

Построение сейсмического разреза базальтовых отложений в Glyvursnes на Фарерских островах: поиск будущих методов разведки площадей покрытых базальтами (Seismic imaging of basalts at Glyvursnes, Faroe Islands: hunting for future exploration methods in basalt covered areas)

U.K Petersen (*University of the Faroe Islands, Noatun 3, FO-100 Torshavn, Faroe Islands*), M.S. Andersen (*Geological Survey of Denmark and Greenland, Ostervold Gade 10, Copenhagen C, DK-1350, Denmark*), R.S. White (*University of Cambridge, Bullard Laboratories, Madingley Road, Cambridge CB30EZ, UK, uni@setur.fo*) и SeiFaBa Group

Введение

Получение хороших подбазальтовых сейсмических разрезов, как известно, является проблематичным (Ziolkowski и др., 2003; White и др., 2003). Хотя свойства базальтов весьма отличаются от свойств большинства отложений, Planke (1999) предположил, что энергия сейсмических колебаний проходит через базальт также как и через другие отложения, и, таким образом, задача сейсмического отображения через базальты составляет традиционную задачу разделения энергии первичного поля и шума, даже при том, что в понятие шума включаются кратные отражения. Физические свойства базальта заметно отличаются от свойств покрывающих и подстилающих отложений. Интенсивные отражения, возникающие вследствие контраста акустической жесткости на кровле (и подошве) базальтов, приводят к существенной потере сейсмической энергии от источника колебаний (Fruehn и др., 2001). Большие изменения свойств материала по разрезам базальтовых потоков не раз демонстрировались и были оценены количественно по анализу данных каротажа скважин, проходящих через такие базальтовые покровы (Planke, 1994) и по данным наземной съемки (например, Self и др., 1998; Thordarson и Self, 1998). Это приводит к тому, что эффекты стратиграфической фильтрации в базальтах более выражены, чем в других отложениях (Maresh и White, 2005; Shaw и др., 2004). Горизонтальные вариации мощностей отложений, впластованных между базальтовыми потоками в верхнюю пористую часть базальтовых потоков были показаны в ходе детальных исследований базальтовых потоков, выходящих на поверхность (Self и др., 1998; Thordarson и Self, 1998). Неровность прослоев вызывает трехмерное рассеяние сейсмической энергии, как демонстрируется при исследованиях по сравнению влияния стратиграфической фильтрации с эффективной добротностью, Q , базальтовых последовательностей (например, White и др., 2005; Shaw и др., 2005; Shaw и др., 2004).

Принимая эти задачи в рассмотрение, в последнее десятилетие были поставлены эксперименты с использованием: более дальних выносов (посредством синтетических баз и более длинных кос), чтобы повысить

отношение сигнал-шум и разрешающую способность NMO и выполнить обработку для выделения закритических отражений; более мощных источников, чтобы увеличить общий энергетический уровень; увеличения амплитуды низкочастотных отражений, чтобы лучше восстановить разрез под базальтами (с малыми значениями Q); и регистрации формы импульса от источника при каждом возбуждении и комбинации данных морской донной сейсмической съемки и данных метода отражений, чтобы улучшить оценку скоростей. Все вышеупомянутые технологии были применены в одном эксперименте, что дает значительные преимущества при построении разреза подбазальтовых отложений, по сравнению с предыдущей работой (Spitzer и White, 2005; White и др., 2005). Другой параметр регистрации сейсмических данных - ориентация сейсмического профиля относительно направления течения базальтовых потоков (Reshef и др., 2003). Однако, недостаточная эффективность проходящей сейсмической энергии, рассеивание, сильные многократные отражения, множественные преобразования мод, и низкочастотная фильтрация энергии, которая распространяется через последовательность базальтовых потоков — все еще препятствуют рутинному построению сейсмического разреза для разведки на нефть в осадочных бассейнах, покрытых базальтами (Maresh и White, 2005). Это хорошо видно в скважине UK164/07-01, где основание базальтовой последовательности было найдено на 700 м глубже, чем по результатам интерпретации данных сейсморазведки MOB (Archer и др., 2005). Чтобы получить качество и детальность разреза, сопоставимую с качеством разреза в других осадочных бассейнах, необходимы дальнейшие усовершенствования.

Проект SeiFaBa (Сейсмические и петрофизические свойства Базальтов Фарерских островов), спонсируемый группой Sindri, нацелен на создание моделей распространения сейсмической энергии в базальте по данным наблюдений, для получения основы для более совершенного построения сейсмического разреза подбазальтовых отложений. Проект включает бурение

скважин Glyvursnes-1 возле Torshavn на Фарерских островах (Рис. 1), анализ керна для получения внутренних физических параметров пород, регистрацию данных ВСП и неперодольного ВСП в Glyvursnes-1 и в скважинах Vestmanna-1, и обработку данных наземной сейсморазведки с использованием закритических отражений и сейсморазведки МОВ в районе скважин Glyvursnes-1 и Vestmanna-1 (Jarsen и др., 2005). На обеих площадях данные исследования упругих свойств базальтов были получены в различных масштабах. В этой статье мы демонстрируем данные наземной сейсморазведки МОВ из эксперимента SeiFaBa, полученные в скважине Glyvursnes летом 2003, как иллюстрацию успешного построения эффективного разреза подбазальтовых отложений при использовании относительно низкоэнергетических источников (250 г. динамита; группа пневмопушек на 2.6 л.) и иллюстрацию того, что стратиграфические детали базальтовых структур могут быть выделены и описаны по данным анализа сейсмических данных и их последующей корреляции со скважинными данными. Мы также продемонстрируем, как различные технологии измерения физических параметров влияют на эффективную полосу частот сейсмических данных и таким образом, на эффективное построение разреза базальтов и подбазальтовых отложений.

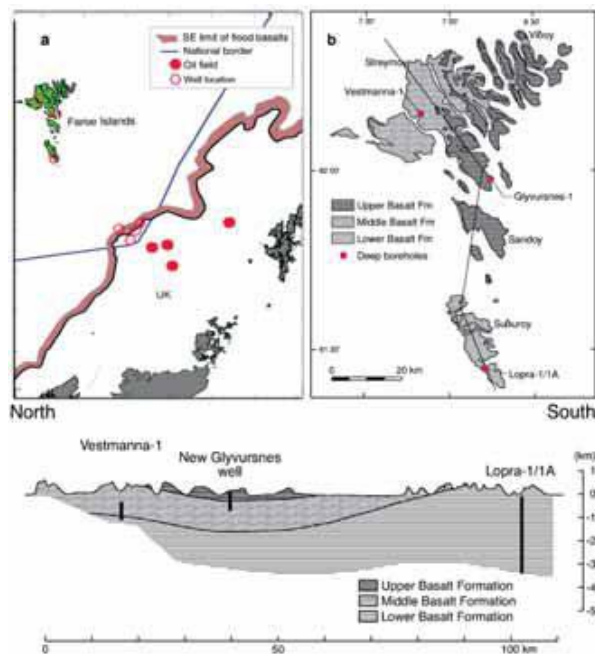


Рис. 1. Верхний а: Расположение Фарерских островов по отношению к распространению базальтовых потоков. Пробуренные скважины на Фарерах показаны в виде красных открытых кружков, эксплуатационные нефтяные скважины показаны в виде красных закрашенных кружков, и международная граница территории Фарерских островов показана в виде синей линии (изменено по Sorensen, 2003). **Верхний б:** Геологическая карта Фарерских островов, на которой показано расположение глубоких скважин (Vestmanna-1, Glyvursnes-1 и Lopra-1/1A) и распределение трех формаций базальта Палеогена (изменено по Waagstein, 1988). **Нижне:** Геологический разрез через Фарерские острова и упомянутые три скважины (изменено по Waagstein, 1988). Линия разреза показана на верхнем рисунке б.

Геологическая обстановка

Слой лавы приблизительно 3 км мощностью с незначительными тонкими включениями вулканокластических отложений выходит на поверхность на Фарерских Островах (Rasmussen и Noe-Nygaard, 1970). Ниже обнаженной части разреза приблизительно на 3 км или более, скважиной Lopra-1/1A был вскрыт базальт, однако данная скважина не достигла подошвы вулканической последовательности (Hald и Waagstein, 1984). Andersen (2002) предложил, что приблизительно 1 км базальта, возможно, ранее залегал выше обнаженной части разреза на Фарерах. Полная стратиграфическая мощность базальтов на Фарерском блоке, таким образом, была бы приблизительно 7 км, а возможно и больше. Данные глубинной сейсморазведки с закритическими отражениями подтверждают эту оценку (например, Richardson и др., 1999).

Rasmussen и Noe-Nygaard (1970) делят представленный базальт на три серии (Рис. 1), представляющие различные стадии и периоды вулканизма. Хотя стратиграфия Rasmussen и Noe-Nygaard была получена давно, их три серии были неофициально названы формациями в недавней литературе (например, Waagstein, 1988). В этой статье мы следуем этой традиции: самая глубокая базальтовая формация (LBF), промежуточная Базальтовая формация (MBF), и верхняя базальтовая формация (UBF). LBF со стратиграфической мощностью приблизительно 900 м (3000 м, включая глубинную часть, найденную в скважине Lopra-1A) и UBF (стратиграфическая мощность приблизительно 675 м) состоят из мощных слоев базальтовых лав. Лавовые потоки обычно имеют мощность 10-30 м в LBF и 5-10 м в UBF с маломощными пластами межбазальтовых туфовых и глинистых отложений. MBF (стратиграфическая мощность приблизительно 1350 м) состоит из маломощных потоков рапоевое (приблизительно 1-2 м), часто образующих поля течения с мощностью до приблизительно 20 м. Пласты осадочных пород/туфа имеют небольшое значение в MBF. Подошва субаэральных базальтов LBF найдена на глубине приблизительно 2450 м в скважине Lopra-1A (Boldreel, в прессе) и последние 1000 м пробуренной базальтовой последовательности на Фарерах состоят главным образом из гиаокластических базальтовых горных пород обычно с массивным базальтом на забое скважины Lopra-1A (Waagstein личное общение, сентябрь 2005).

Данные ГИС

Данные широкополосного акустического и плотностного каротажа в скважинах Vestmanna-1 и Glyvursnes-1 были получены как часть проекта SeiFaBa (Jarsen и др., 2005). Подробности физических свойств отложений в скважинах Vestmanna-1 и Glyvursnes-1 будут опубликованы в другой работе. Скважина Lopra-1/1A была исследована в 1996, и данные акустического каротажа по Р-волнам и плотностного каротажа доступны в этой скважине для интервала глубин 200-3100 м. Скважины Vestmanna-1 и Lopra-1 удалены приблизительно на 28 и 55 км, соответственно, от Glyvursnes. Однако горизонтальная протяженность всех трех лавовых формаций на Фарерских островах хорошо задокументирована (например, Rasmussen и Noe-Nygaard, 1970; Waagstein, 1988). Таким образом, вероятно, скважины Vestmanna-1 и Lopra-1/1A демонстрируют общий характер отложений MBF и LBF ниже Glyvursnes.

Комплексные данные акустического и плотностного каротажа, соответствующие идеальному стратиграфическому разрезу (Rasmussen и Noe-Nygaard, 1970) были сделаны для последовательности под Glyvursnes

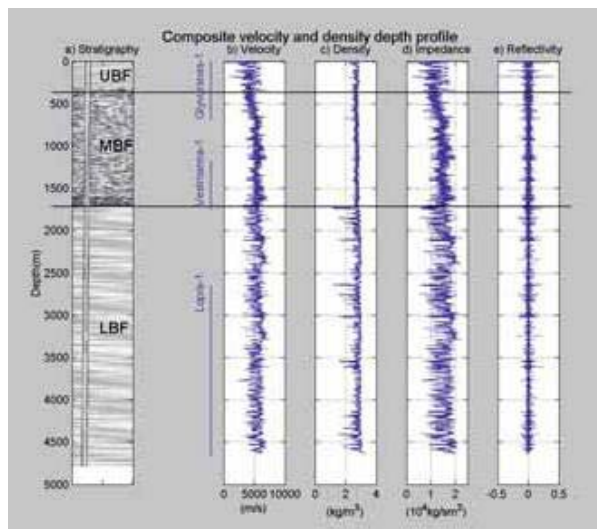


Рис. 2. Комплексные данные акустического и плотностного каротажа для полной стратиграфической последовательности ниже Glyvursnes, созданные на основе данных каротажа скважин Glyvursnes-1, Vestmanna-1 и Lorga-1 (интервалы фактической записи помечены между a) и b), см. также Рис. 1). a) стратиграфическое деление, отображающее границы различных стадий вулканизма (изменено по Rasmussen и Noe-Nygaard, 1970). Подошва UBF и подошва MBF представлены как черные горизонтальные линии, проходящие по всему рисунку; b) Сводные данные скоростей. Верхняя часть данных по скважине Vestmanna-1 используется для заполнения отсутствующего интервала в MBF, а верхняя часть данных по скважине Lorga-1 используется для заполнения отсутствующего интервала глубин в LBF; c) сводные данные плотностного каротажа; на d) и e) показаны значения рассчитанного акустического импеданса и последовательность коэффициентов отражения. Повторные каротажные записи могут быть также выделены на сводных каротажных диаграммах.

на основе скважинных данных по скважинам Glyvursnes-1, Vestmanna-1, и Lorga-1 (Рис. 2). Скорости и плотность в интервалах MBF и LBF, которые не были зарегистрированы, представлены зарегистрированными интервалами в скважинах Vestmanna-1 и Lorga-1, которые являются подобными по данным описания скважин (Hald и Waagstein, 1984) и по данным регионального картирования Фарерских островов (Rasmussen и Noe-Nygaard, 1970).

Синтетические данные

Синтетическая сейсмограмма (без поправок за геометрическое расхождение и другие виды затухания) была создана на основе комплексных данных каротажа, соответствующего идеальному стратиграфическому разрезу, с использованием импульса источника, извлеченного из суммированных данных геофонов при использовании пневмопушек (Рис. 3b). Заметьте явные изменения в характере границ UBF-MBF и MBF-LBF. Синтетическая сейсмограмма показывает, что сигналы, возвращающиеся из UBF и LBF, характеризуются более высокой амплитудой, и они более выражены, чем сигнал от MBF.

Совместный частотно-временной анализ, выполненный посредством вейвлет-преобразования (Torrence и Compo, 1998) данных акустического импеданса и синтетической сейсмограммы, показал, что MBF характеризуется, по большей части, более низкими амплитудами и другим частотным распределением, чем UBF или LBF (Рис. 3c и d).

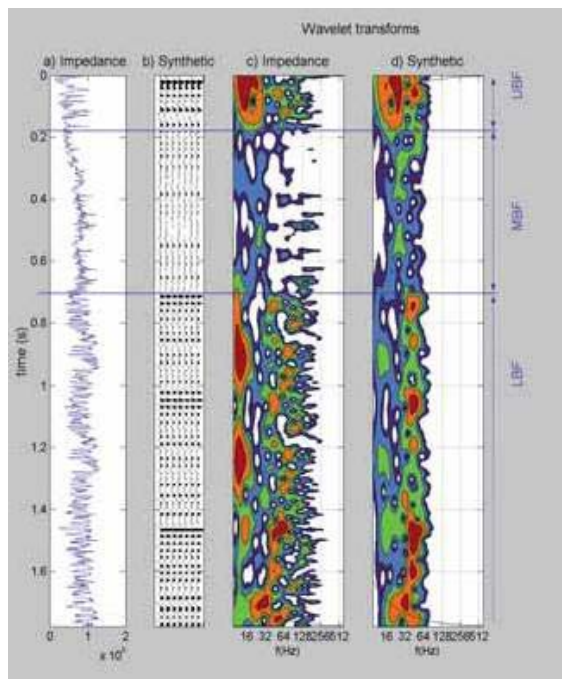


Рис. 3. a) Акустический импеданс по сводным данным каротажа во временной области; b) Синтетическая сейсмограмма, созданная по данным акустического импеданса и импульса источника, извлеченного из суммированных данных геофона при пневмопушке (полоса частот 12-60 Гц) без поправок за геометрическое расхождение или за другие виды затухания; c) вейвлет-преобразование акустического импеданса. Акустический импеданс и трассы синтетической сейсмограммы являются нормированными на среднеквадратическое отклонение (Torrence и Compo, 1998). Уровни изолиний в c) и d). Уровни изолиний увеличиваются по экспоненте.

Данные сейсморазведки

Летом 2003 мы получили комплексный набор данных сейсморазведки в Glyvursnes, на Фарерских островах, включая данные с малыми углами падения по шести различным комбинациям источников энергии и приемников: пневмопушка-геофон и пневмопушка-коса приемников, оба с двумя различными источниками пневмопушек; заряд динамита - геофон и заряд динамита - коса приемников. Схема наблюдений для выбранной части съемки, данные которой, представлены в этой статье, показана на Рис. 4.

Измерения

Данные пневмопушка-геофон/коса были получены на 96-канальных косах, пришвартованных между малым самоподъемным основанием около береговой линии и буксирным судном в другом конце (шаг между центрами групп сейсмодатчиков равен 6.25 м, глубина 3 м), и на профиле из 80 пунктов приема (шаг между пунктами приема равен 5 м, каждый четвертый пункт содержал трехкомпонентные сейсмодатчики, остальные пункты содержали только вертикальные сейсмодатчики). Расположение кос было очень чувствительно к погодным условиям и приливным течениям, и часть записей была сделана только с регистрацией сигнала пневмопушки. Использовались следующие сейсмические источники:

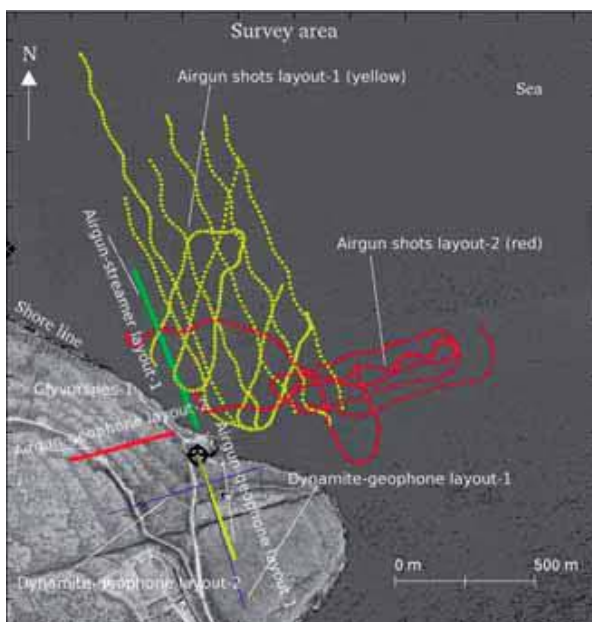


Рис. 4. Аэрофотоснимок площади съемки Glyvursnes, на котором показано размещение выбранной части съемки, которая будет представлена в данной статье. Данные пневмопушка-геофон/коса были получены с пришвартованной косой на 96 каналов (зеленая линия на расстоянии от берега; шаг между группами 6.25 м, глубина 3 м) и с линии из 80 пунктов приема (желтая и красная линия на берегу; расстояние между точками пунктами приема 5 м). При использовании Расстановки 1 одновременно регистрировались данные с косы и геофонов (желтая линия геофонов и зеленая линия косы), в то время как при использовании Расстановки 2 данные регистрировались только на геофонах (красная линия геофонов). Пункты возбуждения выделены цветами, соответствующими расстановке геофонов. Данные динамит-геофон/коса были получены на Расстановке 1 (зеленая и желтая линии). Данные динамит-геофон собирались на двух расстановках (синие линии). Положение скважины Glyvursnes-1 хорошо показано на рисунке (черный кружок со знаком "плюс").

группа шланговых взрывателей 4x40 дюйм³ (2.6 литра) и Solera-Ggun 560 дюйм³ (9.2 литров).

Данные типа динамит-геофон/коса были получены только с нескольких пунктов возбуждения. Сейсмический источник представлял собой 250 г стандартного динамита (скорость горения 3000 м/с) зацементированный и запакерованный в скважинах на глубине 3 м. Данные динамит-геофон были получены по профилю из 120 пунктов приема (расстояние между пунктами приема 5 м) с помощью пунктов возбуждения с шагом по профилю 10 м и с теми же параметрами. В данной статье мы обращаемся только к данным, полученным с помощью группы шланговых взрывателей 4x40 дюйм³ и динамита.

Анализ помех до суммирования

Начальные сравнения сейсмограмм ОПВ указывают на то, что данные сейсмических кос характеризуются значительным шумом, происходящим от множества различных источников, в то время как сейсмограммы ОПП, зарегистрированные от того же самого источника характеризуются значительно меньшим шумом. Переменный по времени частотный анализ отдельных необработанных трасс, основанный на непрерывном фазовом вейвлет-преобразовании [использование импульса Morlet с центральной частотой 0.995 Гц (Addison 2002)] дает

дополнительную информацию о частотном составе сигнала и шума (Рис. 5 и 6). Для ранних времен записи и на частотах ниже 256 Гц, фоновый шум на геофонах - величина малая по сравнению с сейсмическим сигналом (Рис. 5). Ширина полосы частот сейсмического сигнала от обоих источников сужается со временем, отражая относительно низкое эффективное значение Q в базальтах ниже Glyvursnes (Shaw и др. 2004; Shaw и др. 2005).

Хотя используемый динамитный заряд имеет большую (в 5 раз) начальную химическую энергию, чем потенциальная энергия в пневмопушке, однако пневмопушка создает лучший и более сильный сейсмический сигнал. Большинство энергии динамитного возбуждения теряется вследствие неупругой деформации в окрестности возбуждения. Центральная частота динамитного возбуждения немного выше, чем для возбуждения пневмопушкой (Рис. 5 и Рис. 6).

По причинам логистики коса была пришвартована на низкой глубине (3 м). Таким образом, волна - спутник, обусловленная поверхностью, является причиной сильного ослабления сейсмического сигнала на частотах ниже приблизительно 60 Гц. В то же самое время шумы очень сильны на частотах ниже приблизительно 30 Гц (Рис. 6с). В дополнение к фоновому шуму, данные с сейсмических кос характеризуются высокочастотным шумом (~128-512 Гц), вызванным реверберациями сейсмического сигнала в водной толще. Совместное действие фонового шума, волны спутника и ревербераций в водной толще уменьшает эффективную полосу частот сейсмического разреза, и таким образом, проникновение сейсмического сигнала, зарегистрированного на косе сравнимо с сигналом, зарегистрированным на геофонах (сравн. Рис. 5а и Рис. 6а). Однако косы все же дают полезные сейсмические данные до времени приблизительно 1 с.

Низкочастотные шумы на плавучей косе, которые мы наблюдали в процессе сбора информации в Glyvursnes, были в большой степени связаны с разворачиванием пришвартованной косы в течение этого эксперимента. На большем количестве стандартных морских работ, фоновые шумы были ниже. Более того, в глубоководном участке глубины погружения источника и сейсмоприемной косы могут быть отрегулированы для создания оптимальной полосы частот на определенной глубине, при использовании анализа сигналов, как показано на Рис. 5 и Рис. 6 и знании формы импульса источника и частотного затухания в исследуемых отложениях. Несмотря на данные буксируемых сейсмических кос, полученные в ходе эксперимента Glyvursnes 2003, наши данные имеют относительно низкую эффективную полосу частот.

Предварительная обработка

Все зарегистрированные сейсмические данные были подвержены преломленным волнам с малых глубин. Преломленные волны из данных динамит-геофон были удалены посредством верхнего мьютинга, в то время как f-k фильтрация использовалась для данных пневмопушка-геофон. На данных буксируемых кос, преломленные волны и низкочастотные регулярные помехи от неизвестного источника были удалены посредством "хирургического" мьютинга.

Хотя анализ шумов указывает на то, что постоянно во времени фильтрация является предпочтительной процедурой для предварительной обработки для данных представленных в этой статье. Данные пневмопушки были отфильтрованы полосовым фильтром 12-14-50-60 Гц (Ormsby), в то время как данные динамитного возбуждения были фильтрованы фильтром 12-14-100-120 Гц (Ormsby). Данные динамит-геофон и пневмопушка-коса были

обработаны с учетом двумерной геометрии. Двумерный фильтр был применен к суммированным данным пневмопушка-коса (перемешивающий три отсчета и 11 трасс). Данные пневмопушка-коса были обработаны с учетом трехмерной геометрии отражающих границ. Анализ скоростей был сделан на избранных суперсейсмограммах. Полученные скорости суммирования хорошо коррелируются со среднеквадратическими скоростями, рассчитанными по комплексным данным скоростей идеального стратиграфического разреза Фарерских островов. Перед выводом данных, была сделана автоматическая регулировка усиления (АРУ) с двумя различными окнами в 100 мс и 500 мс; трассы были смешаны в соотношении 1:1. Составной разрез (Рис. 7) дает представление о качестве обработанных данных, полученных при комбинациях динамит-геофон, пневмопушка-геофон и пневмопушка-коса (Рис. 8). Хотя суммирование повышает когерентность однократных отражений, частотный состав сигнала и отношение сигнал-шум, наблюдаемые на данных до суммирования (Рис. 5 и 6), полностью отражаются на качестве итогового суммированного разреза (Рис. 8). Поверхность раздела UBF-MBF, через которую прошла скважина Glyvursnes-1, не ясна в любом из этих трех наборов данных. Однако, горизонт С' расположенный приблизительно на 0.2 с на данных динамит-геофон и данных динамит-пневмопушка хорошо коррелируется с поверхностью раздела UBF-MBF в скважине. Заметное отражение приблизительно на 0.6 с, горизонт А', был интерпретирован как поверхность раздела MBF-LBF. Общий характер записи последовательностей выше и ниже горизонта А' хорошо коррелируется с характером записи UBF и MBF соответственно на синтетической сейсмограмме для идеального разреза (Рис. 3b). Хотя земной фильтр и суммирование изменяют полосу частот отраженного сигнала,

более узкий частотный диапазон MBF по сравнению с частотным диапазоном UBF и LBF, который наблюдался на синтетических данных, повторяется в суммированных и масштабированных данных Glyvursnes (Рис. 9). В дальнейшем мы будем считать, что горизонт А' представляет собой поверхность раздела MBF-LBF.

Результаты и обсуждение

Объединенный частотно-временной анализ в виде непрерывного вейвлет-преобразования необработанных данных до суммирования показывает, что высокие частоты сейсмических трасс сильно уменьшаются с глубиной (Рис. 5 и Рис. 6). Наибольшее отношение сигнал-шум получено на данных комбинации пневмопушка-геофон.

Съемка ВСП с нулевым выносом, сделанная в скважине Glyvursnes-1 исследователем Shaw (2004), показала сильное поглощение высоких частот сейсмического сигнала (низкое значение Q) ниже Glyvursnes. В соответствии с этими наблюдениями, мы видим, что эффективная ширина полосы частот данных наземной сейсморазведки сильно сужается в зависимости от времени (Рис. 5b). От первоначальной полосы частот приблизительно 4-128 Гц, полоса частот сузилась до 5-20 Гц в глубине 1.6 с (приблизительно 5300 м). Это объясняет преимущество пневмопушки как сейсмического источника над динамитом. Пневмопушка создает более низкочастотный сигнал (с центральной частотой приблизительно 16 Гц; Рис. 5a), чем динамит (с центральной частотой приблизительно 32 Гц; Рис. 5b), и таким образом лучше подходит для того, чтобы создавать сейсмические сигналы, проходящие через базальт.

Сводный профиль, состоящий из данных, полученных с помощью трех различных методик измерения (Рис. 8), демонстрирует, что полоса частот сигнала и отношение

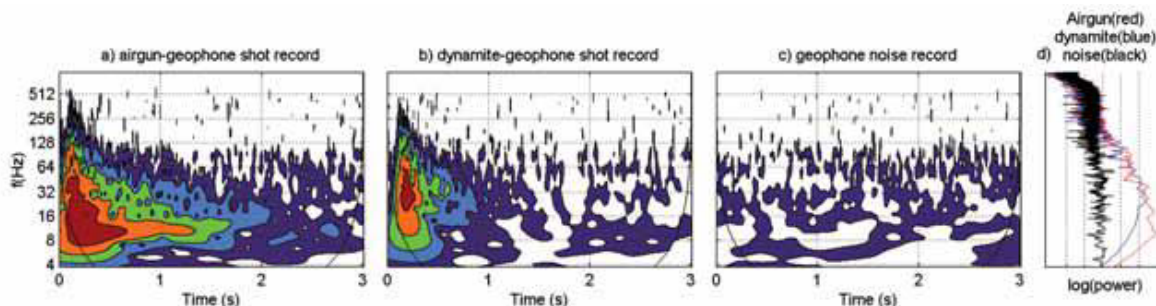


Рис. 5. Показаны непрерывные вейвлет-преобразования записи геофона 110 (пункт приема 74). а) Пневмопушка-геофон, вынос 208 м; б) Динамит-геофон, вынос 224 м; в) Запись шума на геофоне; д) Частотные спектры всех трех записей. Значения не изменены. Уровни изолиний увеличиваются по экспоненте, и они одинаковы для а), б) и в).

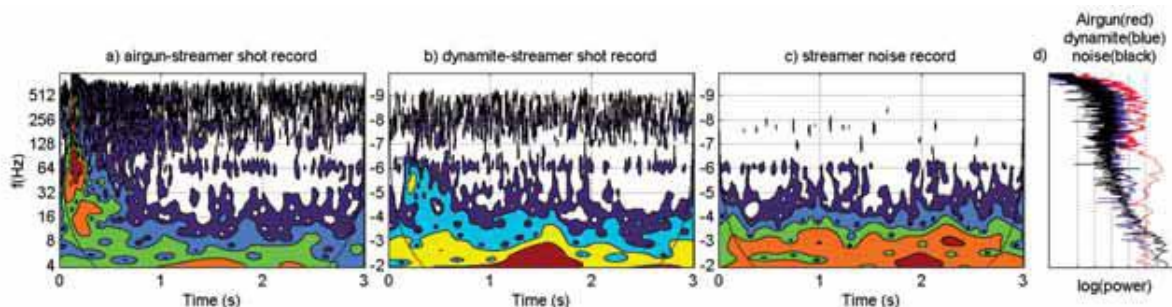


Рис. 6. Показаны непрерывные вейвлет-преобразования канала 130 с буксируемой косы (пункт приема 90). а) Пневмопушка-коса, вынос 195 м; б) Динамит-коса, вынос 415 м; в) Запись шума на косе; д) Частотные спектры всех трех записей. Значения не изменены. Уровни изолиний увеличиваются по экспоненте, и они одинаковы для а), б) и в).

сигнал-шум для необработанных данных до суммирования (Рис. 5 и Рис. 6) отражаются на качестве итогового суммированного разреза. Простое суммирование повышает качество сейсмического изображения однократных отражений.

Разделение сейсмического профиля на три разных кратности отчетливо видно по данным пневмопушка-коса, пневмопушка-геофон и динамит-геофон. Две высоко-амплитудных последовательности, одна выше горизонта C' (0-0.16 м) и одна ниже горизонта A' (0.59 с) и низко-амплитудная последовательность (между 0.16 и 0.59 с) ясно выделяются. Сравнивая синтетические данные для идеального разреза (Рис. 3b) с суммированными данными (Рис. 8), кажется вероятным, что горизонт A' является отражением от (или близко к) поверхности раздела между MBF и LBF. Кроме того, с учетом данных, сопоставимых с данными Glyvursnes, можно выделять MBF по характеру отражения. Кратные волны не значительны выше горизонта A' . Хотя мы ожидаем, что интенсивность кратных волн может возрасти ниже горизонта A' , мы не затрагивали эту тему в ходе предварительной обработки, целью которой было понимание природы горизонта A' ниже Glyvursnes.

Поверхность раздела UBF-MBF была найдена приблизительно на 340 м (ниже среднего уровня моря) в скважине Glyvursnes-1 (Waagstein, личное общение). Глубинное преобразование данных сейсморазведки МОВ дает поверхность раздела MBF-LBF на глубине 1390 м, и мы, таким образом, оцениваем полную мощность MBF как 1050 м ниже Glyvursnes.

Это меньше чем 1350 м, т.е. полной мощности MBF согласно Rasmussen и Noe-Nygaard (1970) в северной части Фарер, и 1400 м в районе Vestmanna (Waagstein 1988). Таким образом, мощность MBF уменьшается к югу и востоку. В общем случае, это соответствует данным Waagstein (1988), который обнаружил, что мощность MBF между Sandoy и Su

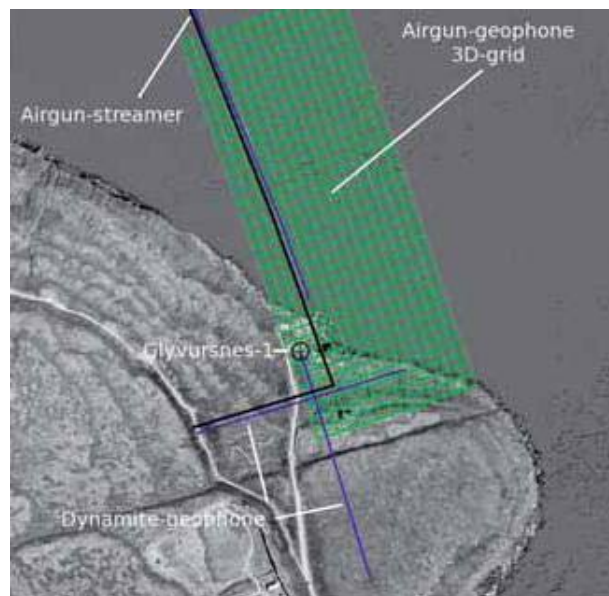


Рис. 7. Аэрофотоснимок площади съемки Glyvursnes, на котором показаны ОГТ для двумерной обработки данных пневмопушка-коса и динамит-геофон (синие линии), и сетка для трехмерной обработки данных пневмопушка-геофон (зеленые линии). Сетка отображает каждый инлайн и каждый 5-ый кросслайн. Черная линия показывает приблизительное положение сводного профиля по данным динамит-геофон, пневмопушка-геофон и пневмопушка-коса, изображенного на Рис. 8. Также указано положение скважины Glyvursnes-1.

меньше чем в районе Vestmanna. Причина кажущегося уменьшения мощности MBF на юг и восток может заключаться том, что количество лавы, доступной в процессе отложения MBF не было достаточным для того, чтобы все потоки достигли Glyvursnes, если их источник был расположен на северо-западе. Однако постепенное уменьшение мощности MBF в восточном направлении не было замечено в ходе картирования Фарерских Островов (Rasmussen и Noe-Nygaard, 1970). С другой стороны, площадь Glyvursnes, возможно, была поднята относительно площади Vestmanna после отложения LBF, что возможно, способствовало образованию разрывных нарушений. К сожалению, существующие данные не позволяют нам сделать выбор среди двух вышеупомянутых или других достоверных гипотез уменьшения мощности MBF.

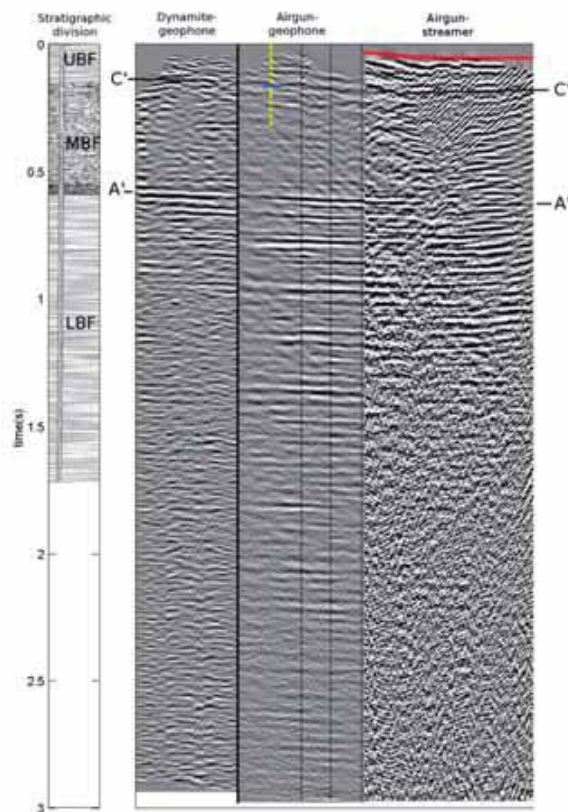


Рис. 8. Показан сводный профиль. См. Рис. 7 для его расположения. Уточненная стратиграфическая модель изображена слева. Тройное разделение сейсмического разреза делается по данным пневмопушка-геофон/коса и динамит-коса.

Две высоко-амплитудных последовательности (0-0.16 с и 0.59 в конце записи) и одна низко-амплитудная последовательность (0.16-0.59 с) ясно выделяются. Сравнивая этот рисунок с рисунком 3b (синтетический разрез по комплексу картажных данных), мы видим, что низко-амплитудная последовательность характеризуется полосой частот, похожей на полосу частот отложений MBF на синтетической сейсмограмме, в то время как полоса частот нижней высоко-амплитудной последовательности сопоставима полосе частот LBF. Горизонт C' хорошо соответствует границе раздела UBF-MBF в скважине (синий маркер на желтой линии). Горизонт A' был интерпретирован как поверхность раздела MBF-LBF. Красная линия обозначает морское дно по данным батиметрической съемки.

Рассматривая возможные погрешности в оценке мощности MBF ниже Glyvursnes, необходимо учитывать, что в скважине Glyvursnes-1 делался контрольный сейсмический каротаж на глубине 600 м, который ограничивает отношение глубина/время до этой глубины. Таким образом, любая существенная погрешность в оцененной мощности является следствием ошибочных значений скорости ниже 600 м. От глубины 600 м до горизонта A', вариация интервальных скоростей равна $\pm 10\%$, что соответствует изменению глубины горизонта A' на ± 80 м. Таким образом, маловероятно, что мощность MBF в Glyvursnes является сопоставимой с её мощностью в Vestmanna, если не использовать нереалистичное значение средней скорости 7000 м/с, или не интерпретировать горизонт A' как поверхность раздела MBF-UBF.

Благодарности

Проект SeiFaBa, основан группой Sindri (www.sindri.fo). Сбор данных сейсморазведки МОБ был сделан с помощью оборудования от Department of Earth Science, University of Aarhus. Обработка данных с помощью пакета Promax была сделана в отдел Earth Science, University of Aarhus. Особенная благодарность выражается Sjurur Patursson, фермеру с участка съемки за его доброжелательность в ходе полевых работ. Мы благодарны студентам University of Cambridge, Aarhus University и University of Faroe Islands за помощь в проведении полевых работ. Мы благодарим Robert James Brown, University of Faroe Islands за правку текста.

Ссылки на литературу

- Addison, P. [2002] *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*. Institute of Physics Publishing, London.
- Andersen, M. S., Sorensen, A. B., Boldreel, L. O., and Nielsen, T. [2002] Cenozoic evolution of the Faroe Platform: comparing denudation and deposition. *Geological Society, London, Special Publications*, **196**, 291-311.
- Archer, S. G., Bergman, S. C., Iliffe, J., Murphy, C. M., and Thornton, M. [2005] Palaeogene igneous rocks reveal new insights into the geodynamic evolution and petroleum potential of the Rockall Trough, NE Atlantic Margin. *Basin Research*, **17**, 1, 171-201.
- Boldreel, L. O. Wire-line log-based stratigraphy of flood basalts from the Lopra-1/1A well, Faroe Islands. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, Copenhagen.
- Fruehn, J., Fliedner, M. M., and White, R. S. [2001] Integrated wide-angle and near-vertical subbasalt study using large-aperture seismic data from the Faeroe-Shetland region. *Geophysics*, **66**, 5, 1340-1348.
- Hald, N. and Waagstein, R. [1984] Lithology and chemistry of a 2-km sequence of Lower Tertiary tholeiitic lavas drilled on su?uroy, Faeroe Islands, (Lopra-1). The deep drilling project [1980-1981] in the Faeroe Islands 15-38. *Foroya Fro?skaparfelag*, Torshavn.
- Japsen, P., Andersen, C., Andersen, H. L., Andersen, M. S., Boldreel, L. O., Mayko, G., Mohammed, N. G., Pedersen, J. M., Petersen, U. K., Rasmussen, R., Shaw, F., Springer, N., Waagstein, R., White, R. S., and Worthington, M. [2005] Preliminary results from investigations of seismic and petrophysical properties of Faeroes basalts in the SeiFaBa project. *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives. Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, 1461-1470.
- Maresh, J. and White, R. S. [2005] Seeing through a glass, darkly: strategies for imaging through basalt. *First Break* **23**, 27-33.
- Planke, S. [1994] Geophysical Response of Flood Basalts from Analysis of Wire Line Logs - Ocean Drilling Program Site-642, Voring Volcanic Margin. *Journal of Geophysical*

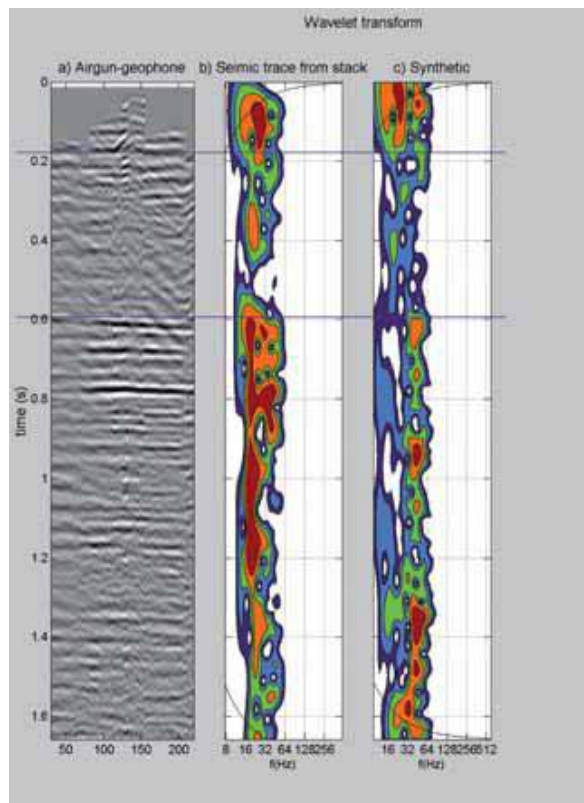


Рис. 9. а) Инлайн 2 по суммированным данным пневмолушка-геофон; б) вейвлет-преобразование трасс из суммированного разреза; в) вейвлет-преобразование синтетической сейсмограммы для уточненной модели. Сейсмотрасса и синтетическая сейсмограмма нормализованы на среднеквадратическое отклонение (Torrence и Comro, 1998). Уровни изолиний увеличиваются по экспоненте. Из сравнения данного рисунка с рисунком 3, мы видим такое же общее понижение амплитуды и изменение частотного состава сигнала, пришедшего от MBF по сравнению с частотным составом сигнала, пришедшего от UBF или LBF. Таким образом, эти действия являются ещё одной проверкой результата интерпретации подошвы MBF (горизонт A') и уточнения мощности MBF. АРУ было применено к сейсмическим данным, с целью поднятия амплитудного уровня MBF.

Research-Solid Earth, **99** (B5), 9279-9296.

Planke, S., Alvestad, E., and Eldholm, O. [1999] Seismic characteristics of basaltic extrusive and intrusive rocks. *The Leading Edge*, **March**, 342-348.

Rasmussen, J. and Noe-Nygaard, A. [1970] *Geology of the Faeroe Islands*. C. A. Reitzels Forlag, København.

Reshef, M., Shulman, H., and Ben-Avraham, Z. [2003] A case study of sub-basalt imaging in land region covered with basalt flows. *Geophysical Prospecting*, **51**, 3, 247-260.

Richardson, K. R., White, R. S., England, R. W. and Fruehn, J., [1999] Crustal structure east of the Faroe Islands: map-ping sub-basalt sediments using wide-angle seismic data. *Petroleum Geoscience*, **5**, 2, 161-172.

Self, S., Keszthelyi, L. and Thordarson, T. [1998] The importance of pahoehoe. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **26**, 81-110.

Shaw, F., Worthington, M. H., White, R. S., Andersen, M. S., Petersen, U. K., and SeiFaBa Group [2004] A study of seismic attenuation in basalt using VSP data from a Faroe Islands borehole. *66th Meeting European*

Association of Geoscientists and Engineers. Expanded abstract P015.

Shaw, F., Worthington, M. H., White, R. S., Andersen, M. S., Petersen, U. K., and SeiFaBa Group [2005] Seismic attenuation in Faroe Island basalts. *67th Meeting European Association of Geoscientists and Engineers*. Expanded abstract P502. Sorensen, A. B. [2003] Cenozoic basin development and stratigraphy of the Faroes area. *Petroleum Geoscience* **9**, 189-207. Spitzer, R. and White, R. S. [2005] Advances in seismic imaging through basalts: A case study from the Faroe-Shetland Basin. *Petroleum Geoscience*, **11**, 2, 147-156.

Thordarson, T. and Self, S. [1998] The Roza Member, Columbia River Basalt Group: A gigantic pahoehoe lava flow field formed by endogenous processes? *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* **103**(B11), 27411-27445.

Torrence, C. and Compo, G. P. [1998] A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* **79**(1), 61-78.

Waagstein, R. [1988] Structure, composition and age of the Faeroe Basalt plateau, Early Tertiary Volcanism and the opening of the NE Atlantic. *Geological Society Special Publication* **39** 225-238.

White, R. S., Smallwood, J. R., Flidner, M. M., Boslaugh, B., Maresh, J. and Fruehn, J. [2003] Imaging and regional distribution of basalt flows in the Faeroe-Shetland Basin. *Geophysical Prospecting* **51**(3), 215-231.

White, R. S., Spitzer, R., Christie, P. A. F., Roberts, A., Lunnon, Z., Maresh, J., and iSimm Working Group [2005] Seismic Imaging through Basalt Flows on the Faroes Shelf. Faroe Islands Exploration Conference, Proceedings of the 1st Conference. *Foroya Fro?skaparfelag*, Supplementum **43**, Torshavn, 11-31.

Ziolkowski, A., Hanssen, P., Gatliff, R., Jakubowicz, H., Dobson, A., Hampson, G., Li, X. Y., and Liu, E. R. [2003]

Use of low frequencies for sub-basalt imaging. *Geophysical Prospecting*, **51**, 3, 169-182.