

Технологии визуализации для улучшения стратиграфических результатов интерпретации трехмерных массивов сейсмических данных

Visualization techniques for enhancing stratigraphic inferences from 3D seismic data volumes

Tracy J. Stark,* Stark Reality, описывает несколько методов, разработкой которых он занимался для того, чтобы добиться визуализации толщины слоя как функции от относительного геологического времени, используя спектральное разложение, ColorStacks, возрастные и сейсмо-хроностратиграфические кубы.

Методы визуализации данных позволяют интерпретаторам интегрировать больше типов данных и извлекать более подходящую и полезную информацию за меньшее время. Часто требуется, как в данном случае, приложение специальных технических средств, программного обеспечения и решений для просмотра, вместе с опытом и обучением. Это помогает интерпретаторам терпеть крики своих начальников или инвесторов, типа «я хочу все это, я хочу это сейчас и я хочу, чтобы это было правильно!».

Конечная цель состоит в том, чтобы распознать и вынести максимальное количество геологической информации за минимальное время. Мы хотим ясно видеть то, что ранее было невидимо. В данной статье сделано несколько предположений. Во-первых, полагается, что Вы, интерпретатор, хотели бы видеть, как толщина слоя меняется, не только как функция от инлайна, кросслайна и времени пробега, но также и как функция от относительного геологического времени. Другими словами, вдоль непрерывного набора сейсмических горизонтов. Во-вторых, полагается, что спектральное разложение дает информацию, содержащую относительную толщину слоя. В-третьих, возрастной куб содержит адекватную информацию для преобразования сейсмическое время пробега в относительное геологическое время. И в-четвертых, полагается, что Вы не страдаете дальтонизмом.

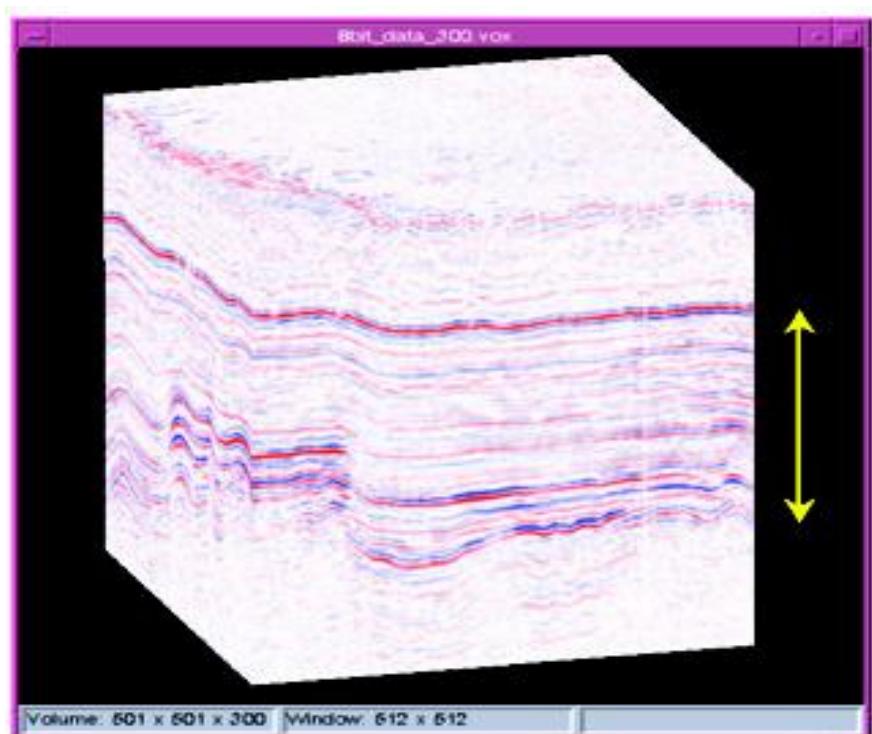


Рис. 1. Часть 3D сейсмического куба, размеры которого: 501 инлайнов, 501 кросслайнов и 1200 мс по времени. Желтая линия представляет интервал, по которому доступен возрастной куб.

Спектральное разложение, ColorStacks, возрастные кубы и сейсмо-хроностратиграфические кубы были независимо описаны в литературе (ссылки в конце). Данный случай — первый раз, когда они рассмотрены вместе. Кратко: в ColorStack данные «суммируются», используя аддитивный цвет вместо аддитивных чисел. Обученным глазом можно видеть и лес, и деревья, используя ColorStack. Возрастной куб — сейсмический куб, который содержит оценку геологического возраста вместо коэффициента отражения в ограниченном диапазоне.

Сейсмо-хроностратиграфический куб — трехмерная диаграмма Wheeler (или хроностратиграфическая диаграмма), показывающая пространственный сейсмический отклик (или его отсутствие для перерывов в осадконакоплении) как функцию относительного геологического времени.

Тем, кого прямо сейчас интересует практический результат, следует перескочить на рис. 12. Он содержит закодированные цветом толщины для нескольких непрерывных наборов горизонтов относительного геологического возраста: красным обозначены

*tstark3@verizon.net

более толстые слои, синим — более тонкие слои, в то время как серым показаны перерывы в осадконакоплении (либо эрозионные, либо связанные с отсутствием осадков).

Демонстрационный набор данных

На рис. 1 приведен куб данных, использованный для иллюстрации различных методов визуализации, которые обсуждаются в данной статье. Данный куб представляет собой часть намного большей трехмерной наземной съемки. Данные на рисунке 1 содержат 501 инлайнов и 501 кроссслайнов, покрывая приблизительно 100 км². Вертикальная ось времени отмеряет 1.2 с, состоящие из 300 дискретов с шагом 4 мс. Заметьте, что подмножество не начинается на t=0.

Величина сейсмической амплитуды в каждой точке сейсмического куба (если он должным образом обработан), представляет отражательную способность с ограниченным диапазоном. Термин «ограниченный диапазон» подразумевает, что каждая величина — некоторый тип среднего числа по малому подмножеству геологической среды. Вообще, чем выше частоты,

тем меньше осредненное подмножество. Желтая вертикальная линия на рисунке 1 представляет стратиграфический интервал, по которому рассчитан возрастной куб с высоким разрешением (рисунок 5).

Спектральное разложение

Недавно большое внимание было уделено спектральному разложению. Он был использован как для оценки толщин (Partyka и др., 1999), так и для прямого обнаружения углеводородов (Castagna и др., 2003). Лекция Greg Partyka про спектральное разложение, ставшая знаменитой в SEG весной 2005 года, была прочитана приблизительно 28 раз во всем мире. В февральском номере «The Leading Edge» 2006 года содержался специальный раздел «Затухание и спектральное разложение», и в последнем номере «First Break» Castagna и Sun (2006) сравнили методы спектрального разложения и обсудили свой метод разложения по методу "поиска совпадения" (EPD).

Существует разнообразие методов для спектрального разложения и разнообразие способов просмотра и интерпретации результатов.

Методы просмотра результатов спектрального разложения, рассмотренные здесь в значительной степени независимы от того, как были получены результаты. Ключом в использовании результатов спектрального разложения является их помещение в контекст, который позволяет Вам с готовностью делать геологические выводы. Вы хотите быть в состоянии ясно видеть то, что ранее было невидимо.

Wulf Massell из Fusion Petroleum Technologies запустил свою программу для спектрального разложения EPD, ExSpect, по данным, показанным на рисунке 1. В результате данного спектрального разложения было получено 100 кубов формата SEGY, каждый из которых имел такой же размер как первоначальный сейсмический куб. Эти кубы, пронумерованные от 1 до 100, характеризуются пространственным и временным распределением высокого разрешения мгновенных спектральных амплитуд, связанных с волновыми пакетами от 1 до 100 Гц.

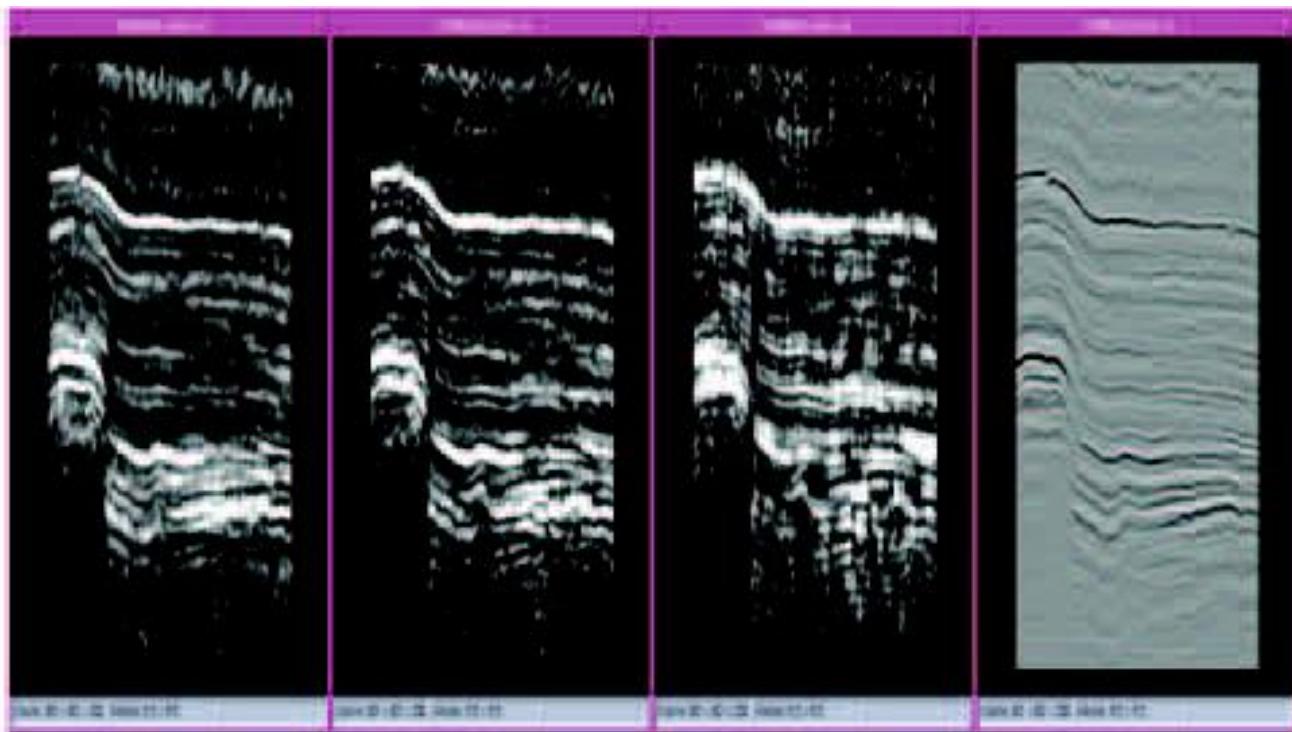


Рис. 2. Низко, средне и высокочастотные спектральные амплитуды (слева направо) показаны с одним и тем же усиление. Эти спектральные амплитуды — результаты суммирования выходных данных 1 - 27 Гц, 28 - 42 Гц, 43 - 100 Гц, полученных по методу Fusion EPD. На вход подавался сейсмический разрез, который приведен в конце справа. Данный рисунок показывает, что частота волны меняется в поперечном направлении.

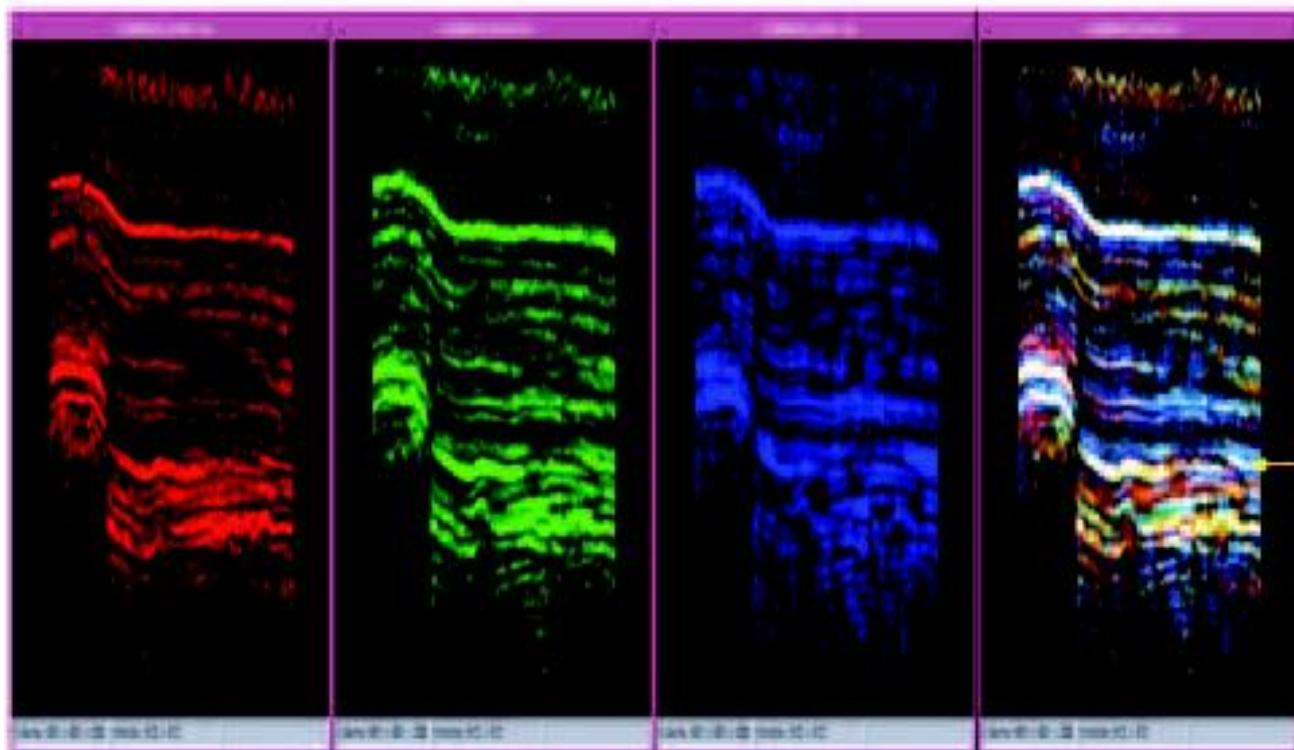


Рис. 3. Генерация ColorStack с использованием трех полос спектрального разложения. Три изображения слева — такие же, как три изображения слева на рисунке 2, но используется градационная цветовая шкала. Изображение справа — цветовая сумма, или ColorStack, трех изображений, расположенных слева. Цветовые вариации в ColorStack геологически существенны.

Как Вы используете или визуализируете эти большие данные? В 2005 году на съезде SEG в Хьюстоне Stark Reality демонстрировала программно-технический продукт, который последовательно объемно визуализировал 50 из этих кубов (~72 МБ/куб), приблизительно 15 картинок за секунду. Пользователь мог в интерактивном режиме менять ориентацию, цветовую таблицу, функцию прозрачности, освещение, плоскости зажима, и т.д., когда для кубов частоты менялись от низких к высоким. В этом примере, сложная природа вариаций пространственных частот стала полностью очевидна за несколько секунд. Однако делать быстрые геологические выводы не было так легко, как Вы хотели бы. Это была интересная демонстрация скорости и производительностей платформы для объемной визуализации, но она оставила больше вопросов, чем ответов.

Чтобы использовать технику ColorStack (описано ниже), эти 100 кубов были уменьшены до трех (рисунок 2). Эти три куба представляют низкие, средние и высокие частоты. Низко, средне и высокочастотные кубы содержат сумму мгновенных спектральных амплитуд кубов частот 1 - 27 Гц,

кубов частот 28 - 42 Гц и кубов частот 43 - 100 Гц соответственно. Эти частотные разделения «отрезали» ряд точек каждого куба, когда они были преобразованы в 8-битовый формат, используя единственную цену деления шкалы. Суммирование кубов в такой манере снизило разрешающую способность по частоте первоначального спектрального разложения. Однако это вероятно не оказалось плохого воздействия ни на временные, ни на пространственные результаты.

Рисунок 2 подводит итоги для результатов спектрального разложения. Он содержит четыре вертикально-сжатых разреза в серых тонах одного сейсмического профиля. Если идти слева направо это: суммированные результаты спектрального разложения для низко, средне и высокочастотных диапазонов, и в конце справа — первоначальный сейсмический разрез. Из рисунка становится очевидным, что даже при таком частотном разложении большинство отражений проявляют некоторую форму поперечной частотной вариации. Однако этот метод просмотра данных не позиционируется «ясно показывающим то, что ранее было невидимо».

ColorStack

При написании магистерской работы в техасском университете Greg Onstott разработал сейсмическую методику ColorStack (Onstott и др., 1984). Его идея возникла на основе дисплеев многополосных изображений спутниковых данных. Исторически это могло быть сделано только на одной линии цветного монитора с высоким разрешением. Недавно, Stark (2005c) продемонстрировал, как метод ColorStack мог бы использоваться для анализа трехмерных AVO кубов, особенно для распознания плоских пятен второго класса.

В данной статье метод ColorStack используется для изучения частотной вариации сейсмических данных, больше тем способом, в котором цвет используется для многополосного спутникового изображения. (Другие авторы, такие как Bahorich и др., 2002, использовали подобные методы отображения для данных спектрального разложения.) ColorStack-и изображаются так, что отражения красного цвета имеют строго низкие частоты, зеленого — строго средние частоты, и синего — строго высокие частоты. Белые или серые цвета характеризуются равным вкладом всех частотных

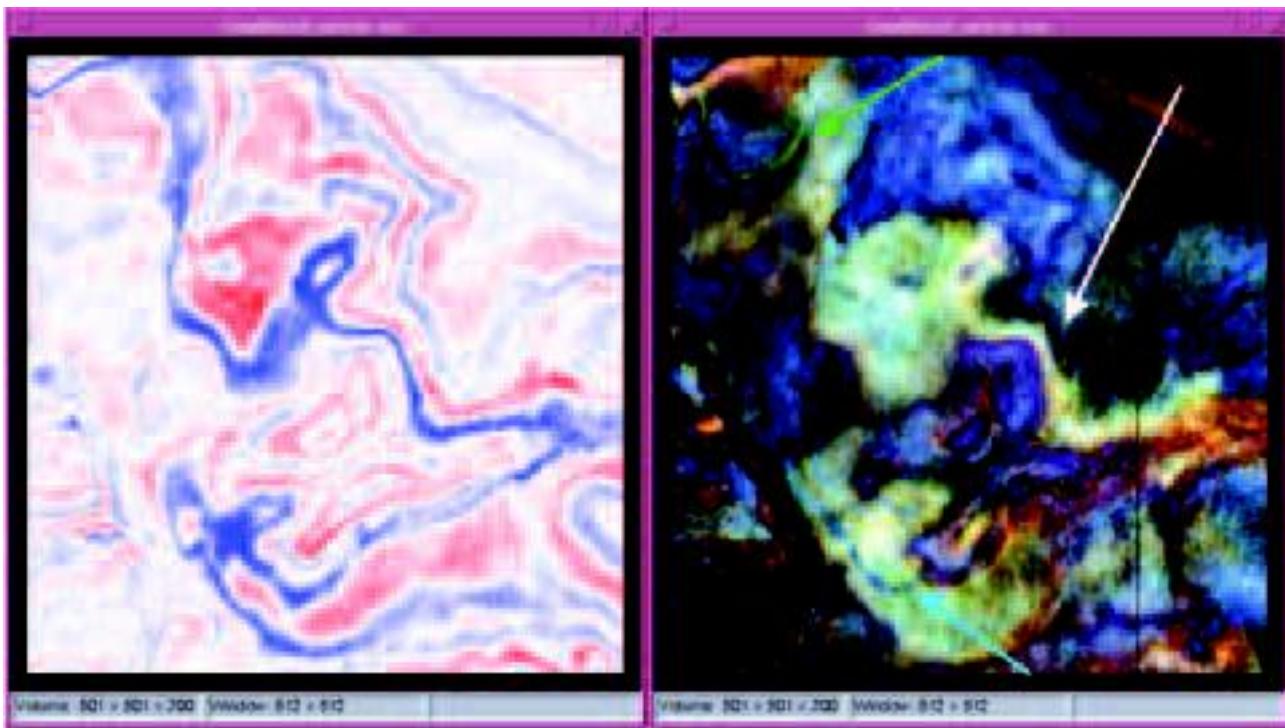


Рис. 4. Сравнение стандартного временного среза (слева) и временного среза ColorStack (справа). Зеленые и синие особенности, обозначенные стрелками, являются локальными каналами, в то время как белая особенность — крутопадающий горизонт. Цвета указывают, что зеленому каналу соответствуют более толстые объекты, чем синему каналу. Эти два канала очень трудно идентифицировать на соответствующем стандартном временном срезе.

диапазонов. Низкие и высокие частоты при интерпретации примерно сопоставляют толстым и маломощным пластам. На рисунке 3 отдельные линии спектрального разложения рисунка 2 показаны в градационной шкале красного, зеленого и синего цветов. Справа, вместо первоначального сейсмического разреза, теперь представлен ColorStack изображений, которые слева от него.

Панель справа на рисунке 3 в самом деле красочна. Но обеспечивает ли она хорошее геологическое понимание ситуации? Связаны ли цветовые вариации с помехами или они имеют геологическое значение? Геологическое значение — правильный ответ. Рисунок 4 помогает в понимании того, почему ответ «геологическое значение». Это сравнение стандартного временного среза с красно-белосиней цветовой шкалой и его соответствующего временного среза ColorStack, рассчитанного для полос низких, средних и высоких частот спектрального разложения. (Этот срез взят на уровне, обозначенном желтой стрелкой на рис. 3.) Заметьте впечатляющую разницу между этими двумя временными срезами.

На панели ColorStack были добавлены три стрелки для обозначения «каналоподобных» особенностей. Зеленая стрелка указывает на зеленую (средние частоты) ось синфазности в верхней левой части. Эта ось не видна на данном временном срезе, но если срезы панорамированы вверх и вниз, его можно обнаружить. Белая стрелка в середине указывает на белую ось синфазности, которая является частью локально круто падающего горизонта. Это совсем не канал. Эта ось синфазности прослеживается на стандартном временном срезе. Синяя стрелка указывает на другой изгибающийся контур, который едва видим на временном срезе. И снова, панорамирование через временные срезы может обнаружить часть, но не весь канал. Синий цвет подразумевает, что напластование в этом канале тоньше, чем в зеленом канале.

Картина начинает проясняться и мы приближаемся к цели увидеть то, что ранее было невидимым, и быстро делать геологические выводы, но мы все еще не получаем полного изображения. На данном этапе картина намного лучше, чем стандартный временной срез, однако мы только можем видеть части отдельных каналов и можем перепутать наклонные оси

синфазности с широкими каналами. Мы хотим видеть весь фиксированный комплекс каналов и не быть обманутыми конфигурацией горизонта. Таким образом, это приводит нас к нашей следующей теме, к возрастному кубу.

Возрастной куб

На рис. 5 приведен возрастной куб с высоким разрешением, рассчитанный по подмножеству данных, приведенных на рис. 1, содержащему 200 дискретов. Он ограничен стратиграфическим интервалом, обозначенным желтой линией на рисунке 1. Возрастной куб имеет те же пространственные размеры и координаты, что сейсмический куб данных, но вместо сейсмической амплитуды, каждому дискрету сопоставляется относительное геологическое время (возраст). Радужная цветовая шкала внизу рисунка 5 представляет увеличивающийся относительный возраст, растущий слева направо. Заметьте, что цвет в пределах каждого оттенка становится прогрессивно более темным с увеличением относительного геологического времени. Не были рассчитаны значения возраста высокого разрешения для осей синфазности, расположенных вверху и внизу этого куба, и поэтому вершина и основание

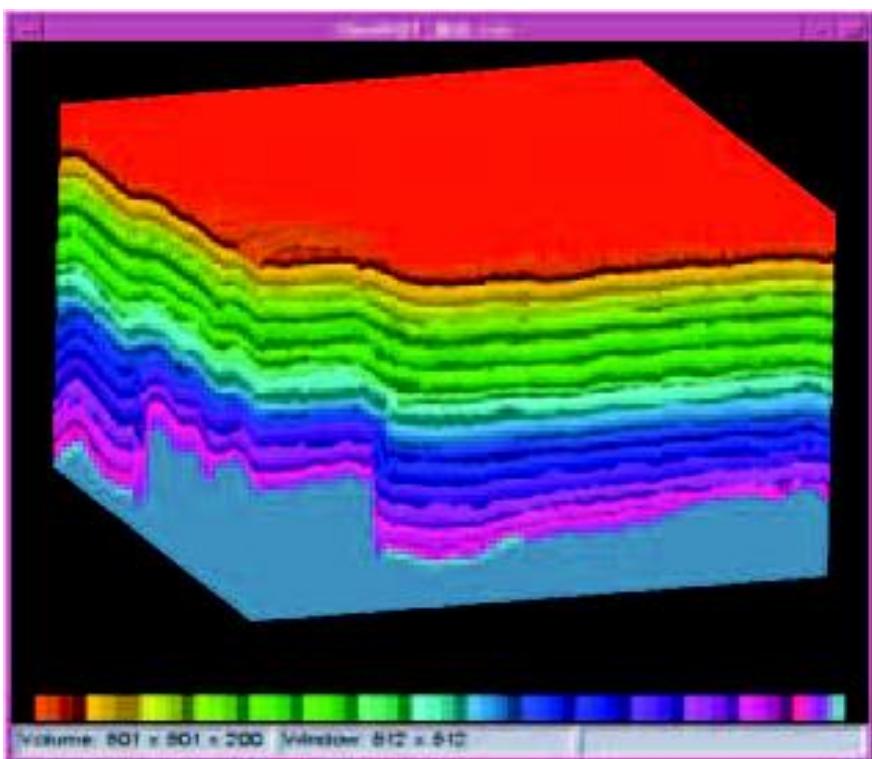


Рис. 5. Возрастной куб, соответствующий стратиграфическому интервалу, отмеченному на рисунке 1. Постоянные цвета представляют постоянное относительное геологическое время. Цветовая шкала, расположенная внизу, показывает возраст, увеличивающийся слева направо.

обозначены единственным возрастом, и поэтому одними цветами. Точно так же как сейсмический амплитудный куб, возрастной куб имеет намного большее разрешение, чем может быть представлено 8-битовой цветовой шкалой.

Куб геологического времени или возрастной куб в промышленности впервые ввел Stark (2002). Методы расчета и просмотра возрастных кубов были далее обсуждены в Stark (2003 и 2004b). Желающие познать детали в расчетах, просмотре и использовании возрастных кубов, могут обратиться к трем американским патентам, связанным с возрастными кубами (Stark 2004a, 2005a и 2005b).

Согласно Stark (2004b), фраза «относительное геологическое время» нужно понимать так: «Если относительное геологическое время А больше чем относительное геологическое время В, то горные породы относительного геологического времени А были отложены раньше горных пород относительного геологического времени В». Таким образом, используя этот куб, мы можем

сказать, данные времени А моложе или старше или того же возраста с данными времени В, однако мы не можем сказать насколько старше или моложе А, чем В, пока не сделан шаг градуировки».

Любой горизонтальный срез, взятый по возрастному кубу рис. 5 содержит геологическую карту, соответствующую тому времени (глубине). Точно так же любой

вертикальный срез возрастного куба, типа грани куба, представляет собой геологический разрез. Далее, постоянный цвет по существу представляет постоянный возраст. Поэтому, элементы на рисунке 5, которые имеют тот же цвет, будут принадлежать одному и тому же горизонту: это может использоваться, при использовании разнообразия методов обработки данных и визуализации, некоторые из которых будут описаны ниже.

Развертывание мгновенной фазы

Возрастной куб высокого разрешения, показанный на рисунке 5, был получен развертыванием (в трех измерениях) мгновенной фазы данных, показанных на рисунке 1. Этот метод расчета возрастного куба будет рассмотрен кратко. Более подробно можно ознакомиться в Stark (2003 и 2004b).

На рисунке 6 одиночная трасса, взятая из середины 2D синтетической линии (вкладка), использована для иллюстрации развертывания мгновенной фазы для получения возрастного куба. Начиная слева, сейсмическая трасса преобразована в мгновенную фазу так, что мгновенная фаза вообще увеличивается со временем пробега. На следующем этапе получается трасса (синяя линия), которая с шагом, кратным 2π , дает существенное изменение мгновенных фаз. Размер кратного зависит от окружающих данных.

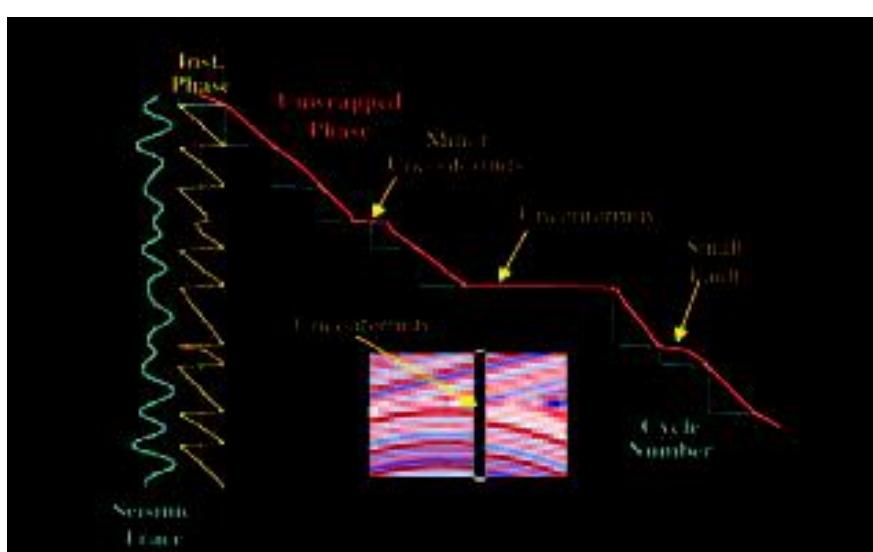


Рис. 6. Пример развертывания мгновенной фазы отдельной синтетической трассы в контексте 2D линии, содержащей стратиграфические несогласия и разлом.

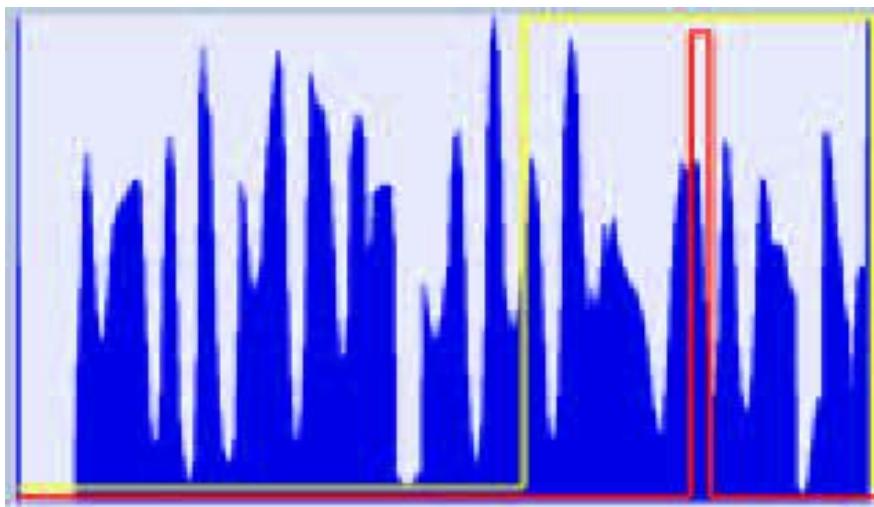


Рис. 7. Гистограмма возрастного куба, возраст увеличивается слева направо. Синие пики представляют либо мощные, либо поперечно обширные горизонты, в то время как бороздки представляют паузы. Заметьте высокочастотные и низкочастотные огибающие на этой гистограмме.

Номер цикла и мгновенная фаза суммируются для расчета развернутой мгновенной фазы (красная линия). Положение и размер шагов цикла изменены так, что 1) результативная развернутая фаза всегда растет со временем пробега и 2) большие пространственные градиенты в развернутой фазе сконцентрированы вдоль разломов и стратиграфических несогласий. Эти условия в основном требуют развернутой фазы, которая (нелинейно) пропорциональна геологическому времени для соблюдения принципа суперпозиции. Заметьте, что

большой размер шага в середине рисунка нужен для компенсации за угловое несогласие.

Гистограмма возрастного куба

Гистограмма возрастного куба содержит большое количество геологической информации, как показывает рисунок 7. На данном рисунке относительный геологический возраст увеличивается слева направо. Темно-синим представлено число вокселей, соответствующих конкретному относительному геологическому возрасту; чем выше

синяя кривая, тем больше воксели данного возраста. Поэтому, в основном, этот рисунок показывает нам объем горной породы, соответствующий относительному геологическому возрасту. Пики представляют поперечно обширные или мощные возрастные единицы, в то время как бороздки представляют либо очень маломощные единицы, либо периоды эрозии или перерывов в осадконакоплении. (Заметьте, что гистограмма масштабирована так, что большое количество вокселей, связанное с неопределенным молодым или старым возрастом верхней и нижней частей куба нескажет картину.)

Сейсмические стратиграфы могут захотеть повернуть картину на 90 градусов для того, чтобы возрастные точки росли вниз.

Заметьте, что синие пики следуют за низкочастотной огибающей пиков и впадин. В этой ориентации, гистограмма несколько походит на одну из диаграмм уровня моря Вэйла (Vail, 1977). Хотя это данные по межконтинентальному региону, по-видимому, незатронутому глобальными изменениями уровня моря, это исследование приводило к вычислению сейсмохроностратиграфических кубов, которые будут обсуждаться чуть позже. Желтая кривая на рисунке 7 представляет кривую непрозрачности, используемую, для

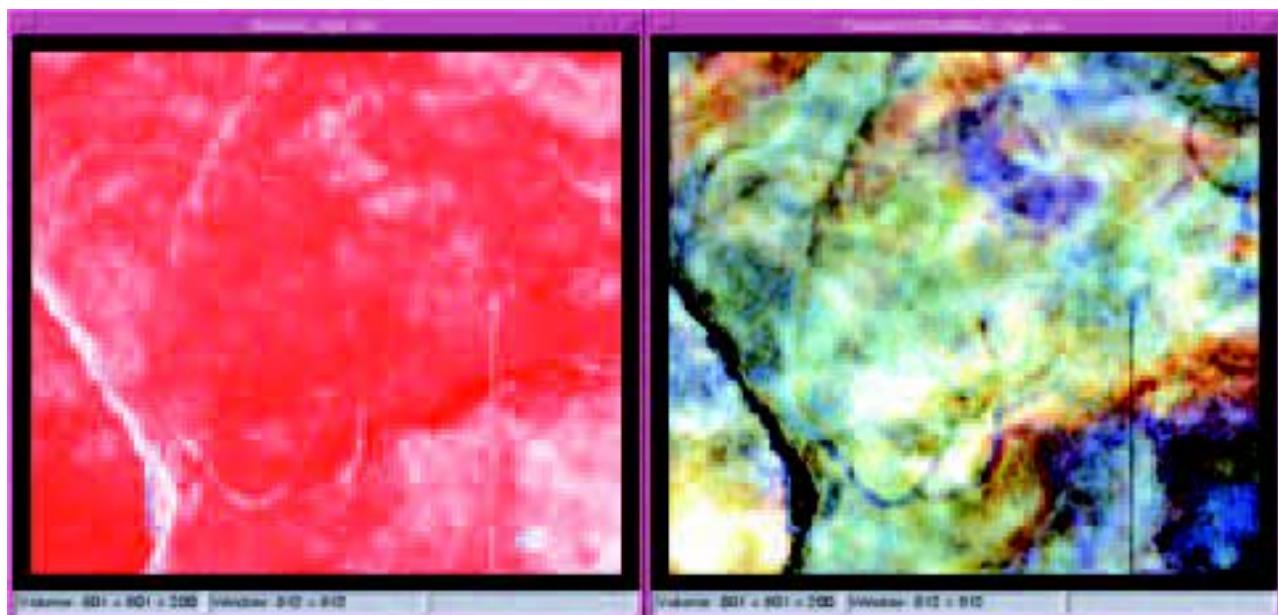


Рис. 8. Результаты извлечения горизонта. На левой части рисунка приведен типичный пластовый срез. Справа приведен тот же пласт, но в формате ColorStack спектрального разложения. Большинство каналов легче видеть в пластовом срезе ColorStack. Цвета в пластовом срезе ColorStack связаны с локальной толщиной слоя. Заметьте разнообразие пространственных вариаций толщины, которые должны иметь геологическое значение.

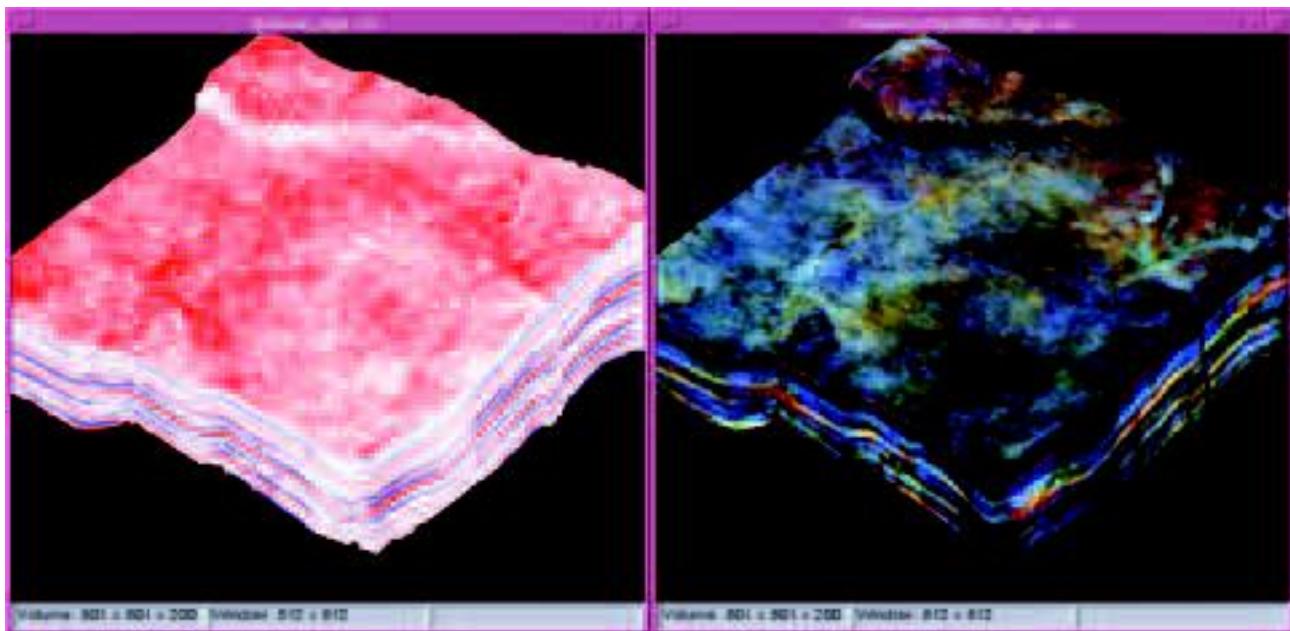


Рис. 9. Результаты построения горизонта с использованием желтой кривой непрозрачности, показанной на рисунке 7. Слева — стандартная сейсмическая амплитуда, в то время как справа — спектральное разложение ColorStack. Заметьте, что синий врезанный канал легче видеть на ColorStack. Это стратиграфически более высокий уровень, изображение приведено с северо-востока к юго-западу относительно данных, показанных на рисунке 8.

получения рисунка 9, в то время как красная кривая представляет кривую непрозрачности, используемую для получения рисунка 10. Эти рисунки будут обсуждены ниже.

Методы визуализации

Ниже представлено четыре метода визуализации, в которых возрастной куб и куб спектрального разложения ColorStack используются для того, чтобы «сделать невидимое замеченным». Это следующие методы: извлечение горизонта, ваяние горизонта, ваяние формации и сейсмо-хроностратиграфический куб. Сейсмо-хроностратиграфический куб будет представлен в следующем разделе.

Извлечение горизонта. Как замечено при обсуждении рисунка 4, мы предпочитаем смотреть на ColorStack спектрального разложения по горизонту, чтобы видеть всю фиксированную систему каналов. Взяв любое место сейсмического куба, например точку на одном из каналов, по соответствующему положению в возрастном кубе можно определить относительный возраст этого места. Каждая трасса возрастного куба тогда может рассматриваться для извлечения времени вступления, которое соответствует интересующему возрасту. Эта поверхность может затем

использоваться для извлечения сейсмической амплитуды, амплитуды ColorStack или некоторого другого атрибута и представления результатов в виде карты. Получение таких результатов — рис. 8.

На рисунке 8 мы видим всю разницу между картиной стандартных сейсмических амплитуд (слева) и ColorStack (справа). Картины слева обычно называют амплитудным срезом горизонта, или пластовым срезом, и он подобен картинам, которые получают Zeng и др. (2001). Это стандартное изображение амплитуд не показывает все каналы, проходящие на этом уровне (что частично связано с его высокой амплитудой и частичной усечкой цветного изображения). Однако на части рисунка, где представлен ColorStack (справа), можно легко заметить каналы различной конфигурации. Помимо двух синих извилиющихся каналов, расположенных внизу изображения, есть также синевато-фиолетовая область в верхнем центре среза. Этот цвет соответствует группе тонких и мощных пластов. На стандартном амплитудном срезе эта область проявляется в виде тусклого пятна.

Ваяние горизонта. На рис. 9 приведен второй способ использования возрастного куба

для лучшего понимания сложного геологического строения массива ColorStack (Stark, 2004c). Для получения изображения справа на данном рисунке низко, средне и высокочастотные кубы спектрального разложения были комбинированы с возрастным кубом для создания воксельного куба, содержащего четыре 8-битовые области. Этот куб затем был обработан в специальной комбинации технических средств и программного обеспечения, которая извлекает оптимальные результаты по таким кубам. Эта программа использует кубы спектрального разложения для определения цвета выводимых вокселей, в то время, как возрастной куб используется для определения непрозрачности. На этом рисунке показаны выборки данных, которые старше интересующего относительного геологического возраста; все, что моложе интересующего возраста представлено в прозрачном виде (используя желтую кривую непрозрачности, показанную на рисунке 7). Подобный куб, но только с двумя 8-битовыми областями, построен с использованием стандартных сейсмических данных и возрастного куба для получения левого изображения рис. 9.

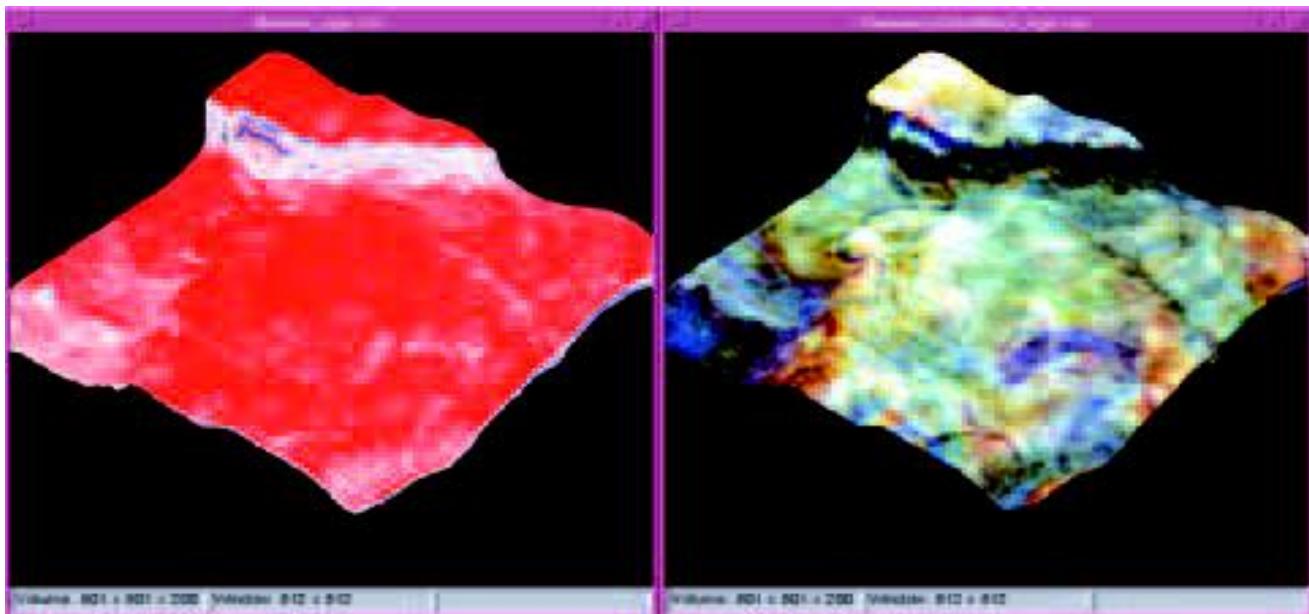


Рис. 10. Результаты ваяния формации с использованием красной кривой непрозрачности, показанной на рисунке 7. Слева — стандартная сейсмическая амплитуда, справа — спектральное разложение ColorStack. Это изображение соответствует пластовым срезам рисунка 8, но данные теперь показаны в их текущем структурном положении. Изменение кривой непрозрачности позволяет интерпретатору в интерактивном режиме менять возраст ваяемой формации.

На этом изображении мы находимся на стратиграфически вышерасположенном горизонте, чем тот, что мы видели на рис. 8. Этот тип отображения позволяет интерпретатору видеть пластовые срезы в их текущем структурном положении. В правой стороне рисунка есть синяя (маломощные пласти) система каналов, проходящая через красный (мощные пласти) фон. Мы также замечаем разнообразие толщин поперек этого горизонта, с более мощными областями, концентрированными на структурных поднятиях. Никакая часть этой информации не может быть извлечена из картины стандартной амплитуды, приведенной слева.

Хотя здесь это не показано, ориентация изображения, так же как и шаг функции непрозрачности, могут быть изменены в интерактивном режиме, и куб может быть повторно представлен приблизительно в 15 или больше окнах за секунду для того, чтобы позволить интерпретатору изучать изменения толщины как функцию относительного геологического времени.

Ваяние формации. На рис. 10 представлен третий способ использования возрастного куба. Для этого изображения использованы те же воксельные кубы, что и для создания рис. 9. Однако видны только сейсмические

данные, найденные в пределах ограниченного диапазона относительного геологического возраста, который показан красной кривой непрозрачности на рисунке 7. Все другие возрасты сделаны прозрачными. Если нужно, непрозрачность видимых данных может также быть трансформирована для отображения выбранного диапазона амплитуд. Это могут быть наибольшие положительные или отрицательные значения первичных сейсмических данных или одним из диапазонов спектра изображения ColorStack. И снова, эти цветовые вариации, так же как и интересующий возрастной диапазон

(амплитуда непрозрачности) могут быть изменены в интерактивном режиме. Как только найден желаемый геологический временной слой, куб можно вращать в интерактивном режиме, преобразовывать и менять масштаб изображения для получения подходящего режима просмотра.

Сейсмо-хроностратиграфический куб

Вышеприведенные изображения резко улучшены по сравнению со стандартными изображениями сейсмических амплитуд, однако все еще есть одна вещь, отсутствующая на тех изображениях — положения временных перерывов. Где паузы?

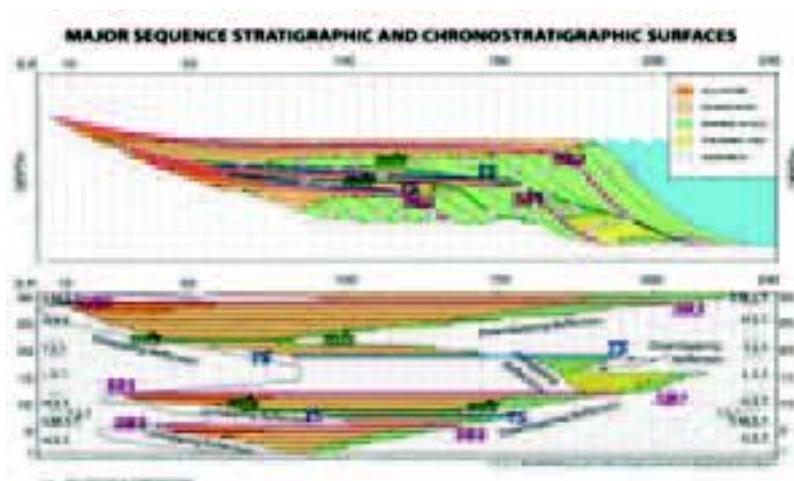


Рис. 11. Стилизованный стратиграфический разрез и соответствующая хроностратиграфическая диаграмма. Это изображение представляет собой сумму стратиграфической диаграммы Baum и хронологической диаграммы, взятой с <http://strata.geol.sc.edu/ss-chrono.html>, 2005.

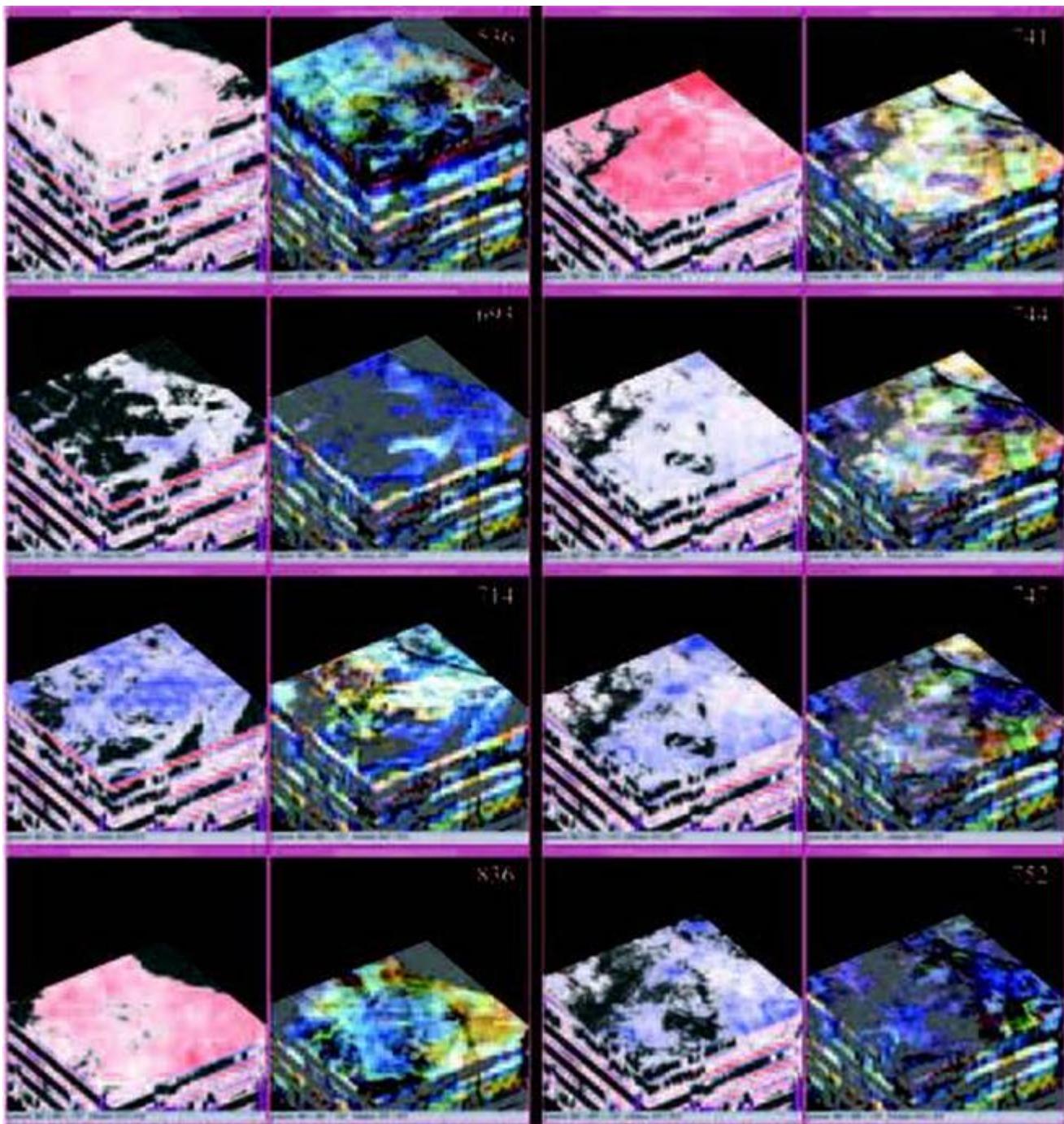


Рис. 12. Восемь пар, в двух колонках, сейсмо-хроностратиграфических (с левой стороны) и ColorStack-Wheeler (с правой стороны) кубов. Верхний среди этих пар пластовый срез увеличен с половины на несколько периодов в левой колонке, в то время как в правой колонке он увеличен на часть периода. Белые номера указывают относительное геологическое время верхнего пластового среза. В данном наборе кубов имеется 32 среза относительного возраста на период. Серый цвет в этих кубах указывает локализации перерывов. Срезы спектрального разложения ColorStack показывают значительно больше стратиграфических деталей, чем срезы стандартной амплитуды. Цветовые вариации в ColorStack, как полагают, связаны с вариациями толщин слоев.

Гистограмма возрастного куба (рисунок 7) показывает, что в возрастном кубе содержатся паузы, но для показа была сделана большая работа, скрытая тогда. Dennis Cooke и Jim Benson из Santos после наблюдения результатов возрастного куба, примененных к стандартным сейсмическим данным, спорили со мной, чтобы я нашел способ

комбинирования сейсмического и возрастного кубов для построения сейсмо-хроностратиграфического куба, подобно хроностратиграфической диаграмме, показанной на рисунке 11 - Wheeler (1958), Vail и др. (1977). Согласно Jim, положения пауз, как показано на рисунке 11, «неопределены» для стратиграфа.

В результате споров Stark (2005d) представил первый промышленный сейсмо-хроностратиграфический куб на съезде SEG 2005 года в Хьюстоне. В данной статье эта работа приводится на один шаг вперед, также сравниваются сейсмо-хроностратиграфический (Wheeler) и ColorStack-Wheeler кубы. Результаты для различных

возрастов приведены на рисунке 12. Он содержит пары сейсмохроностратиграфических и ColorStack-Wheeler кубов, ограниченные тем же срезом постоянного относительного возраста. Вертикальная ось в каждом из этих кубов — шкала относительного геологического времени. Любое сечение этих кубов соответствует нижней части рисунка 11, но при использовании нелинейной шкалы возраста. Сейсмические амплитуды приведены слева от каждой пары и показаны, используя стандартную красно-бело-синюю цветовую шкалу. Версия ColorStack - справа и строится, как описано выше. На обеих картинках серый цвет используется для обозначения пауз. Сейсмический срез постоянного возраста подобен пластовым срезам, описанным Zeng и др. (2001). Однако срезы рис. 12 содержат локализации пауз, которые не присутствуют на пластовых срезах, которые получает Zeng или другие.

Итого имеет 8 пар, организованных в две колонки. В колонке слева, возрастные срезы меняются больше чем от половины до нескольких периодов. В колонке справа, четыре возрастных среза - все меняются меньше половины сейсмического периода. Белые номера в правом верхнем углу каждого ColorStack-Wheeler куба указывают относительное геологическое время соответствующей пары хроностратиграфических кубов. В этом кубе есть 32 шага относительного возраста на период. Первое, что следует отметить при изучении этих изображений — изменение формы области перерыва на верхнем пластовом срезе как функции относительного геологического времени. Не удивительно видеть изменение формы при сравнении двух возрастов, которые являются одним периодом или двумя отдельными периодами, поскольку они находятся в левой колонке. Однако, в правой колонке, где возрасты - только части отдельных периодов, есть также сильные изменения в локализациях пауз. Это указывает на стратиграфическое разрешение, содержащееся в возрастном кубе.

Второе, что следует отметить — в пределах одной пары хроностратиграфических кубов, цвета ColorStack обычно показывают значительно больше

вариаций цвета в поперечном направлении, чем на соответствующих сейсмических амплитудах. Это показывает мощность спектрального разложения и метода ColorStack. И, наконец, следует отметить количество цветов, и, следовательно, соответствующие вариации толщины в каждом пластовом срезе ColorStack. Особенно нужно отметить изменение от одного пластового среза к следующему в правой колонке. Это показывает вертикальное разрешение процедуры спектрального разложения. Зная, что разделенные спектры были суммированы только в три куба для целей отображения, насколько еще можно было бы повысить разрешение, увеличивая количество спектральных стеков?

Резюме

В данной статье был рассмотрен ряд уникальных методов визуализации сейсмических кубов. Основным применением было исследование относительных вариаций толщин как функции относительного геологического возраста, подразумевается с помощью спектрального разложения. Спектральное разложение ColorStacks в комбинации с возрастным кубом позволяет выявить ранее невидимые сложные стратиграфические элементы. Эти методы позволяют интерпретатору быстро получить сведения о сложностях геологического строения интересующего куба данных способами, которые ранее были недоступны.

Суммирование или группировка результатов спектрального разложения для расчета изображений ColorStack явно приносят пользу. Однако это спектральное суммирование, вероятно, больше снижает качество первоначального разложения, чем дает снижение уровня помех как «квадратный корень из n». Способы отображения большого количества «спектральных стеков» необходимо проанализировать. В конечном счете, возрастной куб должен быть объединен с отдельными спектральными кубами для того, чтобы анимации частотных кубов были ограничены относительным геологическим временем.

Здесь цвет изображения ColorStack — качественная индикация полной толщины

напластования. Должно быть сделано детализированное моделирование, чтобы сделать количественные расчеты. Далее, чувствительность результатов ColorStack к особому методу спектрального разложения не известна — это может стать темой будущей статьи. Для этого типа трехкомпонентного спектрального разложения временное разрешение метода разложения наиболее, вероятно, более важно, чем разрешающая способность по частоте.

Качество результативных сейсмохроностратиграфических и ColorStack-Wheeler кубов, так же как изображения ваяния, зависит от качества входных возрастных кубов. В настоящее время расчет высококачественного возрастного куба с высоким разрешением занимает много времени. Расчет возрастных кубов более низкого разрешения занимает намного меньше времени, однако они не обладают такой же информативностью, и могут ввести интерпретатора в заблуждение «остаточным строением». Возрастной куб высокого разрешения — ключ к получению локализаций пауз, таких которые обозначены на рисунке 7 и показанный на рисунке 12.

Рисунок 12 в особенности полон большим количеством детальной геологической информации, которая может быть вытянута из сейсмических данных после суммирования. Взгляните снова на правую часть рисунка 12 и заметьте количество цветовых вариаций в пределах этого полупериода. Это — большой пример совета Milo Backus, чтобы «интерпретировать все, как сигнал, пока не доказано иное».

В печатном варианте статьи не имеет смысла иллюстрировать использование перемещения и взаимодействия на нескольких статических изображениях. Динамическая природа изображений, особенно если они могут быть показаны в стерео режиме, дает интерпретатору значительно большее понимание данных, чем несколько статических изображений. Чтобы облегчить эту задачу, для хроностратиграфических кубов, показанных на рис. 12, был создан ролик в формате QuickTime, чтобы показать детали, располагаемые как функции относительного времени.

Этот ролик отображает все пластовые срезы вместо нескольких срезов, выбранных для рисунка 12. Заинтересованные могут войти в контакт с автором посредством электронной почты (tstark3@verizon.net) для получения данного ролика.

Заметьте, что как только размер куба растет, растет и полноценность сейсмо-хроностратиграфических и ColorStack-Wheeler кубов для отображения временных отметок областей накопления песка и продуктивных нефтегазоносных поясов. Хотя впереди есть много работы, которая должна быть сделана, много вопросов, на которые нужно ответить, работа, представленная здесь вполне удовлетворяет поставленным целям. Приведенные изображения помогают интерпретатору опознавать и проводить большое количество геологической информации за малое времена, так и позволяют Вам ясно видеть то, что ранее было невидимо.

Благодарности

Я обязан Dennis Cooke и Jim Benson из Santos, и Cedric M. Griffiths из CSIRO за то, что они направили мои усилия на создание сейсмо-хроностратиграфического куба на основе возрастного куба. Santos и South West Queensland Unit Joint Venture (Santos, Delhi и Origin) снабжали трехмерными сейсмическими данными, которые были представлены на рисунках данной статьи. Sun Microsystems обеспечил рабочими станциями, на которых была выполнена эта работа. TeraRecon снабжал платформой VolumePro 1000 для расчета кубов ColorStack, что облегчило построение истинного времени и манипуляцию трехмерными кубами данных. Fusion Petroleum Technologies снабдило кубами спектрального разложения, которые я затем «загрязнял», чтобы получить мои низко, средне и высокочастотные спектральные суммы. STARK Research обеспечило финансирование данного проекта.

Ссылки на литературу

Bahorich, M., Motsch, A., and Partyka, G. [2002] Amplitude responses image reservoir, *Hart's E&P*, January 2002, 59-61.
Castagna, J. P., Sun, S., and Siegfried, R. W. [2003]

- Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, **22**, 129-127. Castagna, J.P. and Sun, S. [2006] Comparison of spectral decomposition methods. *First Break*, **24**, 3, 75-79. Onstott, G. E., Backus, M. M., Wilson, C. R., and Phillips, J. D. [1984] Color display of offset dependent reflectivity in seismic data. *54th SEG Meeting*, Expanded Abstract, Session: S17.8 Partyka, G. J., Gridley, J., and Lopez, J. [1999] Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, **18**, 353-360.
Stark, T.J. [2002] A 'Fully Interpreted Cube': Relating every seismic sample to a seismic horizon. *72nd SEG Meeting*, Special Session 3, Summary of 3D Interpretation Workstation Applications.
Stark, T.J. [2003] Unwrapping instantaneous phase to generate a Relative Geologic Time Volume. *73rd SEG Meeting*, Expanded Abstract, 1707-1710.
Stark, T.J. [2004a] System for utilizing geologic time volumes. *United States Patent* 6 708 118.
Stark, T.J. [2004b] Relative geologic time (age) volumes - Relating every seismic sample to a geologically reasonable horizon. *The Leading Edge*, **23**, 928-932.
Stark, T. J. [2004c] Real-time volume sculpting by modifying the opacity lookup table of a classification volume. *74th SEG Meeting*, Visualization Theater presentation.
Stark, T.J. [2005a] System for multidimensional data analysis. *United States Patent* 6 850 845.
Stark, T.J. [2005b] System for information extraction from geologic time volumes. *United States Patent* 6 853 922. Stark, T.J. [2005c] Anomaly detection and visualization using color-stack, cross-plot, and anomalousness volumes, *75th SEG Meeting*, Expanded Abstract, 763-766.
Stark, T.J. [2005d] Generation of a 3D seismic 'Wheeler Diagram' from a high resolution Age Volume. *75th SEG Meeting*, Expanded Abstract, 782-785.
Vail, P.R., Mitchum, R.M. Jr., and Thompson, S.III [1997] Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap, in Payton, C. E., Ed., Seismic stratigraphy. *Association of Petroleum Geologists Memoir* 26, 63-81.
Wheeler, H.E. [1958] Time stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **42**, 1047-1063. Zeng, H., Hentz, T.F., and Wood, L.J. [2001] Stratal slicing of Miocene- Pliocene sediments in Vermilion Block 50-Tiger Shoal Area, offshore Louisiana. *The Leading Edge*, **20**, 408-418.