

## Массивно-параллельное построение изображений залежей углеводородов по данным электроразведки с использованием суперкомпьютера IBM Blue Gene. Massively parallel electrical conductivity imaging of hydrocarbons using the IBM Blue Gene/L supercomputer

Michael Commer,<sup>1\*</sup> Gregory A Newman,<sup>1</sup> James J. Carazzone,<sup>2</sup> Thomas A. Dickens,<sup>2</sup> Kenneth E. Green,<sup>2</sup> Leslie A. Wahrmund,<sup>2</sup> Dennis E. Willen,<sup>2</sup> и Janet Shiu<sup>3</sup> обсуждают практическое решение проблемы построения 3D изображения данных измерений полей активных источников электромагнитных излучений с использованием сверхмощного компьютера IBM. Версия этой статьи издана в IBM (Journal of Research and Development), том 52(1/2), 2008.

**П**остроение крупномасштабного трехмерного изображения по данным электромагнитной разведки (CSEM) для картирования потенциальных морских нефтяных и газовых залежей в настоящее время привлекает большое внимание. Чтобы справиться с типично обширными вычислительными потребностями задачи создания 3D изображения CSEM, наши методики разрабатывают параллельный принцип вычисления и оптимизированное конечно-разностное объединение. Мы сообщаем об опыте создания изображения, использующего 32,768 программных модуля (и программ обработки) на сверхмощном компьютере IBM Blue Gene/L (BG/L), установленного в Научно-Исследовательском Центре IBM T. J. Watson.

Мы получили возможность в течение 24 часов создать изображение массива данных крупномасштабной морской съемки CSEM, для чего раньше требовалось более четырех месяцев работы на 1024-узловом кластере с межузловым соединением InfiniBand. Суммарные начальные погрешности согласования данных могут быть уменьшены на 67% в течение 72 итераций преобразования, что позволило обнаружить наличие области с повышенным сопротивлением в южном районе съемки на глубине 1500 м под морским дном. В невязки наибольший вклад вносят параллельные источникам компоненты приёмников, которые имеют смещение относительно траектории движения передатчиков (система наблюдений с поперечным выносом источника или приёмника). Моделирование подтверждает, что улучшенные совпадения данных системы с поперечным выносом источника/приёмника могут быть получены при учете анизотропии удельной электропроводности. Между тем, обеспечивая удовлетворяющее требованиям крупномасштабное изображение для интересующих исследователя глубин, эксперимент дает важное доказательство необходимости различать горизонтальные и вертикальные компоненты электропроводности для наиболее согласованной 3D инверсии данных CSEM.

### Введение

Сейсмические методы имеют длительную и общепризнанную историю применения в разведке углеводородов и являются очень эффективными при картировании геологических формирований коллекторов. Однако, эти методы не годятся для распознавания разнообразных типов флюидов коллекторов, содержащихся в поровом пространстве пород, таких как рассолы, вода, нефть и газ. Эта задача распознавания способствует разработке новых геофизических методологий, которые совместно с

широко известными сейсмическими методами могут быть использованы для непосредственного отображения типа флюидов. Одна из новых многообещающих технологий использует низкочастотные электромагнитные поля (ЕМ) для картирования вариаций подповерхностной удельной электропроводности,  $\sigma$  (в единицах сименс на метр), или ее обратной величины ( $1/\sigma$  в омметрах), обычно называемой удельным сопротивлением, на нефте- и газоперспективных площадях (Eidesmo et al. 2002; Ellingsrud et al., 2002; Macgregor and Sinha, 2000; Srnka et al., 2006; Constable, 2006).

Удельное сопротивление является более выразительным количественным параметром для построения изображения залежей углеводородов. Увеличение удельного сопротивления, сопоставленное с геологической формацией, может непосредственно указывать на существование потенциальных коллекторов. Данные измерения электромагнитных полей показали, что оно очень чувствительно к изменениям типов поровых флюидов и локализации углеводородов, давая значительный скачок удельного сопротивления между углеводородами и флюидами, такими как рассолы или вода.

В методике измерения CSEM используется буксируемый погруженный датчик с электрическим диполем, излучающий непрерывный низкочастотный (~0.1 до 10 Гц) сигнал ЕМ, который измеряется на морском дне детекторами электрического и магнитного поля. При этом, боковой вынос детекторов может достигать 15 км. Данные первоначально накапливаются во временной области. Преобразование в частотную область включает применение функционального окна с характеристиками, определенными собственной частотой сигнала, которая в современной съемке составляет 0.125 Гц. Для распространения на большие глубины обычно используются при съемке датчики с множественными частотами возбуждения. Как и в случае распространения акустической волны, степень затухания, как функция глубины исследования, увеличивается с ростом частоты волны. Современные технологии требуют для получения информации о глубинах до 4 км применения низкочастотных электромагнитных сигналов (<1 Гц).

В настоящее время разведка методом CSEM при поисках углеводородов распространяется в область довольно сложных геологических условий морской съемки. Геометрия коллекторов по существу является трехмерной и чрезвычайно сложна для картирования без помощи анализа 3D ЕМ изображений, требующих высокоточную параметризацию модели, увеличение плотности измерений и многокомпонентную регистрацию. Задача создания 3D изображения, которая в этой статье относится к инверсионной задаче, как правило, требует больших вычислительных ресурсов, обусловленных дорогостоящим в вычислительном отношении решением задачи последующего моделирования, то есть имитационного

<sup>1</sup> Lawrence Berkeley National Laboratories, Berkeley, California 94720.

<sup>2</sup> ExxonMobil Upstream Research Company, Houston, Texas 77252.

<sup>3</sup> IBM Deep Computing Group, Two Riverway, Houston, Texas 77056.

\* Corresponding author, E-mail: MCommer@lbl.gov.

## Визуализация/Интерпретация

моделирования поля ЕМ на 3D конечно-разностной (FD) сетке. Более того, огромные объемы данных требуют много последующих решений по схеме итеративной инверсии. Поэтому мы разработали алгоритм построения изображения, который использует два уровня параллелизма, один, применяемый к моделируемому объему (или объему изображения), и другой, применяемый к объему исходных данных. Алгоритм допускает обработку произвольных объемов исходных данных, предусматривая использование неограниченно большого количества параллельных процессов при минимизации числа передающихся между процессами сообщений. Кроме того, мы разработали оптимальные процедуры построения сеток, которые позволили нам отделить пространственные сетки от сети моделирования. Это позволило добиться существенного ускорения моделирования трёхмерных электромагнитных полей, что напрямую влияет на время решения задачи построения трехмерного изображения.

В этой работе мы представляем исследование по построению изображения с использованием 32,768 программных модулей на сверхмощном компьютере IBM Blue Gene/L (BG/L) в научно-исследовательском центре IBM T. J. Watson. Новизна этого эксперимента заключается как в плане использования вычислительных ресурсов, так и в плане объемов обрабатываемых данных. Наша основная цель заключалась в том, чтобы дать обоснованное исследование эффективности разработанного алгоритма. Более того, полученные результаты помогут также в проектировании предстоящих крупномасштабных съемок CSEM и усовершенствовании метода автоматического построения изображений, используемых для интерпретации.

## Постановка задачи

Мы формулируем инверсионную задачу, упомянутую во введении, как задачу нахождения модели  $\mathbf{m}$  из  $\mathbf{m}$  частей с постоянными параметрами удельной электропроводности, которые описывают модели среды, воспроизводящие представленный массив данных. Таким образом, алгоритм инверсии минимизирует следующий функционал погрешности:

$$\Phi = \frac{1}{2} [\mathbf{D}(\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{d}^{\text{p}})]^T [\mathbf{D}(\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{d}^{\text{p}})] + \frac{1}{2} \lambda (\mathbf{W}\mathbf{m})^T (\mathbf{W}\mathbf{m}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{T}$  обозначает оператор преобразования, а  $\mathbf{T}^*$  обозначает эрмитово сопряженный оператор. В вышеприведенном выражении прогнозные векторы данных (рассчитываемые по

стартовой модели) и векторы наблюдаемых данных обозначены  $\mathbf{dp}$  и  $\mathbf{dobs}$ , соответственно, где каждый имеет  $n$  комплексных компонент. Эти векторы состоят из значений электрического и магнитного полей, определенных в точках измерения, где прогнозные данные определяются путем решения гармонических по времени трехмерных уравнений Максвелла в диффузной аппроксимации. В функционал погрешности мы также ввели диагональную весовую матрицу  $\mathbf{D}n \times n$ , чтобы компенсировать помехи измерений. Чтобы стабилизировать минимизацию уравнения (1) и уменьшить кривизну модели в трехмерном пространстве, мы ввели матрицу  $\mathbf{W}m \times m$ , основанную на FD аппроксимации оператора Лапласа ( $\nabla^2$ ) в декартовых координатах. Параметр  $\lambda$  пытается скомпенсировать погрешность измерений и ограничить гладкость (однородность) модели.

## Прямая задача

В рамках алгоритма решения обратной задачи прямая задача решается многократно для вычисления электромагнитного поля, обозначенного вектором  $\mathbf{E}$ , и, таким образом, данными  $\mathbf{dp}$  для заданной модели  $\mathbf{m}$ . Распространение электромагнитной волны описывается векторным уравнением Гельмгольца

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mu_0\sigma\mathbf{E} = -i\omega\mu_0\mathbf{J}, \quad (2),$$

где вектор источника, магнитная проницаемость свободного пространства и угловая частота обозначаются  $\mathbf{J}$ ,  $\mu_0$ , и  $\omega$ , соответственно (см. Alumbaugh et al., 1996, для детального рассмотрения). Наш метод решения базируется на рассмотрении того, что число модельных параметров, требуемых для моделирования реального трехмерного распределения удельной электропроводности  $\sigma$  может обычно превосходить 10<sup>7</sup>. Схемы моделирования FD идеально удовлетворяют требованиям нашей задачи и могут проводиться параллельно с выполняемыми вручную крупномасштабными задачами, которые не могут быть иначе обработаны (Alumbaugh et al., 1996). После построения аппроксимации уравнения (2) на равномерной сетке при определенном значении угловой частоты с использованием конечных разностей и устранения магнитного поля, мы получаем следующую линейную систему для электрического поля:

$$\mathbf{KE} = \mathbf{S}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{K}$  – разреженная комплексная симметричная матрица с 13 ненулевыми значениями в каждой строке (Alumbaugh et al., 1996). Диагональные элементы матрицы  $\mathbf{K}$  зависят в явной форме от искомых параметров электропроводности, чтобы оценить весь инверсионный процесс. Поскольку электрическое поле  $\mathbf{E}$  также зависит от электропроводности, обратная задача становится нелинейной. Поля возбуждения, генерированные при помощи петлевых или проводных источников, расположенных в

## Визуализация/Интерпретация

моделируемой области, описываются дискретным вектором источника  $S$  и включают граничные условия Дирихле, налагаемые на задачу. Чтобы избежать излишнего сгущения вблизи источника, мы предпочитаем представление разреженного поля в решении прямой задачи. В этом случае  $E$  заменяется на  $E_s$  в уравнении (3). Член уравнения, отвечающий за источник для данного генератора, будет теперь зависеть от разницы между 3D моделью электропроводности и простой фоновой моделью, взвешенной при помощи фонового электрического поля  $E_b$ , где  $E = E_b + E_s$ . Простые фоновые модели с одномерным (1D) распределением электропроводности, т. е. модели, в которых  $\sigma$  изменяется только с глубиной, используются благодаря существующим быстрым полуаналитическим решениям для  $E_b$ . Получив решение для электрического поля по уравнению (3), магнитное поле может быть легко определено по численной реализации закона Фарадея. Процесс эффективного решения является первостепенным. Мы решаем уравнение (3) до достижения заданного заранее уровня погрешности, применяя итеративные методы Крылова (Krylov) для полупространства, использующие либо схему сопряженных градиентов (BICG), либо схему квази-минимальной разности (остатка) (quasi-minimum residual - QMR) с предварительной обработкой данных (Alumbaugh et al., 1996).

**Процедура минимизации**

В крупномасштабных нелинейных инверсионных задачах, какие рассматриваются здесь, мы минимизируем уравнение (1), используя алгоритмы оптимизации, основанные на градиентах, поскольку эти алгоритмы отличаются минимальными требованиями к памяти и вычислительным ресурсам. Мы характеризуем эти методы как методы, основанные на градиентах, так как они используют в процессе минимизации только информацию о первых производных функционала погрешности, в частности –  $\nabla \phi$ . Градиентные методы включают метод наискорейшего спуска, методы нелинейных сопряженных градиентов и Ньютоновские методы с ограниченной памятью. Последние обычно позволяют достичь наилучшей сходимости за счёт повышенных требований к вычислительным ресурсам. Методы ускорения сходимости обсуждались в работе Newman и Boggs, 1994, где также приводится подробный вывод уравнений градиентов и эффективных вычислительных схем для них. В данной работе мы делаем упор на методе минимизации при помощи нелинейных сопряженных градиентов (NLCG), как компромиссном между увеличением скорости сходимости вычислений и вычислительным объемом работ при инверсионном последовательном приближении.

**Использование параллелизма решения**

Чтобы дать реальное изображение находящихся под поверхностью горизонтов по обширным областям съемки с достаточной степенью разрешения и детальности, массивы данных CSEM могут содержать до нескольких сотен комплектов датчик-приемник, работающих на различных частотах с пространственным покрытием более 1000 км<sup>2</sup>. Такие объемы требуют тысячи решений прямых задач только для одного эксперимента построения изображения. Следовательно, решение трёхмерных обратных задач требуют больших вычислительных ресурсов. Чтобы справиться с этой задачей, наш алгоритм использует два уровня распараллеливания, один по области моделирования и другой по всему объему данных.

Сначала, решая прямую задачу в распределённой среде, мы разбиваем конечно-разностную решётку, а не матрицу, по прямоугольной сети процессоров, которую называем локальным коммуникатором (LC). По мере того, как находится итеративное приближение решения линейной системы, для которого вычисляются матричные произведения

на каждом узле, компоненты вектора решения на каждой итерации процесса Крылова, не имеющиеся на каждом процессоре, должны быть пропущены через LC для завершения вычисления матричных произведений. Требуются дополнительные общие коммуникаторы для завершения вычисления скалярных произведений на каждом шаге итераций процесса Крылова. Время вычислений линейно возрастает с увеличением числа параллельных процессов, вплоть до точки, в которой расходы на передачу сообщений начинают превалировать. В работе Alumbaugh et al. (1996) приводятся данные о зависимости скорости вычислений с плавающей точкой от размера передаваемых сообщений для архитектуры Intel Paragon.

Чтобы иметь возможность одновременно рассчитывать большое число прямых задач, мы применяем множественные LC, соединённые через управляющие процессоры так, что каждому LC соответствует один управляющий процесс. Топология группы управляющих процессоров определяет коммуникатор, на котором выполняется итеративный процесс инверсии методом NLCG. Этот коммуникатор далее называется глобальным коммуникатором (GC). Это распределение процессов решения прямых задач (декомпозиция данных) обладает высокой степенью параллелизма. Предполагая, что оценен оптимальный размер LC для заданных размеров пространственных сеток, размер GC (который равен числу LC) может быть линейно увеличен в зависимости от объема данных. Относительное количество коммуникаторов в GC остается постоянным, так как коммуникация внутри GC необходима только для выполнения нескольких скалярных произведений на итерацию инверсии и для суммирования вкладов каждого LC в глобальный вектор градиентов. Основная вычислительная и коммуникативная нагрузка выпадает на фазу расчёта прямой конечно-разностной задачи. Как описывается ниже, мы подбираем размеры конечно-разностных сеток в соответствии с заданными конфигурациями системы датчик-приемник и требованиями минимизации пространственного разрешения. Чтобы сбалансировать вычислительную и коммуникативную нагрузки между всеми LC, декомпозиция данных основывается на сбалансированном распределении сеток FD по их размерам.

**Выбор оптимальных сеток**

Хотя наше исследование, использующее два уровня параллелизма, удовлетворительно для решения очень больших задач, мы должны получить более высокий уровень эффективности. Один из многообещающих подходов, который мы ранее докладывали (Commer and Newman, 2006), состоит в том, чтобы создать оптимальную FD сеть моделирования для каждого источника возбуждения в уравнении (3). Конечно-разностная сетка строится только для той части общего объема модели, которая может оказывать существенное влияние на построение изображения. Более того, минимальный шаг сетки определяется длиной волны электромагнитного поля и, следовательно, может быть оптимизирован в соответствии с частотой конкретного источника возбуждения. Выбирая оптимальный размер сетки и пространственное разрешение, мы создаем набор сеток,  $\Omega_s$ , который поддерживает модельное электромагнитное поле для всех различных источников, содержащихся в исходном массиве данных. Все сетки для моделирования являются подсетками общей сетки,  $\Omega_m$ , которая определяет размер изображения. Оба типа сеток являются прямоугольными с совпадающими направлениями осей. Для разделения сеток очень важно построить правильную схему отображения свойств среды между  $\Omega_m$  и  $\Omega_s$ . Процесс составления изображения дает кусочно-постоянные оценки электрической проводимости, которые определены ячейками  $\Omega_m$ . С другой стороны, скользящая FD

## Визуализация/Интерпретация

сетка  $\Omega_s$  включает в себя располагающиеся на краях направленные проводимости, необходимые для создания матрицы жесткости  $K$  в уравнении (3) (см. также Alumbaugh, 1996; Newman и Alumbaugh, 1997 для более детального рассмотрения).

В случае если  $\Omega_m = \Omega_s$ , проводимость на краю,  $\sigma^e$ , рассчитывается из соотношения  $\sigma^e = \sum_{i=1}^4 \sigma_i \omega_i$  с

$\omega_i = dV_i / \sum_{i=1}^4 dV_j$ . Здесь  $\omega_i$  представляет веса, пропорциональные весовым долям четырех ячеек  $\Omega_m$ , которые создают краевую  $\sigma^e$  на  $\Omega_s$ . Таким образом, граничная проводимость  $\sigma^e$  является простым среднearифметическим значением проводимости четырех модельных ячеек. Когда  $\Omega_m \neq \Omega_s$ , картирование проводимости сводится к решению задач параллельного и последовательного включения цепей, сводящихся в итоге к арифметическим и гармоническим схемам усреднения (Commer and Newman, 2006; Moskow et al., 1999). Схемы усреднения приведены на рис. 1 для граничной проводимости в направлении оси  $X$ ,  $\sigma_x^e$  для двумерного случая. Здесь модельные и расчетные сетки представлены пунктирной и сплошной линиями. Среднее по объему определяется по формуле:

$$\sigma_x^e = \left[ \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left( \int_{y_{j-1/2}}^{y_{j+1/2}} \sigma(x, y) dy \right)^{-1} dx \right]^{-1}.$$

(4)

Внутреннее интегрирование представляет поточечное параллельное усреднение проводимости, в то время как внешнее интегрирование соответствует вычислению эффективной проводимости на краях отрезка интегрирования  $(x_{i+1} - x_i)$  расчетной ячейки. Общая область интегрирования, определенная для определения  $\sigma_x^e$ , показана красным прямоугольником на рис. 1.

Обобщение на трехмерный случай со следующим дискретным представлением:

$$\sigma_x^e = \sum_{j=1}^J \left[ \left( \frac{1}{V_j} \sum_{i=1}^{I_j} dV_i \sigma_i \right)^{-1} \Delta x_j \right]^{-1} \Delta x,$$

(5)

$\Delta X$  – длина грани ячейки вдоль координатной оси  $X$ . Аналогично,  $\sigma_y^e$  и  $\sigma_z^e$  являются средними значениями вдоль координатных осей  $y$  и  $z$ , соответственно. В уравнении (5) усреднение по  $\Delta X$  включает в себя число  $J$  последовательно соединенных дискретных параллельных цепей,  $P_j$ , каждый со значением  $V_j$ . Отрезок  $P_j$  вдоль края есть  $\Delta x_j$ , где  $\sum_{j=1}^J \Delta x_j = \Delta X$ . Далее,  $I_j$  есть число ячеек на модельной сетке для  $P_j$ , с  $\sigma_i$  и  $dV_i$  проводимостью и объемной долей отдельной модельной ячейки, соответственно.

Нам потребовалось также определить отношение  $\partial \sigma^e / \partial \sigma_k$ , которое необходимо, чтобы определить градиент на модельной сетке, так как оно связано с решением прямых задач на расчетных сектах (см. Newman and D. L. Alumbaugh,

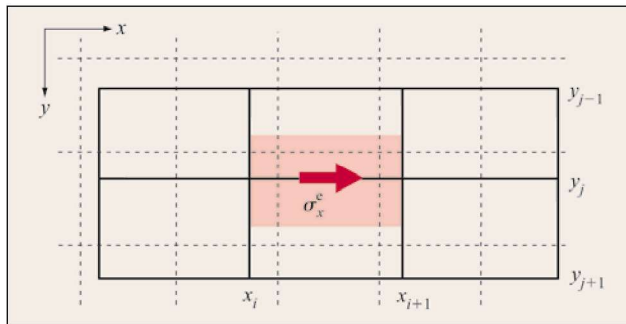


Рис. 1 Иллюстрация схемы осреднения электропроводности в двух измерениях по уравнению (4) 1997, для детального рассмотрения случая равномерной сети).

Таким образом,

$$\partial \sigma^e / \partial \sigma_k = \frac{\sigma^e}{\Delta X} \sum_{j=1}^J \Delta x_j \left( \frac{1}{V_j} \sum_{i=1}^{I_j} dV_i \sigma_i \right)^{-2} \frac{dV_k}{V_j},$$

(6)

где  $J$  является теперь числом дискретных параллельных цепей с ненулевыми вкладами от  $\sigma_k$ . Когда  $\Omega_m = \Omega_s$ , мы имеем  $J=1$ ,  $\Delta x_i = \Delta X$  и  $\partial \sigma^e / \partial \sigma_k = \omega_k$ , которые являются весовыми коэффициентами, определенными выше как

$$\omega_k = dV_k / \sum_{k=1}^4 dV_k.$$

### Построение изображений залежей углеводородов с использованием суперкомпьютера BG/L

Данные CSEM обычно характеризуются обширным динамическим диапазоном, который может достигать величины более 10 порядков. Это требует возможности согласованного анализа данных, относящихся к структурам не только масштаба резервуара (десятики метров), но и масштаба геологического бассейна (десятики километров), а также учитывать информацию о соляных куполах, детальные батиметрические данные и другие трёхмерные геологические явления, которые могут оказать влияние на измерения (Carazzone и др., 2005, Green и др., 2005). Эти сложности мотивируют необходимость автоматизированной 3D инверсионной обработки проводимости для успешного создания изображений залежей углеводородов. Последующее эмпирическое трёхмерное моделирование является слишком громоздким для того, чтобы быть эффективным. Размер модели и объем требуемых данных обеспечивают достаточное представление благодаря использованию для задач массивно параллельного сверхмощного компьютера BG/L. Такая базовая система, которая может увеличить масштаб до 131,072 процессоров (программ обработки), дает возможность для создания изображения перспективных нефтяных и газовых коллекторов с пространственным и временным разрешением достаточным для процесса разведки.

Исследование построения трёхмерного изображения, которое мы здесь представляем, демонстрирует проблемы, упомянутые выше. Данные были получены в результате морской съёмки вблизи Южной Америки. На рис. 2 показаны профили проведения съёмки и 23 положения размещения детекторов на площади  $40 \times 40 \text{ км}^2$ , использованные для картирования подповерхностной проводимости. Данные



## Визуализация/Интерпретация

получены по почти 1 миллиону передающих станций вдоль показанных профилей съемки. Очевидно, что объем данных не может быть обработан с применением традиционных методик инверсии, даже если применять массивно-параллельные процессы вычислений. Каждый источник, используемый для построения изображения, требует решения прямой задачи с соответствующим объемом вычислений, а также два или более дополнительных решения прямой задачи на каждый шаг нелинейной инверсии. Для эффективной работы с таким объемом данных мы используем распространенный принцип взаимности, позволяющий обменивать положения источников и приемников. Следовательно, положения фактически существующих датчиков CSEM вдоль профилей наблюдения становятся положениями виртуальных приемников, а фактически существующие на морском дне детекторы CSEM становятся виртуальными датчиками, в дальнейшем называемыми *источниками*.

Эквивалентная взаимообратная задача включает в себя 951,423 пункта данных и 207 эффективных источников, поскольку существует 23 пункта источников с тремя направлениями поляризации, и каждый из них работает на трех частотах возбуждения 0.125 Гц, 0.25 Гц, и 0.5 Гц. Каждый эффективный источник поляризован согласно ориентации антенны соответствующего ему детектора. Точные ориентировки детектора определены по анализу данных о поляризации и повороте фаз сигналов по отношению к источникам. Обработка данных включает в себя бинирование по времени, сопровождающееся спектральной декомпозицией и пространственной фильтрацией. Ошибки синхронизации были исключены путём наложения требования, чтобы фазы сигналов соответствовали масштабированию частотных сдвигов, соответствующих решениям уравнений Максвелла.

План съемки на рис. 2 содержит различные рассмотренные конфигурации системы датчик-приемник, как показано на рис. 2 (а). Для положения профиля датчиков при фиксированном положении придонного приёмника мы рассматриваем так называемую конфигурацию *пролета* (слева), при которой профиль датчиков проходит непосредственно над приёмником. В конфигурации с поперечным выносом источника (справа) буксируемый датчик проходит на расстоянии  $\Delta y$  в стороне от детектора. Тремя антеннами детектора регистрируется три компоненты сигнала: вдоль горизонтали ( $E_x$ ), перпендикулярно горизонтали ( $E_y$ ) и электрические поля ( $E$ ) по вертикали.

Чтобы запустить инверсионный процесс и разрешить некоторые проблемы, связанные с фазовыми компонентами в данных, требуется стартовая модель. Несомненно, желательно достигнуть минимальной невязки данных уже на начальном этапе. По этой причине модель создана на основании данных по батиметрии морского дна, знания удельной электропроводности воды в зависимости от глубины и результатов одномерной инверсии амплитудных компонент всех приемников при измерениях с конфигурацией перекрытия ( $E_x^i$ ) вдоль профиля.

Полученные в результате одномерные модели затем уточнялись путем сопоставления результатов моделирования с наблюдаемым полем. Чтобы согласовать все профили наблюдений и положения детекторов, участвующих в построении модели, потребовалась обширная параметризация для  $\Omega_m$ .

Для учёта батиметрических данных минимальное расстояние между профилями выдерживалось постоянным и равным 125 м для горизонтальных (x и y) координат, тогда как

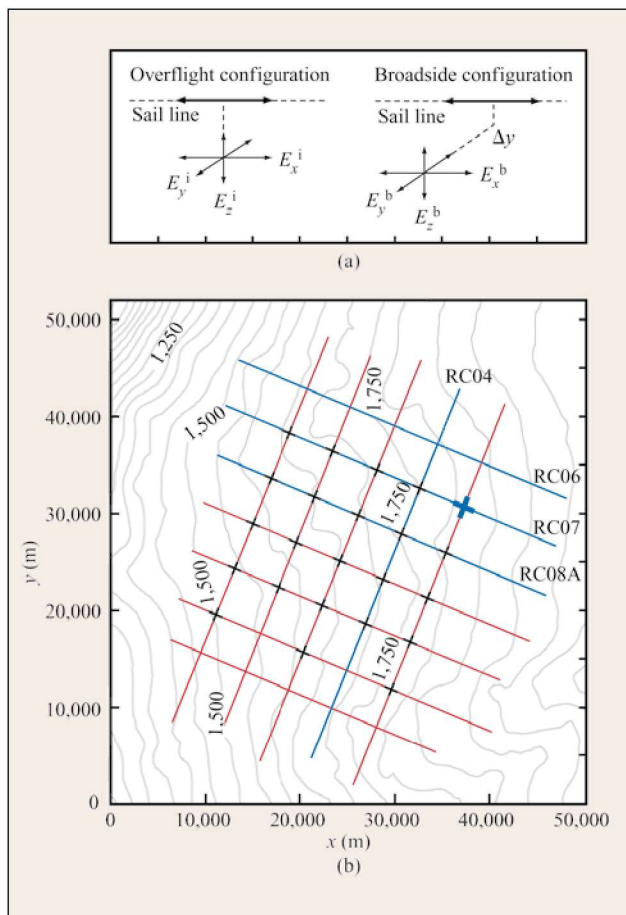


Рис. 2 Положение линий наблюдения (красные и голубые) и 23-х местоположений детекторов (на пересечениях) на морском дне для морской электромагнитной съемки с контролируемым источником (CSEM). Рис 2(а) иллюстрирует геометрию конфигурации (расстановки) внутри массива данных. Рис 2(б) приводит значения батиметрии (значения превышения дна по контурным изолиниям) в метрах под уровнем моря. Данные примера, приведенного в этой статье, соответствуют использованию взаимнообразно заменяемых положений детекторов и источников, соответственно отмеченных голубой точкой пересечения и голубыми линиями. Обозначения, такие как RC04 и RC08A, являются маркировкой линий наблюдения, принятой ExxonMobil.

по оси z оно менялось от 50 до 200 м. Это соответствует 403 узловым точкам вдоль x и y и 173 узловым точкам по вертикали, то есть приблизительно 27.8 миллионам ячеек модели.

Чтобы ограничить размер сети моделирования для каждого источника возбуждения, мы для каждого источника определили отдельную сетку. Размер сетки и густота ее базируются на оценках эффективной глубины проникновения. Глубина проникновения  $\delta$ , часто используемый параметр в приложениях ЕМ, определяется как расстояние от поверхности проводника (в нашем случае положение датчика), на которой плотность тока падает в  $e$  раз по сравнению с плотностью тока на поверхности —  $1/e$  (~0.37).

$$\delta = 503 / \sqrt{\sigma_b f},$$

Шаг сетки зависит от частоты источника возбуждения  $f$  и фоновой проводимости  $\sigma_b$  в принятой стартовой модели. Горизонтальный размер ячеек сетки имеет масштаб десяти глубин проникновения от средней точки источника, предполагая  $\sigma_b = 0.5$  S/м (Сименс/метр); результативные диапазоны сетки были достаточного размера, чтобы разместить конкретные профили наблюдения данных, получаемых от эффективных источников.

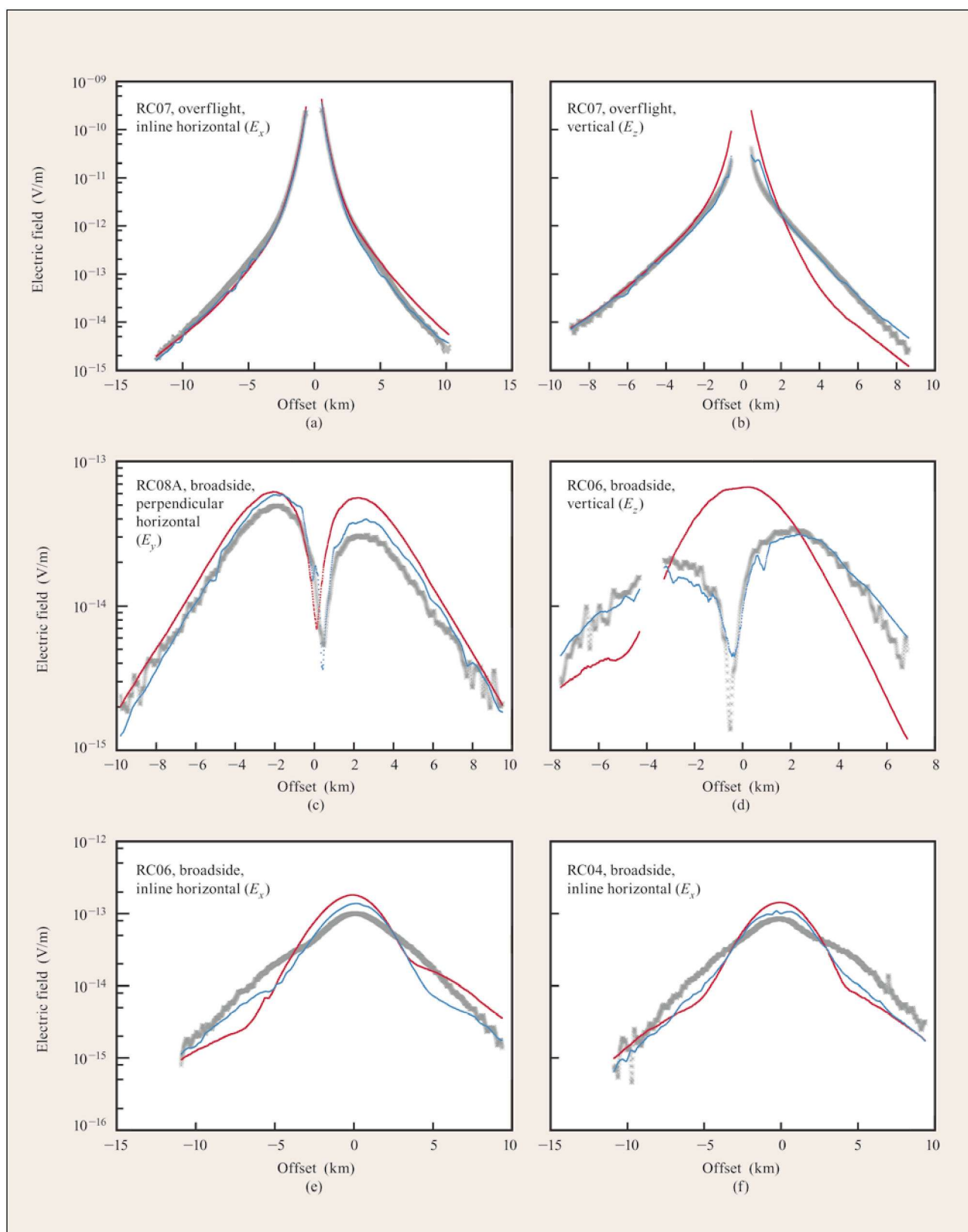


Рис. 3 Шесть выбранных графиков зависимости амплитуд наблюдаемого поля и поля с поперечным выносом приемника (серый цвет) от выноса датчика, спроектированного на линии приемников (RC04, RC06, RC07, RC08A), показанных на рис. 2. Здесь приведены результаты приближения данных для начальной модели (красным) и для 72-ой итерации (синим). Подробно смотри текст.

## Визуализация/Интерпретация

Горизонтальный интервал сети представления,  $\Delta = 250$  м, 200 м и 125 м, соответственно, соответствует частотам  $f = 0.125$  Гц, 0.25 Гц и 0.5 Гц. Вертикальное разбиение сети было идентично тому, которое представлено сеткой модели, чтобы точно учесть значения высот дна. Исходя из этих соображений, мы смогли существенно уменьшить размер ячеек модели; количество узловых точек  $x$  и  $y$  меняется от 128 до 162. Точность решения контролировалась по решениям, в которых  $\Omega_m = \Omega_s$ .

На сверхмощном компьютере BG/L имела в распоряжении максимальная оперативная память в 256 Мб. Наибольшие затраты памяти требуются для временного хранения результатов решения прямой задачи в течение одной итерации инверсии. Чтобы не выйти за пределы доступного оборудования, каждая сетка моделирования была распределена по 512 узлам LC для решения методами BICG/QMR, что было возможно ввиду высокой пропускной способности линий межпроцессорной коммуникации. Затем были использованы 64 LC для распределения 207 эффективных источников и связанных с ними данных. Таким образом, общее число процессоров, использованных в задаче построения изображения, было 32,768. Скорость обмена с дисками и производительность файловой системы играли второстепенную роль, поскольку объём сгенерированных данных был довольно скромным, ~2.5 Гб на итерацию инверсии, эта информация записывалась на диск с использованием 512 параллельных задач. Выходные данные на каждой итерации инверсии состояли из предвычисленных и наблюдаемых данных с общим размером файла 170 Мб. Управляющий процессор глобального коммуникатора использовался для вывода на печать данных при каждом обновлении данных инверсии.

Перед проведением эксперимента по построению изображения было выполнено тестирование рабочих характеристик. Оценка характеристик включала в себя инверсию, в которой обширная модельная сетка (размер 403x403x173 узловых точек) представляла сетки моделирования для каждого источника.

Некоторые полученные результаты:

1. Мы сравнили поведение рабочих характеристик, используя 32 задачи, соединённые при помощи MPI (интерфейс передачи сообщений), укомплектованных на базе BG/L (частота центрального процессора 700 МГц) и на кластере процессоров Intel, соединённых через гигабитный Ethernet. (Pentium 4, с частотой процессоров 2.6 ГГц). Решение прямой задачи, использующее 25 секунд на 100 итераций QMR на базе BG/L, сравнивалось с 23 секундами на базе Intel Pentium 4. Основное время тратилось на умножение с двойной точностью комплексной матрицы, размещённой в оперативной памяти. 64-битная архитектура процессоров IBM Power на базе the BG/L, предназначенная для FLOP, позволила получить эффективный доступ к памяти. Профилирование показывает, что для нашего приложения более удачная архитектура компенсировала меньшую частоту процессоров на платформе BG/L.
2. Используя LC с размером до 4096, измерения показали линейное падение времени вычисления с ростом количества процессоров. Линейное поведение наблюдается при большем числе процессоров.
3. Работа с 1024 процессорами на базе BG/L показала, что среднее время коммуникации составляло около 25% от общего времени решения для каждой итерации инверсии. Распределение затрат на коммуникацию

является следующим: общие коммуникации внутри GC занимали около 50% времени при типичном размере информации в 16 байт. Блокирующая передача информации от точки к точке внутри LC составила в сумме до 20% времени при среднем размере сообщения 30 Кб. Барьерная синхронизация дала 30% затрат времени.

Относительно длительное время простаивания, которое обусловлено барьерной синхронизацией после каждой итерации инверсии, указывает на важность сбалансированного распределения рабочей нагрузки в пределах всех LC. Сходимость алгоритма QMR зависит от того, насколько хорошо в числовом виде поставлена задача. В числовом виде это может быть представлено в терминах *числа обусловленности* густоты FD матрицы  $K$  в уравнении (3), которая в свою очередь определяется характеристическим соотношением масштабов модели и контрастом проводимости внутри  $\Omega_s$ . Поскольку соотношение масштабов по разным направлениям меняется динамически в процесс инверсии, уменьшение затрат на барьерную синхронизацию требует достаточно сложной схемы настройки размера LC.

В течение 24-часового периода на базе BG/L было реализовано 72 обновления инверсия-модель, а относительная среднеквадратическая погрешность несовпадения уменьшилась почти на 67%. Как показано на рис. 3, хорошее приближение, сравнимое с ошибками измерения, было получено для горизонтальной и вертикальной компонент наблюдаемого электрического поля,  $E_x^i$  (рис. 3а) и  $E_z^i$  (рис. 3б), а также компонент электрического поля по направлениям, перпендикулярному к горизонтали и поперечному к вертикали,  $E_y^b$  (рис. 3с) и  $E_z^b$  (рис. 3д). Мы наблюдали, что основные остаточные несовпадения порождаются поперечными компонентами (при поперечном выносе источника или приемника),  $E_x^b$  (рис. 3е и 3ф).

Среднее удельное сопротивление, рассчитанное для трех диапазонов глубин по 72 решениям, показано на рис. 4. Морское дно определяется глубиной  $z=0$ . Исследование изображений показывает увеличение удельного сопротивления на южном участке модели для глубин более 1500 м. То же самое наблюдается при поперечном выносе источника для глубин порядка 0-1500 м. Однако, вдоль линий наблюдений наблюдается незначительное увеличение (до отсутствия его). Здесь изображение имеет искажения, которые, вероятно, обусловлены схемой получения данных.

Возможное объяснение этого результата заключается в несоответствии при сопоставлении данных, наблюдаемых вдоль профильных компонент с поперечным выносом, с данными по другим компонентам. Особенно это справедливо для данных, наблюдаемых вдоль профиля, проходящего над источниками. Очевидно, что такие наблюдения будут наиболее чувствительными к изменениям удельного сопротивления вдоль линий наблюдения, в то время как данные при поперечном выносе будут более чувствительны к вариациям удельного сопротивления в стороне от линий наблюдения. Увеличение удельного сопротивления, наблюдаемое в стороне от линий наблюдения, может возникать из-за того, что алгоритм инверсии пытается согласовать данные вдоль линий наблюдения при поперечном выносе приемников. Повышенное удельное сопротивление вдоль линии с



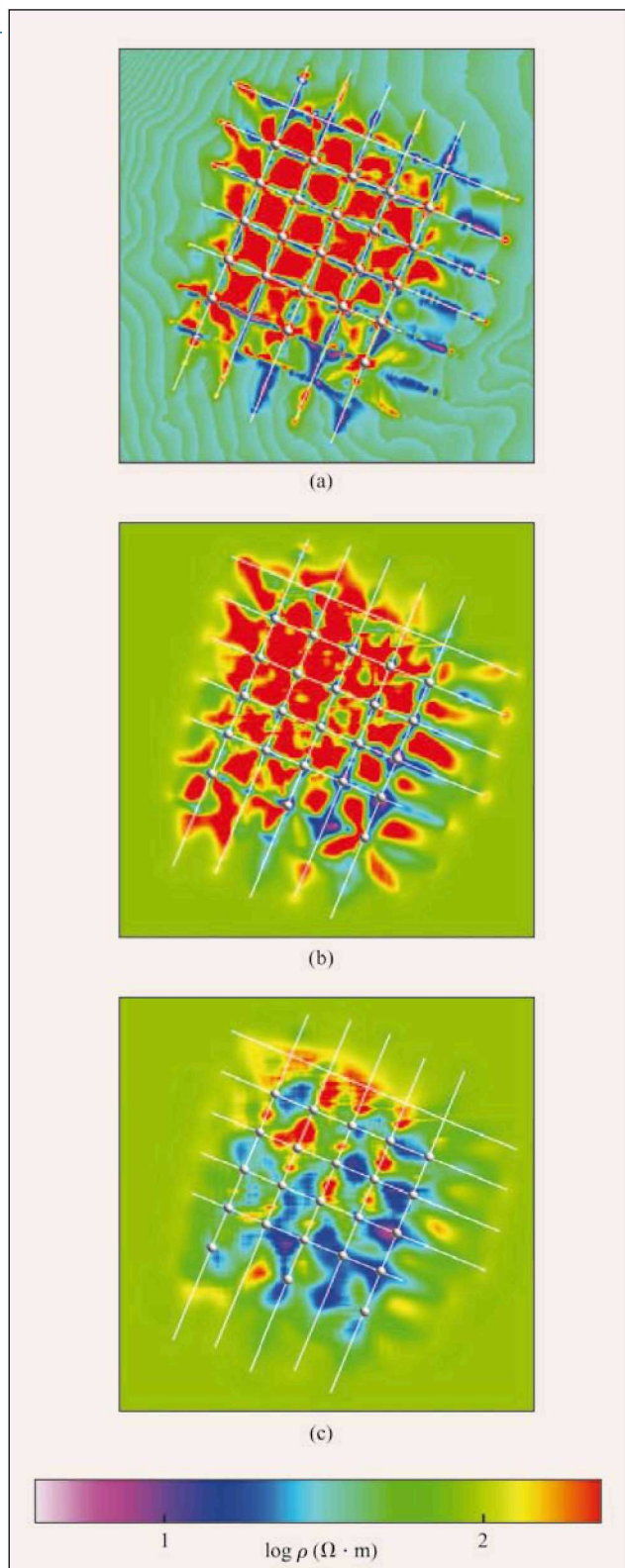


Рис. 4 Осредненное удельное сопротивление, рассчитанное для трех диапазонов глубин, для 72-ой итерации: (а) от дна воды до 500 м под линией ила; (б) интервал от 500 до 1500 м; (с) интервал от 1500 до 2500 м. Удельное сопротивление представлено в логарифмическом масштабе.

поперечным выносом усиливает влияние латеральных особенностей, уменьшая расхождение между наблюдаемыми и предвычисленными данными. Тем не менее, это не позволило получить достаточной точности приближения, что указывало на систематические ошибки, заложенные в исходные предположения, лежащие в основе алгоритмов инверсии. Одно из существенных предположений заключалось в том, что электропроводность изотропна; а именно, электропроводность внутри ячейки не меняется с направлением. Однако, хорошо известно, что в случае осадочных пород поверхности тонкозернистых напластований могут быть причиной проявления электропроводности с поперечной электрической анизотропией (Klein et al., 1995; Zhao et al., 1994). Таким образом, электропроводность может сильно зависеть от направления, перпендикулярного или параллельного к поверхностям напластования. В морской съемке CSEM показано, (Hoversten et al., 2006), что анизотропия электропроводности может создавать значительные аномалии, сопоставимые с аномалиями от коллекторов. В настоящее время становится понятно, что электрическая анизотропия может быть более существенным фактором, влияющим на измерения морской CSEM, чем считалось ранее.

Для проверки влияния анизотропии было проведено два теста. Во-первых, мы повторили первоначальный этап инверсионной обработки для проверки степени, с которой электрическая анизотропия воздействует на данные вдоль линии наблюдения при поперечном выносе, и насколько меньше она влияет на данные съемки с «пролетом» при поперечном выносе по профилям, перпендикулярным линии наблюдения, и вертикальные данные. Эти вычисления включали расчёт по анизотропной модели с фиксированной вертикальной электропроводностью, равной электропроводности, использованной в исходной изотропной инверсии, а горизонтальная электропроводность устанавливалась равной утроенной вертикальной электропроводности под дном воды. Результаты представлены на рис. 5, подтверждая, что данные гораздо лучше согласуются с анизотропной моделью, чем с изотропной. Далее мы повторно запускаем две инверсии с подгруппами данных, соответствующими 36 эффективным датчикам. При использовании одной и той же изотропной стартовой модели результаты инверсии отличались для изотропной и анизотропной параметризации. После 62 итераций анизотропная модель достигает точности приближения данных на 27% лучше, чем изотропная модель. Полная анизотропная инверсия этих данных пока не выполнена.

### Выводы

Мы добились значительного прогресса в повышении эффективности решения крупномасштабных задач построения трёхмерных изображений по электромагнитным данным. Применение множественных уровней параллелизма для данных и модельных площадей и использование различных сеток для решения прямых задач и построения изображения дает возможность решать задачи построения крупномасштабных трехмерных изображений, которые не могут быть иначе выполнены современными методами за приемлемое время.

Результаты исследования на базе сверхмощного компьютера BG/L для морских данных показали, что компонента поля вдоль линии наблюдений при поперечном выносе приемника (датчика) имеет систематические погрешности, которые наиболее вероятно могут быть отнесены за счет анизотропии электропроводности для вертикального и горизонтального направлений. Другие компоненты поля удовлетворительно соответствуют изотропной модели,



## Визуализация/Интерпретация

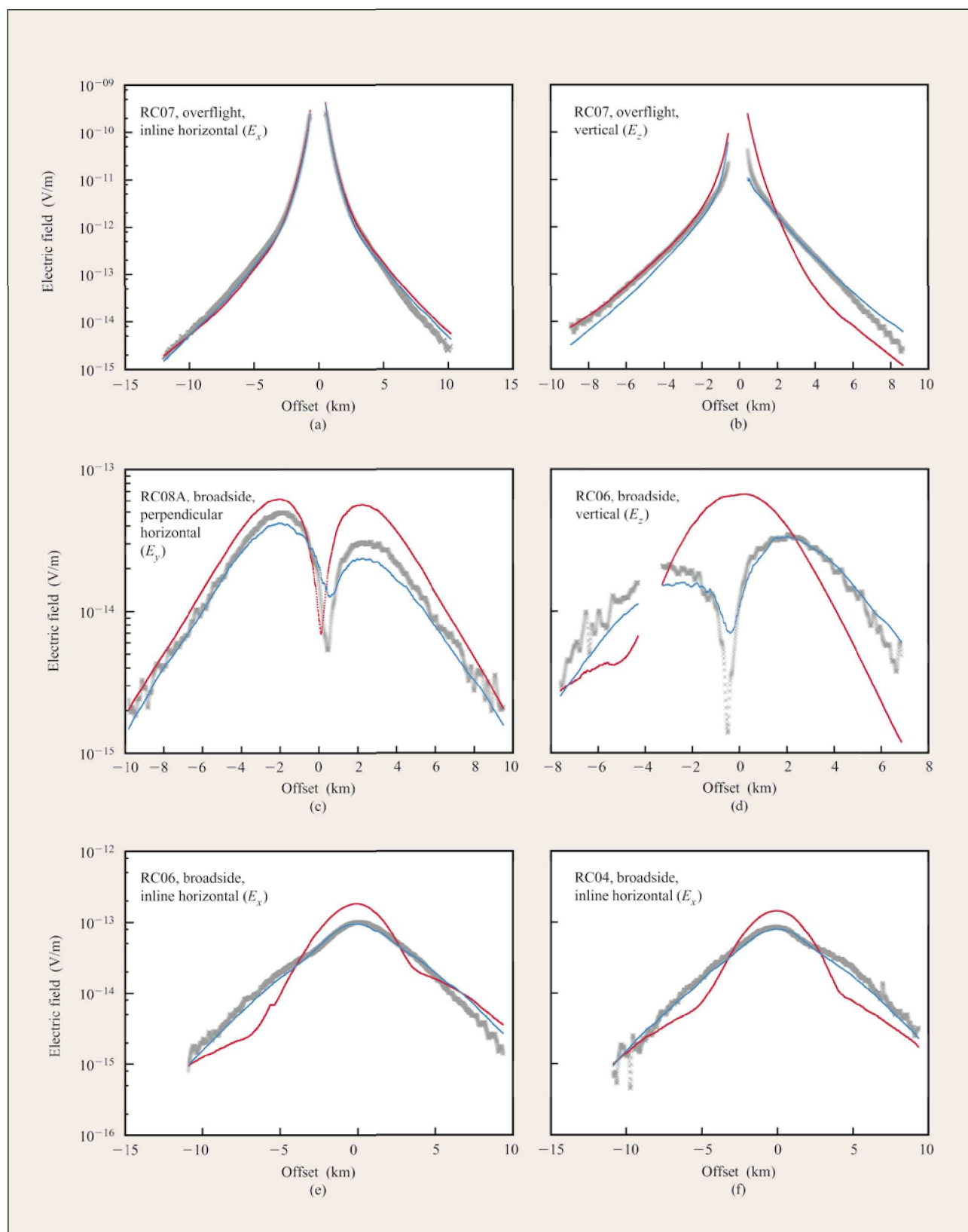


Рис. 5 Шесть выбранных графиков зависимости амплитуд наблюдаемого поля и поля с поперечным выносом датчика (серый цвет) от выноса датчика, спроектированного на линии приемников (RC04, RC06, RC07, RC08A), показанных на рис. 2. Приведены результаты приближения данных для начальной модели (красным цветом) и для 72-й итерации (синим цветом). Детальное описание см. в тексте статьи.

показывая, что они гораздо менее чувствительны к этому виду анизотропии. Скорость, с которой сверхмощный компьютер Blue Gene/L выдает результат, соответствовала временным масштабам исследовательских работ на объекте. Таким образом, результаты данной работы побуждают расширить методологию построения трехмерного изображения электропроводности в анизотропной среде.

#### Благодарности

Авторы признательны IBM за предоставление ресурсов суперкомпьютера Blue Gene/L. Основное финансирование этой работы было обеспечено Корпорацией ExxonMobil и Министерством энергетики США по контракту DE-AC02-05CH11231. Мы также благодарим German Alexander-von-Humboldt Foundation (Немецкий Фонд Александра-фон-Гумбольдта) за поддержку Michael Commer благодаря присуждению исследовательской стипендии Feodor-Lynen. Мы признательны нашему коллеге Dr Xinyou Lu, который предоставил 1D программу инверсии, и наших коллег Dr Dmitriy A. Pavlov и Dr Charlie Jing из ExxonMobil за полезные обсуждения свойств данных CSEM для анизотропных моделей.

#### Литература

- Alumbaugh, D. L., Newman, G. A., Prevost, L., and Shadid, J. [1996] Three-Dimensional, Wideband Electromagnetic Modeling on Massively Parallel Computers. *Radio Science*, 31(1) 1-23.
- Carazzone, J. J., Burtz, O. M., Green, K. E., and Pavlov, D. A. [2005] Three Dimensional Imaging of Marine CSEM Data. *SEG Annual Meeting*, 24, 575-578, Expanded Extracts.
- Commer M. and Newman, G. A. [2006] Large Scale 3D EM Inversion Using Optimized Simulation Grids Nonconformal to the Model Space. *SEG Annual Meeting*, 25, 760-764, Expanded Extracts.
- Constable, S. [2006] Marine Electromagnetic Methods - A New Tool for Offshore Exploration. *The Leading Edge*, 25(4), 438-444.
- 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.
- Eidesmo, T., Ellingsrud, S., Macgregor, L. M., Constable, S., Sinha, M. C., Johansen, S., Kong, F. N., and Westerdahl, H. [2002] Sea Bed Logging (SBL), A New Method for Remote and Direct Identification of Hydrocarbon Filled Layers in Deepwater. *First Break*, 20(3), 144-152.
- Green, K. E., Burtz, O. M., Wahrmond, L. A., Clee, T., Gallegos, I., Xia, C., Zelewski, G., et al. [2005] R3M Case Studies: Detecting Reservoir Resistivity in Complex Settings. *SEG Annual Meeting*, 24, 572-574 Expanded Extracts.
- Hoversten, G. M., Newman, G. A., Geier, N., and Flanagan G. [2006] 3D Modeling of a Deepwater EM Exploration Survey. *Geophysics*, 71(5), G239-G248
- Klein, J. D., Martin, P. R., and Allen, D. F. [1995] The Petrophysics of Electrically Anisotropic Reservoirs. *SPWLA 36th Annual Logging Symposium*.
- L. M. Macgregor, L.M. and Sinha, M. C. [2000] Use of Marine Controlled Source Electromagnetic Sounding for Sub-Basalt Exploration. *Geophysical Prospecting*, 48(6), 1091-1106.
- Moskow, S., Druskin, V., Habashy, T., Lee, P., and Davdychewa, S. [1999] A Finite Difference Scheme for Elliptic Equations with Rough Coefficients Using a Cartesian Grid Nonconforming to Interfaces. *SIAM J. Numer. Anal.*, 36(2), 442-464.
- G A. Newman G.A. and Alumbaugh, D. L. [1997] Three-Dimensional Massively Parallel Electromagnetic Inversion - Part I. Theory. *Geophysical Journal International*, 128(2), 345-354
- Newman, G.A. and Boggs, P.T. [2004] Solution Accelerators for Large-Scale Three-Dimensional Electromagnetic Inverse Problems. *Inverse Problems*, 20(6), S151-S170.
- Srnka, L. J., Carazzone, J. J. Ephron, M. S., and Eriksen, E. A. [2006] Remote Reservoir Resistivity Mapping. *The Leading Edge*, 25 (8), 972-975.
- Zhao, J., Zhou, D., Li, X., Chen, R., and Yang, C. [1994] Laboratory Measurements and Applications of Anisotropy Parameters of Rocks. *SPWLA 35th Annual Logging Symposium*.