

## Новая синергия между построением сейсмических изображений и океанографией. The new synergy between seismic reflection imaging and oceanography

S.M. Jones,<sup>1\*</sup> R.J.J. Hardy,<sup>1</sup> R.W. Hobbs<sup>2</sup> и D. Hardy<sup>1</sup>

### Аннотация

Эффекты влияния изменения температуры и минерализации океана на сейсмограммы стали широко известными углеводородной промышленности в 1993 после проведения больших трехмерных сейсмических съемок в Канале Faroe-Shetland. Десятилетия позже убедительно показали, что данные традиционной сейсморазведки на отраженных волнах хорошо отображают термогалинную структуру океана. За прошедшие пять лет было установлено, что сейсморазведка является инструментом, который позволяет эффективно изучать ранее недоступные большие океанские объемы с высоким пространственным разрешением. Мы рассмотрим стадии обработки, требуемые для построения изображения океана, используя сейсмические данные, полученные во впадине Rockall, к западу от Ирландии. Когда понятна причина сейсмической отражательной способности, сейсмические изображения могут, в конечном счете, использоваться, чтобы измерить пространственное изменение в структуре океана, что должно значительно увеличить наше понимание климатической системы. У промышленности есть шанс помочь в картировании океана, облегчая доступ к существующим сейсмическим данным и делая водный слой на новых сейсмических данных доступным для академического исследования. Способность предсказать пространственное и временное изменение в океанской температуре и течениях, за небольшую дополнительную стоимость по сравнению с сейсмическим сбором данных, должна также помочь промышленности в разработке и управлении месторождением.

### Введение

Разведка залежей углеводородов расширилась до глубоководья в течения прошедших двух десятилетий. Расцветающая глубоководная сейсмическая база данных, полученная во время этой фазы поисково-разведочных работ, теперь приносит прибыль в различных областях. Когда стандартные методы обработки сейсмических данных нацелены на водный слой, можно получить неожиданные изображения, которые в настоящее время оставляют след в океанографическом сообществе (иллюстрация 1). Предоставляя метод для отображения детализированной океанской структуры в беспрецедентно больших объемах, совместные действия между океанографией и сейсмологией обещают пролить свет на новые проблемы, такие как смешивание океана, изменение климата, и стабильность континентального склона. Мы сначала описываем хронологию новых совместных действий и затем поясним стадии обработки, требуемые для получения сейсмических изображений океана, используя пример впадины Rockall, к западу от Ирландии. В конце, мы обсудим значение новых изображений и для океанографии и для углеводородной промышленности.

### Акустическая океанография

Эффекты изменений в океанской температуре, минерализации, и течениях на отражении сейсмические изображения стали широко известными углеводородной промышленности в 1993, после осуществления больших 3D сейсмических съемок в канале Faroe-Shetland. Различия во времени пробега в водном слое более 20 мс на границах были сначала приписаны погрешностям в позиционировании, так как у водного слоя, как первоначально предполагалось, была фиксированная сейсмическая скорость. Скоро стало понятно, что разности времени пробега вызваны изменениями в

сейсмической скорости в морской воде в ходе съемки, связанными со смешиванием более холодных вод с севера Исландии с более теплыми южными водами, которые несет Гольфстрим. Сегодня, задача о переменной скорости в воде - все еще проблема, как для трехмерной обработки так и особенно для 4D сейсмического мониторинга при управлении месторождением нефти (Barley, 1999; Bertrand и MacBeth, 2002). Задача была первоначально обработана, используя подход вертикального статического сдвига, заимствованный из обработки наземных сейсмических данных. Этот подход решает и затем корректирует изменения в средней скорости водного слоя (Wombell, 1997; Ксу и Pham, 2003). Приливные колебания в толщине водяного столба также способствует изменению во времени пробега, и статический сдвиговый подход может использоваться для одновременной корректировки приливов и вариаций сейсмической скорости (Lacombe и др., 2006). Mackay и др. (2003) обсудили возможность измерения сейсмической скорости в воде, прямо используя анализ подобия и инверсию прямых волн, но заключил, что эти методы являются слишком громоздкими, чтобы обычно использоваться на больших глубоководных трехмерных объемах данных. Вместо этого они осуществляли динамическую (то есть функцию времени и угла) коррекцию, которая имеет больше общего с методом замены слоя чем со сдвигами вдоль вертикальной траектории луча, используемые для статических коррекций. Ни один из этих подходов не объясняет вертикального изменения в сейсмической скорости, и не дает объяснения, почему существенные изменения могут произойти во время съемки вдоль одиночной линии.

<sup>1</sup> School of Natural Sciences, Department of Geology, Trinity College Dublin, Dublin 2, Ireland.

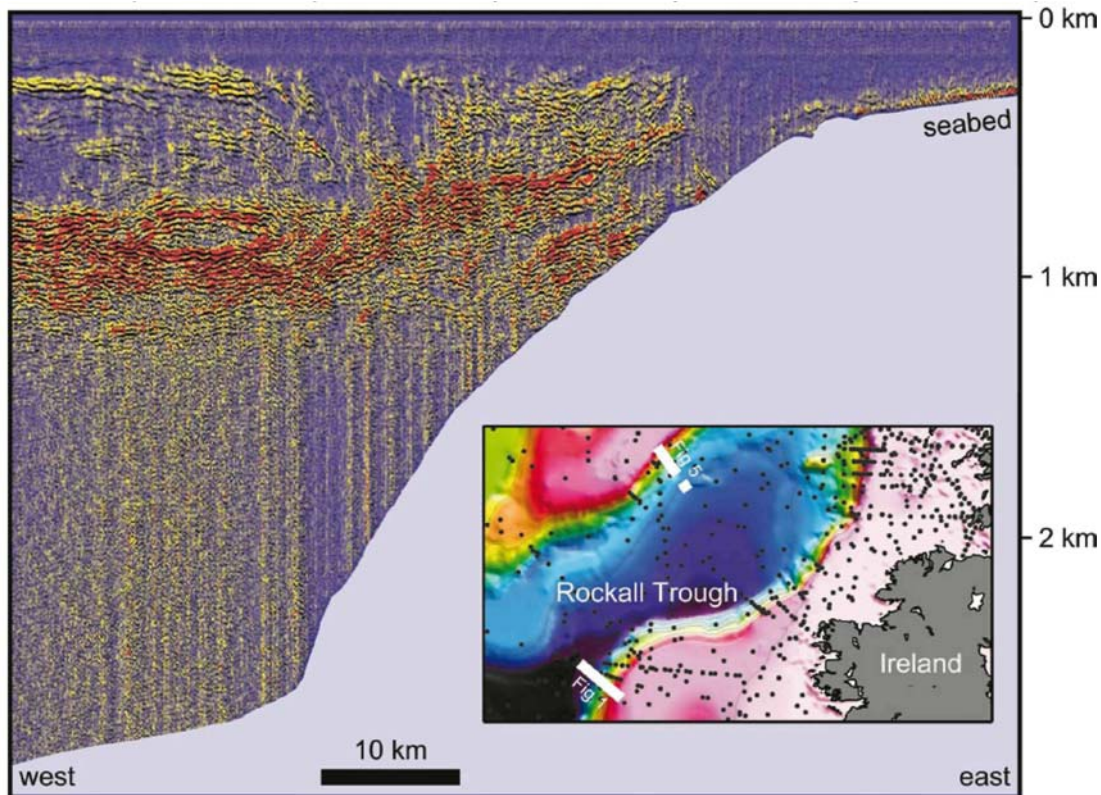
<sup>2</sup> Department of Earth Sciences, Durham University, South Road, Durham DH1 3LE, UK.

\* Corresponding author, E-mail: stephen.jones@tcd.ie.

В тоже время, в поворотной статье, написанной за пределами нефтегазовой индустрии, Holbrook и др. (2003) показали, что данные традиционной сейсморазведки на отраженных волнах могут предоставить картину структуры океана. Ранее отмечалось низкое качество сейсмических изображений структуры океана (Gonella и Michon, 1988; Phillips и Dean, 1991), однако Holbrook и др. (2003) впервые направили стандартные процедуры обработки на водный слой для обеспечения изображений хорошего качества и отметили, что это может принести значительный вклад в океанографию. Holbrook и др. (2003) использовали сейсмические данные с акватории северо-восточной Канады, и сравнили эти изображения с ограниченной информацией о температуре океана, полученной в ходе 3D съемки, и с результатами вертикального профилирования проводимость-температура-глубина (CTD), полученных в ходе отдельных океанографических исследований.

Эти сравнения предложили, чтобы термогалинные (температура и минерализация) вариации через внутренние границы в пределах водяного столба вызвали достаточные скоростные, и плотностные контрасты, чтобы объяснить энергию, отраженную в пределах водяного столба.

Первый специализированный эксперимент, который собрал и сейсмические отражения и океанографические данные, был проведен через континентальную окраину недалеко от берегов Норвегии в 2003 (Nandi и др., 2004; Holbrook и Fer, 2005; Páramo и Holbrook, 2005). Данные с норвежской окраины, которые показали сильные отражения от водного слоя, в синтетических сейсмограммах, вычисленных по соответствующим профилям вертикальной температуры и минерализации, так же показала, что термогалинные вариации в масштабе сейсмической длины волны были существенной причиной отражений. Далее о сейсмических разрезах океана сообщили из Калифорнийского залива, Фолклендских островов Плато акватории Faroe-Shetland, прибрежной Иберии, западной тропической Атлантики (Подветренные острова), Мексиканского залива, Соломоновых Островов, и прибрежной Ирландии (иллюстрация 2; Ocean Science Meeting, 2006) Было придумано несколько различных названий новому



**Рисунок 1** Отражающие поверхности на глубинном сейсмическом разрезе в водной толще в пределах впадины Rockall, к западу от Ирландии. Цветом изображена сила отражения (красный цвет= высокая амплитуда). На вставке изображено положение линии на ЮЗ окраине впадины Rockall с топографией дна, а так же отмечены точки измерений CTD (проводимость-температура-глубина).

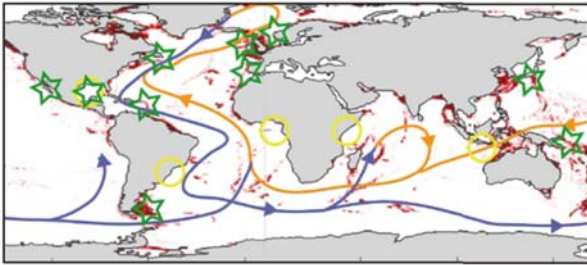


Рисунок 2 Положение совместных экспериментов сейсмологии/океанографии (зеленые звезды) и важные области разведки на нефть и газ (желтые окружности). Глобальная термогалинная конвекция схематично отмечена синими стрелками (глубокие холодные течения) и оранжевыми стрелками (поверхностные теплые течения), красным отмечены области, где приливная энергия рассеивается вследствие крутой топографии морского дна (Egbert and Ray, 2001); отражательная способность водного слоя может быть связана этими явлениями. Многие из сейсмических исследований появились в виде аннотаций (Ocean Science Meeting, 2006)

использованию отраженных сейсмических волн. Убежденные сейсмологи чеканили термины 'сейсмическая океанография' и 'геофизическая океанография', чтобы описать то, что является для них новым направлением исследования. С точки зрения океанографа сейсмическое профилирование методом отраженных волн - всего лишь последний элемент серии методов, которые использовались в том, что уже известно как 'акустическая океанография'. Например, высокочастотные (десятки и сотни килогерц) узкополосные эхолоты, обычно используемые для того, чтобы обнаружить косяки рыб по акустическому обратному рассеянию, могут также использоваться, чтобы изучить внутренние волны и определить турбулентные области на мелководье (Wesson and Gregg, 1994). Эти изображения имеют несколько общих черт с теми, мы собрали использующиеся традиционные сейсмические измерения, хотя у них большая разрешающая способность по горизонтали и менее глубокое проникновение. Звук был передан через все океанские бассейны, чтобы с помощью томографии сделать вывод о десятилетних изменениях в температуре океана. Такие применения акустической океанографии основываются на более чем полувековых оборонных исследованиях. Субмарины скрываются ниже низкоскоростной зоны, связанной с границей между верхним слоем воды с высоким геотермическим градиентом и основным слоем, с пониженным геотермическим градиентом, известным как канал удержания и передачи звука (SOFAR), использующий широкому кругу сейсмологов факт, что скоростная инверсия приводит к 'скрытому слою'. Киты используют способ, которым звук направлен вдоль того же самого низкоскоростного слоя, чтобы общаться через океан. Технические подробности этого и предыдущего использования звука в океанографии могут быть найдены в Medwin (2005), и хорошее обобщение для неспециалиста было сделано Национальной Академией Наук (Выдавая секреты океана.

<http://www.beyonddiscovery.org/>)

### Обработка данных в водном слое на примере впадины Rockall

Мы поясняем последовательность обработки, требуемую для генерации изображения океанской структуры,

используя примеры из нашего продолжающегося изучения традиционных сейсмических профилей через впадину Rockall. Впадина Rockall - обедненный осадками бассейн шириной 200 км, выраженный крутыми наклонами морского дна, которые убывают с глубины 200 м на шельфе до более, чем 3 км в центре впадины (вкладка рисунку 1). Вода вертикально расслоена, и могут быть выделены несколько слоев на основе температуры, минерализации, и других химических характеристик (рисунок 4). Параллельные окраине течения огибают впадины против часовой стрелки, среднemasштабные (100-километровый диаметр) вихри были задокументированы, и внутренние волны сгенерированы на обеих окраинах (внутренние волны распространяются через внутреннюю область водяного столба, а не вдоль морской поверхности). Для исследования этих океанографических явлений доступна существенная база традиционных сейсмических данных, даже притом, что эта территория все еще разведывается на залежи углеводородов. Однако прежде чем тратить время и ресурсы на копирование и загрузку отдельных данных сейсморазведки для океанографического изучения, для удобства сначала необходимо отобразить параметры съемки. Некоторые наборы данных были зарегистрированы с недостаточным динамическим диапазоном, чтобы сохранить океанские отражения, которые являются на порядок слабее, чем отражения от разреза. Еще хуже, если глубоководная задержка, возможно, использовалась, чтобы уменьшить размер набора данных, с тем, чтобы верхняя часть водной толщи не записывалась. Повторный отстрел и другие временные окна при разведке не являются проблемой, так как они дают прямое средство определения краткосрочной изменчивости в отражательной способности водяного столба.

Последовательности обработки как до, так и после суммирования, могут быть применены к сейсмическим данным, в зависимости от отображаемой океанографической особенности.

Для убежденного сейсмолога очевидный курс действия должен привести к суммированному сейсмическому профилю МОВ, как например, на рисунке 1, чтобы описать структуру отражательной способности, и прокоррелировать особенности, представляющие интерес

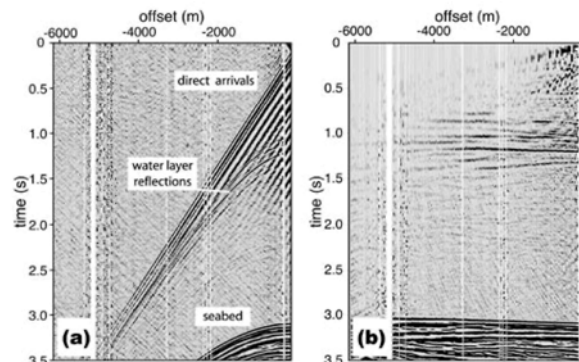
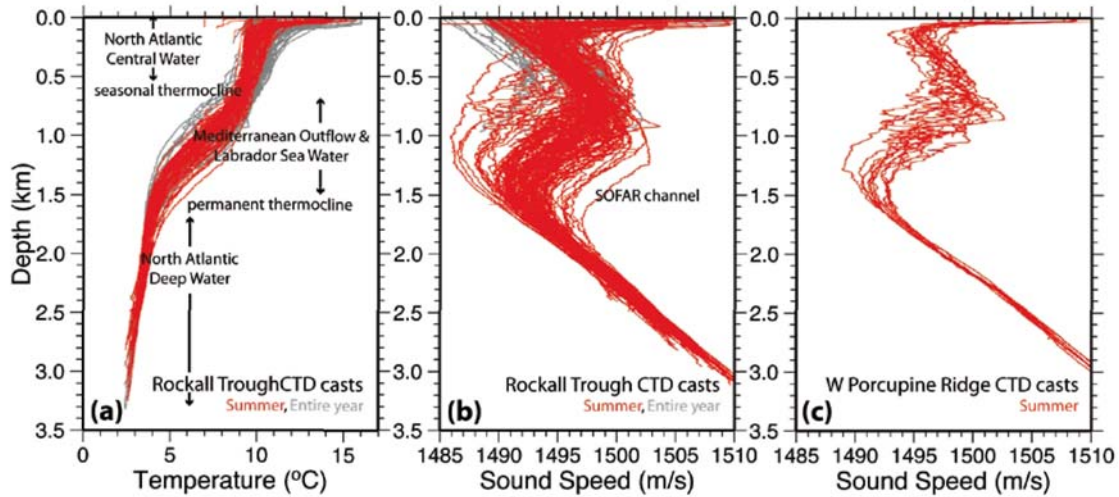


Рисунок 3 Сейсмограмма ОПВ поясняющая соотношение сигнал/шум и эффект обработки. (a) Полевая сейсмограмма ОПВ (b) Та же сейсмограмма после подавления шума и коррекции NMO с постоянной скоростью. Данные могут потребовать дальнейших мер по подавлению шума.



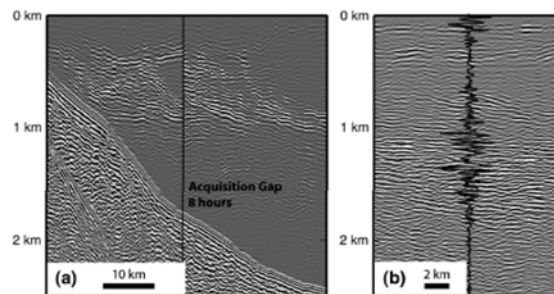
**Рисунок 4** Просуммированные океанографические CTD данные, собранные с 1970-х (см. вставку рис. 1) (a) Крупномасштабное температурное поле, (b) профили скорости звука, рассчитанные из данных минерализации и температуры, (c) набор профилей скорости, собранных во время сейсмического сезона (с мая по сентябрь) вдоль западного края Porcupine Ridge, ЮЗ впадины Rockall (см. вставку на рисунке 1).

со смежными профилями. Мы стремимся развивать стандартную последовательность обработки, которая сохраняет амплитуду отраженной волны и выполняется быстро, так, чтобы различные съемки можно было сравнивать быстро объективно.

Простой обрабатывающий поток достигает этих целей и достаточен, чтобы установить предварительные изображения разумного качества для различных наборов данных. Главными компонентами потока обработки являются: выделение данных в водной толще; удаление сигнатуры источника и масштабирование амплитуды к средней величине; удаление прямой волны после линейного приращения времени и медианной фильтрации; коррекция за нормальное приращение (NMO) с постоянной скоростью (например,  $ms^{-1}$ ); и суммирование. Для нашего автоматизированного потока мы предпочитаем использовать постоянную скорость во время коррекции NMO. Предварительное изучения и выполнение скоростного анализа конечно 'заостряет' изображения. Однако так как водный слой находится в постоянном движении на скоростях, которые могут быть сопоставимыми со скоростью сейсмического судна, зависимость времени от выноса является функцией, как текущей скорости течения воды, так и скорости звука. Результаты анализа меры когерентности не могут быть прямо интерпретированы как скорости звука, и даже если, чтобы получить более резкое суммированное изображение, применена коррекция NMO, основанная на этих результатах, физическая интерпретация волнистых отражений изображенных на стеке неясна. Там, где у отражений есть существенная остаточная кинематика после коррекции NMO с постоянной скоростью, размывания можно избежать, суммируя ограниченный набор выносов.

Хотя фоновые шумы (например, шум от зыби или колебаний кабеля) в некоторых случаях могут забить

сигнал, самый проблематичный шум исходит из прямых волн. Рисунок 3а показывает, что мощность прямой волны и связанного с ней звона намного больше, чем мощность сигнала, хотя сам сигнал может быть ясно идентифицирован без суммирования. Чтобы разобраться с искажениями от прямой волны, можно использовать множество стратегий, в зависимости от глубины целевого



**Рисунок 5** Два примера из впадины Rockall, иллюстрирующие временную изменчивость сейсмических и океанографических данных (см. вставку на рисунке 1). (a) Промежуток около восьми часов во время съемки WESTLINE. Заметьте, что общая форма группы отражающих горизонтов остается той же самой, однако меньшая группа, мощностью несколько сотен метров, обрывается. (b) Пример разумного соответствия между синтетическим сейсмический профилем МОВ (основанным на океанографических данных) и наблюдаемой сейсмической отражательной способностью, даже при том, что сейсмические данные и океанографические данные были получены в различные годы.



сигнала, а так же от того, должны ли данные быть интерпретированы до или после суммирования. Прямые волны могут быть частично удалены растянутым мьютингом, традиционно применяющимся к дальним выносам для ограничения растягивания выноса. Преимущество этой простой стратегии состоит в том, что мощность и частота сигнала полностью не меняются, но значительное количество искажения остается на малых глубинах и ближних выноса, и на больших глубинах используемый диапазон выносов составляет меньше чем 2 км.

Поток обработки, выделенный в предыдущем параграфе, использует медианный фильтр, чтобы удалить часть шумов прямой волны. Для многих наборов данных после медианной фильтрации некоторое количество шума от прямой волны остается, и требуется дальнейшая обработка. Подходящими стали фильтрация фильтром высоких частот (с частотой среза около 20 Гц), медианная фильтрация и Karhunen-Loève (KL) фильтрация (Ocean Science Meeting, 2006). Вообще, мы предпочитаем использовать менее серьезное фильтрование и принять некоторый остаточный шум около поверхности воды. Не всегда необходимо, чтобы иметь хорошие изображения мелководья, так как известно об энергичном смешивании, характеризующем поверхностный слой, что означает, что любые отражения сигнала не могут быть коррелированы в пространстве и времени. Когда требуются мелководные изображения, можно минимально использовать медианную и полосовую фильтрацию, потому что остающиеся шумы от прямой волны формирует прямые горизонтальные полосы на суммированном разрезе, так, что глаз может легко отличить сигнал по его различному падению. Более грубое фильтрование иногда требуется для данных с высокими уровнями искажения в воде, и особенно для старых данных, которые подвержены пространственному аляписингу вследствие более длинных групповых интервалов, однако нужно быть осторожным, чтобы не терять сигнал в больших выносах, где у этого есть время приращения подобно времени прихода прямой волны.

Некоторые океанографы подвергли сомнению использование традиционных сейсмических профилей в океанографическом создании изображений, потому что водный слой находится в постоянном движении, даже при том, что такой же критике могут быть подвергнуты и океанографические наборы данных, собранные за ограниченный период времени. Во впадине Rockall, например, внутренние океанские волны могли перемещаться на скоростях до нескольких метров в секунду, в то время как параллельные окраине течения - со скоростью  $0.01-0.5 \text{ мс}^{-1}$  (White and Bowyer, 1997). Эти скорости подобны типичной сейсмической скорости судна  $2 \text{ мс}^{-1}$  (4 узла). Для 6-километровой косы сигнал может быть виден на выносах до 4 км (Рисунок 3b). Судно перемещается на 2 км, чтобы произвести сейсмограмму ОСТ с 4-километровым выносом, таким образом, выборка содержит трассы собранные в течение 17 минут на скорости около  $2 \text{ мс}^{-1}$ . В течение этого времени, вершина внутренней волны, двигающаяся со скоростью  $1 \text{ мс}^{-1}$ , переместилась бы на 1 км. Этот пример показывает, что традиционные шаги обработки, которые перемешивают вместе записи выстрелов (включая сборку ОСТ и суммирование, и миграцию по разрезам общеудаленных трасс или миграцию после суммирования) могут привести к существенному размазыванию перемещения

целей в течение времени съемки (которое отражается на горизонтальном расстоянии вдоль традиционного профиля), так, что океанографическая информация будет потеряна.

Чтобы избежать этой проблемы, можно использовать технологии обработки до суммирования, чтобы изучить потенциально движущиеся объекты. Каждая запись обеспечивает моментальный снимок толщи воды, и водное движение может быть оценено путем сравнения соседних снимков. Например, отражения на записи на рисунке 3b деформированы волнистостью, которая может быть интерпретирована как возмущения, вызванные внутренними океанскими волнами. Амплитуда и частота внутренних волн могут быть измерены, а скорость распространения может быть измерена путем сравнения того же самого отражения на последовательных записях. Ясно, что чем большее диапазон выносов, на которых отражение может быть прослежено на каждой выборке сейсмограмм, тем больше такой информации относительно внутренних волн, может быть сгенерировано. Поэтому важно не использовать растянутый мьютинг. Можно применить коррекцию за движение приемника (Hampson и Jakubowicz, 1990) и коррекцию за линейное приращение без растяжения (Pettoud и Tygel, 2003) для расширения доступного диапазона выносов.

### Интерпретация сейсмических изображений океана

После Holbrook и др. (2003), было выполнено несколько исследований (Рисунок 2). Некоторые эксперименты отражают смешивание главных водных масс, включая исток теплой соленой Средиземноморской воды в Атлантику и смешивание околоатланических течений с водами Южной Атлантики. На других исследованиях, включая наши примеры из впадины Rockall (Рисунок 1), наблюдались области высокой сейсмической отражательной способности на смежных мелководьях, вдоль континентальных склонов. Хотя эти последние изображения не кажутся столь же захватывающими как вихрь, взаимное проникновение, и структуры погружения, наблюдаемые при смещении фронтов в большом океане, они могут обеспечить существенные и фундаментальные преимущества для нашего понимания глобальных процессов смешивания океанов.

Что вызывает сейсмическую отражательную способность? Все изданные исследования утверждали, что вариации температуры и минерализации в масштабе длины волны сейсмического источника (1-20 м) важны. Океанографы термостратифицированную структуру в этом масштабе называют 'мелкоструктурной'. Nandi и др. (2004) добыли совпадающие наборы данных с акватории Норвегии, получая одноразовые океанографические пробы с сейсмического судна во время отстрела. Синтетические сейсмограммы, вычисленные на основе данных о температуре и минерализации, дают хорошее соответствие сейсмическим данным и предполагают, что сейсмическая отражательная способность определяется влиянием колебаний температуры всего  $0.05^\circ\text{C}$  на интервале 10-20 м. Páramo и Holbrook (2005) использовали анализ зависимости амплитуды от выноса, чтобы продемонстрировать, что у температуры есть преобладающее влияние на сейсмические скорости в акватории Норвегии. В других областях мира, особенно

на мелкой воде, может иметь больший эффект минерализация. В акватории Японии Tsuji и др. (2005) оценили водные коэффициенты отражения слоя приблизительно в 0.0014, используя метод Warner (1987), чтобы сравнить силу отражения водного слоя и морского дна.

Опыт в других областях акустической океанографии показывает, что другие эффекты, такие как рассеивание и рефракция, могли бы поспособствовать энергии, возвращенной из водного слоя (Medwin, 2005). Никакие изданные исследования не зондировали эти идеи относительно данным метода отраженных волн. Однако несколько особенностей нашего набора данных из Rockall предполагают, что термогалинная структура сама по себе может объяснить все наблюдаемые отражения. Например, иногда наблюдаются отражения, которые опускаются более круто, чем контуры плотности, вычисленные по океанографическим измерениям. Кроме того, мы часто замечаем, что отражающий пакет, ассоциируемый с каналом SOFAR, становится более толстым (его кровля пласта становится более неглубокой), и более сильно отражающим ближе к крутым склонам морского дна на окраинах. Однако сопоставление старых океанографических данных не дает очевидной разницы в средней термогалинной структуре между центром впадины и окраинами. Мы поэтому полагаем, что вопрос того, что точно вызывает водную отражательную способность слоя, должным образом еще не понят. Однако, больше сейсмических наблюдений, таких как на иллюстрациях 1 и 5 должно помочь ответить на этот вопрос. Мы находимся в процессе картирования сейсмической отражательной способности водного слоя вокруг всех границ впадины Rockall.

Прежде, чем сейсмические отображения океанской структуры могут использоваться, мы должны знать временную и пространственную изменчивость отражательной способности. Данная статья является результатом активных совместных действий между океанографией и сейсмическим созданием изображений. Преследуются две конечные цели. Одна в том, чтобы выполнить изучение тестовой калибровки, которая включает одновременно изучение и сбор сорасположенных сейсмических и океанографических данных. Например, один из нас (Hobbs) ведет, финансируемый ЕС Geophysical Oceanography (GO) project ([www.dur.ac.uk/eu.go](http://www.dur.ac.uk/eu.go)). Это сотрудничество собрало большой набор данных с Кадисского залива, где происходит смешивание вытекающей Средиземноморской воды. Проект также генерирует синтетический сейсмический набор данных от теоретических моделей океана. Эти два набора данных будут проанализированы, чтобы оценить, какие океанографические параметры могут быть надежно извлечены из сейсмических данных, а также, чтобы спроектировать оптимальную съемку, обработку и стратегии интерпретации для будущих сейсмических экспериментов.

Вторая стратегия для того, чтобы ответить на вопрос о пространственно-временных вариациях состоит в том, чтобы использовать очень большой объем существующих сейсмических данных. Рассматривая типичные текущие скорости, упоминаемые в предыдущей части, мы не должны обязательно ожидать возможность коррелировать индивидуальные отражения, отображенные больше чем на

расстоянии один час. Резкая неоднородность в структуре отражательной способности, рассмотренная после восьмичасового перерыва в отстреле WESTLINE подтверждает этот прогноз (рисунок 5a).

В будущем, возможно, что сейсмические водные изображения слоя будут интерпретироваться, используя понятия, заимствованные от изучения турбулентности. В этой стратегии важно измерить степень корреляционной связи некоторого сейсмического свойства как функции пространства и времени. Используя данные специализированного сейсмического/океанографического эксперимента Tsuji и др. (2005) показал, что индивидуальные отражения могут быть прослежены на расстояниях до 40 км и прокоррелированы на изображениях, полученных в разные дни. Существующие наборы данных могут быть добыты для подобных измерений, путем сравнения линий и крослайнов в пределах отдельной съемки и сорасположенные линии от различных съемок. Мы начали делать временные и пространственные измерения изменчивости, используя 2D сеть во впадине Rockall, и несколько других групп опубликовали аннотации об анализе существующих наборов данных (Ocean Science Meeting, 2006), однако ни одни детальные результаты еще не были изданы. Углеродный опыт промышленности, обобщенный в начале этой статьи, ясно показывает, что в 3D данных содержится большое количество информации о временных вариациях в пределах водного слоя. Вариации времени пробега в пределах полосы содержат изменчивость в течение периода времени от нескольких часов до нескольких недель, в то время как 4D съемки обеспечивают дополнительные сравнения в течение нескольких лет. Об использовании трехмерных или 4D сейсмических данных в океанографии еще не была опубликована ни одна работа.

В дополнение к стратегиям получения совместных сейсмических / океанографических академических наборов данных и анализа существующих промышленных наборов данных, мы предлагаем третий подход, который представляет средний путь. Необходимо заинтересовать нефтяную промышленность в получении океанографических данных, используя одноразовые пробы, сбрасываемые со следующей за съемкой лодкой во время 3D съемки, тем самым делая океанографические измерения и водную часть сейсмических данных доступными для исследований.

### Выгода для океанографии

Океаны и атмосфера играют фундаментальную роль в управлении климатом. Океанография - по существу полевой предмет, и прогресс в понимании океанской циркуляции зависит от улучшенных наблюдений за основными свойствами, такими как температура, минерализация, и текущая скорость. Глубокий океан обширен и постоянно изменяющийся, таким образом методы непосредственного отбора становятся неэффективными средствами отображения. Традиционно, океанографы встраивают модели термогалинной структуры, используя вертикальные профили CTD,

полученные погружением пробника со стационарной лодки. Может потребоваться много часов, чтобы померить отдельный вертикальный профиль на глубоководье. Чтобы улучшить покрытие данных, доступны различные методики, такие как установка пробников CTD на колебательные системы, которые двигаются вверх и вниз в пределах водяного столба позади двигающейся лодки, или сбрасывании одноразовых пробников, которые передают данные назад на движущееся судно. Однако чтобы понять ступенчатое изменение в картировании трехмерной океанской структуры необходимо комбинировать прямые измерения с методами дистанционного зондирования, которые позволяют быстро рассмотреть большие области.

Спутниковые наблюдения обычно используются, чтобы контролировать морскую поверхностную температуру на всей поверхности глобуса, и это площадное покрытие привело к существенным улучшениям в совместных океан-атмосфера компьютерных моделях. Наша надежда в том, что существующие и недавно полученные сейсмические данные, приведут шаг за шагом к изменению в картировании трехмерной океанской структуры до морского дна, в частности вокруг континентальных окраин, где получено большинство индустриальных сейсмических данных. Карты сейсмической отражательной способности могли бы использоваться, чтобы выбрать положения для донных океанографических обсерваторий, которые бы обеспечивали непрерывный поток данных назад на землю в реальном времени, что является все более важным инструментом в современных глубоководных океанографических изысканиях. Когда масштабы пространственно-временного изменчивости будут измерены, карты могли бы также использоваться, чтобы экстраполировать точки измерения, так же как сейсмические данные используются, чтобы экстраполировать наружу скважинные данные углеводородной промышленности. В будущем, когда причина сейсмической отражательной способности будет понятна, сами сейсмические отображения могли бы использоваться, чтобы исследовать океанские процессы смешивания. Смешивание важно, потому что оно сохраняет глобальную переменную термогалинную циркуляцию (Munk и Wunsch, 1998). Способность отобразить изменение в вертикальном смешивании на континентальных окраинах во всем мире значительно увеличивает прогнозирующие возможности компьютерных моделей в океанской циркуляции и изменении климата.

#### **Выгода для углеводородной промышленности**

Способность предсказать пространственные и временные масштабы термогалинной структуры также принесет пользу и поисково-разведочным работам и полевому управлению. Например, начальная двумерная или трехмерная сейсморазведка может быть проанализирована, чтобы установить характерные пространственные и временные изменения в скорости водного слоя. Эта информация может использоваться, чтобы оптимизировать съемку при повторении трехмерной съемки для мониторинга, или чтобы минимизировать

статические сдвиги и проблемы вариации амплитуды. Важно знать силу и изменчивость океанских течений, планируя бурение или установку на дно. Проектируя оборудование и устройства для ведения добычи, важно знать диапазон изменения и временные интервалы для колебания температуры океана, которые строго воздействуют на вязкость нефти, поскольку она качается от морского дна до морской поверхности. Сейсмически полученные карты структуры океана обеспечивают интеллектуальный способ оценить вероятные течения и колебания температуры в большом объеме. Более широко, океанские течения также управляют формой и стабильностью континентального склона.

Политическая и экологическая выгода, которая может быть извлечена из использования данных промышленности для природных целей, что столь же важно, как прямая технологическая прибыль. Углеводородная промышленность регулярно критикуется за то, что она обеспечила парниковый эффект, снабжая двуокисью углерода и метаном атмосферу. Теперь у промышленности есть возможность взять значительную роль в исследовании климата. Мы также надеемся, что промышленность примет две новые методики получения сейсмических данных. Первая должна снабжать копией водной части слоя всех новых данных для академического исследования. Конфиденциальность не была бы проблемой, потому что данные ниже дна были бы автоматически удалены с академической копии, используя стандартные процедуры обработки. Вторая методика должна обычно развертывать недорогие одноразовые океанографические пробники во время сейсморазведки. Принятие этих методик могло бы принести значительную пользу обществу при минимальной стоимости. Мы основали консорциум заинтересованных университетов, нефтяных компаний, и сервисных компаний.

#### **Выводы**

Наша главная цель состояла в том, чтобы показать углеводородной промышленности, что ее сейсмические данные имеют потенциально большое значение в океанографии. Существующие инструментальные средства обработки могут использоваться, чтобы генерировать сейсмические изображения океанской структуры, однако обработка должна проводиться осторожно. Важные вопросы, которыми займутся в течение нескольких следующих лет, - что вызывает сейсмическую отражательную способность, и как сейсмическая отражательная способность изменяется в пространстве и времени? Мы представили первые изображения термогалинной океанской структуры во впадине Rockall, чтобы показать их вопросы обработки и интерпретации. В настоящее время, важная прибыль для океанографии в том, что характеристики внутренней волны могут быть измерены, используя суммированные разрезы и записи отдельных пунктов взрыва.

В будущем, когда связь между сейсмической отражательной способностью и океанографическими процессами будет более понятна, возможно, будет интерпретировать трехмерные сейсмические отображения в терминах вариаций смешивания, что

значительно увеличит прогнозирующие возможности компьютерных моделей океанской циркуляции и изменения климата. Значение для нефтяной промышленности в том, что большее понимание океанографических процессов может помочь поисково-разведочным работам на глубоководье, особенно при вовлечении 4D сейсморазведки или подавлении кратных, бурении и разработке, частично вовлекающих установку на морском дне. Мы предлагаем, чтобы углеводородная промышленность жертвовала данные по океанскому слою сейсмических данных в банк данных со свободным доступом для исследователей, изучающих океан и процессы климата, и желательно сбрасывать океанографические пробники со сторожевого катера, чтобы увеличить вклад новых данных в изучение климата и океана. Мы основали MOST- консорциум ([www.most-project.org](http://www.most-project.org)), чтобы облегчить такой обмен данными.

#### Благодарности

Полевые данные для иллюстрации 1 были великодушно предоставлены GGS-Spectrum. Вся обработка сейсмических данных была выполнена, используя превосходную систему Seismic Unix. Мы благодарим Irish Petroleum Infrastructure Project за поддержку нас средствами обработки, и Irish Marine Institute за доступ к океанографическим наборам данных. SMJ и RJH благодарят М. Curé, С. Mohn, S. Thorpe, J. Ullgren, и М. White за полезные дискуссии относительно океанографии, и RWH благодарят членов GO project. RWH - NERC Advanced Research Fellow. MOST project в настоящее время включает Trinity College Dublin, University of Durham, Memorial University of Newfoundland, GGS-Spectrum, Statoil Ireland, British Gas Group. DH благодарит PIP и Geological Survey of Ireland за спонсорскую помощь.

#### Литература

- Barley, B. [1999] Deep-water problems around the world. *The Leading Edge*, 18, 488-494.
- Bertrand, A. and MacBeth, C. [2003] Seawater velocity variations and real time reservoir monitoring. *The Leading Edge*, 22, 351-355.
- Egbert, G.D. and Ray, R.D. [2001] Estimates of M2 tidal energy dissipation from TOPEX/ Poseidon altimeter data. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 22475-22502.
- Gonella, J. and Michon, D. [1988] Ondes internes profondes révélées par sismique réflexion au sein des masses d'eau en Atlantique-Est. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **306**, 781-787.
- Hampson, G. and Jakubowicz, H. [1990] Effects of source and receiver motion on seismic data. *60<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts, 859-862.
- Holbrook, W.S. and Fer, I. [2005] Ocean internal wave spectra inferred from seismic reflection transects. *Geophysical Research Letters*, 32, L15604.
- Holbrook, W.S., Páramo, P., Pearse, S. and Schmitt, R.W. [2003] Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling. *Science*, **301**, 821-824.
- Lacombe, C., Schultzen, J., Butt, S. and Lecerf, S. [2006]. Correction for water velocity variations and tidal statics. *68th EAGE Conference & Exhibition*, Extended Abstracts, P098
- Mackay, S., Fried, J. and Carvill, C. [2003] The impact of water-velocity variations on deepwater seismic data. *The Leading Edge*, 22, 344-350.

- Medwin, H. [2005] *Sounds in the Sea: from Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography*. Cambridge University Press.
- Munk, W. and Wunsch, C. [1998] Abyssal recipes II: Energetics of tidal and wind mixing. *Deep Sea Research I*, 45, 1977-2010.
- Nandi, P., Holbrook, W.S., Pearse, S., Páramo, P. and Schmitt, R.W. [2004] Seismic reflection imaging of water mass boundary in the Norwegian Sea. *Geophysical Research Letters*, **31**, L23311.
- Ocean Science Meeting [2006] *EOS, Transactions of the AGU*, 87(36), Ocean Science Meeting Supplement, Sessions OS13I, OS14I & OS16G.
- Páramo, P. and Holbrook, W.S. [2005] Temperature contrasts in the water column inferred from amplitude-versus-offset analysis of acoustic reflections. *Geophysical Research Letters*, 32, L24611, doi:10.1029/2005GL024533.
- Perroud, H. and Tygel, M. [2004] Nonstretch NMO. *Geophysics*, 69, 599-607.
- Phillips, J.D. and Dean, D.F. [1991] Multichannel acoustic reflection profiling of ocean watermass temperature/salinity interfaces. In: Potter, J. and Warn-Varnas, A. (Eds.) *Ocean Variability and Acoustic Propagation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 199-214.
- Tsuji, T., Noguchi, T., Niino, H., Matsuoka, T., Nakamura, Y., Tokuyama, H., Kuramoto, S. and Bangs, N. [2005] Two-dimensional mapping of fine structures in the Kuroshio Current using seismic reflection data. *Geophysical Research Letters*, 32, L14609, doi:10.1029/2005GL023095.
- Wamer, M. [1990] Absolute reflection coefficients from deep seismic reflections. *Tectonophysics*, **173**, 15-23.
- Wesson, J.C. and Gregg, M.C. [1994] Mixing at Camarinal Sill in the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research*, 99, 9847-9878.
- White, M. and Bowyer, P. [1997] The shelf-edge current north-west of Ireland. *Annales Geophysicae*, 15, 1076-1083.
- Wombell, R. [1997] Water velocity variations and static corrections in 3D data processing. *59th EAGE Conference and Exhibition*, Extended Abstracts, A029.
- Xu S. and Pham, D. [2003] Global solution to water column statics: a new approach to an old problem. *73rd SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts, 1885-1888.