



ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ РАЗНОВЫСОТНОЙ МАГНИТНОЙ РАЗВЕДКИ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА

М.А. Максимов^{1,3}, И.В. Суродина^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6, Россия,

³Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия,
e-mail: maksimovma@ipgg.sbras.ru

Разработано высокопроизводительное программно-алгоритмическое обеспечение для решения прямой и обратной задач моделирования и инверсии пространственно-распределенных данных магнитной разведки с учетом рельефа. Показаны результаты решения обратной задачи магнитной разведки для синтетических зашумленных данных.

Магниторазведка; инверсия; геомагнитная томография

THREE-DIMENSIONAL FORWARD AND INVERSE MODELLING OF MULTI-HEIGHT MAGNETIC DATA USING THE RELIEF MAPS

M.A. Maksimov^{1,3}, I.V. Surodina^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Lavrentiev Ave., 6, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Novosibirsk State University, Pirogova Str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: maksimovma@ipgg.sbras.ru

We have developed the high-performance software and algorithmic software for solving the direct and inverse problems of modeling and inversion of spatially distributed magnetic, taking into account the relief. We show the results of solving the inverse problem of magnetic survey taking into account the relief for synthetic noisy data.

Magnetic survey; inversion; geomagnetic tomography

ВВЕДЕНИЕ

Магниторазведка является одним из наиболее распространенных методов разведочной геофизики. При необходимости выполнения магнитной съемки в труднодоступных районах с пересеченной местностью наиболее перспективной является многоуровневая съемка с получением пространственно-распределенных данных. Большой объем высокоточных измерений магнитного поля на различных высотах дает возможность с высокой степенью достоверности определять параметры геологических объектов [Эпов и др., 2016]. Для выделения основных аномалий магнитной восприимчивости для определения перспективных участков и более детального их исследования, необходима быстрая инверсия данных в масштабе реального времени. В труднодоступных районах связь с расчетными кластерами фактически отсутствует, поэтому необходим быстрый алгоритм инверсии магнитометрических данных, работающий в том числе на мобильных платформах.

Для быстрого и эффективного вычисления векторно-матричных операций можно применять параллельные вычисления на многопроцессорных кластерах или графических ускорителях (GPU). В полевых условиях использование GPU является наиболее перспективным вариантом.

Нами были разработаны и программно реализованы быстрые высокопроизводительные алгоритмы решения прямой и обратной задач разновысотной магнитометрии, основанные на магнитостатическом подходе к уравнениям Максвелла, который описан во многих работах, включая [Блох, 2009], с использованием дискретизации основного уравнения конечно-разностным методом на неравномерной сетке [Самарский, 1979]. В отличие от подхода с моделированием сигналов от примитивных тел (шаров, цилиндров), данные алгоритмы, используя решения полных уравнений, дают возможность учесть остаточную намагниченность и эффекты перемагничивания (для сильномагнитных тел), а их вычислительная эффективность подкреплена растущей производительностью современных устройств.

Численная инверсия в магниторазведке реализуется путем восстановления потенциала магнитного поля и его производных, что делает методики их решения максимально приближенными к таковым для задач гравиметрии, в частности, по аналогии возможно применение полных тензорных градиентов данных для выделения потенциально значимых объектов [Droujinine et al., 2007].

В данной работе представлено тестирование комбинированного алгоритма инверсии магнитных данных [Максимов и др., 2018] на синтетической модели с реалистичным рельефом, который является одним из важнейших факторов, влияющих на магнитную съемку [Попков, Почтарев, 1959; Долгаль, Христенко, 1997]. За основу взяты два подхода: минимизация целевой функции невязки с использованием ее градиентов [Fletcher, 1987] и инверсия системы линейных уравнений с матрицей чувствительности измеряемых данных к модельным параметрам путем обратной подстановки сингулярного разложения (SVD) [Стренг, 1980].

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНВЕРСИИ

Как известно, связь магнитной индукции \vec{B} и напряженности магнитного поля описывается соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 * [\vec{H} + \vec{I}], \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, \vec{I} – намагниченность.

В немагнитной среде справедливо соотношение $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$. Традиционно используют упрощенную модель намагничения, которая описывает горные породы как «идеальный ферромагнетик», что дает возможность связать намагниченность с магнитными свойствами следующим образом:

$$\vec{I} = \kappa \vec{H} + \vec{I}_n. \quad (2)$$

Здесь κ – магнитная восприимчивость, \vec{I}_n – вектор естественной остаточной намагниченности. Учитывая (1) и (2), имеем:

$$\vec{B} = \mu_0 [(1 + \kappa) \vec{H} + \vec{I}_n] = \mu_0 (\mu \vec{H} + \vec{I}_n). \quad (3)$$

Величину $\mu = (1 + \kappa)$ называют относительной магнитной проницаемостью вещества. Векторы \vec{B} и \vec{H} удовлетворяют дифференциальным уравнениям, являющимся частным случаем уравнений Максвелла:

$$\text{rot } \vec{H} = 0; \text{div } \vec{B} = 0. \quad (4)$$

Первое уравнение (4) позволяет ввести скалярный магнитный потенциал

$$\vec{H} = -\text{grad } U. \quad (5)$$

Из уравнений (3)–(5) получим уравнение Пуассона на функцию U

$$\text{div}(\mu \text{grad} U) = \text{div} \vec{I}_n. \quad (6)$$

В случае равенства нулю вектора остаточной намагниченности (постановка «идеальный ферромагнетик»), уравнение (6) приобретает вид:

$$\text{div grad} U = -\text{div} \vec{I}. \quad (7)$$

Таким образом, нахождение скалярного потенциала сводится к решению краевой задачи Дирихле (или Неймана) для уравнения Пуассона (6) или (7).

Для того чтобы построить область моделирования магнитных объектов, будем считать, что ее внешние границы достаточно удалены, что минимизирует влияние рассматриваемых объектов на них. Оптимальное расположение внешних границ можно установить опытным путем при тестировании.

При рассмотрении уравнения (7) очевидно, что левая часть содержит оператор Лапласа. Наиболее быстро такое уравнение решается методом разделения переменных с использованием быстрого преобразования Фурье. Введем в области моделирования сетку с равномерными шагами $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$. Для численного решения воспользуемся программой «Poisson» из библиотеки Intel MKL. Программа позволяет выбирать граничные условия (Неймана или Дирихле) и задавать количество шагов сетки в каждом направлении.

Задача инверсии требует больших расчетных ресурсов. Перед ее реализацией необходимо максимально оптимизировать алгоритм решения прямой задачи, что и позволяет использование распараллеливания решения большой СЛАУ на процессорном кластере или GPU. Чем быстрее работает непосредственно прямая задача, тем более детальную инверсию можно получить за конечное время при прочих равных условиях, так как время решения обратной задачи напрямую зависит от числа определяемых модельных параметров и от времени решения прямой задачи.

Множество алгоритмов инверсии базируется на минимизации целевой функции невязки с использованием градиентного метода. Их эффективность существенно повышается, если имеется возможность быстро вычислить градиент функционала невязки в пространстве модельных параметров. Такой возможностью обладает, в частности, метод решения сопряженной задачи [Fichtner, 2011].

Одним из вариантов развития градиентного метода является квазиньютоновский подход, который за счет имитации расчета вторых производных, позволяет быстро и с высокой точностью решить задачу нахождения глобального экстремума функционала. Это обстоятельство можно применить для построения референтной модели среды низкого разрешения, например, горизонтально-слоистой или блочной. Для решения задачи минимизации нами используется алгоритм Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно в условиях ограниченной памяти (L-BFGS) [Fletcher, 1987].

Построенная референтная модель среды служит основой для стартовой непосредственно при инверсии данных. Используется псевдообращение матрицы чувствительностей данных к модельным параметрам, основанное на сингулярном (SVD) разложении. Начальная модель итерационной инверсии представляет собой ячеистое разбиение среды и может иметь различное разрешение. Применяется многостартовый подход, и подбираются оптимальные параметры размера ячеек и вычислений для сохранения баланса между временем решения прямой задачи и ее точности. SVD-псевдообращение позволяет не только быстро и качественно разрешить СЛАУ для восстановления приращений искомым модельных параметров, но и исключить линейно-зависимые данные, выделив неразрешимые модельные параметры. Критерием разрешимости индивидуальных модельных параметров в данном методе является оценка уровня сингулярных чисел для каждого из них. Обращение СЛАУ путем SVD-разложения хорошо

работает при условии, что стартовая модель несущественно отличается от искомой, поскольку позволяет восстановить лишь малые приращения искомого вектора параметров. Выполнение данного условия гарантируется решением задачи предварительного построения качественной модели референтной среды.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИНВЕРСИИ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА

Для тестирования алгоритма инверсии используется сложная модель («шахматы»): в качестве рельефа используется реалистичная карта поверхности с амплитудой до 5 м, а синтетические данные строятся для блочной «шахматной» среды: 2 слоя с разбиением 5x5 ячеек с чередованием $\chi_1=4 \cdot 10^{-4}$, $\chi_2=6 \cdot 10^{-4}$. Толщина первого слоя модели 10 м, второго – 30 м. Контрастность магнитной восприимчивости между блоками невысокая, поэтому необходим точный учет рельефа при инверсии. На синтетические данные накладывается нормальный шум с дисперсией 5 % от текущего значения измерения. Имитируются пространственно-распределенные измерения на четырех уровнях: 3, 5, 10 и 15 м. Используемая модель представлена на рис. 1.

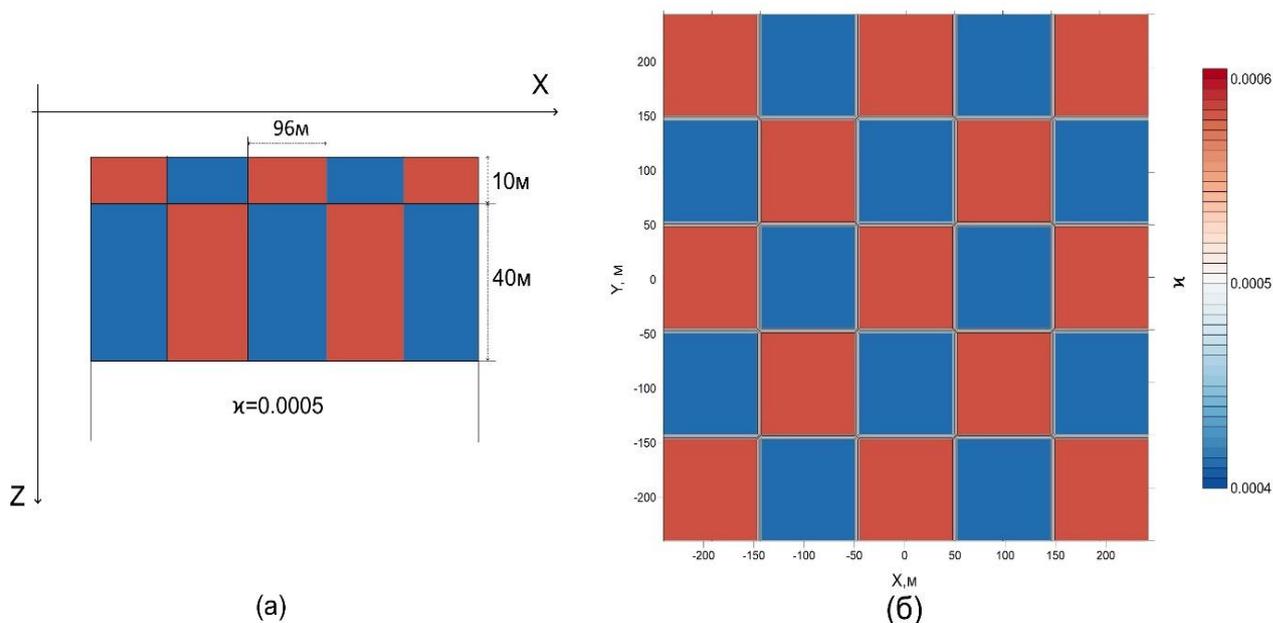


Рис. 1. Модель: а – горизонтальный разрез по оси $Y=0$; б – вертикальная проекция блоков разбиения (первый слой) на плоскость X - Y : $\chi_1=4 \cdot 10^{-4}$ (синий), $\chi_2=6 \cdot 10^{-4}$ (красный)

На рис. 2 представлена карта использованного рельефа дневной поверхности. Рассчитанные синтетические данные показаны на рис. 3. Видно влияние рельефа на общую картину и при интерпретации таких измерений можно допустить ошибку, если его не учитывать.

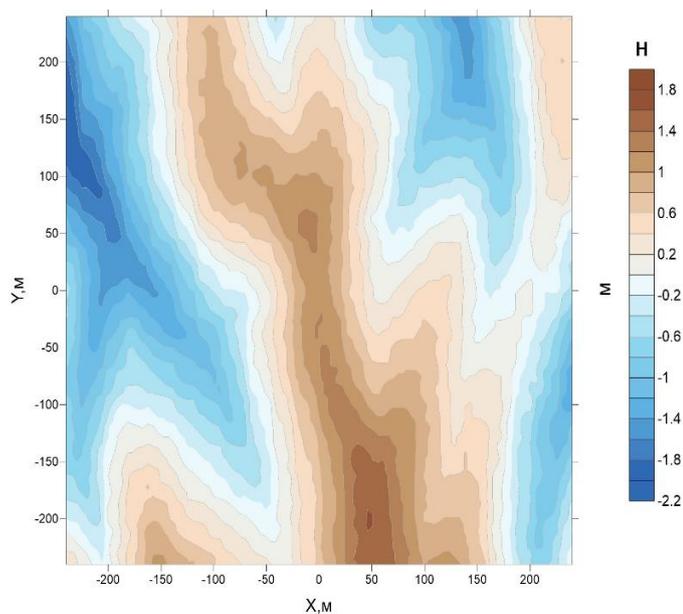


Рис. 2. Карта дневной поверхности, использованная для подготовки синтетических измерений

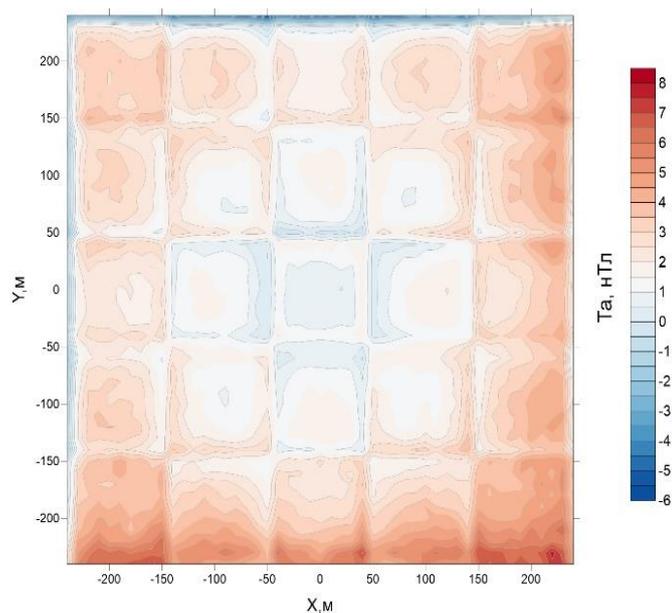


Рис. 3. Синтетическое аномальное полное магнитное поле (магнитная индукция) для модели «шахматы» на высоте 3 м

При инверсии в роли априорной информации используется фиксированный уровень магнитной восприимчивости вмещающей среды $\chi_0=0.0005$, оценка которой может быть получена капаметрией при полевых изысканиях в районе исследований. Данный уровень также определяет стартовые значения модельных параметров при инверсии. На рис. 4а представлен результат инверсии первого слоя, на рис. 4б – второго. Модель получена после применения алгоритма инверсии с сеткой 40x40 ячеек на слой, что значительно превышает число блоков в исходной модели.

Подбираемые ячейки первого слоя достоверно восстанавливают исходную модель с отклонением не более 5 % от значения магнитной восприимчивости. Исключением являются ячейки на границе модели, что может быть вызвано переходом к вмещающей среде (с референтными значениями), но требует дополнительной проверки. Для них отклонение составляет до 10 %.

Точность решения для второго слоя модели ниже: до 10 % отклонения по блокам в центре и до 20 % по блокам у границы, что объясняется меньшей чувствительностью данных к параметрам определяемого слоя. Необходимо дальнейшее уточнение параметризации и регуляризации решения.

Полученные относительные погрешности отображаются в размазывании получаемого изображения: на втором слое затруднительно выделить приграничные блоки размером 5x5, однако в центре отчетливо прослеживается «шахматная» структура.

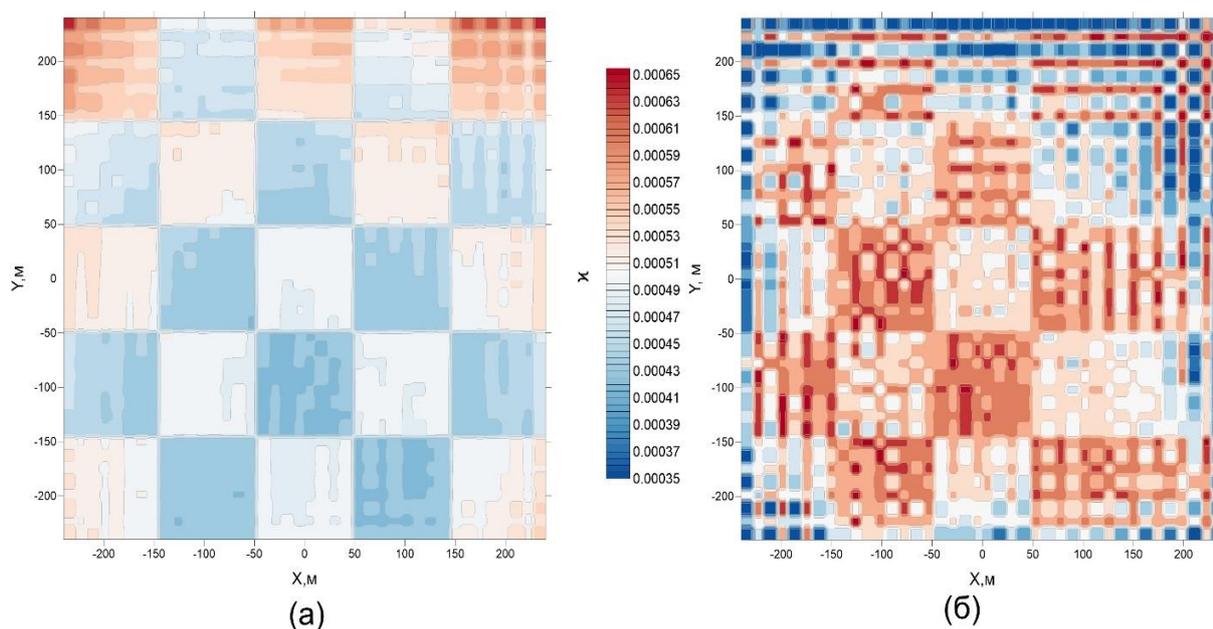


Рис. 4. Результат численной инверсии с использованием предложенного алгоритма: распределение восстановленной магнитной восприимчивости первого (а) и второго (б) слоев

ВЫВОДЫ

На основе проведенных тестов можно сделать следующие выводы по использованию разработанных алгоритмов.

1. Для модели среды «шахматная доска» алгоритм инверсии с учетом рельефа позволяет успешно справиться с задачей выделения пространственных неоднородностей, а также восстановления значений магнитной восприимчивости на заданной сетке.
2. Дальнейшее развитие алгоритма предполагает анализ новых подходов к регуляризации при решении обратной задачи с учетом пространственно-распределенных модельных параметров и системы измерений.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка программно-алгоритмического обеспечения для технологии беспилотной геомагнитной томографии в условиях криолитозоны» программы фундаментальных исследований президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития». Координатор программы академик РАН А.И. Ханчук. Номер гос. регистрации АААА-А18-118061490076-3.

ЛИТЕРАТУРА

- Блох Ю.И.** Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий: Уч. пособие. – 2009. – 231 с.
- Долгаль А.С., Христенко Л.А.** Учет влияния рельефа при обработке магниторазведочных данных. – Геофизика. – 1997. – № 1. – С. 51–57.
- Максимов М.А., Суродина И.В., Глинских В.Н.** Быстрая инверсия данных разновысотных измерений магнитного поля с БПЛА на примере синтетических моделей с учетом рельефа [Электронный ресурс] // Геофизические технологии. – 2018. – № 3. – С. 30–38.
- Попков Н.Е., Почтарев В.И.** Влияние топографического рельефа на магнитные измерения // Тр. научно-исследовательского института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. – М.: Связьиздат, 1959. – Вып. 14.
- Самарский А.А.** Теория разностных схем. – М.: Наука, 1979. – 655 с.
- Стренг Г.** Линейная алгебра и ее применения. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
- Эпов М.И., Фирсов А.П., Савлук А.В., Злыгостев И.Н.** Магниторазведчик: нам сверху видно все // Наука из первых рук. – 2016. – Т. 71–72, № 5–6. – С. 104–109.
- Droujinine A., Vasilevsky A., Evans R.** Feasibility of using full tensor gradient (FTG) data for detection of local lateral density contrasts during reservoir monitoring // Geophysical Journal International. – 2007. – Vol. 169, No. 3. – P. 795–820.
- Fichtner A.** Full seismic waveform modelling and inversion. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – 343 p.
- Fletcher R.** Practical methods of optimization. – New York: John Wiley & Sons, 1987. – 436 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАКСИМОВ Михаил Андреевич – аспирант, научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: обратные задачи и математическое моделирование.

СУРОДИНА Ирина Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: математические методы, параллельные вычисления, численное моделирование.