

Количественный анализ в ходе первых 4D работ по технологии Q-on-Q

Quantitative analysis on the first Q-on-Q 4D programme

Дж. Хазанедари (J. Khazanehdari)¹, Р. Гото (R. Goto)¹, Т. Кертис (T. Curtis)¹, Х. Оздемир (H. Ozdemir)¹, А. Муринедду (A. Murineddu)¹, Дж. М. Гехенн (J.M.Gehenn)¹ и Т. Йи (T. Yi)² рассказывают об успехах при первом применении методики Q-Marine (разработка WesternGeco) для опорных и мониторинговых наблюдений в ходе 4D работ для количественной оценки динамики содержания флюидов и давления на месторождении Норне (Statoil).

Благодаря значительному улучшению систем сбора сейсмических данных и способов обработки данных, отмечаемому в последние годы, сегодня специалисты могут получать данные с высокой воспроизводимостью и, таким образом, отслеживать изменения параметров залежи как функцию срока эксплуатации. Сейсмический мониторинг залежей основан на том, что в процессе эксплуатации, в частности – при использовании нагнетательных скважин, в залежи значительно изменяется содержание флюидов, давление и температура. Это, в свою очередь, приводит к изменению акустических свойств пород-коллекторов, которое может быть зафиксировано методами сейсморазведки.

Если в сейсмических данных присутствуют изменения, не связанные с эксплуатацией, 4D сигнал может быть подавлен или искажен 4D шумом. Ранее различия параметров систем сбора данных в ходе опорных и повторных 3D работ были существенным источником 4D шумов. В работах по методике Q-Marine применяется калибровка источников и приемников, а также акустическая система выставления управляемой косы на профиль. Таким образом, различия между опорными и повторными наблюдениями можно значительно уменьшить и, тем самым, получить более четкий 4D образ, который можно интерпретировать более точно и достоверно (Curtis et al., 2002 and Goto et al., 2002). С улучшением соотношения 4D сигнал - 4D шум сокращается интервал между опорными и повторными наблюдениями и появляется возможность мониторинга залежей, на которых 4D эффекты слабы.

При проведении 4D работ на месторождении Норне Statoil ставит задачу отследить движение флюидов в залежи, улучшить размещение скважин и увеличить извлекаемые запасы на 50%. К настоящему времени, кроме 3D съемки перед началом эксплуатации (1992 г.), на месторождении Норне проведено три повторных исследования (2001, 2003 and 2004) по методике Q-Marine специально в целях мониторинга залежи.

Для анализа 4D сигнала, полученного в ходе первых повторных работ по методике Q-on-Q, применен как качественный, так и количественный подходы. В ходе качественного анализа изменения сейсмического отклика визуально увязывались с изменениями динамических свойств залежи. Количественный подход подразумевает численной решение обратной задачи (инверсию) для 4D и прямое вычисление значений параметров залежи

Месторождение Норне

Месторождение Норне находится в 200 км от середины западного побережья Норвегии. Открытое в 1991 г. месторождение площадью около 40 км², имеет выраженное горстообразное строение (рис. 1). Коллекторы представлены нижне- и среднеюрскими песчанками формаций Гарн, Иле, Тофте и Тилье, для которых в целом характерна высокая пористость со значительной долей открытых пор (net-to-gross ratio). Перед вводом в эксплуатацию было установлено, что продуктивная толща содержит слой нефтесодержащих пород мощностью 110 м, перекрытый газовой шапкой мощностью до 75 м. В коллекторах встречаются прослои глинистых сланцев и кальцитизированных песков, а также разрывные нарушения, которые являются барьерами для движения углеводородов и нагнетаемой воды и газа.

Statoil решила уже на ранних стадиях эксплуатации месторождения проводить повторные сейсморазведочные работы, чтобы с помощью мониторинга движения нефти, газа и, особенно, водо-нефтяного контакта (ВНК) оптимизировать развитие месторождения.

Сбор и обработка данных

В июне 2003 г., WesternGeco вторые работы по методике Q-Marine на месторождении Норне. В ходе работ применена

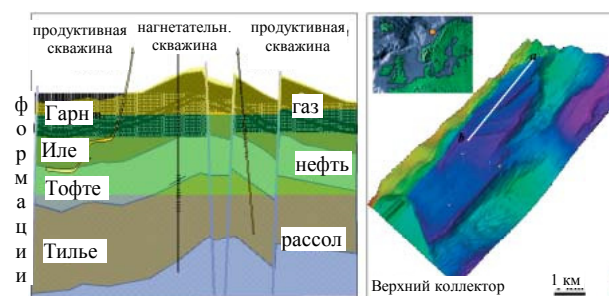


Рис. 1. Карта фактического материала и временной срез на уровне верхнего коллектора, показывающий контуры и строение месторождения Норне (справа). Геологический разрез: видны 4 основные формации, разломы, скважины и положение углеводородов перед началом добычи. (слева).

¹Schlumberger House, Buckingham Gate, Gatwick, West Sussex, RH6 0NZ, UK

²Schlumberger GeoQuest, Abingdon Business Park, Oxfordshire, OX14 1DZ, UK

геофизические исследования коллекторов

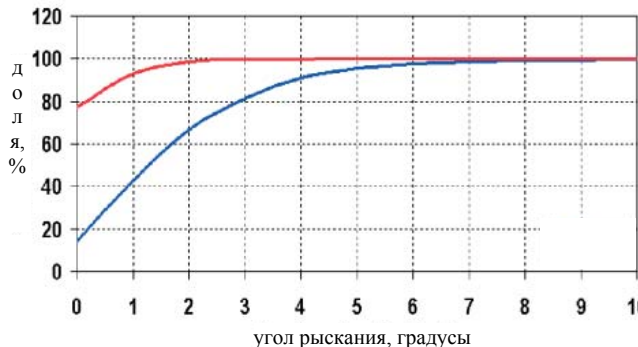


Рис. 2. Сопоставление рыскания косы в ходе обычных работ 1992 г. (синяя линия) и работ 2003 г. с управляемой косой (красная линия) на месторождении Норне.

та же методика 3D работ с одноканальной управляемой косой, что и в августе 2001 г. Замысел состоял в том, чтобы провести работы при минимальном, близком к нулю, рыскании косы (отклонении косы от курса судна под воздействием поперечных течений). В 2001 году 79% данных было получено при отклонении косы от курса менее чем на 1 градус (рис.2). Для сравнения приведена величина, типичная для неуправляемой косы (около 32%) в том же районе (Eiken et al., 2003).

В 2001 г. устройства Q-Fin (элементы системы Q-Marine, обеспечивающие управление косой по курсу и глубине) использовались для управления по курсу и размещались под каждой косой каждые 400 м. В 2003 г. это шаг уменьшили до 300 м, чтобы путем более активного управления точнее повторить опорный профиль 2001 г. Кроме того, при планировании работ решили усилить контроль рыскания на

где ранее не удалось сделать его близким к нулю, и тем самым, облегчить последующие мониторинговые работы. Поэтому профили, пройденные в 2001 г. с более сильным рысканием косы, были пересняты с пониженным рысканием, и в итоге 86% данных 2003 г было получено с отклонением косы от курса судна менее чем на 1 градус (рис. 2). Разница таких отклонений для 2001 и 2003 гг. показана на рис. 3.

В ходе опорной съемки 2001 г. по два соседним профилям сделаны повторные проходы. Анализ данных по ним показал, что работы 2001 г. удастся воспроизвести довольно точно и ? применяя детерминистские методы обработки, получить малошумную 4D результаты. За меру 4D шума обычно принимают приведенную среднеквадратическую ошибку (выраженное в процентах отношение среднеквадратического отклонения разности двух наборов данных к среднему из значений среднеквадратических отклонений каждого из наборов данных). Приведенная ошибка данных, полученных с неуправляемыми косами, часто превышает 30%. На тестовых профилях, снятых по методике Q-Marine достигнута необычайно хорошая воспроизводимость при величине приведенной ошибки около 13%. Обычно при 4D работах приходится совместно обрабатывать опорные и мониторинговые данные. Опыт 2001 г. показал, что при точном выставлении кос на профиль и при измерениях калиброванными приборами, можно ограничиться раздельной обработкой опорных и мониторинговых данных.

Перед началом мониторинговой съемки в 2003 г. была проведена повторная обработка опорных данных 2001 г. Обработка данных 2003 г. проведена по тому же графу, включая детерминированные поправки за изменения системы наблюдений. Это позволило получить 4D результаты непосредственно на борту уже через несколько дней после завершения съемки. Эти «оперативные» данные достаточно хорошего качества поступили в распоряжение Statoil в указанный срок и позволили выявить поступление воды в область предполагаемой траектории планируемой скважины, после чего в конструкцию последней внесли соответствующие изменения. Окончательные 4D результаты показаны на рис. 4 в сопоставлении с результатами более раннего обычного 4D исследования.

Временной анализ данных сейсморазведки

Изменения флюидонасыщенности, давления и температуры залежи в процессе эксплуатации можно отслеживать по изменению во времени данных сейсморазведки. В данных отмечаются изменения акустического и упругого отклика пород, образующих залежь. На месторождении Норне такие изменения анализировались с применением трех различных подходов: 1) качественного, основанного на визуальном выделении различий в двух наборах данных; 2) полуколичественного, предполагающего решение обратной задачи и получение разреза акустического импеданса, и, наконец, 3) количественного, основанного на решении обратной задачи и получении разрезов основных сейсмических атрибутов (акустического импеданса и импеданса сдвига) с последующим расчетом свойств коллекторов на основе петрофизической модели.

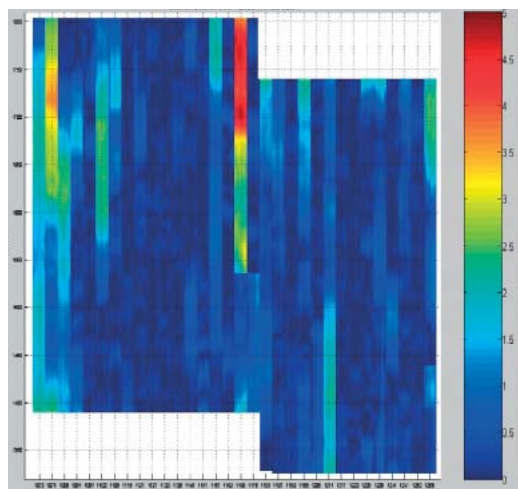


Рис. 3. Карта различий угла рыскания косы в работах по методике Q-Marine в 2001 и 2003 гг. Заметное различие в центре связано с посторонними объектами

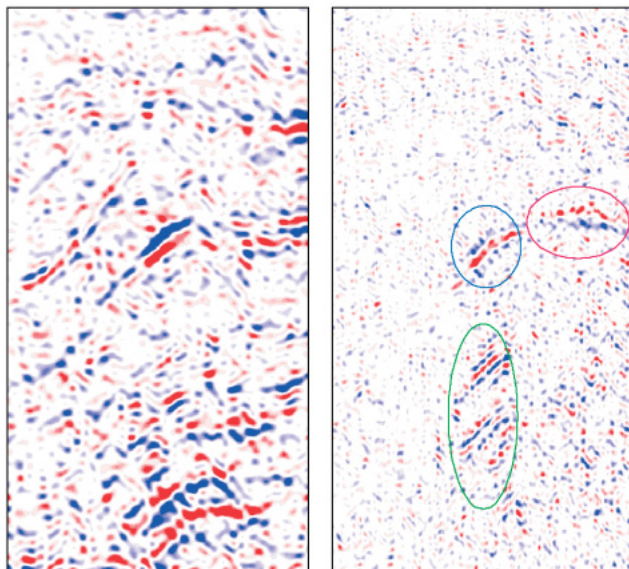


Рис. 4. Сравнение 4D разностных разрезов амплитуд: малошумного по данным работ Q-on-Q (справа) и зашумленного по обычной методике (слева). Показаны 4D сигналы, связанные с уходом газа (красным) и с нагнетанием (синим). Зеленым обведен 4D артефакт, связанный с занижением скоростей

Качественный анализ изменений во времени

Известные на сегодняшний день успехи в решении 4D задач достигнуты главным образом на основе качественного подхода, путем анализа и интерпретации видимых на разностных разрезах признаков движения флюидов или изменений давления в залежи.

Различия, обнаруженные в данных 2001 и 2003 гг. По месторождению Норне, связаны с процессом добычи углеводородов и нагнетания воды за прошедший интервал времени (рис. 4). Данные сейсморазведки с хорошей воспроизводимостью позволили значительно повысить качество разностных 4D данных. Применение методики Q-Marine минимизировало составляющую разностного сигнала, связанную с неидентичностью методики. Интерпретатор может теперь считать, что разностные данные более достоверно отражают динамику изменений в залежи.

Временной 3D разрез (куб) разностных данных был преобразован в глубинный, который сравнили с расчетной моделью залежи, что позволило напрямую сравнить результаты интерпретации с изменениями содержания флюидов и давления, спрогнозированными при моделировании динамики залежи (рис. 5). Эти наблюдения позволили приблизиться к обнаружению объектов, препятствующих эксплуатации залежи, таких как разрывные нарушения. Хорошая воспроизводимость результатов работ по методике Q-on-Q позволила даже на основе качественного подхода быстро наметить положения нескольких скважин.

Полуколичественный анализ

Полуколичественный анализ подразумевает анализ числовых величин в рамках слоистой модели, полученной путем инверсии сейсмических данных после суммирования по ОГТ в разрез акустического импеданса. В рамках этого подхода прогнозные значения флюидосодержания и давления по результатам моделирования залежи сопоставляются с наблюдаемыми изменениями акустического импеданса по данным сейсморазведки. На месторождении Норне проникновение бурового раствора в нефть приводит к увеличению акустического импеданса (рис. 6), и, наоборот, изменения давления из-за нагнетания воды понижает акустический импеданс.

Полуколичественный анализ данных повторных наблюдений по Норне начался с получения разреза относительного акустического импеданса путем применения средств собственной разработки (Micromodelling) с привлечением всего частотного диапазона данных. Для применения Micromodelling не требуется привлечения априорной информации для регуляризации решения: устойчивость достигается ограничениями на изменение модели от трассы к трассе.

Для получения абсолютных значений акустического импеданса, к данным по относительному следует внести низкочастотную составляющую. Информацию о низких частотах можно получить по-разному, например по скважинным данным или по результатам петрофизического моделирования. Для Норне недостающая низкочастотная составляющая была получена сбивкой отражающих поверхностей с границами горизонтов и формированием грубой модели путем сглаживания значений акустического импеданса по данным каротажа.

Такой полуколичественный подход позволил Statoil использовать данные повторных сейсморазведочных работ отслеживания движения фронта воды, оценки хода нагнетания и уточнения модели залежи при планировании закладки горизонтальных нагнетательных скважин (рис. 7)

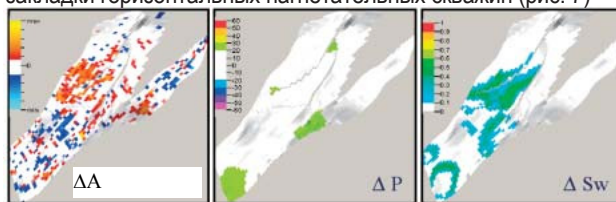


Рис. 5. Разность амплитуд (ΔA) и изменения флюидосодержания (ΔSw) и давления (ΔP), прогнозируемые по результатам моделирования залежи. Давление дано в барах.

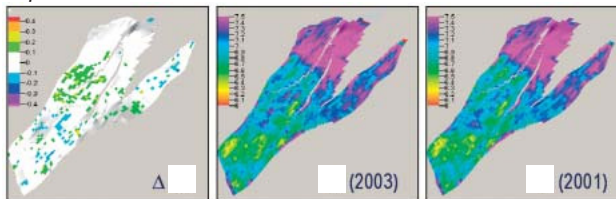


Рис. 6. Акустические импедансы по результатам инверсии данных сейсморазведки за 2001 г. (2001), 2003 г. (2003) и их разность (Δ). Глубинные разрезы величин наложены модель залежи.

геофизические исследования коллекторов

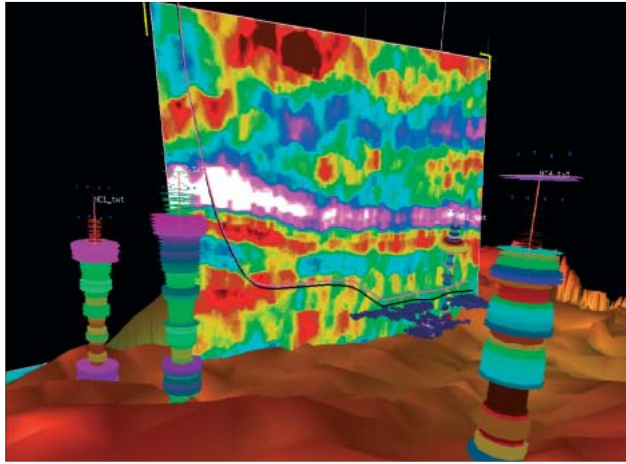


Рис. 7. 3D изображение данных по акустическому импедансу. Также показаны измерения акустического импеданса по трем скважинам. Объект, выделенный по разности импедансов, показан синим чуть выше горизонта Тофле. Объект представляет фронт распространения воды. Показаны предполагавшаяся (черным) и исправленная (пурпурным) траектории скважины.

Оказалось, что траектория одной из скважин, запланированных еще до работ 2003 г., попадает в область, где за период с 2001 по 2003 г. сейсмические данные изменились, по-видимому, из-за того, что ВНК преодолел предполагаемый скачок проницаемости. Сместив горизонтальную скважину в сторону и на 20 м выше, Statoil смогла избежать раннего прорыва воды, сэкономя стоимость бурения новой горизонтальной скважины (29 млн. долл.). Кроме улучшений в планах бурения удалось также скорректировать темпы добычи и нагнетания.

Количественный анализ изменений во времени

При полном количественном анализе данных повторных сейсмических наблюдений проводится непосредственное сопоставление прогнозных изменений флюидосодержания и давления по результатам моделирования залежи со значениями, полученными в результате инверсии данных сейсморазведки. Концепция решения прямой задачи используется во многих сферах нефтяной отрасли, где требуется построить модель разреза, соответствующую наблюдаемым данным. Если результаты расчетов по модели хорошо согласуются с полевыми данными, считается, что модель соответствует реальной геологической ситуации. Необходимым элементом этого подхода является составление петрофизической модели, в рамках которой возможны взаимные преобразования данных сейсморазведки в физические свойства и наоборот.

Для определения свойств залежи, наряду с петрофизической моделью, нужна некоторая априорная информация для регуляризации решения обратной задачи плюс сами полевые данные скважинных и сейсмических наблюдений. Решение не единственно, но высокое соотношение сигнал/шум в 4D данных, полученных по методике Q-Marine, делает решение более устойчивым.

Количественный анализ данных многократных наблюдений по Норну (рис.8) включал AVO-инверсию данных до суммирования по ОГТ, разработку петрофизической модели упругих свойств и переход к параметрам залежи. Инверсия, выполненная по методу Аки – Ричардса (Аки, Richards, 1980), дала значения акустического импеданса, импеданса сдвига и плотности. Успех был обеспечен хорошим соотношением сигнал/шум в данных при углах падения до 42 градусов.

Далее была построена петрофизическая модель упругих свойств, которая описывала упругий отклик залежи на изменения состава матрицы, флюидосодержания и давления. Для калибровки модели использованы данные по керну и результаты каротажа. С опорой на эту модель получены оценки изменения содержания флюидов и давления, соответствующие наблюдаемому набору сейсмических атрибутов. В петрофизической модели упругих свойств для месторождения Норне предполагается, что режим геомеханических нагрузок остается постоянным. Изменения этого режима за тот малый промежуток времени, что прошел между наблюдениями, и при малых изменениях давления в залежи в целом за время эксплуатации, признаны несущественными. Определение флюидосодержания и давления проведены по способу собственной разработки в три этапа. (1) Построение начальной геологической модели зоны исследования и приписывание ее элементам определенных свойств (литология, пористость, содержание флюидов) с учетом всей доступной информации (в том числе по скважинам, по керну и по результатам моделирования). Для этого потребовалось сочетание детерминистских и геостатистических приемов. (2) Решение прямой задачи для акустического импеданса и импеданса сдвига в рамках подходящей петрофизической модели упругих свойств. (3) Подбор расчетных импедансов путем минимизации расхождений с результатами инверсии сейсмических данных с помощью стохастического алгоритма. В результате получен детальный 3D разрез свойств залежи, увязанный с данными сейсморазведки и геологии. Та же процедура была проделана с данными повторных наблюдений. Сравнение разрезов свойств по результатам этих двух сейсмических исследований дало количественные оценки динамических свойств залежи и их изменений. На рис. 9 и 10 показаны, соответственно, срезы водонасыщенности и давления по результатам сейсморазведки и по модельному прогнозу.

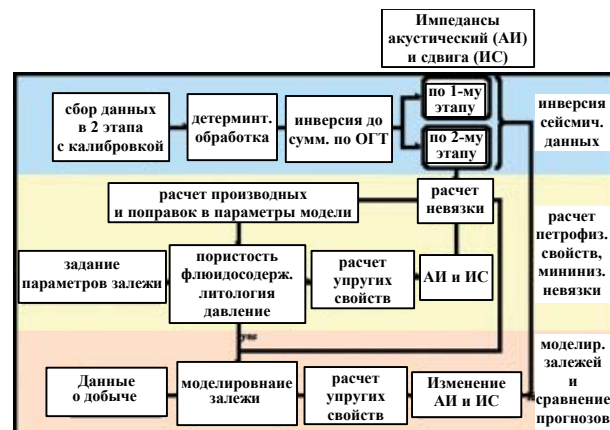


Рис. 8. Граф обработки для количественного 4D анализа

геофизические исследования коллекторов

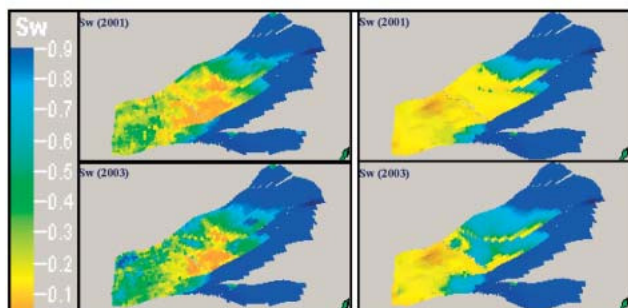


Рис. 9. Срезы водонасыщенности по данным сейсморазведки (слева) по результатам моделирования залежи (справа)

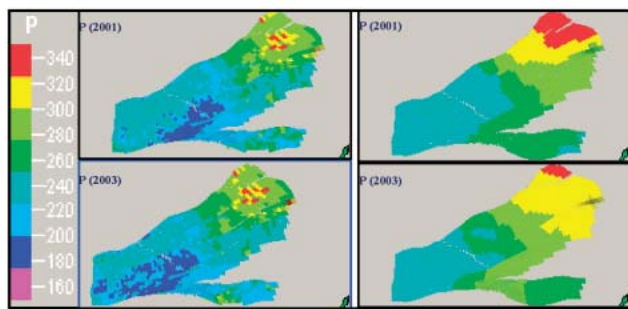


Рис. 10. Срезы давления (шкала в барах) по данным сейсморазведки (слева) по результатам моделирования залежи (справа).

Глубинные разрезы свойств, полученные по данным сейсморазведки, были вынесены на модель залежи, что позволило провести прямое количественное сопоставление с результатами моделирования динамики залежи.

Оценки содержания флюидов в целом согласуются между собой, но по данным сейсморазведки получено более сложное неравномерное распределение этой величины, что существенно для оптимизации управления добычей. Максимальные изменения водонасыщенности (около 60%) отмечены вблизи нагнетательных скважин и на ВНК.

Оценки давления также, в общем, согласуются между собой, их расхождение (± 30 бар) находится на уровне точности оценок. Интересно, однако, отметить, что моделирование предсказывает небольшое возрастание давления в коллекторе (+20 бар), а по сейсморазведке выделяются зоны понижения давления (-20 бар). Вряд ли

можно полагать, что в залежи образуются обширные зоны повышения давления, особенно при ограниченном нагнетании, при котором, скорее, произойдет падение давления в результате добычи.

Заключение

Сочетание точных, с высоким разрешением, данных сейсморазведки по методике Q-Marine с тщательным, петрофизическим обоснованным, анализом этих данных позволило получить:

Данные с хорошим соотношением сигнал/шум, пригодные для количественной инверсии, связывающей сейсмические данные со параметрами залежи.

Новый устойчивый алгоритм работы с 4D данными, который позволяет проводить количественные оценки изменений флюидосодержания и давления по данным многократных сейсмических наблюдений.

Успехи применения интегрированного количественного подхода, о которых говорится в этой работе, показывают, что соединение сейсморазведки и моделирования залежей перспективно для совершенствования управления месторождениями.

Благодарности

Авторы выражают признательность многочисленным коллегам из WesternGeco и Schlumberger за их вклад в этот проект. Мы также благодарны Statoil за ее вклад и тесное сотрудничество в ходе этого проекта.

Литература

- Aki, K.I. and Richards, P. G. [1980] *Quantitative seismology*. W.H. Freeman and Co.
- Curtis, T., Smith, P., Combee, L., and Olafsen, W. [2002] Acquisition of highly repeatable seismic data using active streamer steering, *Expanded Abstracts*, SEG 72nd Annual International Meeting, Salt Lake City.
- Eiken, O., Aronsen, H., Furre, A-E., Klefstad, L., Nordby, L.H., Osdal, B. and Skaar, M. [2003] Seismic monitoring of the Heidrun, Norn and Midgard fields using steerable streamers. *Expanded Abstract A-30*. EAGE Annual Conference, Stavanger, Norway.
- Goto, R. and Strudley, A. [2002] Seismic repeatability corrections – Quantified: *Expanded Abstract*, PETEX Conference (PESGB), London..

