

Решение обратных задач ЭМ зондирования с управляемым источником при поиске полезных ископаемых

Controlled source electromagnetic inversion for resource exploration

Douglas Oldenburg¹, Robert Eso¹, Scott Napier¹, и Eldad Haber² приводят обзор своих исследований по решению обратных задач данных ЭМ зондирования с управляемым источником с целью повышения эффективности электропроводности при поиске и поиске минерального и УВ сырья.

Электропроводность является диагностическим физическим свойством в ряде исследований, посвященных поиску минерального и УВ сырья. В первом случае оно может непосредственно отражать рудное содержание или может использоваться для выявления геологической структуры отложений. При поиске нефти, коэффициент электропроводности может использоваться в качестве прямого индикатора нефти. Одной из основных проблем, связанных с проведением ЭМ зондирований является сложность получаемых данных. В отличие от грави- и магниторазведки, в которых данные иногда могут использоваться для вывода о геологическом строении или для определения целей бурения, данные ЭС не связаны с геологией напрямую. За последние несколько лет нами были разработаны алгоритмы, позволяющие решить обратную задачу ЭМ зондирования с управляемым источником (CSEM). В дальнейшем это открывает возможности для проведения различных исследований и пересмотра способов получения и интерпретации данных. Целью данной статьи является ознакомление читателя с означенными идеями путем использования методов решения обратных задач применительно к синтетическим и полевым данным, относящимся к поиску полезных ископаемых. Начнем с обзора ЭМ зондирований и затем перейдем к моделированию. При проведении ЭМ зондирований, передатчик (источник) может представлять собой заземленный диполь или петлю, по которой проходит переменный ток. При этом могут измеряться напряженность электрического (E), или магнитного (H) поля или его производная по времени (dH/dt). В основе лежат уравнения Максвелла. Данные являются функцией трех физических свойств: электропроводность, магнитная проницаемость и диэлектрическая проницаемость. В данной статье мы пренебрегаем воздействием диэлектрической проницаемости, предполагая при этом, что магнитная проницаемость идентична магнитной проницаемости свободного пространства. Мы сосредоточимся на электропроводности, или обратной ей величине – электрическом сопротивлении, которое, как показано в Таблице 1, изменяется в широких пределах (на много порядков) в различных породах и минералах.

ЭМ зондирования и моделирование

Через источник проходит синусоидальный ток. При этом он может быть замкнутой петлей или заземленным диполем, а измерения могут производиться в воздухе, на поверхности земли или в скважинах. В качестве примера,

Таблица 1 Электрические свойства пород и минералов. (*Applied Geophysics*, Telford, W.M., et al., 1976, University Press.).

Тип породы	Диапазон сопротивлений Ом
Гранит	$3 \times 10^2 - 10^6$
Базальт	$10 - 1.3 \times 10^7$
Песчаники	$1 - 6.4 \times 10^8$
Известняки	$50 - 10^7$
Нефтенасыщенные песчаники	$4 - 800$

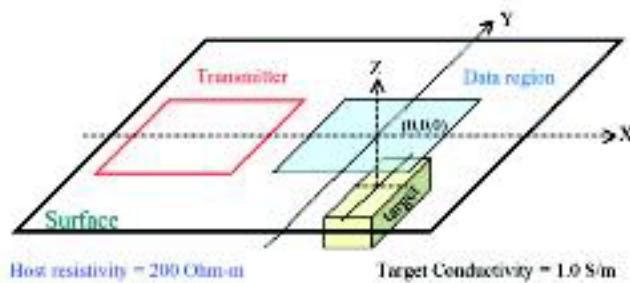


Рис 1 Источник представляет собой квадратную петлю 1 км. Измерения производятся на участке в 1 км. Цель – найти проводящий объект.

рассмотрим типичный случай поисков минерального сырья. На Рис. 1 показана большая петля источника, показания считываются на поверхности вне петли. Целью зондирования является поиск проводящего объекта на глубине. Чтобы создать численные ЭМ поля, уравнения Максвелла переформулированы с переменными, являющимися векторным и скалярным потенциалом ([1], [2]). Объем, включающий воздух и породы, разделяется на ячейки, каждая – с постоянной электропроводностью. Методы конечных объемов используются для дискретизации уравнений Максвелла, при этом задействуются подходящие граничные условия. В результате задача сводится к решению системы уравнений, решение которой получают методом сопряженного градиента. Значения электрического и магнитного полей по всему объему могут быть затем восстановлены из потенциалов.

¹UBC-Кафедра обратных задач геофизики, Отделение океанологии и наук о земле, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, V6T 1Z4

²Отделение математики и компьютерных дисциплин, Emory University Atlanta, GA, 30322. E-mail – адрес для связи с автором: doug@eos.ubc.ca

Поиск полезных ископаемых

Если переменный ток в источнике синусоидальный, полученное в результате электрическое или магнитное поле также будет синусоидальным по всему объему пород. Но по фазе и амплитуде оно не будет совпадать с полем источника. Данные могут быть представлены в виде амплитуды и фазы, или в виде действительной и мнимой частей. Действительная часть представляет собой часть сигнала, находящуюся в фазе с сигналом источника; мнимая часть представляет собой сигнал не в фазе с источником.

Карттирование может быть осуществлено по данным, представляющим собой показания составляющей поля (действительная часть E_x или мнимая E_y), на одной частоте и при одном местоположении источника. В результате зондирования, при проведении которого используются 6 частот, измеряются 4 поля и 5 местоположений источника, были бы созданы 120 карт данных. Отдельные карты синтетических данных изображенных на Рис. 1 приведены на Рис. 2. Из приведенных изображений невозможно визуально сделать какие-либо выводы относительно геологического строения. Необходимо решить обратную задачу.

Решение обратных задач

Процедура решения обратной задачи ЭМ данных идентична таковой при прочих исследованиях. Она заключается в безусловной оптимизации. Минимизируется невязка между полевой и модельной (содержащей априорную информацию) кривыми. Необходимо также определить параметр регуляризации, отвечающий за величину невязки и структуру. В предыдущих статьях ([3], [4]) мы рассмотрели процедуру решения обратных задач применительно к грави-, магнито- и электроразведке на постоянном токе, а также данным ГИС, создав трехмерные модели по наблюдаемым физическим свойствам.

В данном случае при решении обратной задачи использовались итеративные приближения Гаусса-Ньютона [5]. Эффективность вычислений была достигнута путем создания матрицы высокой плотности из разреженных матриц и путем использования заранее определенных методов сопряженных градиентов

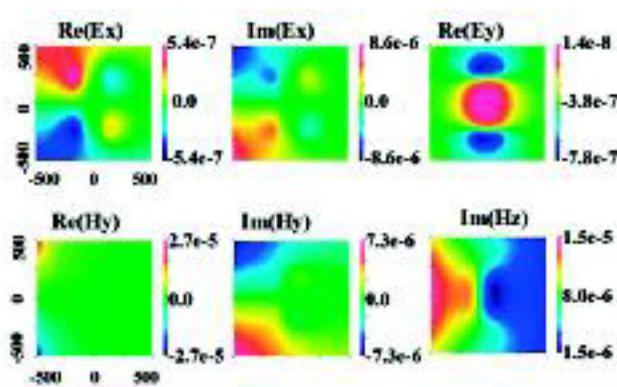


Рис. 2 Синтетические данные с источником частоты 10 Гц и геометрией, показанной на рис. 1.

для решения окончательно полученной системы уравнений.

Синтетические данные (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z) при 6 частотах в диапазоне между 0,1, и 1000 Hz, генерированные с использованием геометрии, приведенной на Рис. 1, были смешаны с шумом, после чего была решена обратная задача. На Рис. 3 изображены результаты в виде изоповерхностей, и элементы вертикального разреза. В результате решения обратной задачи был получен слаженный проводящий элемент. Предсказанные данные выглядят идентично наблюденным, поэтому они здесь не приведены.

На примере синтетических данных можно кратко ознакомиться с решением обратных задач и типом модели, которая будет воссоздана после него. Теперь обратимся к полевым наблюдениям.

Сведения о геологии района

Золотое месторождение Antonio расположено в Перуанских Андах. Золотосодержание месторождения Antonio приурочено к кремнеземистым массивным, трещинноватым и зернистым разностям [6]. Основным со средоточием является пересечение разломов ССВ и ВЗ. Более поздние образования, проходящие в направлении C45Z, перекрывают разломы ССВ и ВЗ, но относятся к эпохе после минерализации. Литология поверхности, структурные особенности и разрез месторождения приведены на рис. 4. Выход месторождения на поверхность представляет собой область в виде дуги, ограниченную разломами, сложенную тонкослоистыми и брекчированными породами.

Геофизические исследования

Зондирования ЭМ с управляемым источником и зондирования ЭС на постоянном токе были произведены на месторождении Antonio. Их целью являлось картирование областей с высоким сопротивлением, связанных с окварцеванием. На рис. 5 приведена схема геофизических исследований. Использовались два источника, каждый длиной примерно 2 км. Значения поля E снимались параллельно источнику, поля H - перпендикулярно ему. Амплитуда электрического поля при частоте 4 Гц показана на Рис. 6.

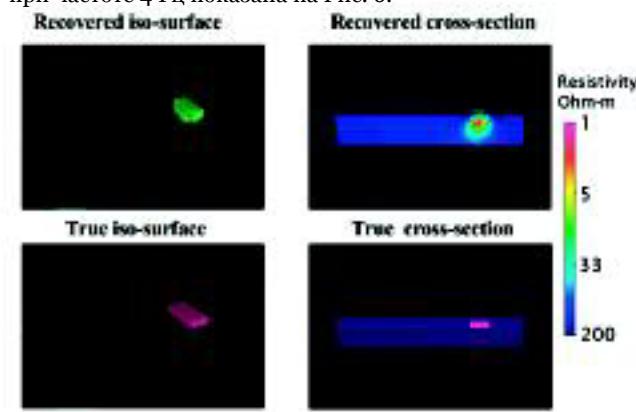


Рис. 3 Сравнение модели электропроводности, полученной в результате решения обратной задачи (наверху) с исходной электропроводностью (внизу)

Поиск полезных ископаемых

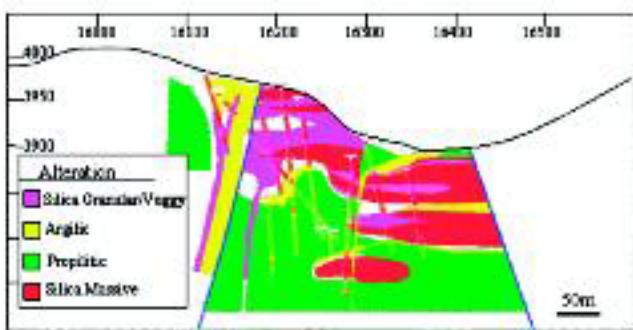


Рис. 4 Литология поверхности (наверху) и геологический разрез (внизу). Месторождение Antonio, Перу.

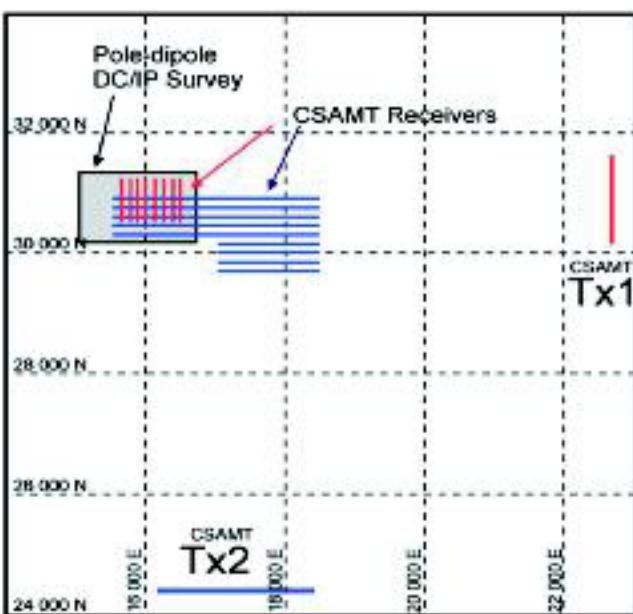


Рис. 5 Схема геофизических исследований месторождения Antonio. Указано местоположение управляемых источников и приемников, а также область исследований DC/IP (на постоянном токе/ГИС).

Стек процедур решения 3D обратной задачи CSEM

Решение обратной задачи сводится к определенной последовательности процедур. Стеки процедур будут различны для различных исследований, но многие элементы являются общими для всех наборов данных:

- Анализ полученных данных
- Априорная информация об электропроводности
- Оценка влияния рельефа
- Сужение области исследований (локализация)
- Отдельное решение обратной задачи для каждого источника и частоты
- Одновременное решение обратной задачи для всех источников и частот

Мы приведем краткий обзор всех вышеуказанных процедур на примере данных месторождения Antonio.

Анализ полученных данных

Для того чтобы реакция модели соответствовала полевым данным, необходимо знать расположение и ориентацию источников и приемников, значение тока в источнике, функции отклика, усиление или нормализацию, которые были применены к полученным данным. Невыясненная нормализация или фильтрация наблюдаемых данных может сделать данные непригодными к численному решению обратной задачи. К сожалению, обычно на выяснение этих аспектов уходит много времени. Кроме того, если необходимо решить обратную задачу для отдельных полей, необходима синхронизация по времени между источником и приемником. Поскольку на месторождении Antonio это не было выполнено должным образом, нам пришлось решать обратную задачу для импеданса $Z = E/H$.

Априорная информация

Результат решения обратных задач напрямую зависит от количества исходной информации. В особенности важно знать региональное значение электропроводности. От нее отталкиваются при решении обратной задачи. Она также необходима, как будет нами показано позднее, для локализации месторождения. При решении обратной задачи на месторождении Antonio, по данным аэроэлектромагнитной съемки была получена оценка электропроводности по региону, который включал в себя

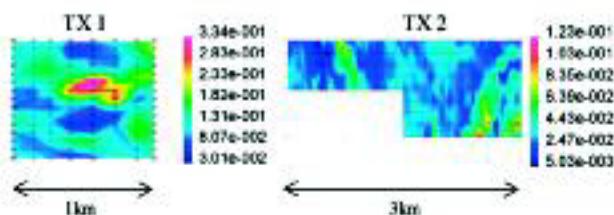


Рис. 6 Амплитуда напряженности E электрического поля от источников TX1 и TX2 при 4Гц.

Поиск полезных ископаемых

исследуемую площадь и источники. Простейшее значение электропроводности было выбрано равным 50 Ом в полупространстве.

Ввод погрешностей

Необходимо учитывать, что каждое измерение сопровождается погрешностью. Это одна из наиболее сложных проблем при решении обратных задач, поскольку необходимо учитывать дополнительный шум и различные ошибки моделирования, такие как ошибка дискретизации, неверное расположение приемников, передатчиков и т.п.

Мы задались целью построить графики амплитуды и фазы и вынести субъективное решение относительно амплитуд вариаций наблюденных данных, которые мы хотим смоделировать. В итоге мы получили погрешность величиной 5% для амплитуды импеданса и 2° для фазы.

Оценка влияния рельефа

Рельеф поверхности может оказывать существенное влияние на данные. Рельеф месторождения Antonio, показанный на Рис. 7, показывает, что перепад высот в районе расположения приемников и источников составляет примерно 1 км. Дальнейшее сравнение результатов моделирования, полученных с учетом и без учета рельефа, покажут необходимость учета рельефа при численном моделировании.

Локализация месторождения

Размер ячеек, используемых при численном моделировании, должен быть достаточно мал для детального моделирования исследуемой геологической структуры, и также достаточно мал в сравнении с глубиной скин слоя на каждой частоте. В тоже время, объем, разбиение которого производится, должен быть достаточно большим, чтобы содержать источники и область сбора данных, и также простираться на достаточноное расстояние во всех направлениях, чтобы выполнялись граничные условия.

Зачастую попытки увязать две вышеозначенных цели приводят к проблеме вычислений. Например, в случае Antonio, объем, разбиение которого необходимо произвести, составляет примерно 28 x 28 x 4 км

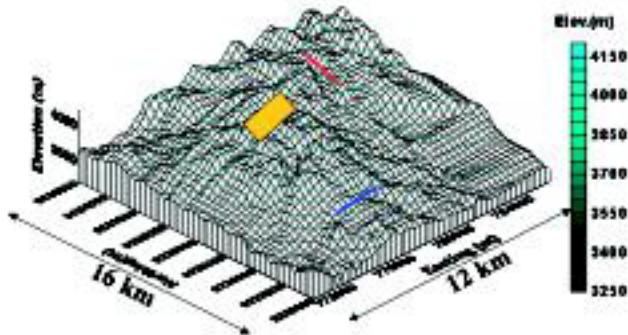


Рис. 7 Рельеф месторождения Antonio и прилегающей области. Расположения источников показаны цветными линиями, исследуемая площадь выделена желтым.

(см Рис. 5). Но размеры исследуемого геологического образования подразумевают ячейки размером 25-50 м. Чтобы работать при таких масштабах и чтобы обеспечить численное решение проблемы, мы сначала смоделировали поля в большом объеме используя ячейки размером 250 м и электропроводность, полученную по априорным данным. Затем был выбран меньший объем, включающий исследуемый участок, и было произведено его разбиение ячейками размером 50 м. Обратная задача на меньшем объеме стала условием, что поля на границе являются региональными полями, полученными при моделировании в большом масштабе. Успех подобной методики определяется наличием хорошей оценки региональной электропроводности и знанием окружающего рельефа. Сетки, демонстрирующие локализацию объема, показаны на рис. 8.

Решение обратной задачи отдельно для каждой частоты

Хорошей практикой является решение обратной задачи отдельно для каждой частоты и каждого источника. При этом могут выявиться отдельные проблемы, связанные с присвоением погрешностей, нормализацией и качеством данных и эффекты дискретизации. Эти отдельные решения были произведены на Antonio.

Решение обратной задачи для набора частот/источников

Были решены обратные задачи для импедансов каждого источника на частотах 4, 64 и 256 Гц. Решение трехмерной обратной задачи заняло 1.5 дня работы компьютера быстродействием 3.0 ГГц. Полученная в результате модель электропроводности изображена на Рис. 9. Наблюденные и предсказанные данные показывают, что полученная в результате модель электропроводности адекватно воспроизводит наблюденные поля.

Обратная задача показывает большое обладающее сопротивлением образование, простирающееся на глубину примерно 150 м ниже поверхности.

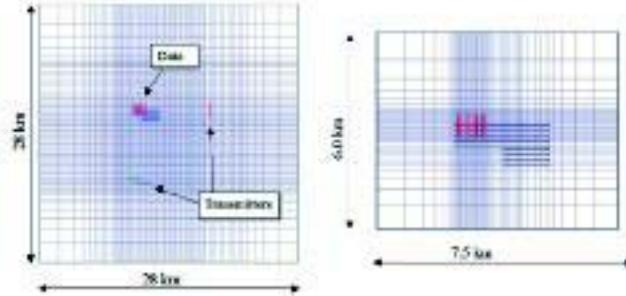


Рис. 8 Разбиение обратных задач месторождения Antonio. Слева разбиение, учитывающее источники и область исследований. Площадь размерами 28x28 км содержит 236,250 ячеек с горизонтальными размерами 250x250 м. Рисунок слева показывает разбиение основной исследуемой области. Размеры этого меньшего объема 7.5x6.5 км, он содержит 73,226 ячеек размерами 50x50 м.

Поиск полезных ископаемых

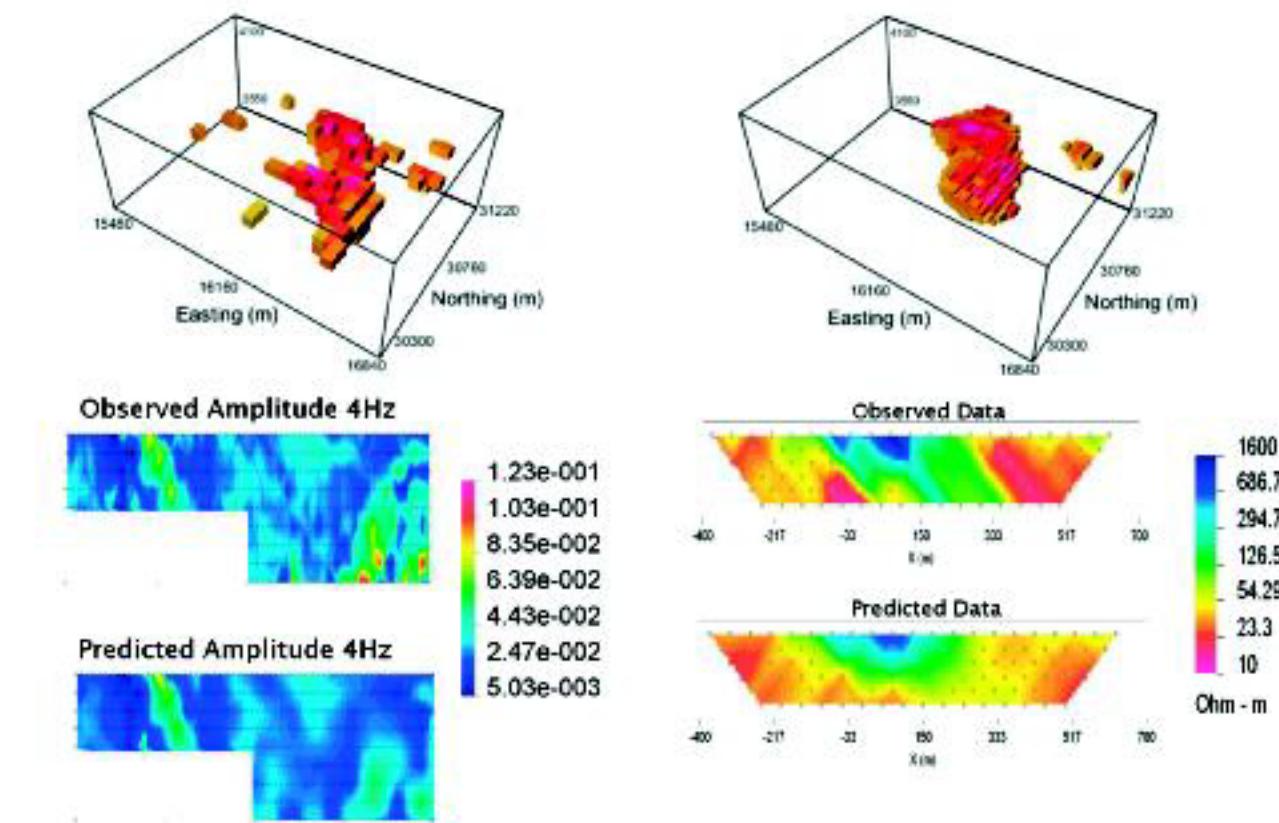


Рис. 9 3D CSEM инвертированный объем с использованием 4, 64, 256 Гц для двух источников. Показаны амплитуды наблюденного и рассчитанного импеданса для отдельного источника при 4 Гц.

Этот объект подвержен кремнизации и ассоциируется с золоторудными образованиями. 3D модель согласуется с данными литологии поверхности и результатами бурения на месторождении Antonio.

Обратная 3D задача сопротивления на постоянном токе

Дипольные данные сопротивлений на постоянном токе также были получены по месторождению Antonio (Рис. 5). Исследование состояло из 4-х линий, удаленных друг от друга на 150 м, удаленность от источника 50 м. Обратная задача была решена так же, как и для случая CSEM, но использовался другой алгоритм, вычисляющий только скалярный электрический потенциал. Объем для решения обратной задачи состоял из 35, 910 ячеек, наименьший размер ячеек составил 25 x 25 x 12.5 м. Полученное в результате изображение электропроводности приведено на рис. 10 вместе с наблюденными и расчетными данными.

Результат решения обратной задачи показывает большое обладающее сопротивлением образование с кварцевой минерализацией. Форма, размер и местоположение образования очень схожи с наблюдаемыми при решении обратной задачи CSEM. Мы обращаем внимание, что объемы, полученные в результате решения обратных задач 3D CSEM и 3D сопротивления DC, показанные на Рис. 9 и 10, изображены в одной цветовой гамме и с одинаковым значением отсечки для изоповерхности. Более детальное сравнение

Рис. 10 3D DC инвертированные данные сопротивления с соответствующими наблюдаемыми и расчетными дипольными данными, изображенными в виде кажущегося сопротивления.

показано на рис. 11. Разрезы и карты двух полученных в результате моделей изображены рядом. Разрывные нарушения наложены на эти изображения, показывая, что окремнение ограничено двумя почти вертикальными разломами, простирающимися в направлении ССВ, показанные на рис. 4.

Подобная согласованность сопротивлений, полученных в результате независимых друг от друга геофизических методов, весьма воодушевляет. Она дополнительно убеждает нас в том, что основные детали, показанные на этих рисунках, являются показателями действительного сопротивления.

ЭМ зондирования морского дна

ЭМ зондирования с управляемым источником (CSEM) также нашли применение при морской разведке УВ сырья. Морские осадки обладают достаточной электропроводностью примерно на глубине 1-5 м, при этом коллекторы УВ обладают сопротивлением по крайней мере на порядок большим. Таким образом получают информацию о сопротивлении, дополнительную к данным сейморазведки, сокращая риск разбуривания непродуктивной скважины. В случае УВ коллектора, объектом ЭМ зондирований является резистор, толщина которого очень мала по сравнению с горизонтальным распространением. В латеральном направлении коллектор может простираться на несколько километров, в то же время обладая мощностью 10-100 м.

Поиск полезных ископаемых

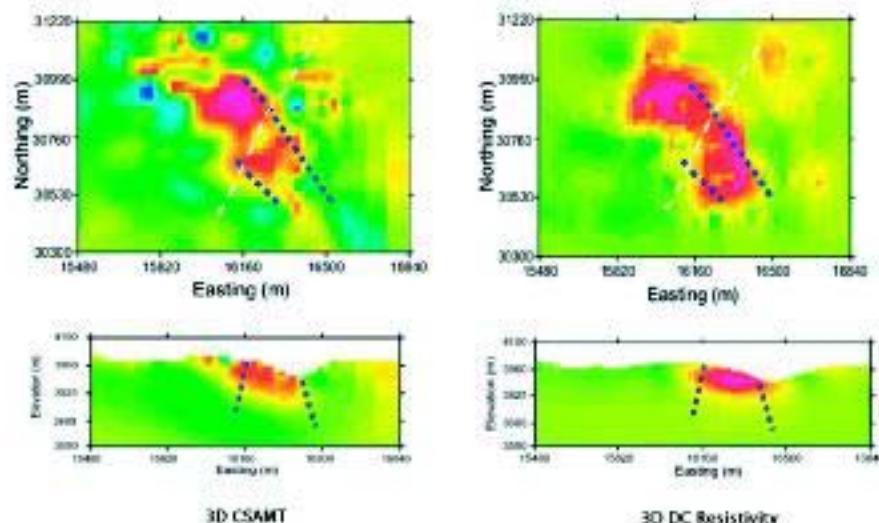


Рис. 11 Разрез и вид в плане обратной задачи 3D CSAMT и 3D DC сопротивления. Оба вида в плане показывают глубину 3900 м.

Кроме того, коллектор обычно находится на глубине 1 км ниже уровня морского дна или более, дно в свою очередь находится в сотнях метров или в нескольких километрах от морской поверхности.

Геофизические исследования состоят в помещении на морском дне датчиков электрического и магнитного поля и буксировании дипольного источника вдоль линий, пересекающих исследуемую площадь. Протекание токов в земле удаляется по каналам от резистора, что создает возмущения ЭМ полей. Частота синусоидального тока в источнике обычно составляет 0.1-10 Гц, поэтому глубины исследований могут достигать нескольких километров. Данный тип исследований иногда называют *seabed logging*. [7] [8] Чтобы продемонстрировать потенциал морских CSEM исследований для поиска УВ, применим моделирование и решим обратную задачу на синтетических данных.

Модель коллектора показана на рис. 12. Данные были созданы для 1 и 5 Гц и 9 приемников вдоль двух перпендикулярных линий. Источники расположены на ряде линий с востока на запад на удалении 500 м. Данные E_x для одного приемника показаны на рис. 13. Решение обратной задачи было выполнено с использованием того же кода, что и в примере с поиском минерального сырья. Простое сравнение наблюденных и рассчитанных данных приведено на рис. 13. На рис. 14 изображена восстановленная модель по решению обратной задачи, изображенная как значения и как изоповерхность. Присутствуют некоторые участки со средней электропроводностью в области над и под объектом, но общая форма и электропроводность объекта соблюдены.

Рис. 14 показывает, что в результате решения обратной задачи ЭМ зондирования морского дна можно установить геометрию коллектора и дать хорошую оценку сопротивления. Может быть получен еще лучший результат, если данные ЭМ зондирования опираются на данные, полученные в результате интерпретации данных сейсморазведки. В этом случае эти методы дополняют друг друга.

Итоговые комментарии

В данной статье мы сделали попытку продемонстрировать практическое применение решения обратных задач ЭМ зондирования в частотной области при поиске полезных ископаемых. Возможность решения обратной задачи означает, что нет больше необходимости получения данных, которые могут быть интерпретированы посредством карт данных или с помощью алгоритмов, подразумевающих упрощающие предположения, например, удаленность от источника. Это открывает возможности для экономически более выгодного планирования исследований. В частности, источники в типичных исследованиях CSAMT могут находиться ближе к исследуемой области чем раньше, таким образом, повышая соотношение сигнал/помеха и сокращая расходы. Кроме того, могут быть инвертированы отдельные поля.

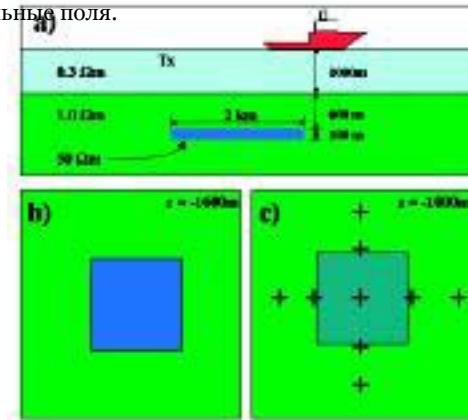


Рис. 12 Вид в плане и в разрезе синтетической модели. Расположение приемников на дне показано крестами. Обладающий сопротивлением объект показан синим. Глубина воды 0.3 км. Размеры коллектора 2 км x 2 км x 100 м

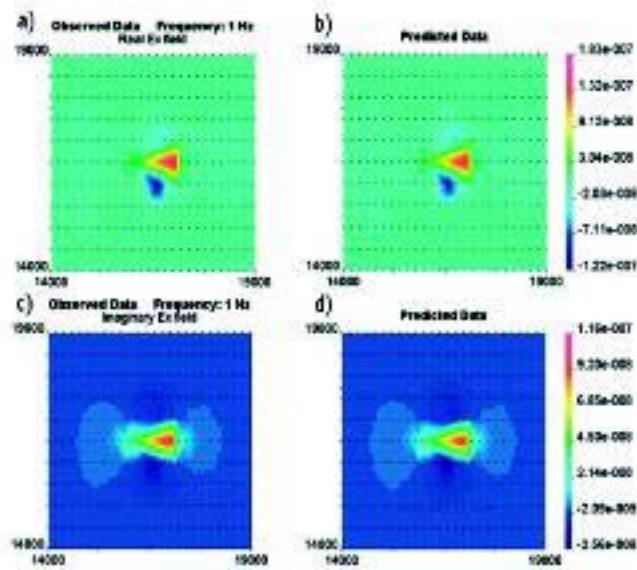


Рис. 13 Моделирование наблюдаемых данных для компоненты E_x отдельного приемника при частоте 1 Гц показано на рис. (a) и (c). Точкиами показаны расположения источника на линиях Восток-Запад. Расчетные данные от модели решения обратной задачи приведены на рис. (b) и (d).

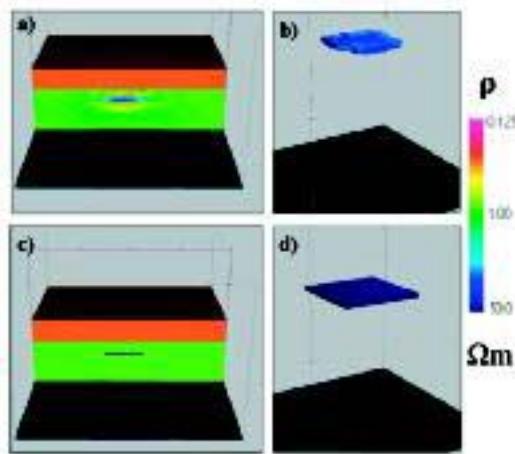


Рис. 14 Разрезы восстановленной и действительной моделей показаны на рис. (a) и (c) соответственно. Изоповерхности изображены на рис. (b) и (d).

Преимущества данной операции могут быть подробно исследованы, но принципиально больше информации можно получить отдельно из полей E и H , чем из их отношения.

В современных исследованиях измеряющих эти отдельные поля, необходимо отслеживать любые нормализации, чтобы по данным можно было построить адекватную модель. Неважно, каким полезным ископаемым посвящены поиски – минеральным ресурсам или УВ сырью, наше исследование показывает, что в результате измерений нескольких компонент поля во многих точках и на нескольких частотах получается большой объем трехмерной информации. Нам также

известна глубина исследований и количество структур, установленных в результате решения обратной задачи, которое в достаточной степени зависит от соотношения сигнал/помеха. Совмещение этих двух понятий приводит нас к выводу, что получение данных высокого качества на нескольких хорошо выбранных частотах может быть более эффективным, чем получение зашумленных данных для большого числа частот.

В заключение, подчеркнем, что решение 3D обратной задачи ЭМ зондирования в целях поиска полезных ископаемых не является простой задачей, и существует множество ситуаций, при которых обратная задача не может быть решена. Результаты высокого качества могут быть получены только путем использования хорошо спланированного стека процедур и с помощью взаимодействия между геологами и геофизиками и пониманием конечных целей.

Благодарности

Мы хотим поблагодарить Perry Eaton, Bob Anderson, Brock Bolin, и Lewis Teal из Newmont Mining corporation, предоставивших нам данные по месторождению Antonio и оказавших поддержку при интерпретации этих данных. Мы также благодарим Juiping Chen и Peter Lelievre за их содействие в работе с данными CSEM. Работа на UBC-GIF была поддержана TIME Consortium, членами которого в том числе являются Placer Dome, Teck-Cominco, Noranda-Falconbridge, Newmont Gold, INCO, ENI, Anglo-American и Rio Tinto.

Ссылки

- [1] Haber, E., Ascher, U., Aruliah, D., and Oldenburg, D. [2000] Fast modelling of 3D electromagnetic problems using potentials, *J. of Comp. Phys.*, **163**, 150-171.
- [2] Haber, E. and Ascher, U. [2001] Fast finite volume simulation of 3D electromagnetic problems with highly discontinuous coefficients. *SIAM J. Scient. Comput.*, **22**, 1943-1961.
- [3] Phillips, N., Oldenburg, D., Chen, J., Li, Y., and Routh, P. [2001] Cost effectiveness of geophysical inversions in mineral exploration: Applications at San Nicolas. *The Leading Edge*, **20**, 12, 1351.
- [4] Oldenburg D.W., Li Y., Farquharson C.G., Kowalczyk P., Aravanis T., King A., Zhang P., and Watts A. [1998] Applications of Geophysical Inversions in Mineral Exploration Problems. *The Leading Edge*, **17**, 461-465.
- [5] Haber, E., Ascher, U., and Oldenburg, D. [2004] Inversion of 3D electromagnetic data in frequency and time domain using an inexact all-at-once approach. *Geophysics*, **69**, 1216-1228.
- [6] Oldenburg, D., Shekhtman, R., Eso, R., Farquharson, C.G., Eaton, P., Anderson, B., and Bolin, B. [2004] Closing the gap between research and practice in EM data interpretation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1179-1182.
- [7] Ellingsrud, S., Eidesmo, T., Johansen, S., Sinha, M.C., MacGregor, L.M., and Constable, S. [2002] Remote sensing of hydrocarbon layers by seabed logging (SBL): Results from a cruise offshore Angola. *The Leading Edge*, **21**, 10, 972-982.
- [8] Johansen, S., Amundsen, H.E.F., Rsten, T., and Ellingsrud, S. [2005] Subsurface hydrocarbons detected by electromagnetic sounding. *First Break*, **23**, 3, 31-36