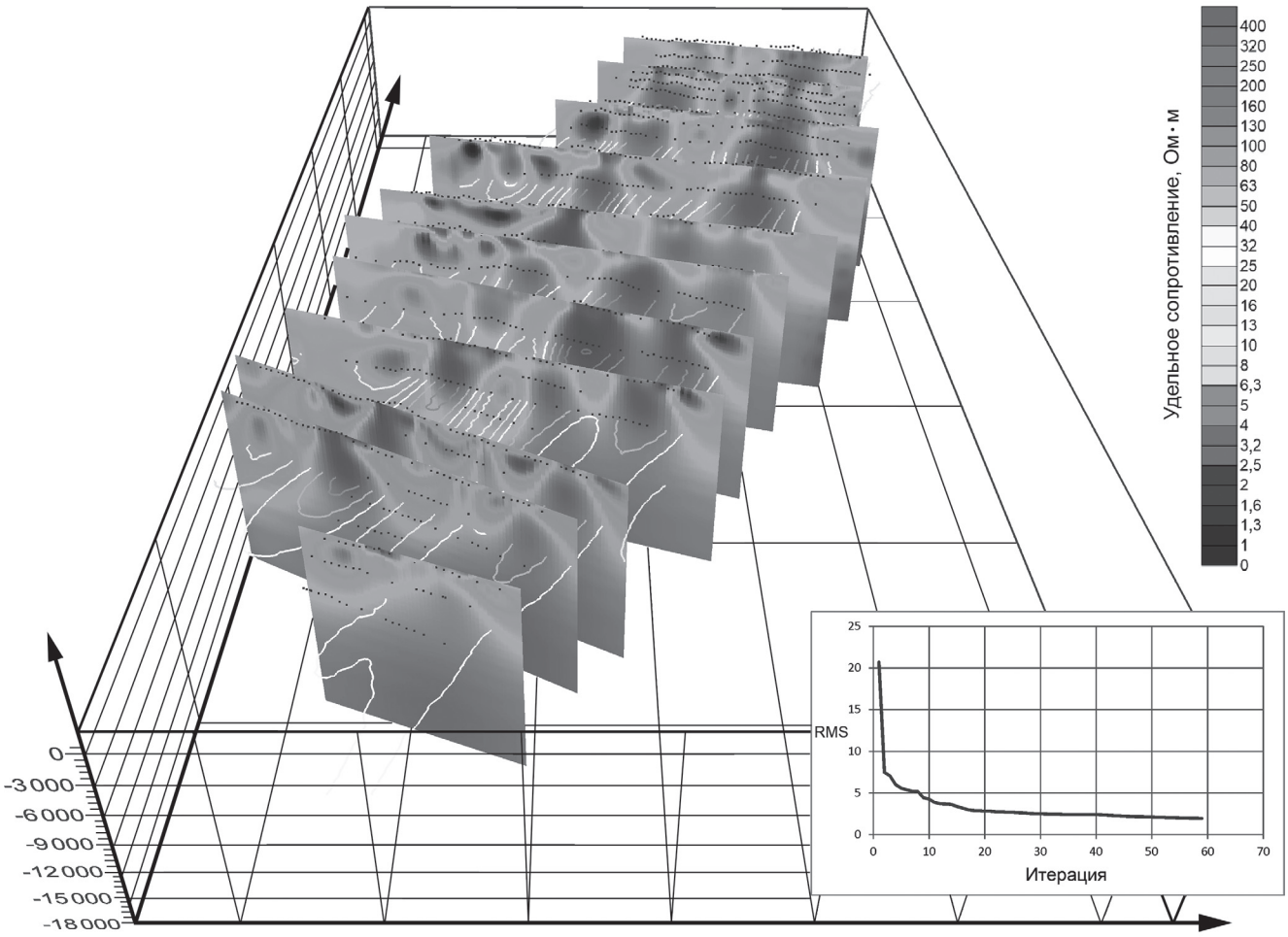

Рис. 3. Результат трехмерной инверсии данных МТЗ в Боливии, направленной на поиск УВ; в правом нижнем углу — график зависимости RMS от номера итерации

многоэтапной 2D-инверсией) можно достичь приемлемых результатов для огромного числа станций магнитотеллурического зондирования. Эффективность использования 3D-инверсии и хорошая корреляция полученных результатов с известной геологической моделью продемонстрированы на природных производственных объектах.

Благодарности. **В**ыражаю благодарность сотрудникам компании ООО «Северо-Запад» за предоставленные данные.

Финансирование. Исследование выполнено с использованием оборудования совместных исследовательских объектов вычислительной техники и ресурсов в МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке проекта RFMEFI62117X0011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И. и др. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // Открытые системы. 2012. № 7. С. 36–39.

Иванов П.В., Пушкарев П.Ю. Возможности интерпретации магнитотеллурических данных, полученных на одиночном профиле, при изучении трехмерно-неоднородной среды // Физика Земли. 2010. № 9. С. 3–10.

Куликов В.А., Яковлев А.Г. Практическое применение магнитотеллурических методов в рудной геофизике // Разведка и охрана недр. 2011. № 3. С. 26–33.

Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D. et al. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosciences. 2014. N 66. P. 40–53.

Ledo J. 2-D versus 3-D magnetotelluric data interpretation // Surv. Geophys. 2006. N 27. P. 111–148.

Miensopust M.P. Application of 3-D electromagnetic inversion in practice: challenges // Pitfalls and Solution Approaches. Surv Geophys. 2017. N 38. P. 869–933.

Поступила в редакцию 26.02.2019

Поступила с доработки 26.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019