

# СЕЙСМОРАЗВЕДКА И СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ

Е.А. Курин

## Введение

При поисках, разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений применяются математические методы, требующие большого объёма вычислений в достаточно сжатые сроки. В настоящей работе мы остановимся на задачах обработки данных, полученных при сейсмической разведке, так как именно они предъявляют самые высокие требования к объёму вычислений. Разумеется, в отрасли существуют и другие области применения высокопроизводительных вычислений, например, моделирование углеводородных систем в осадочных бассейнах, а также гидродинамическое моделирование в процессе добычи. В работе [1] приводится сопоставление различных методов построения глубинного изображения среды по сейсмическим данным и необходимых вычислительных ресурсов. Там показано, что применение ряда эффективных процедур в экономически оправданные сроки требует применения суперкомпьютеров. Поэтому неудивительно, что высокопроизводительные вычисления в области сейсморазведки в настоящее время являются актуальной темой исследований специалистов нефтегазовых и сервисных компаний и академических организаций. В рамках каждой международной геофизической конференции (SEG, EAGE) проводятся соответствующие сессии или семинары. Организуются и специализированные мероприятия, например, ежегодный семинар в Rice University (г.Хьюстон, США), посвящённый высокопроизводительным вычислениям в нефтяной и газовой отрасли. Увеличилось количество публикаций на данную тему в геолого-геофизических периодических изданиях. В настоящей работе будет дано краткое описание сейсмического метода поисков полезных ископаемых, сделан обзор задач и методов обработки сейсмических данных, а также рассмотрены отдельные процедуры, требующие применения высокопроизводительных вычислительных систем.

## О сейсморазведке

Нефть и газ сосредоточены в так называемых ловушках. Они представляют собой участки пористых и проницаемых пород, в которых происходит накопление углеводородов. Эти породы перекрываются другими, непроницаемыми, породами, которые препятствуют дальнейшей миграции нефти и газа. Одной из основных задач сейсморазведки является поиск и определение пространственного положения глубинных структур, которые могли бы являться такими ловушками. Не менее важно построение геологической модели по всему месторождению для того, чтобы оптимальным образом осуществлять его разработку, сведя к минимуму технологические и экологические риски.

Напомним основы сейсмического метода. Вблизи поверхности Земли искусственно возбуждают упругие волны, которые распространяются в нижнее полупространство. Часть из них, претерпев отражение и преломление на границах раздела горных пород, возвращается к поверхности. Здесь происходит их регистрация специальными устройствами – сейсмоприёмниками. На акваториях процесс наблюдений происходит следующим образом: судно буксирует периодически срабатывающий источник и кабели, так называемые «кось», с приёмниками (гидрофонами). На суше обычно применяют взрывные или вибрационные источники и стационарно размещённые приёмники (геофоны), для которых обеспечивается механический контакт с поверхностью наблюдений.

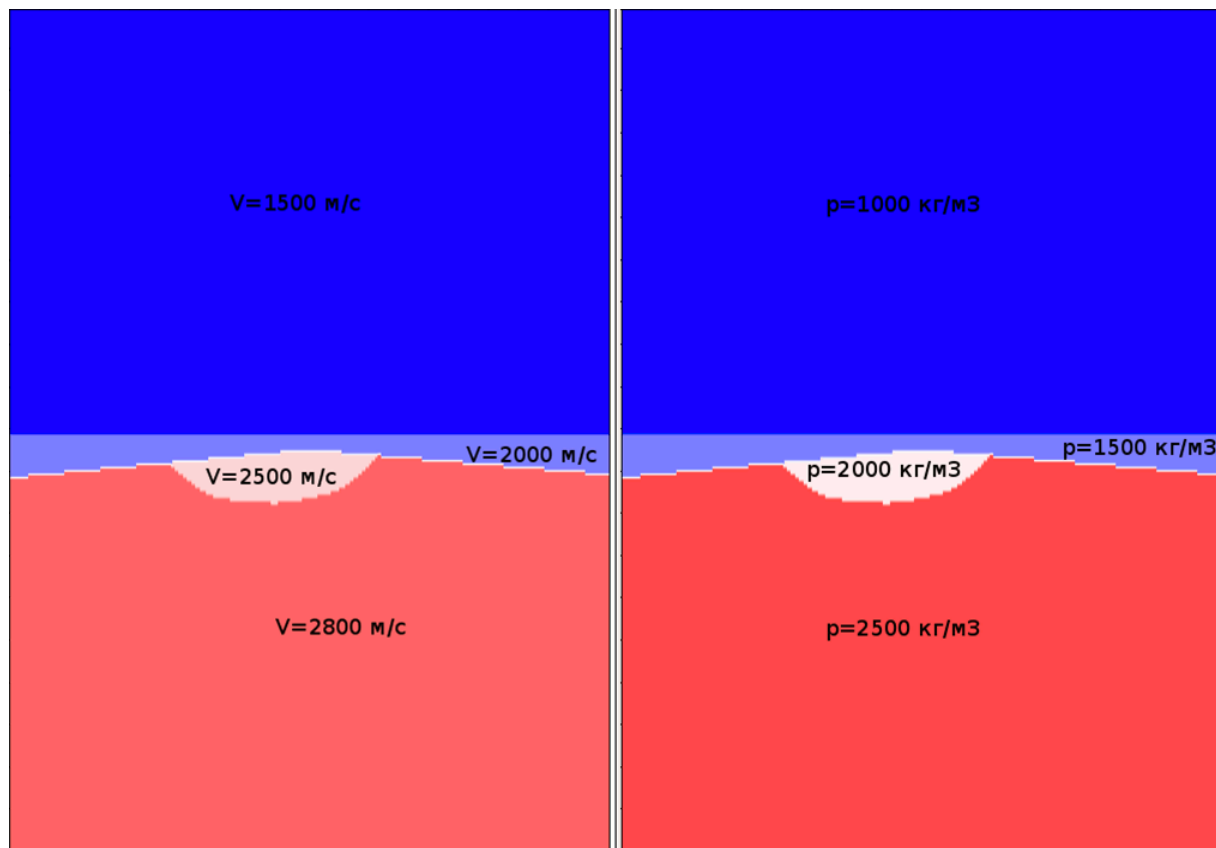


Рис.1. Модель среды.

Чтобы показать, как работает сейсморазведка, рассмотрим простую модель, для которой проведём численный сейсмический эксперимент. Предположим, что распространение волн в среде описывается акустическим волновым уравнением. Зададим форму отражающих границ, скорости (слева) и плотности (справа) в слоях между ними (см. Рис.1). Поместим источник вблизи поверхности в центре модели, а приёмники - вдоль поверхности. Произведём «взрыв» и будем следить, как меняется давление в разных точках нашей среды. То есть будем решать акустическое скалярное волновое уравнение и исследовать его решение в различные моменты времени. На Рис.2 показано волновое поле через 0.7 секунды после взрыва. Горизонтальная ось соответствует позиции приёмника, а вертикальная – глубине. Значение давления в каждой точке, соответствующее максимуму, показано черным цветом, а минимуму - белым. Видно, что часть энергии отражается, а часть проходит дальше. Отражённая волна доходит до поверхности, и вызываемые ей изменения давления записываются сейсμοприёмниками. Именно такие, один раз отражённые волны, и несут в себе основную полезную информацию о строении среды. На Рис.3 (0.9 секунды) виден процесс отражения от поверхности. На Рис.4 (1.2 секунды) показана волна, которая отразилась от границ два раза. Такие волны называются кратными. Они представляют собой серьёзную помеху, которая затрудняет выделение и интерпретацию полезных волн.



Рис.2. Волновое поле: 0.7 с после взрыва.



Рис.3. Волновое поле: 0.9 с после взрыва.

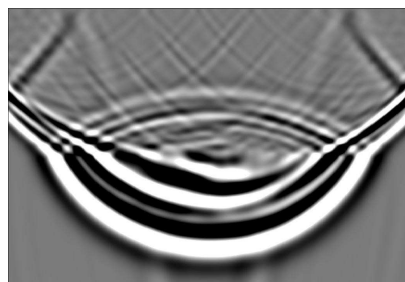


Рис.4. Волновое поле: 1.2 с после взрыва.

На Рис.5 показан результат одного сейсмического эксперимента - сейсмограмма. Здесь к результату был добавлен случайный шум, который обычно присутствует в реальных данных. Горизонтальная ось соответствует позиции сейсμοприёмника, вертикальная — времени регистрации. Каждая запись по вертикали (сейсмическая трасса) соответствует сигналу, зарегистрированному отдельным приёмником. Синей надписью указаны полезные, однократно отражённые, волны. Красными надписями – различные виды помех. Помехи можно

классифицировать как нерегулярные (случайный шум) и регулярные (например, прямые и поверхностные волны, многократные отражения). Как мы видим, сейсмограмма лишь отдалённо напоминает исходную модель. В результате наблюдений мы имеем набор сейсмограмм для всех произведённых взрывов. По ним необходимо узнать глубинное строение участка земной коры и попробовать оценить состав и свойства горных пород на этом участке, то есть решить обратную задачу сейсморазведки.

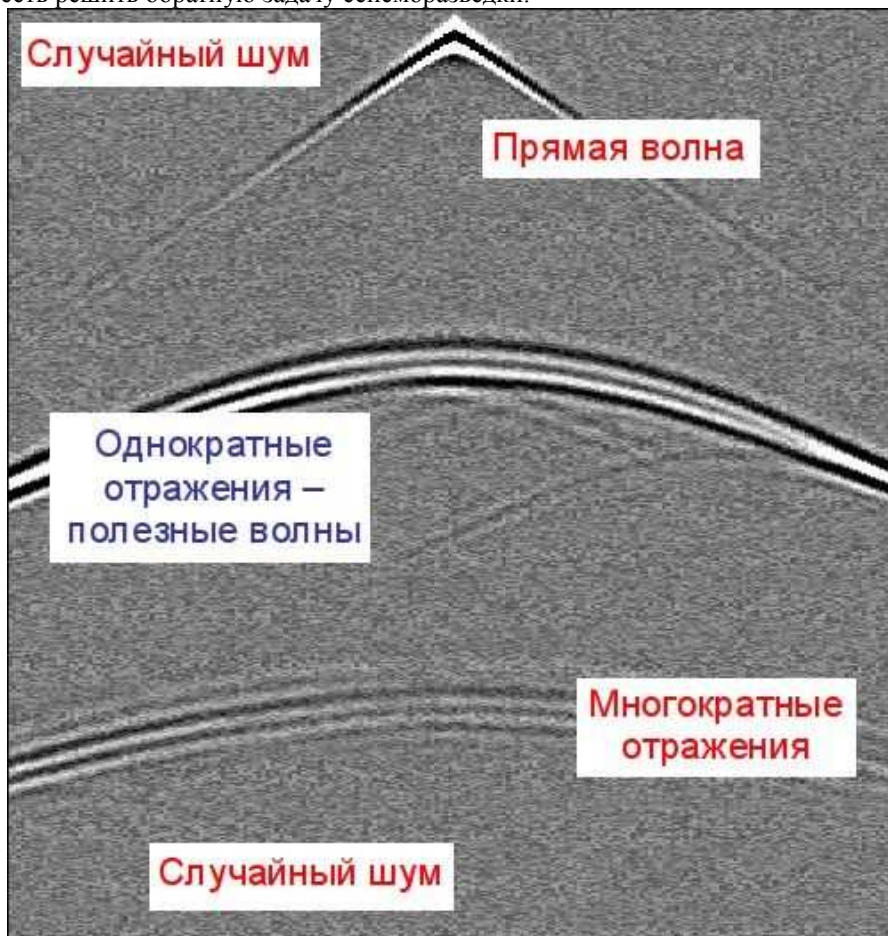


Рис.5. Сейсмограмма.

Это достигается решением целого комплекса задач. В него входит подавление волн-помех, выделение и интерпретация полезного сигнала, повышение пространственного и временного разрешения записи. Затем оценивается глубинно-скоростная модель среды и строится глубинное изображение. Наконец, можно попытаться оценить состав и свойства пород. При этом используется сложный и разнообразный математический аппарат. Необходимо решать системы линейных алгебраических уравнений большой размерности, производить интегральные преобразования (например, Фурье или Радона), рассчитывать и применять цифровые фильтры во временной, пространственно-временной, частотной и пространственно-частотной областях, решать задачи условной и безусловной оптимизации, дифференциальные уравнения в частных производных. В ряде процедур широко применяются вероятностные и статистические методы.

#### **Суперкомпьютеры и некоторые задачи обработки данных**

С момента своего появления компьютеры стали применяться при обработке сейсмических данных. На Рис.6 показан фрагмент рекламного буклета компьютера Bendix G-15 (1955 год). В списке задач, который он умел решать, значилась обработка данных сейсморазведки. Несмотря на бурный рост возможностей вычислительной техники в последние десятилетия, оказывается, что эти возможности отстают от потребностей сейсморазведки. Например, в 2009 году на месторождении Карачаганак (Казахстан) проводились трёхмерные наблюдения на площади около 900 кв.км. При этом были зарегистрированы около трёх миллиардов записей (трасс). Общий объём данных превысил 100 терабайт. Если мы попытаемся прочитать такой объём данных с внешних USB-дисков на компьютер, то процесс чтения займёт полтора месяца. Кроме того данные надо ещё обработать и записать результат обработки, что также потребует значительного времени. В наше время ни одна нефтяная компания не согласна ждать результата так долго, и необходимо применять более совершенные устройства для вычислений и хранения данных.



Рис.6. Компьютер Bendix G-15, 1955 год.

Рассмотрим, как обрабатываются данные при помощи стандартного набора процедур, в который обычно входят модули для работы с геометрией наблюдений и подавления регулярных и нерегулярных помех. Такие процедуры применяются последовательно к небольшим порциям данных, которые передаются по конвейеру. Отдельные порции данных обрабатываются независимо друг от друга. Для этого класса задач узким местом является подсистема ввода-вывода. Поэтому идеальным компьютером для их решения будет кластер с узлами, обладающими быстрым доступом к общей системе хранения данных (СХД). Изучим, как эта проблема может быть решена на современных суперкомпьютерах, установленных в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. На Рис.7 изображены результаты измерения скорости чтения и записи данных одним узлом в зависимости от количества одновременно читающих и пишущих узлов для суперкомпьютера «Чебышёв». Нетрудно посчитать, что, например, 200 узлов могут прочитать 100 терабайт за 8 часов. На Рис.8 приведены аналогичные измерения для новейшего суперкомпьютера «Ломоносов», также установленного в МГУ. Время чтения 100 терабайт данных уменьшилось ещё в 3 раза.

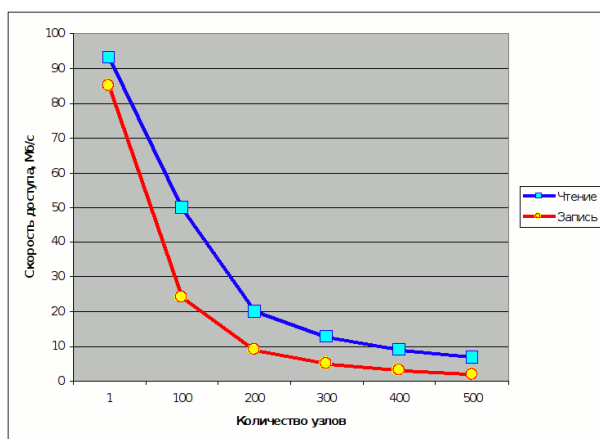


Рис.7 Производительность СХД суперкомпьютера «Чебышев».

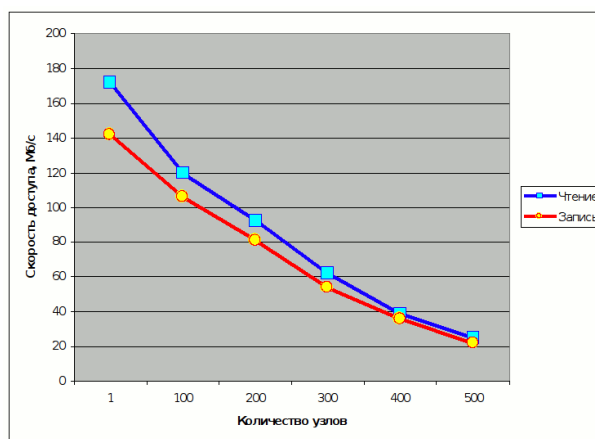


Рис.8 Производительность СХД суперкомпьютера «Ломоносов».

Далее мы остановимся на некоторых отдельных процедурах, требующих большого объема вычислений. Известно, что при обработке сейсмических данных, полученных на акваториях, остро стоит проблема



подавления кратных волн-помех. Кратные волны образуются при многократном отражении от границ раздела горных пород, часто с участием отражения от дневной поверхности, и они затрудняют интерпретацию полезных волн. При подавлении таких помех применяются различные методы, например, основанные на каких-либо отличиях в свойствах полезных волн и помех. Одним из самых эффективных способов подавления кратных волн является метод SRME, предложенный профессором Беркхаутом из Делфтского университета в Нидерландах. Метод двухшаговый. На первом шаге делается прогнозирование помехи, а на втором – её адаптивное вычитание. Для прогнозирования одной трассы помехи производится попарная свёртка трасс сейсмограмм общих пунктов взрыва и приёма, к которым принадлежит эта трасса, в пределах некоторой апертуры. На втором шаге производится поиск многоканального фильтра, который оптимальным образом адаптирует оценку помехи к реальным данным. После применения фильтра помеха вычитается из данных. В двумерном, а особенно в трёхмерном, случае мы имеем значительный объём как ввода-вывода, так и вычислений. Рассмотрим пример применения метода 3D SRME для морских широкоазимутальных данных по площади 400 кв.км и размером порядка 1 терабайта. В процессе вычислений производится около 100 миллиардов операций дискретной свёртки одномерных массивов, каждый из которых состоит из 2000 элементов. Трафик данных составляет более одного петабайта. Если бы мы доверили вычисления одному единственному, пусть самому быстрому, серверу, то получили бы результат через 3 года. С практической точки зрения это лишено всякого смысла. Однако, при использовании лишь пятой части суперкомпьютера «Ломоносов» для получения результатов хватило бы 3-х дней. На Рис.9 приведены сейсмические разрезы по исходным данным (сверху) и по результату подавления кратных волн-помех (снизу). Здесь нам удалось добиться высокого качества подавления помехи.

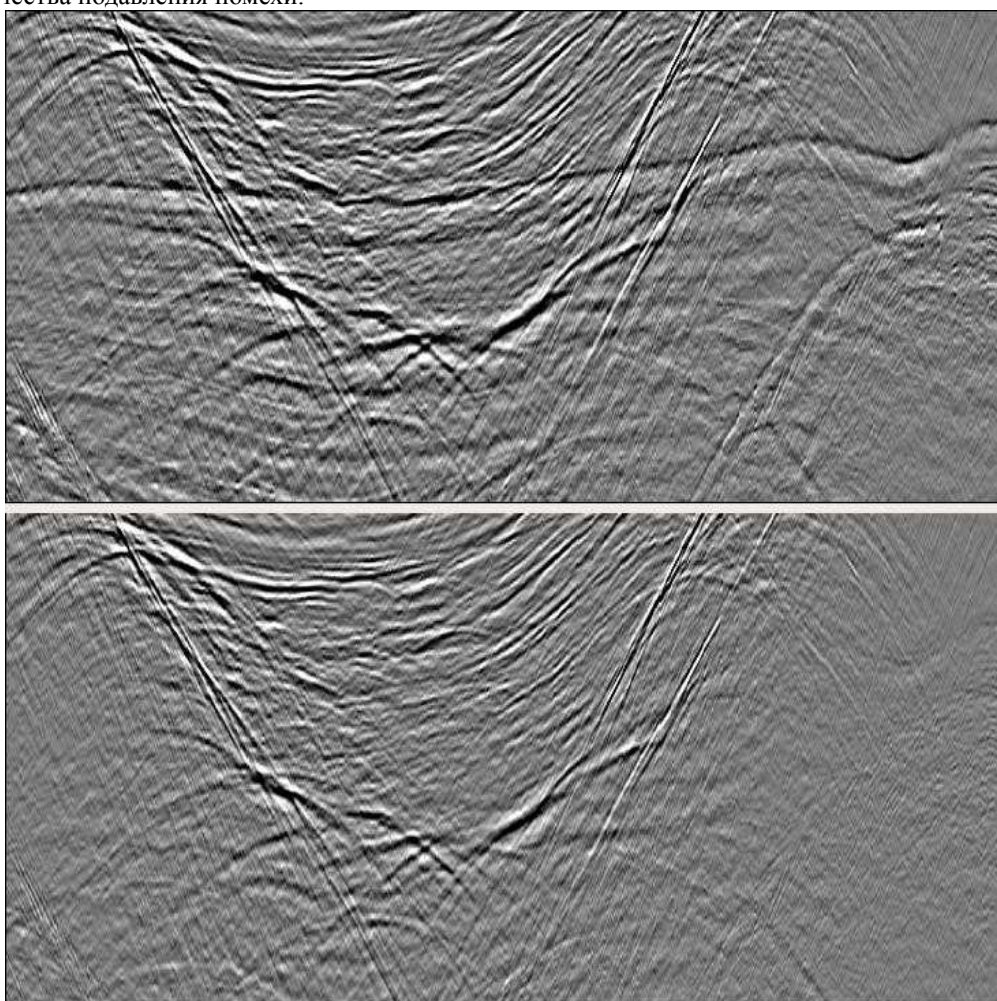


Рис.9 Подавление кратных волн-помех методом 3D SRME.

Следующий важный класс алгоритмов посвящён построению глубинного сейсмического изображения среды по данным и по предварительно оцененной глубинно-скоростной модели. Этот процесс называется сейсмической миграцией. Самым простым, интуитивно понятным и быстрым является метод, основанный на вычислении приближения к интегралу Кирхгофа. С вычислительной точки зрения, он сводится к суммированию отсчётов входных данных вдоль некоторой траектории, зависящей от скорости в среде. Таким образом, для получения одного отсчёта результата необходим доступ к значительной части данных. При этом размер данных может быть порядка нескольких терабайт. Идеальный компьютер для решения этой задачи – с общей памятью, вмещающей входные данные и результат интегрирования. Возможно эффективное решение задачи на кластере с

быстрой коммуникационной сетью, где организовано оптимальное размещение входных данных в распределённом массиве.

Альтернативный метод построения глубинного изображения - это миграция в обратном времени (reverse time migration — RTM), состоящий в следующем. Для каждого пункта взрыва моделируется и запоминается на диске волновое поле во все моменты времени в пределах интервала записи данных. Затем для соответствующей этому пункту взрыва сейсмограммы производится продолжение волнового поля, зарегистрированного на поверхности, в обратном времени. Это также делается во все моменты времени в пределах интервала записи. И, наконец, посредством корреляции этих полей получают глубинное изображение среды. Очевидно, что для быстрой работы алгоритма необходимо наличие быстрых жёстких дисков на каждом вычислительном узле. Этот метод требует значительно больших вычислительных затрат по сравнению с предыдущим, однако, в ряде случаев даёт лучший результат. В работе [2] (см. Рис.10 ) приведён пример сравнения результатов, полученных при использовании обоих вышеописанных алгоритмов для сложных данных из района с солянокупольной тектоникой. Здесь целью являлось построение глубинного изображения соляного тела с «карнизом», а также примыкающих к нему слоёв осадочных отложений. Сверху находится результат миграции методом Кирхгофа, а снизу — результат миграции в обратном времени. Синим цветом выделена область, где оба метода дают приемлемое качество изображения, а красным – зона, где конфигурацию соляного тела можно получить только при помощи времяёмкого алгоритма миграции в обратном времени. В обоих случаях время вычислений составляет около двух недель. Однако, если для получения результата при помощи миграции Кирхгофа достаточно кластера с 32 узлами, то для миграции в обратном времени требуется суперкомпьютер с сотнями вычислительных узлов.

Ряд  
задач  
обработки

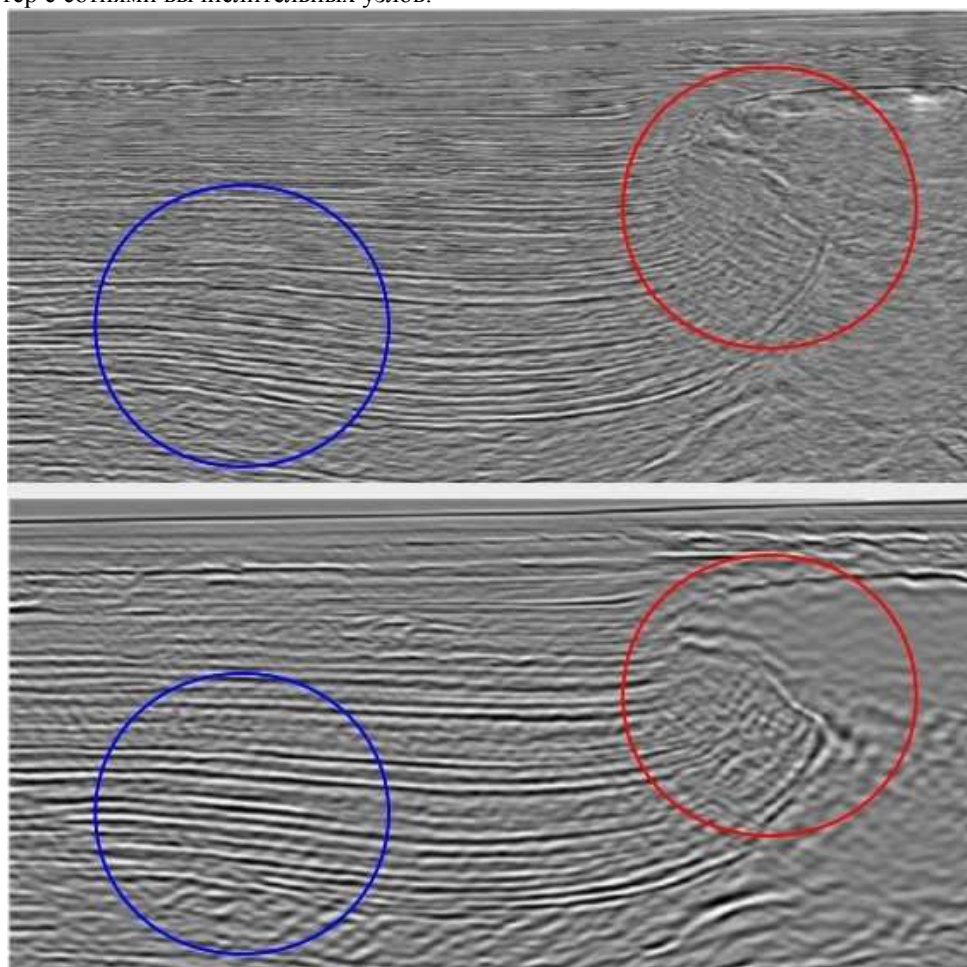


Рис.10 Построение глубинного изображения среды различными методами.

сейсмических данных подразумевает то, для чего современные суперкомпьютеры общего назначения, собственно, и спроектированы: решение систем линейных алгебраических уравнений большой размерности. К таким задачам можно отнести, в первую очередь, определение статических поправок для площадных (3D) данных. Статические поправки представляют собой временные задержки, связанные с рельефом дневной поверхности и неоднородностями верхней части разреза. Качество определения и учёта статических поправок непосредственно влияет как на надёжность выделения и корреляцию отражённых волн, так и на достоверность последующих глубинных построений. Наличие статических сдвигов препятствует синфазному суммированию полезных волн. Для решения этой задачи предложено много методов, более или менее эффективных в различных условиях. Многие из них сводятся к решению системы линейных алгебраических уравнений,

размерность которых зачастую превышает произведение количества пунктов взрыва и количества пунктов приёма, используемых в процессе наблюдений на исследуемой площади. При этом такая система, как правило, вырожденная, и её решение может осуществляться методом наименьших квадратов. Для уменьшения размера оперативной памяти, требуемой для решения, используются некоторые свойства системы уравнений, в частности, разреженность и характерная блочная структура. К системам линейных алгебраических уравнений также приводят другие задачи, например, различные томографические методы оценки глубинно-скоростной модели среды по временам пробега отражённых волн, сейсмическое моделирование и полноволновая инверсия (full-waveform inversion — FWI) в частотной области.

Следует также упомянуть о нестандартных вычислительных технологиях, используемых при работе с сейсмическими данными. В настоящее время наблюдается большой интерес разработчиков к различного рода аппаратным ускорителям. В частности, опубликован ряд работ по использованию графических процессоров общего назначения (GP GPU) для решения отдельных задач сейсмического моделирования и построения глубинных изображений. При этом обычно применяется технология CUDA, разрабатываемая и продвигаемая компанией NVidia. Распространение этой технологии на более широкий класс задач сдерживается особенностями архитектуры графических процессоров и ограничениями производительности интерфейса PCI-E, служащего для соединения плат ускорителей с материнской вычислительной системой. Кроме того, существуют работы по оптимизации ряда алгоритмов обработки для ускорителей на основе ПЛИС (FPGA). Ознакомиться с работами в области применения аппаратных ускорителей вычислений для сейсмических задач можно по материалам семинара [3].

### **Заключение**

В настоящей работе описаны цели, стоящие перед сейсморазведкой, и дан обзор задач, которые необходимо решать в процессе обработки сейсмических данных. Приведены примеры, показывающие, что в ряде случаев применение суперкомпьютеров позволяет значительно улучшить качество результатов обработки и построения глубинных изображений среды, а также обеспечить решение задач в экономически оправданные сроки.

К сожалению, в рамках одной работы невозможно дать полный обзор вычислительных методов и технологий, используемых при обработке и интерпретации данных сейсморазведки. Поэтому ниже приводятся ссылки на источники, которые могут послужить отправными точками в изучении проблемы. Подробнее ознакомиться с сейсмическим методом поисков и разведки полезных ископаемых можно, например, по книге [4]. Справочник [5] поможет составить представление обо всём многообразии математического аппарата, используемого в разведочной геофизике и, в частности, в сейсморазведке. Работа [6] интересна тем, что в ней исследуются вопросы программной реализации алгоритмов обработки сейсмических данных. На том же сайте (проект CREWES, Университет Калгари, Канада) доступны исходные коды программ, описанных в работе. Исчерпывающий и превосходно иллюстрированный учебный материал по различным вопросам анализа сейсмических данных можно найти в [7]. С самыми последними тенденциями в области высокопроизводительных вычислений в нефтяной и газовой отрасли можно ознакомиться по материалам уже упоминавшегося семинара [3].

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Camp W.J., Thierry P., 2010, Trends for high-performance scientific computing. The Leading Edge, 29, 44-47
2. Suh S.Y., Yeh A., Wang B., Cai J., Yoon K., Li Z., 2010, Cluster programming for reverse time migration, The Leading Edge, 29.
3. Материалы семинара по высокопроизводительным вычислениям в нефтяной и газовой отрасли: <http://www.og-hpc.org>.
4. Шерифф Р., Гелдарт Л., 1987, Сейсморазведка: в 2-х т., М., Мир
5. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика. Под ред. В.И.Дмитриева. М., Недра, 1982.
6. Margrave G.F., 2003, Numerical methods in exploration seismology with algorithms in MATLAB: <http://www.crewes.org/ResearchLinks/FreeSoftware/EduSoftware/NumMeth.pdf>
7. Yilmaz O., 2001, Seismic data analysis (v.1, v.2), SEG, Tulsa, OK