

## Результаты идентификации и подавления кратных волн по интерпретации периодических наблюдений на месторождении Valhall

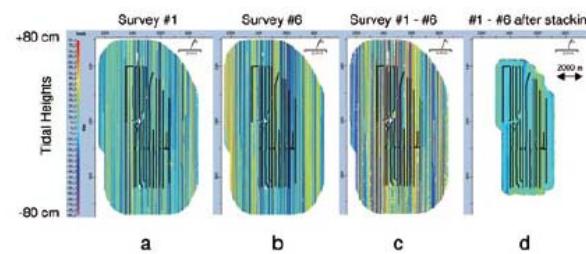
Paul Hatchell,<sup>1\*</sup> Peter Wills<sup>1</sup> и Catalin Didraga<sup>1</sup>

Сейсмические данные содержат первичные и кратные отраженные вступления. Когда мы рассматриваем конечные обработанные сейсмические изображения, мы часто не уверены, что выделенный сейсмический цикл является осью синфазности однократной отраженной волны. В данных морского сейсмического мониторинга присутствие кратных волн порождает характерную причину невоспроизводимости, так как длиннопериодная свободная поверхность и кратные волны от морского дна имеют дополнительные траектории луча в водном слое, сопоставимые с первичными волнами. Разница периодов и скоростей в воде для времени получения данных базисной и мониторинговой съемок делают возможным маркировать времена первичной энергии и энергии кратных волн. Полученное в результате рассогласование создает артефакты (искажения), которые препятствуют временной интерпретации.

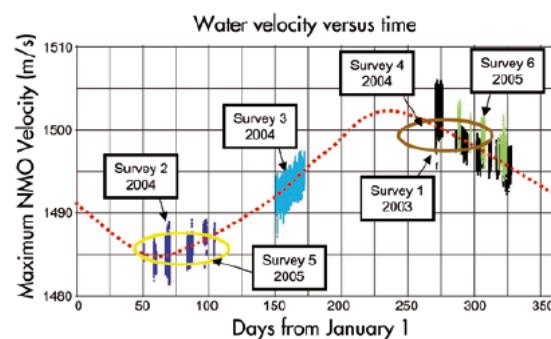
В эту задачу вносят вклад различия в приливно-отливных явлениях и изменения скоростей в воде. MacKay et al. (2003) показал пример, в котором изменения температуры в воде на глубине в воде вносят значительные помехи на пересечениях линий наблюдения в пределах одной съемки. Calvert (2005a and 2005b) разработал метод для удаления кратных волн из временных данных, проводя взрывы во время одной или двух съемок дважды при различных приливно-отливных условиях или двойного времени пробега в воде и получая метод для удаления кратных волн из различных временных данных. Метод Calvert является изящным решением задачи удаления кратных волн, но увеличивает начальную стоимость работ, так как одна из съемок должна быть проведена дважды.

В этой статье мы рассматриваем воздействие неповторяющихся кратных волн на шести массивах данных, полученных в течение первых двух лет работы с системой стационарного океанического донного кабеля (OBC), размещенной на месторождении Valhall (Kommendal et al., 2004). Малоглубинное месторождение Valhall дает нефть из пористого мелового коллектора, который существенно уплотняется в течение разработки пласта и дает интенсивные 4D амплитудные и смещенные по времени сигналы (Barkved et al., 2003).

Данные по месторождению Valhall получены при приливно-отливных условиях, которые различаются при разных съемках приблизительно на 1 м и в основном нерегулярны между профилями взрыва. Данные также получены в разное время года, Hatchell et al. (2007) проследили, что средняя скорость в воде изменяется более, чем на 1% в результате сезонных температурных изменений. Хотя в области взрыва эти два эффекта вносят на рассмотрение аналогичные задачи согласования кратных волн, в следующем разделе показано, что после биннинга (сортировки по общей глубинной площадке), суммирования и миграции приливно-отливный эффект существенно уменьшается в постсуммированных данных, и что в целом самое большое рассогласование многократных волн проистекает из-за сезонных различий скорости в воде.



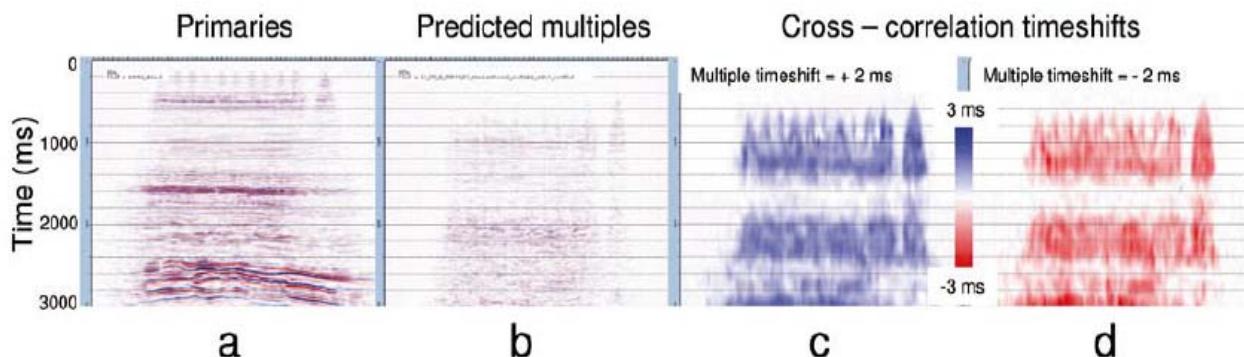
**Рис. 1** Карта положений пунктов взрыва с раскрашенными приливно-отливными высотами на период полевых работ для съемок #7 (a) и #6 (b). Различия между съемками #1-#6 показаны на (c). Модель эффективных различий приливно-отливных высот после биннинга, миграции и суммирования (d). Положение кабелей ОВС показано черными линиями.



**Рис. 2** Измерения Hatchell и др. [2007] скоростей в воде как функции времени с 1 января. По съемкам #4 и #5 скорости не измерялись, и эллипсы показывают прогноз их положений, основанный на сезонном тренде измеренных данных (красная пунктирная линия).

Затем мы рассматриваем воздействие рассогласованных многократных волн на характер смещения по времени при мониторинговых съемках и на простых моделях показываем, что невыровненные кратные волны создают систематическую погрешность смещений по времени, которая зависит линейно от различия во времених вступления многократных волн. Эта систематическая погрешность небольшая, когда отношение первичной энергии к энергии кратных волн большое, но она существенна в областях, где энергия кратных волн сопоставима с энергией первичной волны, как в зонах небольших контрастов импеданса или в областях, где энергия первичной волны ослаблена газопроявлениями в верхней части разреза. Главные характеристики, прогнозируемые по этим моделям, без труда определяются по окончательным обработанным (PSDM full stack – полная сейсмограмма после миграции до суммирования в глубинной области) данным LOFS (Life of Field Seismic - сейсмики эксплуатации месторождения).

<sup>1</sup> Shell International E&P, Kessler Park 1, 2288 GS, Rijswijk, The Netherlands.  
Corresponding author, E-mail: Paul.Hatchell@shell.com.



**Рис. 3** Простая модель рассогласованных кратных волн. Сейсмический профиль по съемке #1 (a) является, предположительно, первичной энергией и использовался для прогноза кратных волн (b). Смещения по времени вычислены между основными данными= первичные волны+ кратные волны и мониторинговыми данными= первичные волны+ кратные волны, смещенными по времени, со смещениями 2.0 мсек (c) и -2.0 мсек (d).

Линейная природа засорения многократными волнами означает, что мы можем идентифицировать и детерминировано удалить их из данных, которые мы получили по нескольким съемкам при разных приливно-отливных условиях или с известными скоростями в воде. Мы иллюстрируем наш метод на шести съемках, полученных между 2003 и 2005 г.г., с использованием стационарных донных океанических кабелей, размещенных на нефтяном месторождении Valhall в Северном море. Мы обнаружили, что эффекты загрязнения многократными волнами соответствуют нашим моделям и что метод удаления многократных волн превосходно минимизирует эти эффекты и усовершенствует временную интерпретацию в области газового облака.

#### Морские приливы и отливы или скорости в воде?

Различия в приливно-отливных явлениях и скоростях в воде создают временное рассогласование для длинно-периодных и кратных волн от морского дна в данных сейсмического мониторинга, которые обрабатываются для того, чтобы выровнять поле первичных волн. Как мы хорошо видим, и различия приливно-отливных явлений, и скорость в воде сводятся в результате к кратным волнам, которые имеют относительные сдвиги по времени приблизительно в 1 мсек для кратных волн первого порядка в досуммированной области. После биннинга, суммирования и миграции эффект приливно-отливных различий существенно уменьшился, так как мы обычно комбинируем данные по нескольким взрывным профилям с произвольно выбранными приливно-отливными условиями, и полный эффект заключается в «подавлении в результате суммирования» приливно-отливных различий. Конечный результат заключается в том, что по нашим конечным обработанным суммированным данным мы предполагаем и наблюдаем, что основной источник рассогласования кратных волн является результатом сезонной изменчивости скорости в воде.

На рис. 1а и 1б приведены карты положений источников, раскрашенные в зависимости от приливно-отливных высот, измеренных на морской платформе Valhall во время проведения съемки #1 и съемки #6, соответственно. Как видно из рисунка, типичный порядок приливно-отливных изменений на месторождении составляет +/-0.5 м. На эти рисунки наложена схема размещения в пределах месторождения океанских донных кабелей длиной в 120 км. Начальное направление движения судна, параллельное ориентации кабелей и единственной линии источников, удерживается в течение трех часов, после чего судно разворачивается и встает на другую взрывную линию с противоположным направлением. В результате такая съемка приобретает полосчатый характер, который мы видим на

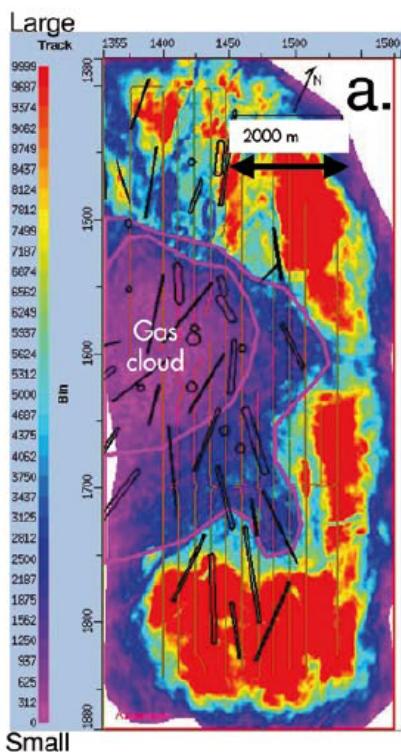
картах. Различие приливно-отливных высот между пунктами взрыва по этим двум съемкам приведено на рис. 1с. Произвольная природа связанный с приливами и отливами полосчатости отмечается различиями высот порядка 1 м.

Наши конечные обработанные данные заключаются не в области взрыва, а в области CDP (общей глубинной точки), и эффект биннинга, миграции и суммирования данных усредняет приливно-отливные высоты по различным взрывным линиям в выходных обработанных данных, что осуществляется на каждой CDP. Мы оцениваем этот эффект на рис. 1д, где мы показали действительные приливно-отливные различия после биннинга, суммирования (вплоть до ответвления на глубине 2000 м) и обращения к операции смешивания для воспроизведения миграции. Мы отмечаем, что ослабление выходных приливно-отливных искажений будет более эффективно для более глубоких слоев из-за роста кратности и апертуры смещения. Приливно-отливные различия «после обработки» имеют коэффициент в 5 раз меньший, чем тот, который мы наблюдали в области взрыва. Предполагаемые максимальные приливно-отливные различия имеют величину -20 см. Дополнительное время пробега,  $t_m$ , для кратных волн первого порядка, проходящих через водную толщу,  $t_m = 2 * h/w$ , где  $h$  – мощность водной толщи,  $w$  – скорость в воде. Эффект приливно-отливных вариаций есть эффективное изменение в  $h = h + dh$ , так, что будет иметь место временное различие между съемками с магнитудой  $dt_m = 2 * dh/w$ . Для необработанных приливно-отливных различий в 1 м и  $w = 1500$  м/сек оно может быть около 1.3 мсек. Но мы видим, что после обработки эти эффекты значительно ослабляются, так что самое большое приливно-отливное различие имеет порядок ~0.25 мсек и представлено положительными и отрицательными значениями съемки (рис. 1д). Если данные по Valhall были собраны скорее по линиям вкрест пересечения, чем вдоль, может быть получено почти идеальное ослабление приливно-отливного эффекта. В настоящих данных геометрически отдельные взрывные линии,

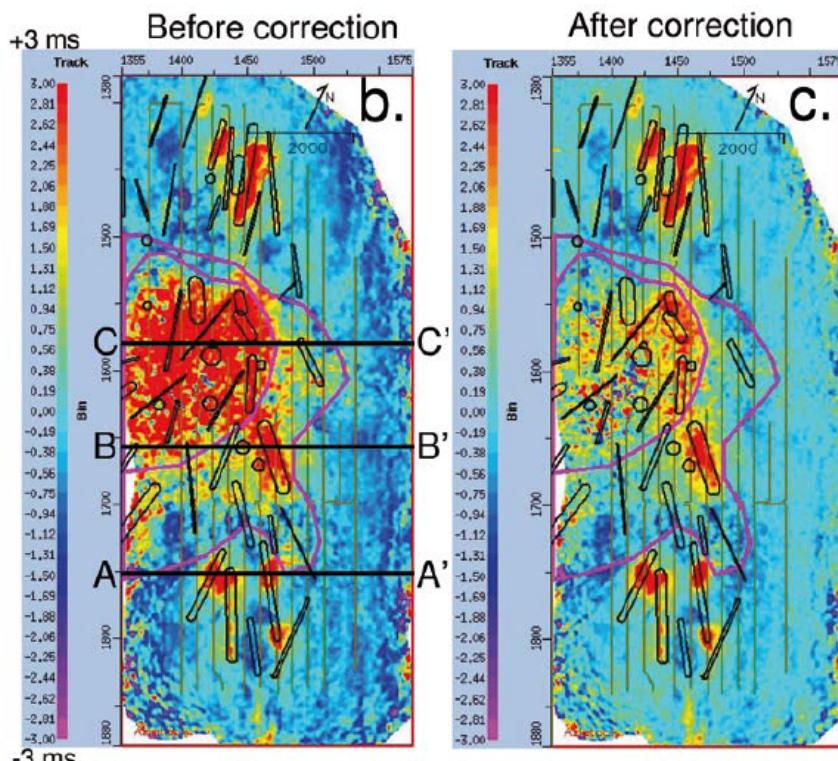
Съемка	Дата получения(средняя)	Вода
1	Октябрь-ноябрь 2003	1497.5
2	Февраль-апрель 2004	1486.0
3	Май-июнь 2004	1493.0
4	Сентябрь-октябрь 2004	1500.0
5	Март-апрель 2005	1485.0
6	Октябрь-ноябрь 2005	1497.0

**Таблица 1.** Времена получения данных и скорости в воде по шести съемкам, проведенным в течение двух лет на Valhall. Скорости в воде представлены приблизительными средними скоростями по данным, изображенным на рис. 2.

## RMS Amplitude Survey #1



## Top reservoir timeshift: Survey #1 - #5



**Рис. 4** Средне-квадратическая (RMS) энергия по съемке #7, измеренная по оси синфазности поверхности коллектора (a). Смещения по времени при временной съемке поверхности коллектора между съемками #7 и #5 до (b) и после (c) введения поправки за кратные волны. Многоугольники пурпурного цвета указывают контуры внешнего и внутреннего газового облака. Многоугольники черного цвета на (b) и (d) указывают количество добываемой нефти в период времени между съемками #7 и #5 и отрисованы около добывающей скважины.

зарегистрированные сейсмограммами по одному кабелю, суммируются в некоторых средних точках линий пересечения, давая низкое (равное числу кабелей) осреднение приливно-отливной изменчивости в противоположность поперечным линиям взрыва, где получено высокое осреднение.

Изменения скоростей в воде также создает временное различие между кратными волнами. Hatchell и др. (2007) использовали граничные волны для измерения осредненных по вертикали скоростей в воде на четырех из шести съемках, и, экстраполируя их тренд, мы можем предсказать приблизительные скорости в воде на оставшихся двух съемках, которые не были проанализированы (съемки #4 и #5). Они показаны на рис. 2. Различия скоростей в воде до 15 м/сек обнаружены между съемками в зависимости от времени их проведения. Временное различие от изменения скорости в воде,  $dw$ , есть  $dt_m = -2 * h * dw / (w * w)$ . Это число равно -0.93 мсек для толщины воды  $h=70$  м,  $w=1500$  м/с и различия скорости в воде  $dw=15$  м/с.

Мало того, величина эффекта изменения скорости в воде большая, чем «постсуммированный» приливно-отливной эффект, и он также систематический по всей области съемки, так как каждая съемка проводится в течение относительно короткого периода времени по сравнению с сезонной изменчивостью. «Постсуммированная» приливно-отливная изменчивость смещений по времени меняется от места к месту и не является систематическим эффектом.

### Элементарная модель невыровненных (не находящихся на одной линии) кратных волн

Используя простые модели, мы затем исследуем эффект, который оказывают невыровненные кратные волны на смещения по времени при мониторинге. Мы начали с характерного сейсмического разреза через месторождение Valhall (рис. 3а) и предполагаем, что эти данные представляют 100% однократных волн. По серии первичных отражений мы создаем упрощенную предварительную оценку (прогноз) соответствующих кратных волн с помощью свертки однократных волн и фаз однократных волн. Прогнозные кратные волны приведены на рис. 3б. Затем мы проводим базисные исследования, которые являются суммированием однократных волн и прогнозных кратных волн, и мониторинг, который является суммированием однократных и прогнозных кратных волн после наложения сдвига по времени на прогнозные кратные волны. Хотя эти «синтетические» данные являются только частичным представлением реальных массивов данных, и не хватает точной обработки многих характеристик серии кратных волн (зависимость от смещения, масштабирование амплитуд и кратные волны более высокого порядка), они представляются для качественной демонстрации эффектов невыровненных кратных волн.

Рис. 3с и 3д демонстрируют взаимно коррелированные смещения по времени между синтетическими базисными и мониторинговыми данными, когда смещение по времени, наложенное на прогнозные кратные волны и добавленное к данным мониторинга, составляет +2.0 мсек и -2.0 мсек, соответственно. Примечательно, что мы видим, как невыровненные кратные волны создают систематическое отклонение смещения по

времени во взаимно коррелированных величинах, которое составляет небольшой эффект, когда однократные волны преобладают над кратными, но является существенным в областях, где энергия кратных волн сопоставима или больше энергии однократных волн.

Мы также наблюдаем, что систематическое отклонение смещения по времени линейно зависит от различия времен прихода кратных волн, в которых, изменяя значение смещения по времени на рис. 3c, мы почти точно воспроизведем смещения по времени на рис. 3d. Далее мы проанализировали эту линейность вычислением синтетических смещений по времени для ряда смещений кратных волн и нашли, что сохранение линейности, обеспечивающей относительные смещения по времени, находится в пределах нескольких мсек.

Эта линейность, а также эффект взаимодействия между относительными интенсивностями энергий кратных и однократных волн во взаимно коррелированных смещениях по времени могут быть показаны, используя простые аналитические методы. Допустим  $B(t) = p(t) + m(t)$  есть базисная сейсмическая съемка и  $M(t) = p(t+dt_p) + m(t+dt_m)$

есть мониторинговая съемка, где  $p(t)$  и  $m(t)$  соответствуют первичной энергии и энергии кратной волны (рис. 3a и 3b),  $dt_p$  есть смещение по времени первичной энергии, а  $dt_m$  представляет рассогласование по времени энергии кратной волны. Величина  $dt_p$  содержит информацию о продуктивности коллектора и является величиной, которую мы хотим оценить по данным.

Смещение по времени при мониторинговой съемке,  $\tau$ , между  $B(t)$  и  $M(t)$  может быть оценено минимизацией  $|B(t+\tau) - M(t)|^2$  во временном интервале (и возможно также в области интервала). Мы получаем решение для  $\tau$ , используя аппроксимацию рядом Тейлора небольших смещений по времени [например,  $B(t+\tau) = B(t) + \tau B'(t)$ ], разработанную Hatchell и др. (2003), и нашли, что (обозначая среднее значение параметра A во временном интервале как  $\langle A \rangle$ ):

$$\tau = \frac{dt_p + Q dt_m}{1 + Q}, \quad \text{где} \quad Q = \frac{\langle m'^2 \rangle + \langle p'm' \rangle}{\langle p'^2 \rangle + \langle p'm' \rangle}$$

Выше приведенное уравнение представляет требуемую

линейность между измеренным смещением по времени,  $\tau$ , и  $dt_m$ . По нескольким съемкам, полученным при разных значениях  $dt_m$ , мы можем измерить линейную зависимость и вычесть ее из нашего смещения по времени. После вычитания линейной зависимости от  $dt_m$  наблюдаемое смещение по времени уменьшается по сравнению с его истинным значением  $dt_p$  с коэффициентом  $(1 + Q)$ . Вычисление Q по измерению наклона затем может быть использовано, чтобы скомпенсировать это уменьшение, но это на практике затруднено, когда в данных одновременно присутствует несколько порядков кратных волн. Мы не выполняем эту компенсацию на картах, она представлена в дальнейших разделах.

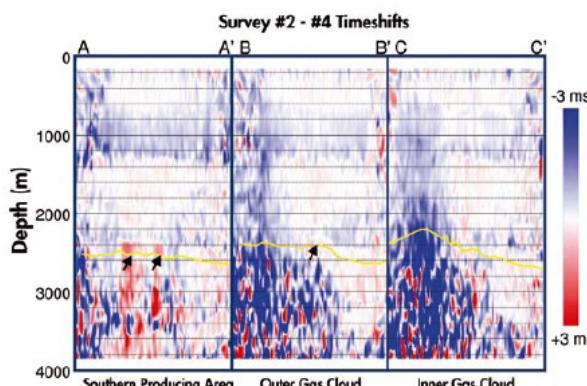
Когда первичная энергия большая по сравнению с энергией кратных волн,  $Q \ll 1$  и измеренное смещение по времени будет равно первичному смещению, а эффект от кратных волн ничтожен. Когда энергия кратных волн сопоставима ( $Q \approx 1$ ) или больше первичной энергии ( $Q > 1$ ), то вклад кратных волн в измеренные смещения по времени становится значительным. Когда кратные волны полностью доминируют, так что  $Q \gg 1$ , мы надлежащим образом определяем и удаляем загрязнение кратными волнами из измеренных смещений по времени, и остается небольшая информация о лежащих в основе первичных смещениях по времени.

Выше приведенное моделирование показывает, что невыровненные кратные волны создают линейное систематическое отклонение смещений по времени. Линейная природа загрязнения кратными волнами означает, что мы можем детерминировано определить и удалить его из данных, если мы имеем несколько съемок, полученных при известных скоростях в воде, как в случае на месторождении Valhall.

**Проблема кратных волн на данных мониторинга по долговременным данным ОВС (донная сейсморазведочная коса) на месторождении Valhall**

С 2003 г. более девяти сейсмических съемок было проведено по проекту Valhall (LOFS) с системой ОВС (донных сейсморазведочных кос), размещенных для получения многократных и высокоразрешимых моментальных отображений разработки месторождения. Мы обсудим результаты первых шести из этих съемок, чьи временные данные и данные по скоростям в воде, использованные для анализа в этой статье, приведены в таблице 1. Для нашего анализа данных мы используем окончательные обработанные PSDM данные, которые включают PZ

## 4D сейсморазведка



**Рис. 7** Смещения по времени в мониторинговой съемке между съемками #2 и #4 вдоль трех сейсмических профилей, изображенных на рис. 4б.

суммирование для ослабления кратных волн от дна и статические поправки за приливно-отливный эффект для выравнивания однократных волн [Kommedal et al., 2007].

Хотя получены высококачественные временные данные на флангах месторождения, остается неразрешенной спорная техническая проблема для понимания временных изменений, имеющих место в сводовой части месторождения, где присутствие близповерхностного газа резко ослабляет сейсмические данные РР. Важность сводовой области подчеркивается тем фактом, что эта область обеспечивает приблизительно половину установленной добычи.

Чтобы определить и проиллюстрировать проблемы, которые имеют место в области газового облака, на рис. 4а приведены амплитуды RMS (среднеквадратичных значений), измеренные вдоль вершины коллектора по съемке #1 в интервале 100 мсек, размещенной в центре вершины коллектора. Область, соответствующая газовому облаку, содержит слабые амплитуды RMS (пурпурный и голубой цвет) по сравнению с таковыми на флангах месторождения. Внутри других участков области газового облака обычные амплитуды РР ослаблены, но лежащая в основе первичная сейсмическая энергия все еще заметна и интерпретируется. Во внутренней части области газового облака, соответствующей самым слабым амплитудам RMS, данные РР сильно ослаблены, и в этой области преобладают шумы и кратные волны. Внутренняя и другие части области газового облака показаны многоугольниками пурпурного цвета на рис. 4а. Положения кабелей ОВС также приведены на этом рисунке.

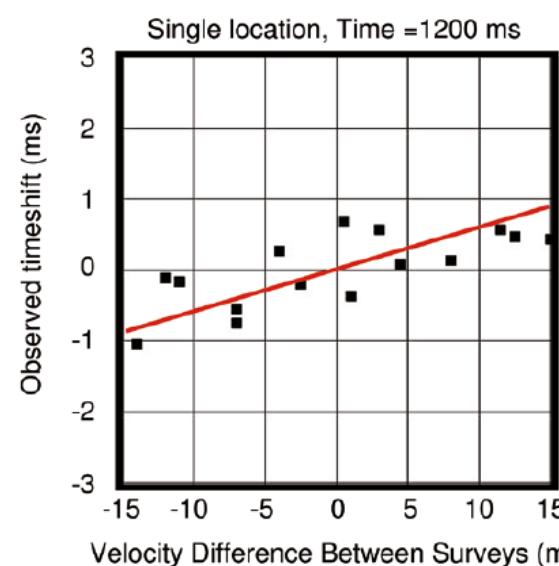
На рис. 4б приведена карта смещений по времени при мониторинговых съемках поверхности коллектора #1 и #5, проведенных с использованием интервала взаимной корреляции в 120 мсек. Противоположные условные обозначения, использованные для демонстрации этого и других смещений по времени, состоят в том, что положительные смещения по времени соответствуют временем прихода, которые имели место позже, при мониторинговой съемке, относительно базисной съемки. Добыча нефти в период между двумя съемками показана на рисунке многоугольниками, размещенными около перфорационного отверстия добывающей скважины, размер многоугольника пропорционален объему добытой нефти.

Мы видим по рис. 4б, что на флангах месторождения характер смещений по времени коррелируется с добычей нефти. Отметим, что основная энергия коллектора на месторождении Valhall идет от уплотнения горных пород, и характер смещений по времени сильно коррелируется с уплотнением коллектора (Hatchell and Bourne, 2005). В области газового облака мы наблюдаем, что смещения по времени большие и положительные по всей области и не коррелируются

с многоугольниками добычи. Мы вскоре увидим, что эти положительные смещения по времени в области газового облака, наблюденные между съемками #1 и #5, являются результатом различий скоростей в воде во время проведения съемок и, как следствие, соответствующего рассогласования кратных волн. Метод для удаления этого рассогласования обсуждается в следующем разделе, и карта на рис. 4с показывает смещения по времени между съемками #1 и #5 после введения этих поправок.

Три секущих линии профилей, чьи положения приведены на рис. 4б, показаны на рис. 5, представляющем сейсмические данные по съемке #1, на рис. 6, показывающем значение смещения по времени между съемками #1 и #5; и на рис. 7, показывающем значения смещений между съемками #2 и #4. На всех трех сейсмических профилях отражение от поверхности коллектора проявлено на глубине 2500 м. Самый левый профиль (A-A') идет через область южного фланга, где добывающие скважины создают уплотнение и вертикальные смещения по времени, которые выделены как положительные (красные) смещения по времени. Стрелки на рис. 5 и 6 указывают на положение этих скважин. Средний профиль (B-B') проходит через внешнюю область газового облака и другую добывающую скважину (показана стрелкой). Самый правый профиль (C-C') проходит через центр газового облака.

На рис. 6 и 7 мы видим две зоны вблизи глубин 1200 м и 2300 м, где обнаружены горизонтальные полосы смещений по времени, не связанные с добычей нефти, которые протягиваются по всему району съемки. Они проявляются как положительные (красные) смещения по времени на рис. 6 и отрицательные (голубые) смещения по времени на рис. 7. Положение этих полос находится там, где сейсмическая энергия небольшой магнитуды на рис. 5 соответствует нашим прогнозным рассогласованиям кратных волн, описанным в предыдущих разделах, и также совпадает с результатами модельных исследований на рис. 3с и 3д. Положительные смещения по времени на рис. 6 совпадают с тем фактом, что скорости в воде при съемке #1 больше, чем при съемке #5 (см. таблицу 1), так что кратные волны при съемке #5 приходят позже. Отрицательные смещения по времени на рис. 7 являются результатом меньших фоновых



**Рис. 8** График зависимости различных скоростей в воде и наблюденных смещений по времени мониторинговой съемки, измеренных в одном положении по всем 15-ти парам съемок, по возможности упорядоченных по времени. Сплошная красная линия является различием модельного времени вступления для кратных волн первого порядка, которые дважды проходят через 70-метровую толщу воды.

скоростей в воде при съемке #2 по сравнению со съемкой #4, и таким образом кратные волны при съемке #4 приходят раньше.

По шести сейсмическим съемкам мы можем проанализировать смещения по времени от 15 упорядоченных по времени пар и подтвердить, что горизонтальная полосчатость имеет место в каждой из них, и что знак и магнитуда смещений по времени совпадают с изменениями скорости в воде. На рис. 8 представлен график смещений по времени, измеренных между каждыми 15-ю парами по одному положению сейсмического явления на глубине 1200 м с соответствующим различием скоростей в воде по данным таблицы 1. Взаимосвязь линейная, совпадает с нашим модельным расчетом, описанным выше. Сплошная красная линия на этом рисунке это образец временной задержки,  $dt_m$ , рассчитанной для кратной волны первого порядка, которая проходит дважды толщу воды в 70 м. Мы видим, что наклон наших наблюдений вблизи глубины 1200 м близок к прогнозному. Аппроксимация небольшого смещения по времени, показанная в предыдущем разделе, прогнозирует, что в присутствии первичной энергии и энергии кратной волны, наблюденные смещения по времени пропорциональны только смещениям по времени кратной волны с коэффициентом  $Q/(1 + Q)$ . Данные на рис. 8, показывающие наблюденный наклон, соответствующий модели для кратных волн первого порядка (без учета кратных волн более высокого порядка), предполагают, что коэффициент  $Q/(1 + Q)$  близок к единице, допуская большое значение  $Q$ , и что кратные волны имеют преобладающую энергию в этом месте.

Корреляция между различиями скорости в воде и смещениями по времени, приведенная на рис. 8, существует для единственного положения ( $x, y, z$ ) в 3D сейсмическом объеме. Мы распространяем этот анализ на каждую точку съемки, вычисляя методом наименьших квадратов линейную регрессию между наблюденными смещениями по времени и различиями скорости в воде. Если  $\tau_{ij}$  смещение по времени, измеренное между съемками  $i$  и  $j$ , а  $d\omega_{ij}$  есть различие скоростей в воде, мы находим  $A$  и  $B$ , чтобы оптимально удовлетворить уравнению  $\tau_{ij} = A d\omega_{ij} + B$ . Хотя эта процедура выполняется для каждой точки съемки, полученные в результате коэффициенты регрессии  $A$  и  $B$  имеют трехмерные значения.

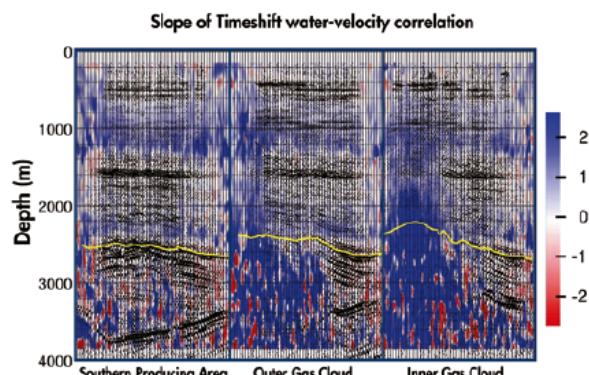


Рис. 9 Значения наклона, образованного при сравнении смещений по времени временной съемки и различий скоростей в воде между всеми 15-тью парами съемок. Фоновые данные являются сейсмическими данными съемке #7.

Величина наклона  $A$  указывает на взаимосвязь между наблюденными смещениями по времени и скоростями в воде и представлена на рис. 9 вдоль тех же профилей, что и на рис. 5-8. Наложенные на первый план рисунка 9 – это сейсмические данные по съемке #1 (приведенные на рис. 5). Масштабирование значения  $A$  выбрано так, что  $A=1$  там, где наклон смещений по времени из-за скорости в воде соответствует наклону, предсказанному для кратных волн первого порядка (например, наклон красной линии на рис. 8 равен  $0.062 \text{ мс}/[\text{м/с}]$ ).

Величина наклона полезна и указывает место, где кратные волны загрязняют сейсмические данные. Для большинства полученных значений наклоны положительные от 0 до +3, а отрицательные наклоны наблюдаются редко. Небольшие значения наклона имеют место тогда, когда присутствует первичная энергия, а большие значения наклона имеют место тогда, когда первичная энергия слабая. Мы видим, что кратные волны, создающие ранее описанную горизонтальную полосчатость, имеют магнитуды наклона, совпадающие с кратными волнами первого порядка. В областях, находящихся под воздействием газового облака, обычно наблюдаются более высокие значения наклона, которые указывают, что более высокий порядок кратных волн является преобладающей энергией. Одна из причин, почему более высокий порядок кратных волн наблюдается только в областях газового облака, состоит в том, что в этих областях менее глубинные рефлекторы, которые генерируют длиннопериодные кратные волны первого порядка, становятся ослабленными. Например, на средней и самой правой панели рис. 9 мы наблюдаем, что первичное отражение большой амплитуды вблизи 1600 м ослаблено в том положении, где наблюдаются большие наклоны. Отражение на

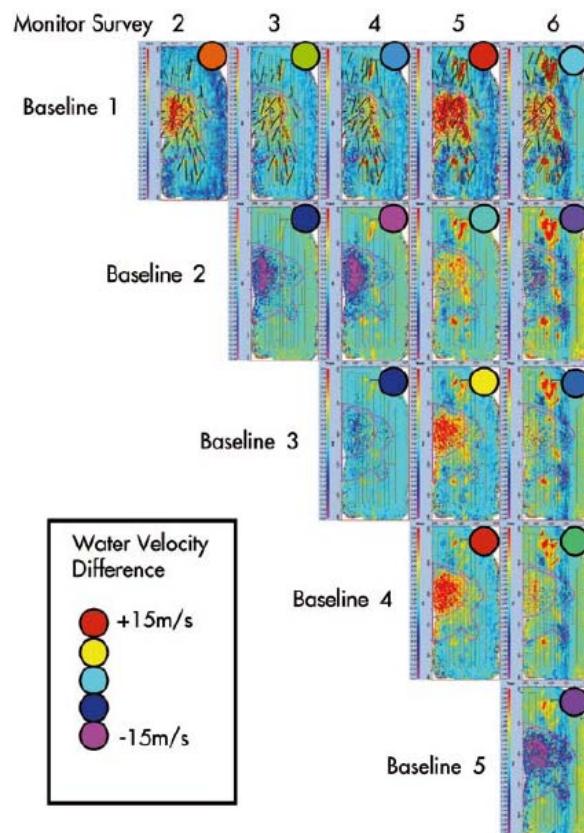


Рис. 10 Смещения по времени временной съемки поверхности коллектора, измеренные по всем 15-ти парам съемок. Пара съемок #7-#5 была ранее приведена на рис. 4b. Различия скоростей в воде между съемками показаны цветными кружками в верхнем правом углу каждой карты.

## 4D сейсморазведка

## Удаление рассогласованных кратных волн

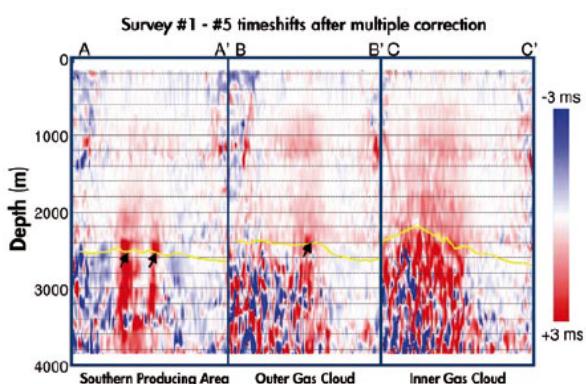
Результаты предыдущих разделов показали, что рассогласование кратных волн дает систематическое отклонение смещения по времени, которое линейно зависит от различий скоростей в воде между съемками. Мы измерили трехмерную величину, содержащую наклон между смещениями по времени и различиями скоростей в воде (рис. 9), и используем это значение, чтобы удалить эффекты рассогласованных кратных волн из наших значений смещений по времени.

В качестве последней иллюстрации проблем, которые имеют место из-за рассогласования кратных волн в области газового облака, рис. 10 приводит карты смещений по времени от поверхности коллектора по всем 15 упорядоченным по времени съемкам, аналогичные тем, которые приведены на рис. 4b. Нанесенный в верхнем правом углу каждой карты кружок указывает различие скоростей в воде между парами съемок (по таблице 1). Мы видим по этим 15 картам, что в районах флангов месторождения, где смещения, обусловленные добычей нефти, монотонно возрастают с увеличением времени между съемками, и при движении по карте в горизонтальном направлении слева направо, или по вертикали снизу вверх, наблюденные смещения по времени увеличиваются. В области газового облака поведение сильно отличается. Например, большие положительные смещения по времени наблюдаются между съемками 1-2, 1-5 и 4-5. Большие отрицательные смещения наблюдаются между съемками 2-3, 2-4 и 5-6. Эти большие положительные и отрицательные смещения по времени совпадают со знаком и магнитудой различий скоростей в воде по таблице 1. Когда скорость в воде при базисной съемке больше, чем скорость в воде при мониторинге, наблюдаются положительные смещения по времени в области газового облака, а когда скорость в воде при базисной съемке меньше, наблюдаются отрицательные смещения по времени. Когда скорости в воде совпадают при базисной и мониторинговой съемках (например, 1-4, 1-6 и 2-5), эффект, обусловленный кратными волнами, небольшой, и в этих зонах выделяется лежащий в основе эффект от добычи.

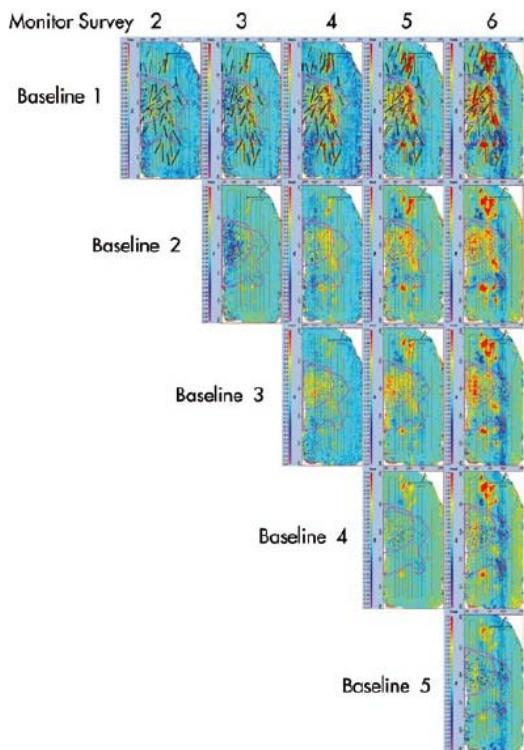
Наш наклон и значения на пересечениях А и В были определены как трехмерные значения, которые наилучшим образом соответствуют в смысле LSQ линейной взаимосвязи между смещениями по времени и различиями скоростей в воде:  $\tau_{ij} = Adw_{ij} + B$ . Член  $Adw_{ij}$  содержит информацию, которая линейно связана с различиями скоростей в воде, и мы образуем обновленные значения смещения по времени, вычитая этот член из исходных данных. Таким образом, кратные волны с поправкой за смещение будут  $\tau_{ij}(\text{исправленное}) = \tau_{ij} - Adw_{ij}$ .

Рисунок 11 показывает исправленные значения смещения по времени между съемками #1 и #5. Данные до введения поправки приведены на рис. 6. Мы видим существенное преимущество исправленных значений данных. Горизонтальная полосчатость смещений по времени вблизи глубин 1200 и 2300 м значительно ослабила. Это ослабление дает возможность слабым сигналам, связанным с добычей нефти, стать заметными, и мы отмечаем один такой сигнал вблизи стрелки на средней панели. В данных смещениях по времени на рис. 6 высокий уровень шума неубедительно отмечает, что в этом месте существует сигнал, связанный с добычей нефти, но в исправленных значениях этот сигнал убедительный и похож по характеру на сигналы, связанные с добычей нефти, на самой левой панели, которые не подвержены влиянию газового облака. Исправленным значениям отдают предпочтение при интерпретации.

Рис. 4c приводит карту временных смещений от поверхности коллектора между съемками #1 и #5 по исправленным значениям (сравни с рис. 4b до исправления), а рис. 12 приводит карты, так же, как и на рис. 10, созданные по исправленным значениям смещений по времени. Существенно улучшение и в области газового облака, и большинство аномальных смещений, связанных с кратными волнами в области газового облака, удалено. Наблюдаются смещения по времени, которые растут с увеличением времени добычи нефти, почти повсеместно включающие части внешней и внутренней областей газового облака. Теперь мы можем наблюдать эффекты, связанные с добычей нефти по всем парам съемок, в областях, где они раньше были скрыты временами смещения рассогласованных кратных волн.



**Рис. 11** Смещения по времени при мониторинговой съемке между съемками #7 и #5 после удаления (ослабления) кратных волн (сравните с рис. 6).



**Рис. 12** Смещения по времени во временной съемке поверхности коллектора между всеми 15-тью парами съемок после удаления (ослабления) кратных волн (сравните с рис. 10).

## Выводы

В данных морского сейсмического мониторинга присутствие кратных волн создает существенный источник нестабильности из-за длиннопериодной свободной поверхности, и кратные волны от дна имеют дополнительный путь пробега через слой воды по сравнению с первичными (однократными) волнами. Различия приливно-отливных условий и скоростей в воде в течение проведения базисной и мониторинговой съемок делают невозможным выравнивание по времени энергии первичной и кратной волн. Полученное в результате рассогласование создает искажения, которые препятствуют временной интерпретации.

Рассматривая данные по месторождению Valhall, мы обнаруживаем, что различия в двойном времени пробега через водный слой, обусловленные приливно-отливными и сезонными скоростными изменениями, сопоставимы по магнитуде. Так как статические поправки за приливные движения произвольны между линиями взрыва, мы показали, что после биннинга, миграции и суммирования эффект на основании статических поправок за приливные движения ослабляется, и самый большой эффект получается в результате сезонных изменений скорости в воде.

Простые модели влияния этого эффекта на анализ временных смещений показали, что невыровненные кратные волны создают систематическое отклонение смещений по времени, которое зависит от различия времен вступления кратных волн. Это систематическое отклонение небольшое, когда отношение первичной энергии к энергии кратных волн большое, но оно существенно в областях, где энергия кратных волн сопоставима с энергией первичной волны, как в зонах небольшого контраста импеданса (сопротивлений), или в областях, где первичная энергия ослаблена неглубоко залегающим газом. Линейная природа загрязнения кратными волнами означает, что мы можем определить и удалить (ослабить) его детерминировано. Мы применили наш метод на шести съемках, проведенных между 2003 и 2005 годами, используя стационарные океанские донные кабели, размещенные на месторождении нефти Valhall в Северном море. Мы обнаружили, что эффекты смещения по времени кратных волн совпадают с нашими моделями, и метод ослабления (удаления) кратных волн превосходно выполняет операцию минимизации этого влияния и улучшает временную интерпретацию в областях газового облака.

## Благодарности

Мы хотели бы выразить признательность Dave Rampton (Norske Shell) за его терпение и поддержку в этой работе. Авторы также благодарят компанию Shell International E&P и товарищество Valhall (BP Norge, Norske Shell, Total E&P Norge, and Amerada Hess Norge) за разрешение опубликовать эту статью. Результаты и заключения, представленные в этой статье, не обязательно представляют точку зрения товарищества Valhall.

## Литература

- Barkved, O., Heavey, P., Kjelstadli, R., Kleppan, T. and Kristiansen, T. [2003] Valhall field - Still on Plateau after 20 years of production. *Offshore Europe 2003*, SPE 83957.
- Calvert, R.W. [2005a] Marine time-lapse seismic surveying. US patent #6906982 B2.
- Calvert, R.W. [2005b] Insights and Methods for 4D reservoir monitoring and characterisation. *SEG/EAGE Distinguished Instructor Short Course*.
- Hatchell, P.J., Wills, P.B. and Landro, M. [2007] Analysis of guided modes on permanent OBC data. *69th EAGE Meeting*, Expanded Abstract.
- Hatchell, P. J. and Bourne, S.J. [2005] Measuring reservoir compaction using time-lapse time-shifts. *75<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 2500-2503.
- Hatchell, P., van den Beukel, A., Molenaar, M., Maron, K., Renter, C., Stammeijer, J., van der Velde, J. and Sayers, C. [2003] Whole earth 4D: Monitoring geomechanics. *73<sup>rd</sup> SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 1330-1333.
- Kommedal, J. H., Barkved, O.I. and Howe, D.J. [2004] Initial experience operating a permanent 4C seabed array for reservoir monitoring at Valhall. *74<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 2239-2242.
- Kommedal, J. H., Barkved, O.I., van Gestel, J.P. and Pettersen, R. [2007] Processing strategies for multiple repeat 4D сейсморазведка. *77<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 2908.
- MacKay, S., Fried, J. and Carvill, C. [2003] The impact of water-velocity variations on deepwater seismic data. *The Leading Edge*, 22(4), 344-350.