

Сравнение трёхмерной инверсии электромагнитных данных, полученных буксируемой косой, с данными CSEM при модельных исследованиях месторождения Хардинг

Michael S. Zhdanov^{1,2}, Chris Anderson³, Masashi Endo¹, Leif H. Cox¹, Martin Čuma^{1,2}, Glenn A. Wilson^{1,*}, Noel Black¹ и Alexander V. Gribenko^{1,2} представляют предварительное изучение проблем, связанных с проверкой достоверности морских электромагнитных (EM) данных, полученных с помощью буксируемой приёмной косы (разрабатывается в настоящее время), и сравнивают результаты с существующей морской технологией донных контролируемых источников (CSEM).

Предпосылкой для создания различных морских электромагнитных методов с контролируемым источником (CSEM) является чувствительность к латеральной протяженности и мощности резистивных тел, погруженных в проводящую среду. За последнее десятилетие съёмки для методов CSEM использовалась расстановка с расположенными на морском дне приёмниками и буксируемыми генераторами. Они применялись для снижения рисков поисковых и оценочных проектов при прямом обнаружении углеводородов. До настоящего времени наиболее успешным было применение методов CSEM в качестве дополнения к сейсмической интерпретации там, где изменения литологии или флюидов невозможно обнаружить одними только сейсмическими методами (например, Hesthammer et al., 2010). Однако относительно высокая стоимость съёмок представляет собой серьёзное препятствие для широкого использования традиционной технологии CSEM, особенно в слабоизученных бассейнах. В связи с этим недавно была разработана буксируемая кабельная система, способная обеспечивать одновременное получение сейсмических и электромагнитных (EM) данных, она прошла испытания в Северном море (Anderson and Mattsson, 2010; Mattsson et al., 2010; Linfoot et al., 2011; McKay et al., 2011) (рис. 1). Такая конфигурация движущейся платформы позволяет получать электромагнитные данные на очень больших площадях как в малоизученных, так и в «зрелых» бассейнах с большей производительностью и меньшими затратами по сравнению с традиционными методами CSEM.

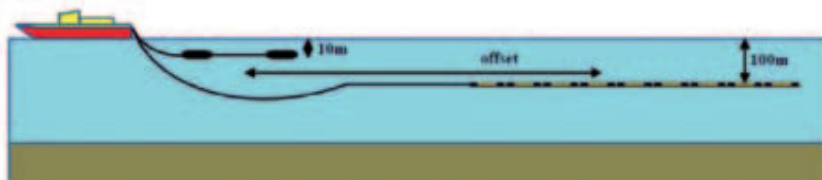


Рис. 1. Схематическое представление электроразведочной системы донной косы с одним генератором, буксируемой на глубине 10 м от поверхности моря, и приёмниками с различными удалениями от косы, номинально буксируемой на глубине 100 м от поверхности моря.

В поисково-разведочных проектах запасы и ресурсы углеводородов оценивают с различной достоверностью на основании объёмных прогнозов по разным трёхмерным моделям геологической среды и сценариям. Количественная интерпретация электромагнитных данных изначально базируется на трёхмерных моделях геологической среды, получаемых с помощью инверсии, поскольку эти данные невозможно просто разделять или трансформировать при помощи линейных операторов, как это делается в сейсмических методах. Однако инверсия данных CSEM осложняется очень слабыми, неоднородными и нелинейными сигналами от содержащих углеводороды пластов резервуара по

¹ TechnoImaging, 4001 South, 700 East, Suite 500, Salt Lake City UT 84107, USA.

² The University of Utah, 1450 East, 100 South, Salt Lake City UT 84102, USA.

³ Petroleum GeoServices, 4 The Heights, Brooklands, Weybridge, Surrey, KT13 0NY, UK

* Автор для переписки. E-mail: glenn@technoimaging.com



сравнению с измеренным полным полем. Более того, трёхмерная инверсия данных электромагнитной съёмки с буксируемой косой представляет значительную трудность из-за повышенного масштаба съёмок, потребности в моделях с высокой разрешающей способностью и значительного количества пар источник-приёмник.

Инверсия электромагнитных данных с буксируемой косой

Традиционные крупномасштабные съёмки CSEM могут включать порядка сотен фиксированных приёмников и порядка тысяч положений генератора. В традиционном трёхмерном моделировании и инверсии CSEM для сведения к минимуму рассматриваемых членов, связанных с источниками, которые необходимо найти, обычно используется принцип взаимности (Zhdanov et al., 2011). Съёмки EM с буксируемыми косами могут включать тысячи положений генератора и тысячи положений приёмников. Ради повышения эффективности вычислений нельзя пользоваться принципом взаимности. В этом отношении электромагнитные съёмки с буксируемой косой аналогичны аэро-электроразведочным съёмкам (АЕМ) — они включают движущиеся пары генератор-приёмник. В соответствии с недавними нашими разработками, результатом которых стала первая практическая крупномасштабная методология трёхмерной АЕМ-инверсии (Cox et al., 2010), мы можем использовать тот факт, что суммарный объём чувствительной области буксированных электроразведочных систем значительно ниже, чем размер площади съёмки: мы вводим понятие подвижной области чувствительности. То есть для данной пары генератор-приёмник сигналы и производные Фреше рассчитываются по трёхмерной модели геологической среды, которая включает чувствительность электроразведочной системы с буксируемой косой. Далее строится разреженная (в отличие от полной) матрица Фреше для всей модели геологической среды как суперпозиция производных Фреше для всех интегрированных областей чувствительности (рис. 2). В результате можно на несколько порядков снизить требования к памяти и вычислительным мощностям. Например, количество ненулевых элементов в каждой строке матрицы Фреше — это количество ячеек в каждой области чувствительности (от тысяч до десятков тысяч), а не общее количество ячеек в трёхмерной модели геологической среды (порядка нескольких миллионов). Так, например, эта концепция подвижной области чувствительности дала нам возможность выполнить инверсию данных АЕМ от сотен тысяч положений генератора в трёхмерной модели геологической среды с более чем 15 миллионами ячеек.

Наше моделирование в частотной области основано на методе интегрального уравнения свёртки (IE) (Hursán and Zhdanov, 2002). На практике при инверсии в подвижной области чувствительности имеется несколько явных преимуществ использования метода IE в отличие от методов конечных разностей, конечного объёма и конечного элемента. Во-первых, не требуется рассчитывать тензоры Грина и фоновые электрические поля на удалении от области чувствительности буксированной электроразведочной системы, при этом в области чувствительности соблюдаются все граничные условия. Во-вторых, тензоры Грина по отдельным телам могут вычисляться для области чувствительности заранее и распространяться на всю трёхмерную модель геологической среды. В-третьих, можно записать интегральное уравнение для прямого нахождения полного электрического поля в трёхмерной модели геологической среды с сохранением распределённого члена источников. В-четвёртых, интегральное уравнение можно выразить в виде свёртки, что позволяет выполнять умножение FFT-матрицы на вектор для уменьшения сложности вычислений в методах подпространства Крылова от $O(n^2)$ до $O(n \log n)$. В-пятых, производные Фреше можно точно рассчитать с небольшими затратами, применяя квази-аналитические методы. В-шестых, не требуется сопоставлять пары генератор-приёмник с позициями, границами или центрами сетки. И, наконец, на практике можно обобщить связанное с областью индексирование чувствительности, чтобы включить дискретизацию частотно-зависимой модели и дискового пространства. Для EM во временной области отклики системы и производные Фреше можно получить, применяя преобразование Фурье к откликам и производным Фреше в частотной области.

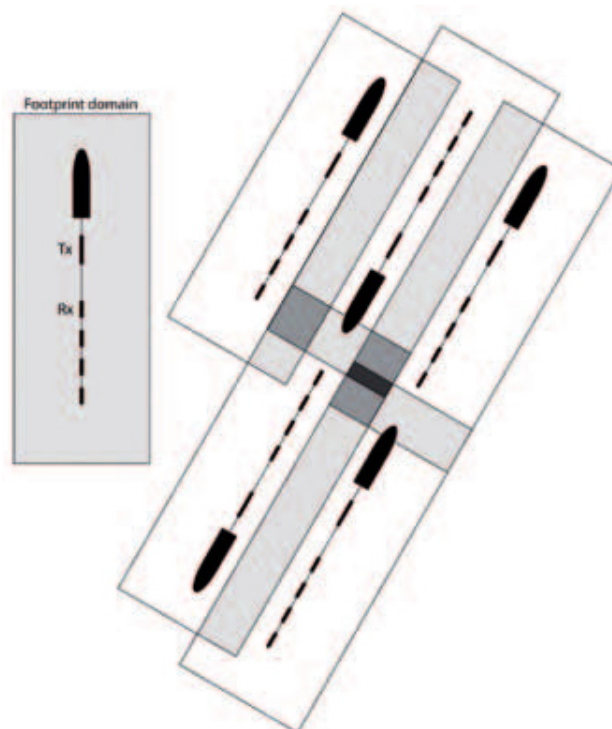


Рис. 2. Горизонтальная проекция нескольких областей чувствительности EM с буксируемыми косами, наложенных на аналогичную трёхмерную модель геологической среды. Более тёмные области обозначают более высокую кратность разных областей чувствительности.

Мы используем регуляризованный метод сопряжённых градиентов с изменением весов для минимизации параметрического функционала Тихонова, который включает фокусирующую регуляризацию (Zhdanov, 2002). Как показано Zhdanov и др. (2011), фокусирующая регуляризация требуется для восстановления трёхмерных моделей сопротивлений с резкими контрастами, например между заполненным углеводородами резервуаром и вмещающими породами. Традиционные методы гладкой регуляризации стремятся занизить оценку модели трёхмерных сопротивлений с излишне гладкими моделями. Кроме того, Zhdanov и др. (2011) показали, что фокусирующая регуляризация может повысить сходимость инверсии по сравнению с гладкой регуляризацией.

Модельные исследования: месторождение Хардинг в Северном море

Хардинг — это нефтегазовое месторождение средних размеров, занимающее около 20 км² и расположенное в блоке 9/23В английского сектора Северного моря примерно в 320 км к северо-востоку от Абердина. Коллекторы месторождения характеризуются высокой песчаностью, высоким качеством эоценовых песчаников Balder, залегающих на глубине около 1700 м ниже дна моря (глубина моря 110 м). Добыча началась в 1996 г. с центрального и южного резервуаров месторождения Хардинг при начальных геологических запасах 300 млн. барр н.э. С тех пор были разработаны два следующих резервуара: юго-восточный Хардинг и северный Хардинг с наклонно-направленным бурением. Резервуары содержат газ, он закачивается обратно в газовую шапку для последующей добычи. Добыча нефти в настоящее время снижается, она составляет приблизительно 10 000 барр/сут с увеличивающимся заводнением. Остаточная залежь углеводородов состоит из газовой шапки мощностью примерно 100 м и маломощной нефтяной оторочки мощностью примерно 20 м (Ziolkowski et al., 2010).

Модели пористости и флюидонасыщения центрального Хардинга были получены в результате адаптированного к данным разработки гидродинамического моделирования на основании данных добычи, каротажа и интерпретации трёхмерных сейсмических данных. Анализ керна показывает, что песчаники Balder в резервуаре Хардинга чистые, поэтому для установления связи петрофизических свойств и сопротивлений пригоден закон Арчи. Кривые сопротивлений по скважине 9/23В-7 показали значения сопротивлений выше 1200 Ом-м в интервалах сухого газа. В действительности в некоторых

Электромагнитный и другие перспективные методы

интервалах сопротивления могут превышать 1200 Ом-м, но ограниченные пределы откликов сопротивлений по CSEM означают, что их истинные значения в данных CSEM неразличимы. По Ziolkowski и др. (2010), наша трёхмерная модель сопротивлений состоит из толщи воды мощностью 110 м с сопротивлением 0,3 Ом-м, перекрывающей другое однородное полупространство с сопротивлением 1,0 Ом-м, в котором заключена модель резервуара Хардинг (рис. 3а).

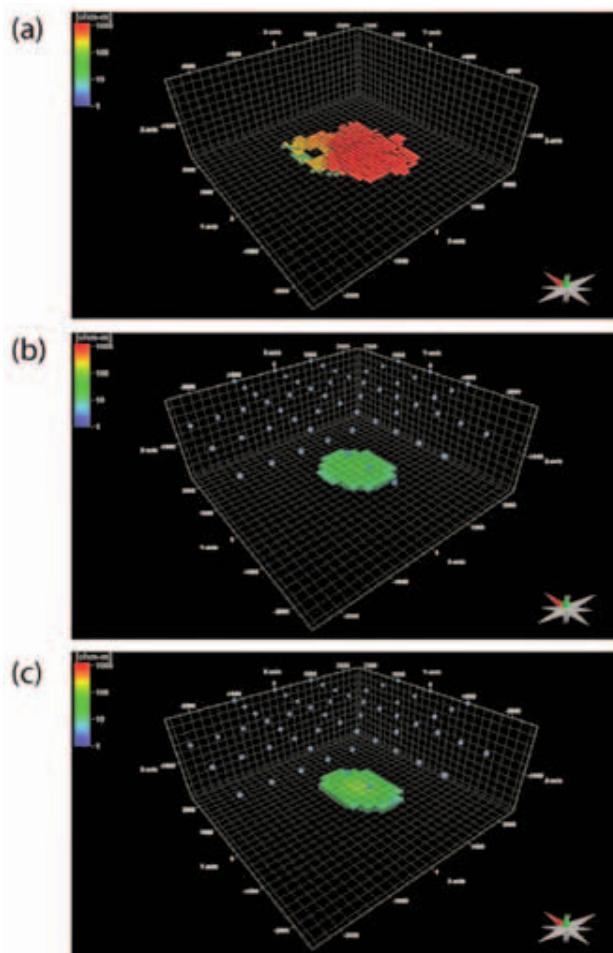


Рис. 3. (а) Трёхмерное изображение модели резервуара Центральный Хардинг с вынесенными значениями сопротивлений, превышающих 10 Ом-м. (б) Трёхмерное изображение модели резервуара Центральный Хардинг, полученное по трёхмерной инверсии данных CSEM с буксируемой косой, с вынесенными значениями сопротивлений выше 10 Ом-м. Голубые точки обозначают разные положения генераторов. (с) Трёхмерное изображение модели резервуара Центральный Хардинг, полученное по трёхмерной инверсии данных традиционного метода CSEM, с вынесенными значениями сопротивлений выше 10 Ом-м. Голубые точки обозначают разные положения донных приёмников.

Электромагнитная съёмка с буксируемой косой включала 6 профилей наблюдения: три, ориентированные в меридиональном направлении, и три — в широтном. Расстояние между профилями составляет 1 км. Каждый профиль содержал 44 пары генератор-приёмник с расстоянием между ними 500 м (всего 264). Электромагнитная система с буксируемой косой включала 300-метровый электрический дипольный генератор, буксируемый на глубине 10 м ниже поверхности моря, и линии электрических приёмников, буксируемых на глубине 50 м с выносами 1325 м, 1850 м., 2025 м и 2545 м. Моделировались данные для частот 0,10 Гц, 0,25 Гц и 1,00 Гц. Для инверсии данные были ограничены значениями выше соответствующего порога помех.



Электромагнитный и другие перспективные методы

Для сравнения, традиционная съёмка CSEM состояла из шести профилей наблюдения с такой же ориентацией (три — с севера на юг, три — с запада на восток). Традиционная съёмка CSEM располагалась там же, где и электромагнитная съёмка с буксируемой косой. Расстояние между линиями составляло 1 км. Каждая линия содержала 11 приёмников с расстоянием 500 м между ними, всего было 66 приёмников. Данные моделировались для выносов 5500 м вдоль профиля и вертикального электрического поля и поперечных магнитных полей на частотах 0,10 Гц, 0,25 Гц, 0,50 Гц и 0,75 Гц. Для инверсии данные были ограничены значениями выше соответствующего порога помех. Инверсия традиционных данных CSEM выполнялась с использованием метода итеративной миграции, описанного в работе Zhdanov et al. (2011).

Для сравнения трёхмерных инверсий данных традиционного метода CSEM и электромагнитной съёмки с буксируемой косой использовали общую трёхмерную модель геологической среды. Эта модель состоит из толщи воды мощностью 110 м с сопротивлением 0,3 Ом-м, залегающей на однородном полупространстве с сопротивлением 1,0 Ом-м. Область трёхмерной инверсии разбили на ячейки размером 200 × 200 × 20 м. Априорную модель не использовали, инверсия была не ограничена. Результаты трёхмерной инверсии данных электромагнитной съёмки с буксируемой косой показаны на рис. 3b (нанесены также положения генераторов). Результаты трёхмерной инверсии данных традиционной съёмки CSEM показаны на рис. 3c (нанесены также положения приёмников). Можно видеть, что результаты инверсии данных EM с буксируемой косой и данных традиционной CSEM довольно похожи. Для всех целей и задач результаты можно считать эквивалентными.

Выводы

Избавляя от необходимости размещения приёмников на дне моря, система электромагнитной съёмки с буксируемой косой позволяет получать данные CSEM одновременно с сейсмическими данными на больших площадях как в хорошо изученных, так и малоизученных бассейнах с более высокой производительностью и относительно более низкими затратами, чем при использовании традиционных методов CSEM. Слишком большой объём данных представляет проблему для существующих методов трёхмерной инверсии данных CSEM. Исходя из этого, мы представляем практическую методологию крупномасштабной трёхмерной инверсии электромагнитных данных с буксируемой косой, которая основана на подвижной области чувствительности. Мы продемонстрировали её на модельных исследованиях для месторождения Хардинг в английском секторе Северного моря. Мы сравнили трёхмерную инверсию синтетических электромагнитных данных, полученных буксируемой косой, с инверсией синтетических данных традиционной CSEM и получили сходство между трёхмерными моделями сопротивлений. Это доказывает, что электромагнитные данные, полученные с помощью буксируемых кос, могут адекватно отображать углеводородные поисковые объекты среднего размера на глубинах около 2 км.

Благодарности

Авторы благодарят компанию TechnoImaging and Petroleum GeoServices (PGS) за поддержку при проведении этих исследований и разрешение на публикацию. Zhdanov и Cuma благодарят Консорциум по электромагнитному моделированию и инверсии (CEMI) и Центр высокопроизводительных вычислений Университета штата Юты. Трёхмерные модели сопротивлений месторождения Хардинг были разработаны в рамках совместного исследовательского проекта PGS, BP и министерства торговли и промышленности Великобритании (ныне министерство предпринимательства, промышленности и управленческих реформ). Выражаем благодарность компаниям BP и Maersk, операторам месторождения Хардинг, за модель резервуара Хардинг. Благодарим проф. Bruce Hobbs и Ed Morris за помощь при работе с моделями резервуара Хардинг.

Список литературы

- Anderson, C. and Mattsson, J. [2010] An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. *First Break*, **28**(5), 71–75.
- Cox, L.H., Wilson, G.A. and Zhdanov M.S. [2010] 3D inversion of airborne electromagnetic data using a moving footprint. *Exploration Geophysics*, **41**, 250–259.



- Hesthammer, J., Stefatos, A., Boulaenko, M., Fanavoll, S. and Danielsen, J. [2010] CSEM performance in light of well results. *The Leading Edge*, **29**, 34–41.
- Hursán G. and Zhdanov M. S. [2002] Contraction integral equation method in three-dimensional electromagnetic modeling. *Radio Science*, **37**(6), 1089. doi: 10.1029/2001RS002513.
- Linfoot, J.P., Clarke, C., Mattsson, J. and Price, D. [2011] Modeling and analysis of towed EM data - An example from a North Sea field trial. *73rd EAGE Conference and Exhibition*, Vienna.
- Mattsson, J.M., Lund, L.L., Lima, J.L., Englemark, F.E. and McKay, A.M. [2010] Case study – A towed EM test at the Peon discovery in the North Sea. *72nd EAGE Conference and Exhibition*, Barcelona.
- McKay, A., Clarke, C., Linfoot, J. and Mattsson, J. [2011] Interpretative quality control of towed EM data - Examples from the North Sea. *73rd EAGE Conference and Exhibition*, Vienna.
- Ziolkowski, A., Parr, R., Wright, D., Nockles, V., Limond, C., Morris, E. and Linfoot, J. [2010] Multi-transient electromagnetic repeat- ability experiment over the North Sea Harding field. *Geophysical Prospecting*, **58**, 1159–1176.
- Zhdanov, M.S. [2002] *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems*. Elsevier, Amsterdam.
- Zhdanov, M.S., Čuma, M., Wilson, G.A., Velikhov, E.P., Black, N. and Gribenko A. [2011] Iterative electromagnetic migration for 3D inversion of marine CSEM data. *Geophysical Prospecting*, **59**, 1101–1113.