

Описание подбазальтовых отложений сложной 3-х мерной моделью A complex 3D volume for sub-basalt imaging

F. Martini¹, R.W. Hobbs² C.J. Bean¹ и R. Single³

Мощные напластования базальта и базальт - андезитовые лавовые потоки были внедрены во время континентального перерыва в осадконакоплении, и они покрывают существовавшие ранее осадочные комплексы представляющие интерес для поисков углеводородов. Обычными методами сбора и обработки сейсмических материалов трудно отобразить внутреннее строение вулканических напластований, так же как и ниже залегающих подбазальтовых структур. Использование синтетических сейсмограмм может помочь понять, как максимально приблизить качество получения и обработки к реальным данным. Кроме того, несейсмические методы полезны для проверки понимания общего строения исследуемых подбазальтовых отложений. Поэтому объединение сейсмических и несейсмических данных приводит к многообещающим результатам и должно развиваться далее.

Из этих рассуждений следует, что существует потребность в адекватной 3 мерной модели базальта, которая позволила бы смоделировать реальные сейсмические и несейсмические данные, с одной стороны, чтобы проверить методы получения и обработки сейсмических данных, и с другой, чтобы развить стратегии для интеграции геофизических данных в общую методику, чтобы преодолеть проблему отображения подбазальтовых отложений. Сложная 3 х мерная модель была построена, используя всю информацию, доступную из интерпретации сейсмических данных, данных ГИС, гравиметрических данных, и геологических наблюдений. В модели были использованы сейсмические и несейсмические синтетические данные. В этой статье мы представляем методику, построения 3-х мерной модели, а так же первый результат по моделируемым данным. Модель и данные доступны широкому кругу читателей данной статьи.

Введение

Проблема построения базальтовых и подбазальтовых отложений по сейсмическим данным является специфично острой во многих областях, где потенциальные коллекторы, содержащие углеводороды, перекрываются базальтовыми напластованиями, по сумме толщин до нескольких километров (например, на границе Североатлантических, Западноафриканских и Бразильских бассейнов). На этих территориях мощные напластования базальта и базальто- андезитовых лавовых потоков были внедрены во время континентального перерыва в осадконакоплении (т.е базальты затопления), и они покрывают существовавшие ранее осадочные породы, которые представляют интерес для исследований на наличие залежей углеводородов. Обычными сейсмическими методами получения и обработки данных, трудно отобразить внутреннее строение вулканических напластований, а так же нижележащих подбазальтовых структур.

Проблема построения моделей упирается в несколько факторов: как неоднородность природы поверхности базальтовых потоков, так и сильное воздействие на их внутреннюю структуру (Flidner and White, 2001, Martini and Bean, 2002a, Martini and Bean, 2002b, Martini et al., submitted.). Роль рассеивания волны в сейсмических построениях хорошо показана в литературе (Gibson and Lavender, 1988, Pullammanappillil et al., 1997, Martini et al., 2001), так же как и эффекты влияния неровных отражающих горизонтов на распространение волны (Paul and Campillo, 1988, Purnell et al., 1990, Ruud and Hestholm, 2000, Hestholm and Ruud, 2000, Martini and Bean, 2002a, Martini and Bean, 2002b, Ziolkowski et al., 2003). Изменения скорости внутри лавовых потоков, вызванные композиционной и структурной изменчивостью в пределах одиночных потоков (низкая скорость на кровле и высокая скорость на подошве в плотной породе), совместно с прослоями между потоками лавы, отложениями туфов, угольных пластов и вулканобломочными породами вносят вклад в неоднородность внутренней структуры вулканических напластований.

Эта сложно построенная 3-х мерная структура ослабляет, рассеивает и многократно отражает энергию, которая передается в слои базальта с высоким импеданс-контрастом на кровле потоков. Кроме того, кровля и подошва базальта не являются плоскими и ровными поверхностями, но часто имеют сложное топографическое строение, которое оказывает разрушительное воздействие на распространение волны. Все эти факторы объединяются и существенно уменьшают качество сейсморазведки подбазальтовых отложений.

Использование синтетических данных может помочь понять влияние этих факторов на изображение подбазальтовых отложений и исследовать эффективные подходы получения и обработки, пригодные для реальных данных.

Для сейсмических данных в базальтах, распространение 3Д волны в 3Д модели требует получения синтетических данных, которые количественно должны быть подобны 3Д реальным данным (Martini et al., submitted). Следовательно, существует потребность достоверной 3-х мерной модели базальта.

Несейсмические методы были успешно использованы для улучшения понимания общей геометрии подбазальтовых залежей, например, электрические и электромагнитные методы (e.g., Manglik and Verma, 1998, Warren and Srnka, 1992, MacGregor et al., 1999, MacGregor and Sinha, 2002, Jegen et al., 2002), гравиразведка (e.g., Murphy et al., 2002), методы соответствия (e.g., Crawford, 2002).

С помощью объединения сейсмических и несейсмических данных была сделана проверка некоторых методов и она привела к многообещающим результатам (Manglik and Verma, 1998; Hautot et al., 2002). Однако, эти методы не могут создать ясного изображения объектов, требуемого для типовой оценки риска для разведки на наличие углеводородов.

¹Seismology and Computational Rock Physics Lab., Geophysics Group, Dept. of Geology, University College Dublin, Belfield, Dublin 4.

²Department of Earth Science, University of Durham, UK.

³Department of Earth Science, University of Durham, UK, now at: Heidrun PETEK, Statoil A.S.A., P.O.Box 273, N-7501, Stjordal, Norway.

Цель этой работы состоит в том, чтобы создать достоверную 3-х мерную скоростную модель, которая помогла бы средствами моделирования синтетических волн обеспечить полную оценку результата отображения подбазальтовых отложений. Эта модель базировалась на информации, взятой из реальных данных, и воспроизводит распределение скорости, сильно рассеивающую внутреннюю структуру базальта, и нерегулярную поверхность потока.

В этой статье мы представляем методику, используемую для построения 3-х мерной модели, а так же начальные результаты моделирования. Модель и сейсмические данные доступны специалистам для загрузки и проверки новой техники обработки. Мы предлагаем модель в представлении базальтового эквивалента модели соли Marmousi /SEG/EAGE (i.e. Aminzadeh et al., 1997, Versteeg, 1994).

Создание модели

В последовательности восстановления синтетических данных в сравнении с реальными данными, 3-х мерная модель должна соответствовать возможностям истинной геологии как можно ближе. Эта информация включает детерминистскую, когда возможно, и статистическую, когда детерминированные знания этих возможностей не доступны. Поэтому, чтобы преодолеть недостаток детерминированного представления малоразмерных неоднородностей, наша модель включает крупномасштабные наблюдения из сейсмических данных и геологического картирования и мелкомасштабную статистическую информацию, извлеченную из сейсмических данных и геологического картирования, а также по данным скважинного бурения. Специальный набор сейсмических данных был выбран как основа для нашей модели так, что мы могли гарантировать, что наши синтетические данные соответствуют реальным полевым данным. Параметры модели основного базальтового тела, под и над- базальтовых поверхностей, рассчитываются по данным сейсмической разведки методом отраженных волн. Толщина базальта – это структура "лавого пирога", в котором потоки базальта имеют мощности, рассчитанные из полевых наблюдений по сечениям. (Jerram, 2002, Single and Jerram, 2004). Отдельные потоки созданы, используя статистическую скоростную информацию, взятую из анализа акустического и плотностного каротажа в скважине. Остальная часть модели (под и над – базальтовые осадочные слои, почвы угольных пластов, фундамент) была заполнена в соответствии с геологической моделью, рассчитанной из полевых сейсмических данных и соответствует полевым данным потенциальных методов (гравirazведке).

Исходные данные

Геологическая модель была создана по проинтерпретированным сейсмическим данным по съемке GFA-99, выполненной WesternGeco в бассейне Faergoe- Shetland. Съемка состоит из грубой сетки 2Д профилей (Рис 1а), с общей длиной - 1700 км. Данные были зарегистрированы, используя единственный буксир, буксирующий 11.4 км длинную сейсмоприемную косу с 25 м. интервалом между ПВ; полная длина записи - 10 секунд (Bagaini . et al, 2000).

Данные были обработаны Geco-Prakla и для целей этого проекта интерпретировались в Университете Durham. Шесть 2Д сейсмических профилей расположенных под углом в 90 ° друг от друга с девятью сейсмическими пересекающимися профилями интерпретировались в узлах сетки 500 м вдоль профилей. Интерполяция вкрест набора данных, выполненная в GoCad по этой интерпретации создала набор поверхностей более чем 50 x 50-километровой области. Эти поверхности, которые явились отправной точкой для 3-х мерной модели, показаны на Рис.1б. Гравиметрическое моделирование и инверсия были рассчитаны по этим данным в попытке оценить глубину и строение фундамента.

Границы

Пересчет сетки и передискретизация

Поверхности, интерпретируемые по сейсмическим данным и интерполированные в GoCad, были представлены в форме x, y и z (глубина) координатах на сетке с нерегулярным шагом с минимальным интервалом между узлами 500 м. (Рис 2а). Неравномерность интервала является следствием работы программы Gocad, который не работает с XYZ ортогональной сеткой в XYZ пространстве. Первый необходимый шаг состоял в переинтерполяции узлов на равномерную сетку (Рис 2б); затем дискретизации поверхности к масштабу, требуемому для моделирования (25 m) (Рис 2с). Из исходного набора данных 177 неравномерных узлов сетки для каждой поверхности, окончательная дискретная равномерная сетка содержала 3363 x 3363 узлов сетки. Центральный блок 2048 x 2048 был взят для последующего создания полной модели.

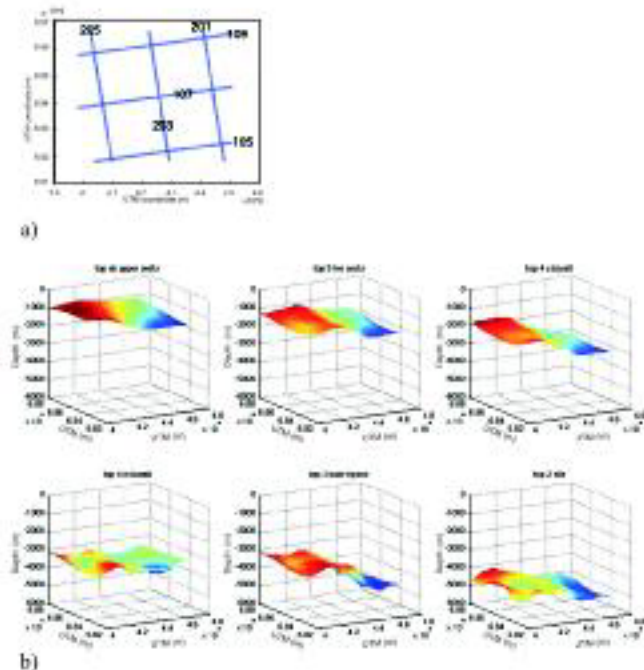


Рис 1 а) GFA-99 проект, сетка сейсмических профилей; **б)** до и пост базальтовые слои, кровля, середина и подошва поверхностей базальта, по сейсмическим данным GFA-99 проекта в Университете Дарема. Показанные данные интерпретировались с 5-километровым интервалом между узлами сетки.

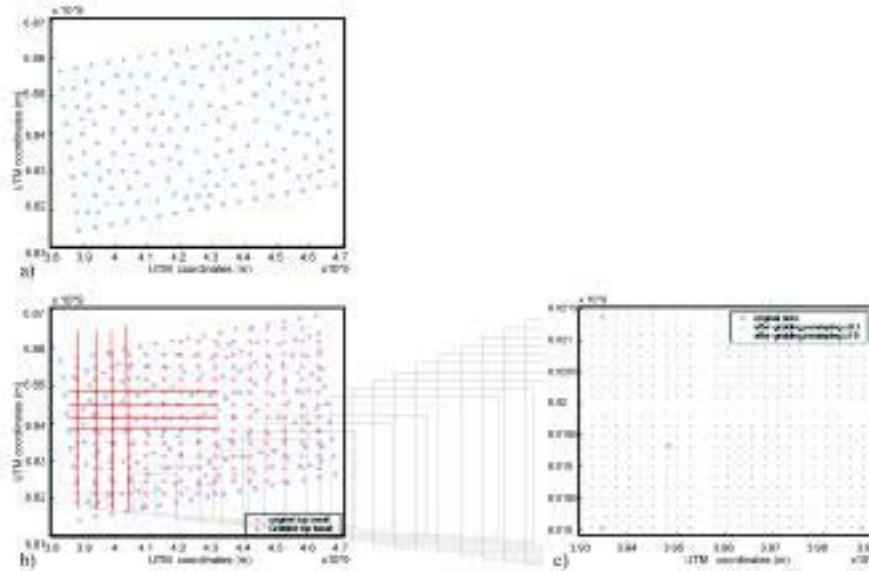


Рис 2 а) Начальные отметки поверхности кровли базальта, x и y позиция. **б)** Отметки, дискретизированные к регулярной сетке, и затем **с)** повторно передискретизированные к интервалу 25 м.. В **с)** изменение масштаба изображения из небольшой поверхности, для того, чтобы увидеть новые точки сетки (черные точки), которые определяют поверхность относительно сетки не- дискретизированных точек (красные круги), и начальные отметки (синие круги).

Интерполяция границ

Почему?

Поверхности базальта, как большинство природных топографических поверхностей (Mandelbrot 1977, Brown, 1985, Fagg, 1992, Huang and Turcotte, 1989), должны быть шероховатыми. Walia and Bull (1997), например, установили шероховатость базальтовых горизонтов на юго-западе Rockall Plateau (NE Atlantic). Интерпретацией сейсмических данных можно выделить только длинноволновые шероховатые поверхности. Малоразмерные (контролируемые длиной волны, используемой при регистрации) неоднородности истинных сейсмических границ не могут быть получены из данных.

Следовательно, эта информация отсутствует на сейсмических разрезах. Это можно увидеть по амплитудному спектру изображения поверхности. Амплитудный спектр дается логарифмом амплитуды, построенным в зависимости от амплитуды пространственной длины волны. Теоретический амплитудный спектр поверхности, интерпретируемой и оцифрованной по сейсмическим данным, показан на Рис 3. Информация от средних до крупноразмерных объектов представлена на Рис 3, сплошной линией; однако, амплитудная информация по малоразмерным объектам отсутствует (Рис 3, пунктирная линия). Интерполяция шероховатостей используется для восстановления этих мелкомасштабных структур, статистическим способом. Процедура описана подробно в следующей главе.

Процедура

Амплитуды шероховатых поверхностей как функция длины волны лежат на прямой линии, наклон которой соотносится с размером шероховатостей на поверхности. Мы можем экстраполировать значения, отсутствующие в области высоких частот и создать их синтетически. Более низкочастотная пространственная информация из интерпретируемых сейсмических данных сохранена и объединена с более высокими пространственными частотными компонентами, полученными по

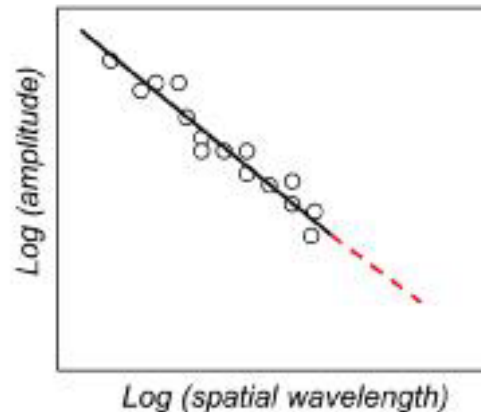


Рис 3 а) Теоретический схематический амплитудный спектр интерпретируемого сейсмического горизонта. Представлена информация о среде с крупномасштабными особенностями (черные точки), и здесь мы можем измерить размер шероховатостей (от наклона линии лучшего соответствия). Однако амплитуда особенностей маленького масштаба отсутствует (красный пунктир).

шероховатым поверхностям, полученных синтетически с тем же самым размером шероховатостей, как на измеренных оцифрованных горизонтах. Следовательно, мы статистически создаем отсутствующие малоразмерные объекты, представленные пунктирной линией на Рис 3 (Walia and Bull, 1997).

По шагам:

- Размер шероховатостей, среднее значение амплитуды, и ее стандартное отклонение рассчитывались от оцифрованной поверхности;

- Был создан шероховатый синтетический профиль с тем же самым размером шероховатостей и включающий низко и высокочастотные компоненты;
- Высокочастотные компоненты, извлеченные из этого синтетического профиля, обрезались для соответствия самой высокой частоте реальных оцифрованных данных (использовался Gauss-фильтр); и
- Эта высокочастотная компонента добавляется к оцифрованной поверхности.

Изображение синтетического профиля показано на Рис 4. Начальный сигнал показан синим; по рассчитанному амплитудному спектру был измерен размер шероховатостей. Шероховатый синтетический профиль был сделан с тем же самым размером шероховатостей для более высоких значений частотных компонентов (отмечены красным). Высокочастотная компонента (отмечена красным) добавляется к начальному сигналу (отмечена синим), для получения окончательного интерполированного сигнала (показан зеленым). Здесь мы показываем изображение профиля для простоты визуализации. В случае поверхности, процедура шероховатой интерполяции применяется по аналогии.

Приложение

Процедура, описанная в предыдущем разделе, была применена к кровле базальта, средней пачке и поверхности подошвы базальта, интерпретируемой по GFA-99 сейсмическим данным (Рис 1). Однако, для реальных данных, простая процедура, описанная выше, должна была быть изменена, потому что на геометрию поверхностей, оцифрованных по сейсмическим данным, большое влияние оказали тектонические нарушения после накопления осадков и уплотнения. Так, чтобы оценить величину шероховатости первоначальной поверхности базальта, эти постседиментационные эффекты были убраны вовсе. Это было достигнуто вычитанием из базальтовой поверхности геометрии вышележащего пласта (Рис 5).

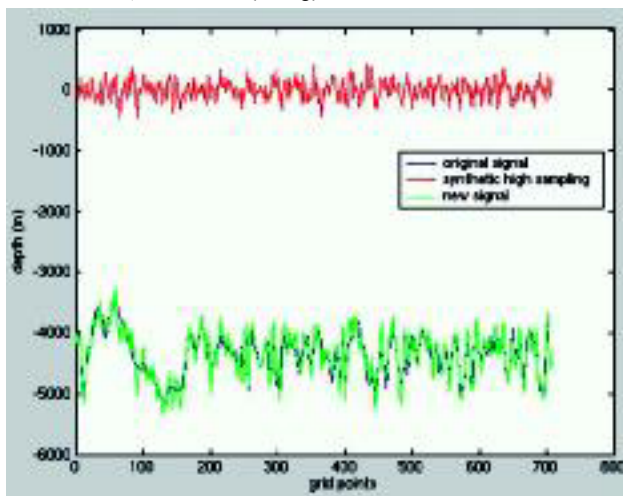


Рис 4 Шероховатая интерполяция, примененная к синтетическому профилю: первоначальный синтетический сигнал выделен синим. Присутствует только низкочастотная компонента. Высокочастотный сигнал – синтетически создан (напечатан красным) и добавлен к начальному (исходному) сигналу. Результат показан зеленым.

refer to the result as the pre-tectonic deformation interface. While the fractal dimension was calculated on the pre-deformation interface, the standard deviation of the interface depth was calculated on what we refer to as the 'residual interface'. This is obtained by subtracting from the pre-tectonic deformation interface its best-fit line (Figure 6). If the standard deviation was calculated on the pre-deformation interface, the value would be unrealistically high, due to the slope of the

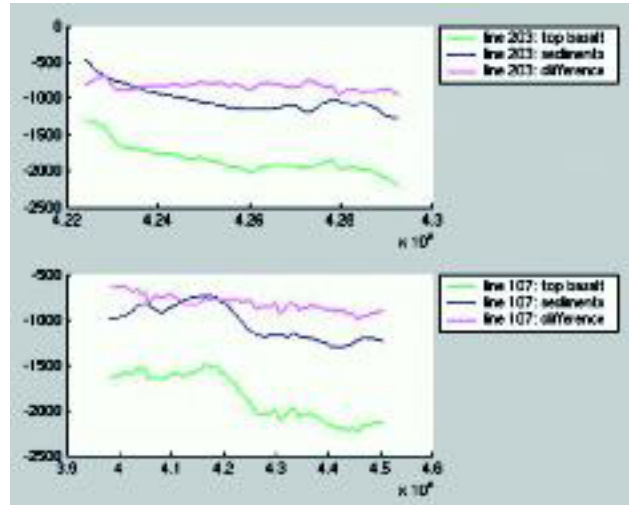


Рис 5 Исходная кровля базальта по профилям от 203 и 107, зеленым. Геометрия осадков над (синим) до исходного сечения (зеленым) вычтена чтобы получить до-тектоническую геометрию (фиолетовым).

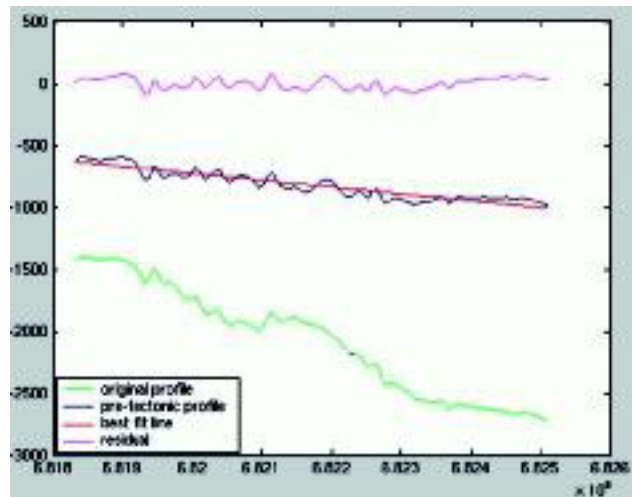


Рис 6 Исходная граница кровли базальта для профиля 105 зеленым. Геометрия вышележающих осадков была вычтена до исходного профиля (зеленым), для получения профиля до-тектонических деформаций (синим). По нему была рассчитана линия наилучшего приближения (красным) и вычтена из профиля до деформаций для получения т.н. 'остаточной' границы (фиолетовым). Для остаточной границы рассчитано стандартное отклонение.

Мы ссылаемся на результат до - тектонической деформации поверхности. В то время как величина шероховатости была рассчитана на предеформационной поверхности, стандартное (среднее) отклонение глубины поверхности было рассчитано со ссылкой на «остаточную» границу. Она получена вычитанием из предтектонической деформационной поверхности линии наилучшего соответствия (Рис 6). Если бы стандартное отклонение было рассчитано на додеформационной поверхности, значения были бы нереально высокие из-за наклона профиля. Впоследствии, процедура интерполяции шероховатостей, описанная выше, была применена к данным, и затем была добавлена осадочная геометрия, чтобы обновить поверхность базальта, включая возможно более короткие длины волн. Шаги, используемые в этой процедуре, показаны для одного профиля (GFA-99-203) на Рисунке 7.

В амплитудном спектре конечной поверхности (Рис 7), высокочастотная компонента, которая добавляется к исходной, не имеет продолжения первоначального спектра данных (Рис 7b, в голубом и синем). Это следствие того, что, как предварительно установлено, степень шероховатости профиля была рассчитана

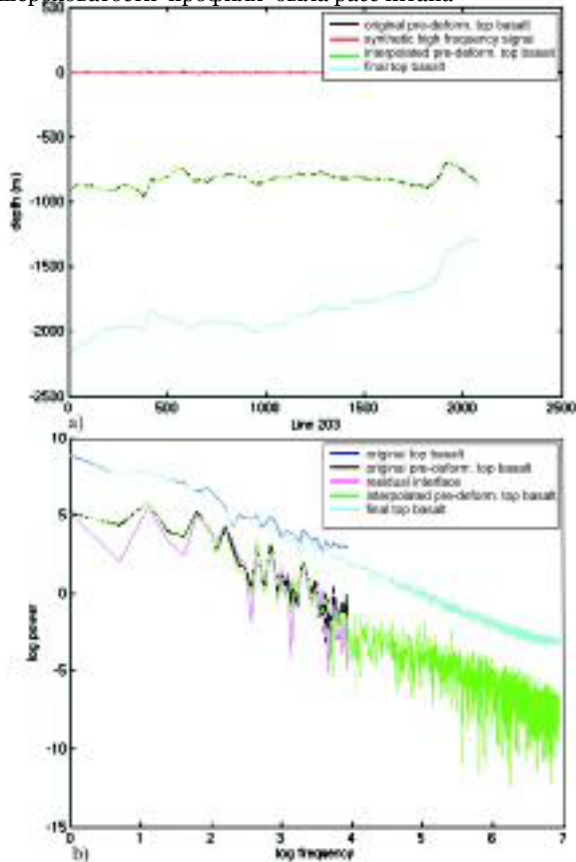


Рис 7 Профиль 203; сечение, вычтенное из поверхности кровли базальта показано на различных стадиях выполнения шероховатой интерполяции, пояснение в тексте. Показаны пространственные данные (a) и амплитудный спектр для одного и того же профиля на разных этапах шероховатой интерполяции (b). Кровля базальта показана синим; кровля базальта до деформации - черным; высокочастотный сигнал (красным) был построен и добавлен к кровле базальта до деформации (черным). Голубым показана новая граница проинтерполированной кровли базальта. Геометрия осадков добавлена для получения окончательной кровли базальтов (зеленым).

на основе додеформационной поверхности (Рис 7b, черным), в то время как стандартное отклонение поверхности было рассчитано по остаточной поверхности (Рис 7b, в красный). Наклон двух частей амплитудного спектра - тот же самый (наклон определяет величину шероховатости), но новая часть спектра подходит только как продолжение 'остаточного' спектра поверхности. Часть профиля, полученного от кровли поверхности базальта для Профиля 105, показана до и после применения шероховатой интерполяции на Рис 8.

Слои

Мощность базальта

Определив поверхности базальтового тела, мы все еще должны объяснять его внутреннюю неоднородность. Из геологических наблюдений и интерпретации сейсмических данных мы заключаем, что объем базальтового тела на моделируемой территории был заполнен ровными потоками, с различием между надбазальтовыми отложениями, между кровлей и средней поверхностью базальта, нижележащей поверхностью базальтовой толщи и подошвой базальтовых отложений. Статистические значения используются для заполнения каждого потока в вышележащей серии, которые берутся из анализа крупных наборов данных акустического каротажа взятого из Ocean Drilling Project (ODP) (Flood et al, 1995) и из других скважин, вскрывших слои базальта. Поток базальта с горизонтальной поверхностью был идентифицирован по акустическому каротажу на основе геологических описаний, доступных по каротажу. Значения скоростей были статистически проанализированы в пределах каждого метода; также различные методы были 'объединены' вместе со статистическими значениями, полученными из этих накопленных данных. Отдельные методы ГИС и объединенный каротаж дали те же самые оценки для средней скорости, стандартные отклонения скоростей и размер шероховатостей

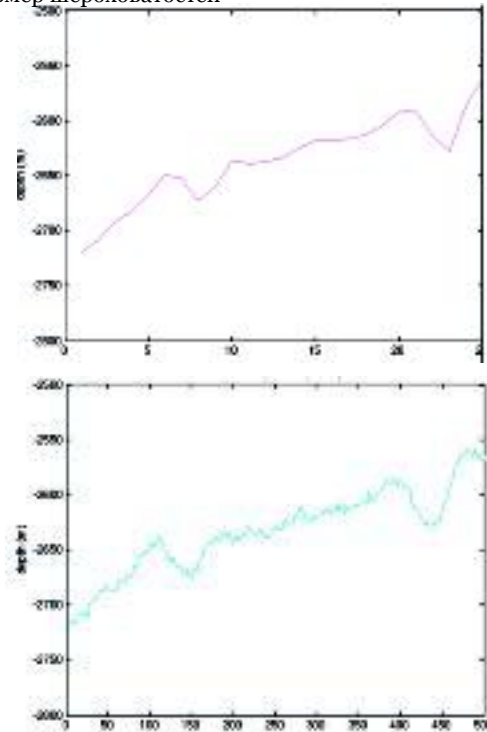


Рисунок 8 Профиль 105; сечение, полученное для кровли базальтов, до (слева, фиолетовым) и после (справа, голубым) выполнения методики шероховатой интерполяции.

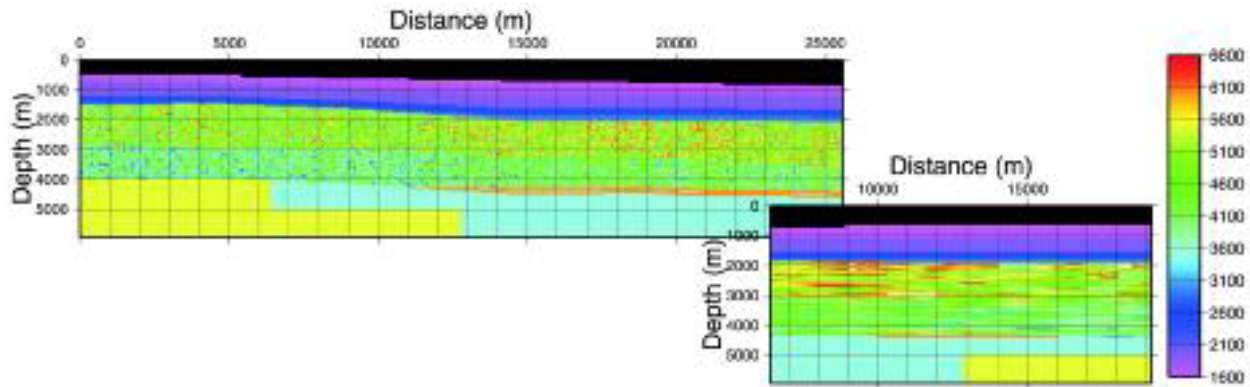


Рисунок 9 Ортогональные вертикальные срезы в центре модели 3-D синтетических данных, на участке работ, вдоль $y=12800$ м, масштаб 1:1. (используя экспоненту Hurst (H)) $v_{\text{mean}}=4870$ м/с, $\sigma=680$ м/с, $H=0.3$.

Каждый слой создан как реализация той же самой шероховатой среды. Радиус корреляции в одном горизонтальном направлении в пять раз больше чем в другом. Это было сделано, чтобы добавить направленную горизонтальную структурную анизотропию. Радиус корреляции в вертикальном направлении был выбран так, чтобы превосходить размер узлов сетки, которые являются максимальной толщиной слоя. Следовательно, радиус корреляции является фактически бесконечным в вертикальном направлении. Средняя мощность каждого потока, если слои были плоские, установлены по четырем узлам сетки (100 м) и потоки отделены шероховатой поверхностью, определяемой экспонентой Hurst $H=0.7$ (Walia and Bull, 1997) со стандартным отклонением 8 %. Интервал между узлами сетки - 25 м был выбран на основе компромисса между сохранением достаточной информации о шероховатости, ожидаемым временем работы программного обеспечения для оценки распространения волны (Wild et al., 2000) и длиной волны сейсмического источника (~500 м) с доминирующей частотой 10 гц. Потоки, созданные этим путем, добавлялись к дотектоническим деформациям поверхностей базальта, чтобы заполнить объем между кровлей и средней частью базальта. По сейсмическим данным интерпретируемые нижние слои базальта имеют менее акустически контрастные свойства. Геологическое объяснение состоит в том, что вероятно, они представляют базальты от излившихся магм с некоторыми вулканогенными осадочными породами, где лава взаимодействовала с водой. Чтобы заполнить этот объем, второй расчет объема базальтового тела был создан на основании верхнего слоя, но со средней скоростью, уменьшенной до 4090 м/с, стандартное отклонение было уменьшено на 20 %. Между верхним и нижележащим базальтом, тонкий однородный слой добавлялся в областях, которые не были оценены, чтобы гарантировать сплошной слой базальта. Максимальная мощность слоя была 125 м., и скорость была установлена 4200 м/с. Скоростная модель была преобразована в плотностную следующим образом:

$$\rho = 1700 + 0.2 \cdot v$$

Где ρ является плотностью (г/см^3) и v скоростью Р волны (м/с ; Шериф и Geldart, 1995). Это преобразование было первоначально испытано на акустическом каротаже: полученные значения, преобразованные из акустического каротажа в плотностной, показывают хорошее качество сходимости в сравнении с плотностным каротажем, сделанным в той же самой скважине.

Это отношение использовалось для всей модели. Скорость S-волны была установлена в $1/\sqrt{3}$ из скорости Р-волны, так же были включена Р-волна с Q 200, и S-волна с Q 66.

Над/под базальтами

На завершающей стадии к модели добавлена геологическая модель, полученная из интерпретации данных сейсмической съемки GFA-99 и инверсии спутниковых данных гравиразведки. Сюда вошли:

- Надбазальтовые осадочные слои (как результаты интерпретации сейсмических данных);
- Мощный фундамент в основании нижних комплексов (по данным сейсморазведки);
- подбазальтовые данные - слои, погружающиеся на восток.

Основной фундамент имеет извилистую зубчатую кромку и представлен самым мощным подбазальтовым осадочным слоем на 'востоке' модели. Угольный пласт имеет извилистую форму и представлен на западе модели мощными подбазальтовыми отложениями. Основание контактирует на 30° 'севере', с базальтами, лежащими непосредственно на фундаменте на 'северо-западе' и двумя разломами, которые лежат на 2 км глубже на 'юго востоке' бассейна подбазальтовых отложений (Рис 9). Поверхности тех слоев оставались такими же ровными как при получении из интерпретационных данных, то есть шероховатая интерполяция не применялась. Постоянная скорость была присвоена угольному пласту (6000 м/с), фундаменту (5500 м/с), и добазальтовым отложениям (3500 м/с). Над-базальтовые отложения были разделены на три слоя. Верхние и более низкие слои имеют низкий градиент скорости 50 м/с на глубине на 25 м. ниже поверхности. Верхний слой располагался на интервале от 1600 м/с до максимальной значения 1800 м/с, средний слой мощностью 800 м. имеет постоянную скорость 1950 м/с, и более низкий слой располагался на интервале от 2300 м/с до максимального значения 3100 м/с. Плотность и скорость S-волн взята такой же, какая используется для базальтовых тел, но значения Q для Р-, и S-волн были направлены в бесконечность.

Окончательная модель

Окончательный размер модели 2048 x 2048 x 180 точек сетки, с шагом сетки 25 м. дает пространственный размер 51.175 км x 51.175 км, и глубину 4.475-километров.

Синтетические сейсмические данные были использованы над частью куба модели 25.6 км с запада на восток и 12.8 км с севера на юг. Разрезы окончательной модели показываются на Рис 10. Размер окончательной модели продиктован ограничениями компьютерных ресурсов, доступных для моделирования. Завершенная 3-х мерная модель имеет сейсмические характеристики (параметры), очень близкие сейсмическим данным GFA-99.

Рис 11 приведено сравнение между фазовым экраном (Wild et al., 2000) 2Д разрез со взрывающимися границами смоделирован на окончательной 3-х мерной модели и суммарном разрезе из профиля GFA-99-107.

Получение данных

Модель использовалась для накопления сейсмических и несейсмических синтетических данных, для проверки других способов обработки и объединения различных методов для улучшения подбазальтовых построений. Так как модель является синтетической, результаты можно объединить с реальной моделью для проверки их точности.

Сейсмические данные

3-х мерные сейсмические данные были получены с симулятором упругого фазового экрана (Wild et al., 2000) на 10 ПК кластерах, находящихся в Университете Dugham. 3Д набор сейсмических данных был создан, с помощью неоднократного получения 2Д профилей, моделируя типичные морские наблюдения с восьмью морскими косами. Схема получения данных показана на Рис 12: Восемь кабелей, буксируемых на 15 м. ниже морской поверхности с расстоянием перпендикулярных профилей 100 м., каждый с 240 каналами, с интервалом 25 м. Выстрелы были произведены с минимальным выносом 200 м. Источник использует запись сигнала от регулярной пушки, буксируемой на глубине 10 м. Каждая полоса включает запись по 320 выстрелов на профилях, на расстоянии в 50 м., с интервалом между профилями 400 м., что дает полностью заполненную 3Д сетку с шириной бина по Кросслайну 50 м. и шириной бина Инлайна 12.5 м. Данные моделировались со свободной границей и без нее, а также с учетом и без многократных отражений, для обеспечения идеальных сейсмограмм после удаления кратных волн и кратных отражений внутри тонкого слоя, а также получения сейсмограмм, в которых кратные волны от свободной поверхности и рассеивание доминируют над записью на более поздних временах.

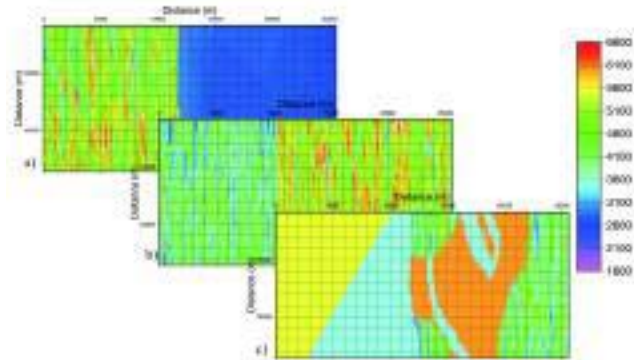


Рисунок 10 Горизонтальные срезы модели 3D, на глубине а) 1800 м, б) 3000 м и с) 4300 м, масштаб 1:1.

Сейсмограммы записываются для восьми кос для местоположения источника $x=13000m$ и $y=12800$, они показываются на Рис13 (а: и без б: с кратными) Ключевые отражения для набора выстрелов отмечены на рис 13, они маркированы на рис 14.

Для ясности, этот набор взрывов не включает кратные волны от поверхности раздела, ни внутренние кратные волны от тонких пластов. Так как метод фазового экрана дает узко-угловую аппроксимацию, волновое поле глущится по мере приближения к критическому углу, также подавляется приход широко-угловых и преломленных отражений, данные можно полагать подобными полевым данным после tau-p фильтрации с целью подавления энергии низких скоростей.

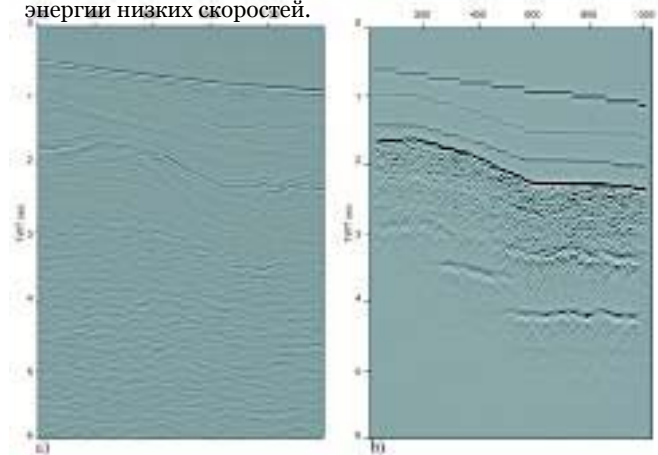


Рисунок 11 Сравнение а) участка суммарного разреза по профилю GFA-99-107 и б) разреза 2D модели со взрывающимися границами, созданными на финальной модели. Соответствие времен прихода различных волн очень хорошее.

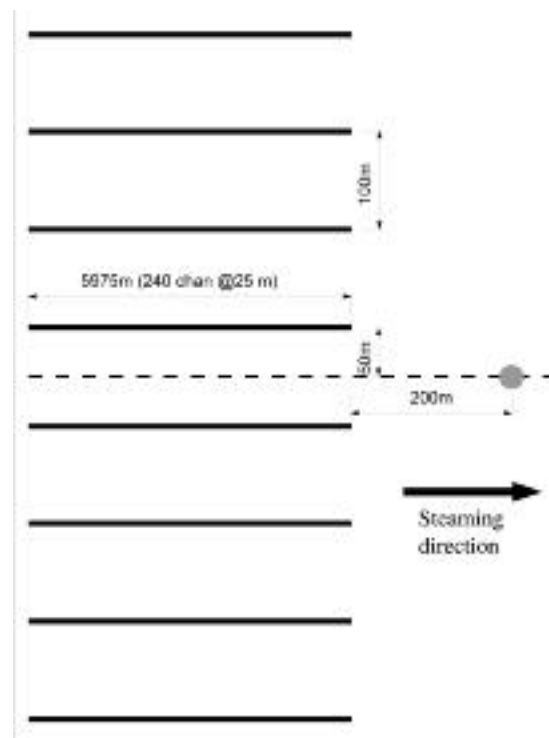


Рисунок 12 Геометрия расстановки для синтетических данных.

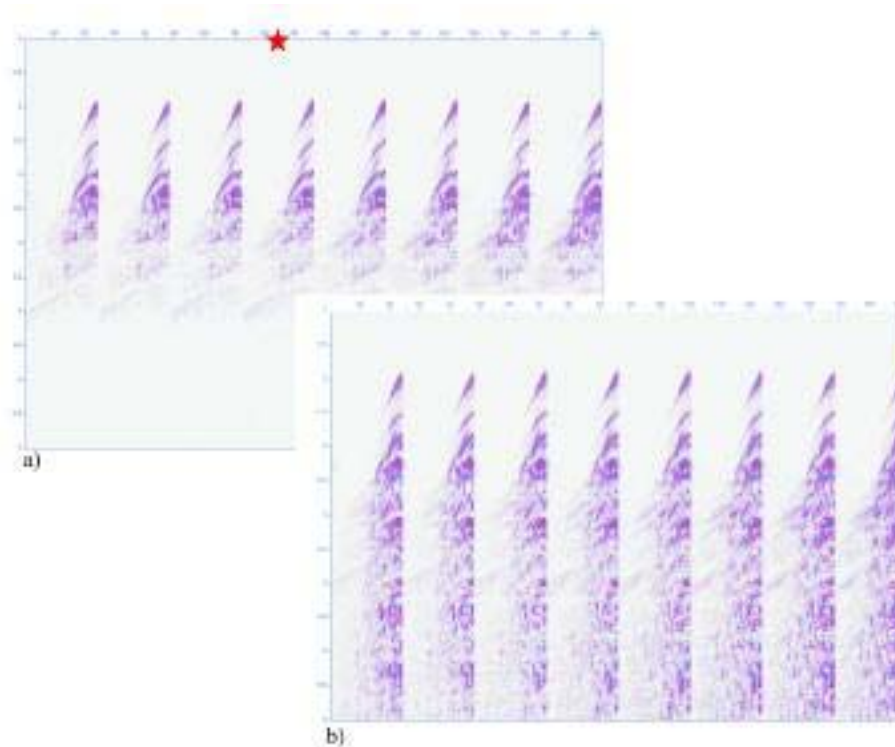


Рисунок 13 Синтетические сейсмограммы ОПВ записанные 8 косами для возбуждения в точке $x=13000$ м, $y=12800$ м, а) без кратных, б) с кратными. Звездочкой указана сейсмограмма ОПВ, которая приведена в рисунке 14.

Морское дно и два осадочных горизонта дают высокоамплитудные гиперболы вступлений; также можно наблюдать высокоамплитудные обменные волны PS. Кровля базальта имеет большую амплитуду, но жесткая граница вызывает искажения ожидаемых

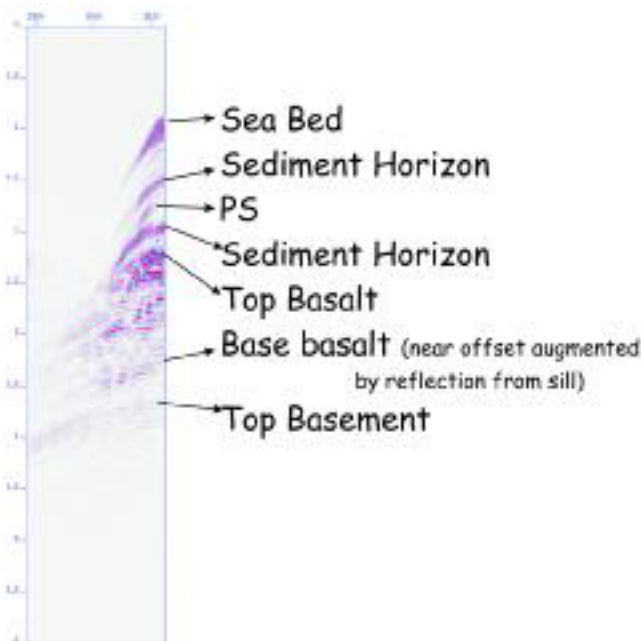


Рис 14 Основные отражения с подписями на исходных сейсмограммах ОПВ (помечено звездочкой на рисунке 13).

времен прихода; амплитуда волн подавляется на выносе более чем 1.5 км, потому что сочетание высокой скорости и глубины базальта означает, что при относительно небольшом выносе быстро достигается критический угол. Внутренние отражения в базальте - беспорядочны – за исключением некоторых случаев когерентности. Отражения Р-волны на фундаменте можно увидеть на всех выносах, это последнее высокоамплитудное когерентное отражение на сейсмограмме. Нет очевидного отражения энергии от фундамента, которое прошло бы через базальт как S-волна. Это соответствует теории распространения волны и теории рассеивания, которая предсказывает, что S волны с более низкими скоростями, и короткими длинами волн будут более существенно рассеиваться в слое базальта, чем энергия Р-волн (см. Martini and Bean. 2002a, там приведено приложение теории для картирования подбазальтовых отложений).

На данных, которые включают в себя свободную поверхность и энергию кратных волн, очевидно присутствие высокоамплитудных отражений внутри подбазальтовой толщи. Тот факт, что энергия сконцентрирована на близких удалениях означает, что энергия кратных волн преобладает над отражениями от надбазальтовых пластов. Можно увидеть кратные отражения от фундамента, это подтверждает, что, как только Р-волна прошла через слой базальта, и более высокочастотная энергия поглотилась, остаточный импульс может неоднократно проходить через базальт без ослабления когерентности.

Несейсмические данные

Был выполнен расчет прямой задачи грави- и магниторазведки на 3Д модели, он приведен на Рис 15 и b. Моделирование было сделано путем картирования отдельных слоев в виде 2Д поверхности,

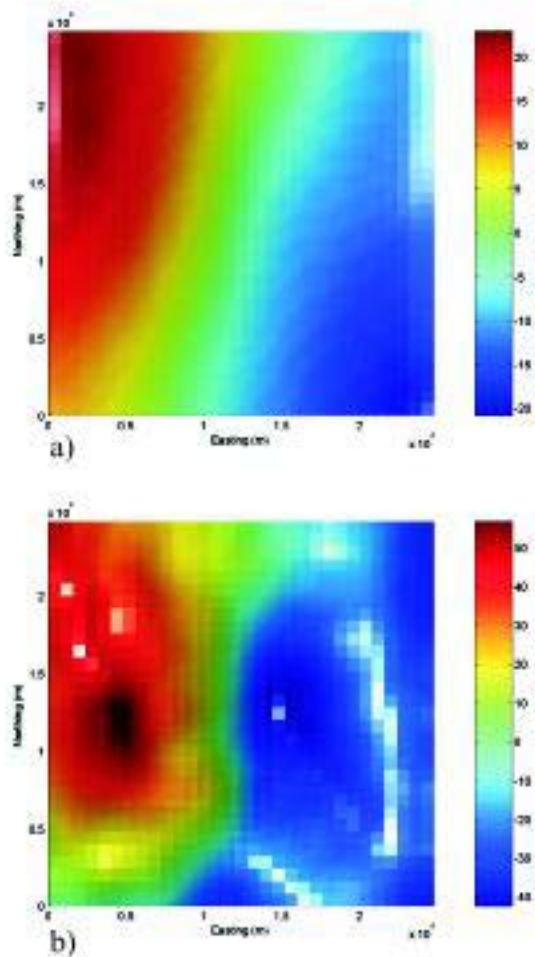


Рис 15 а) гравиметрический и **б)** магнитный синтетический сигнал 3D модели.

затем каждому слою назначено постоянное значение плотности и восприимчивости (Таблица 1). Выбор постоянного значения для каждого слоя вместо параметризации на уровне отдельных потоков обоснован наблюдениями базальтов, захороненных под осадочной толщей: поэтому мы производим запись объемного эффекта в то время как высокочастотные изменения, вызванные мелкоразмерными аномалиями или тонкими

пластами не были наблюдаемы. Магнитная модель базируется на предположении, что слои базальта на этой территории - из средних и верхних пластов (Waagstein, 1988); эти слои обратно намагничены со слабой остаточной намагниченностью. Это соответствует модели Smallwood et al., (2001), в которой данные GFA-99 съемки увязаны с профилем BIRPS-FAST. На данных гравитки виден северный 30 ° тренд нижезалегающего фундамента, тогда как магнитные данные более чувствительны к северо- южному направлению падения поверхности кровли базальта.

МТ зондирования были получены на сетке 4.8 км для всей модели 3D. Значения сопротивлений приведены в Таблице 1. Как и для данных магниторазведки, свойства для МТ моделирования были промоделированы для грубой слоистости. При наличии слоистости из проводящих и непроводящих слоев может образоваться МТ анизотропия. Таким образом, первичные и вызванные токи, параллельные напластованию будут 'видеть' среднее значение проводимости, а токи ортогональные напластованию будут видеть аномально низкую проводимость. На МТ измерения влияют горизонтальные токи, поэтому не влияют эффекты анизотропии напластований (как например для управляемого источника ЕМ, для вертикальной компоненты тока). На данные МТ будет иметь большее влияние азимутальная анизотропия в присутствии значительных латеральных изменений. Для нашей модели базальтов, у нас одинаковая вертикальная слоистость, хотя радиус корреляции разный в двух направлениях. Неявно предполагая наличие изотропного слоя, мы делаем предположение о сообщаемости всех флюидов в базальте в обоих горизонтальных направлениях: мы верим в справедливость этого предположения, при условии, что структура вертикального напластования одинаковая. Тестирование показало, что имеется незначительный 3D эффект, поэтому каждое зондирование МТ рассчитывается используя локальное 1-D приближение. Было рассчитано 20 частот с 1.86 Гц по 1x10-6 Гц для покрытия частотного диапазона, который обычно используется в поле. На рисунке 16 показаны кривые зондирования МТ для двух станций, расположенных в СЗ и ЮВ углах модели. На рисунке заметно влияние подбазальтовых осадков с низким сопротивлением. Красная кривая (северо-запад) говорит о положении базальтов с высоким сопротивлением непосредственно на фундаменте, тогда как синяя кривая (юго-восток) показывает 2 км подбазальтовых осадков. Различие особенно заметно на фазовой компоненте.

Таблица 1 Плотность, магнитная восприимчивость и сопротивление отдельных слоев при моделировании гравимагнитного поля и МТ данных.

Границы	Горизонт	Средн. плотн. (кг/м³)	Магн. Восприимчив. (нТл)	Сопротивление (Ом м)
0	Вода	1000	--	0.3
1	Верхние осадки	1770	--	1
2	Средние осадки	1880	--	1.2
3	Нижние средн. осадки	2180	--	1.9
4	Верх. базальты	2650	0.03	17.7
5	Промежут. базальты	2500	0.022	6.8
6	Нижние базальты	2520	0.025	5.7
7	Нижние силлы	2700	0.03	67.9
8	Нижние осадки	2400	--	2.5
9	Фундамент	2700	0.01	80

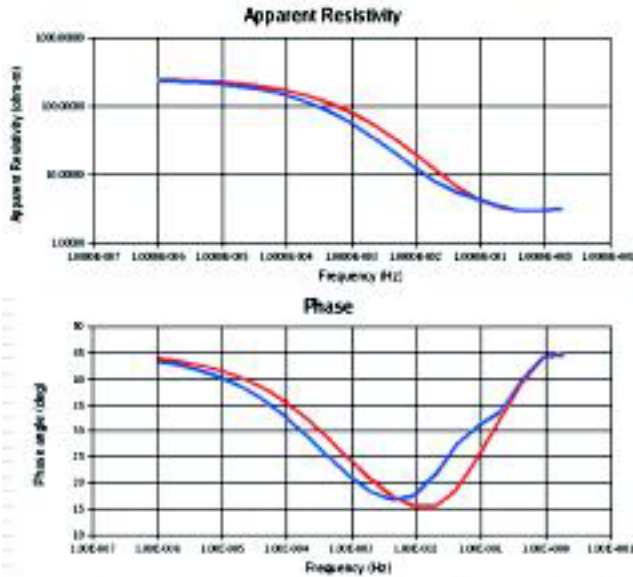


Рисунок 16 Кажущееся сопротивление и фаза для двух положений в модели. Красная кривая - для положения без подбазальтовых осадков, синяя кривая - для положения с подбазальтовыми осадками мощностью 2 км.

Тесты, выполненные на 2D слайсах модели, предполагают, что оценка 1D приемлема для модели, хотя и имеется маленькая ошибка. Не был промоделирован эффект вызванный структурой вне модели, он мог быть значительным. Все кто используют эти результаты, должны быть осведомлены об этом ограничении; мы считаем, что простой переход аномалии МТ от отсутствия подбазальтовых осадков до осадков мощностью 2 км под базальтами, продемонстрированный в модели, полезен для понимания сложных взаимозависимостей данных МТ.

Выводы

Сложная 3-х мерная модель была построена, используя всю информацию, доступную из интерпретации сейсмических данных, данных ГИС, данных гравиразведки и геологических наблюдений. Сейсмические и несейсмические синтетические данные были опробованы на модели, которая используется для развития стратегий для интеграции данных в общую методику, чтобы преодолеть проблему отображения подбазальтовых отложений,

Модель и данные могут быть доступны специалистам, при обращении к авторам данной статьи.

Благодарность

Авторы хотели бы благодарить D. Jerram в Университете Durham за стимулирующие обсуждения и полезные советы при построении реалистических геологических моделей, ARK Geophysics за модели подбазальтовых слоев и гравимагнитное моделирование, Marion Jegen за МТ моделирование, Anthony Mallon за компиляцию базы данных свойств пород, Paul Williamson и анонимных рецензентов за полезные комментарии, которые помогли улучшить рукопись. Эта работа спонсируется проектом SIMBA, EU ref: ENK6-2000-00075.

Ссылки

- Aminzadeh, F., Brac, J., and Kunz, T. [1997] 3-D Salt and Overthrust Models. SEG/EAGE 3-D Modeling Series No.1. Soc. Explor. Geophysicists, Tulsa.
- Bagaini, C., Hansen, J.O., Kostov, C., and Ronen, S. [2000] Contributions of wide-angle P and PSP data to sub-basalt imaging. Petex Conference, London. Expanded Abstract.
- Brown, S.R. and Scholz, C.H. [1985] Broad bandwidth study of the topography of natural surfaces. J. Geophys. Res. 90, 12575-12582.
- Crawford, W.C. [2002] Sub-basalt imaging using sea floor compliance: a case study. J. Conf. Abstr. 7, 2, 141.
- Farr, T.G. [1992] Microtopographic evolution of lava flows at Cima volcanic field, Mojave desert, California. J. Geophys. Res. 97, 15171-15179.
- Fliedner, M.M. and White, R.S. [2001] Seismic structure of basalt flows from surface seismic data, borehole measurements and synthetic seismogram modelling. Geophysics 66, 6, 1925-1936.
- Flood, R.D., Piper, D.J.W., Klaus, A., et al. [1995] Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports. College Station, TX, Ocean Drilling Programme.
- Gibson, B. S. and Levander, A.R [1998] Modelling and processing of scattered waves in seismic reflection surveys. Geophysics 53, 466-478.
- Hautot, S., Perrot, J., Jegen, M.D., Cairns, G., and Tarits, P. [2002] Feasibility study of joint magnetotelluric/seismic interpretation for sub-basalt imaging. J. Conf. Abs. 7, 2, 150- 151.
- Hestholm, S.O. and Ruud, B. [2000] 2D finite-difference vis-coelastic wave modelling including surface topography. Geophysical Prospecting, 48, 341-373.
- Huang, J. and Turcotte, L. [1989] Fractal mapping of digitized images: application to the topography of Arizona and comparisons with synthetic images. J. Geophys. Res. 94, 7491-7495.
- Jerram, D. A. [2002] Vulcanology and facies architecture of flood basalts. Volcanic Rifted Margins: Geological Society of America Special Paper, 362, 119-132.
- Jegen, M., Hautot, S., Cairns, G., and Tarits, P. [2002] Using electromagnetics to image sub-basalt sediments. J. Conf. Abs. 7, 2, 154-155.
- MacGregor, L., Sinha, M., and Constable, S. [1999] Use of marine controlled source electromagnetic sounding for sub-basalt exploration. 61st European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition, Expanded Abstract.
- MacGregor, L. and Sinha, M. [2002] Sub-basalt imaging using marine controlled source electromagnetic sounding. J. Conf. Abs. 7, 2, 172-173.
- Mandelbrot, B.B. [1977] Fractals: Form, Chance and Dimension. Freeman and Co., USA.
- Manglik, A. and Verma, S.K. [1998] Delineation of sediments below flood basalts by joint inversion of seismic and magnetotelluric data. Geophys. Res. Lett. 25, 21, 4015-4018.

- Martini, F. and Bean, C.J. [2002a] Application of pre-stack wave equation datuming to remove interface scattering in sub-basalt imaging. *First Break* 20, 6 395-403.
- Martini, F. and Bean, C.J. [2002b] Interface scattering versus body scattering in sub-basalt imaging and application of prestack wave equation datuming. *Geophysics* 67, 5, 1593-1601.
- Martini, F., Bean, C.J., Dolan, S.S., and Marsan, D. [2001] Seismic image quality beneath strongly scattering structures and implications for lower crustal imaging: numerical simulations. *Geophys. J. Int.* 145, 423-435.
- Martini, F., Hobbs, R.W., Bean, C.J., and Pandolfi, D., Seismic wave attenuation in basaltic rocks from VSP synthetic and real data. Submitted to *Geophysical Prospecting*.
- Murphy, C., Mumaw, G.R., and Stalin, F. [2002] Resolving basalt and sub-basalt geology with high precision high resolution gravity gradient data. *J. Conf. Abs.* 7, 2, 178-179.
- Paul, A. and Campillo, M. [1988] Diffraction and conversion of elastic waves at a corrugated interface. *Geophysics* 53, 1415-1424.
- Pullammanappallil, S., Levander, A., and Larkin, S.P. [1997] Estimation of crustal stochastic parameters from seismic exploration data. *J. Geophys. Res.* 102, 15269-15286.
- Purnell, G.W., Hampson, G., and McDonald, J.A. [1990] Effects of interface roughness on wave propagation. 60th Meeting, Society of Exploration Geophysicist, Expanded Abstract.
- Ruud, B. and Hestholm, S. [2000] 2-D surface topography boundary conditions in seismic wave modelling. 70th Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstract.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P. [1995] *Exploration Seismology*. Cambridge University Press.
- Single, R.T. and Jerram, D. A. [2004] The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: examples from the Palaeogene Skye Lava Field. *Journal of the Geological Society*, 161, 911-926.
- Smallwood, J.R., Towns, M.J., and White R.S. [2001] The structure of the Faeroe-Shetland Trough from integrated deep seismic and potential field modelling. *Journal of the Geol. Soc. London* 158, 409-412.
- Versteeg, R. [1994] The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set. *The Leading Edge* 13, 927-936.
- Waagstein R. [1988] Structure, composition and age of the Faeroe basalt plateau. In: *Early Tertiary Volcanism and the Opening of the NE Atlantic* (eds A.C. Morton and L.M. Parson), 225-238. Special Publication 39, Geological Society, London.
- Walia, R.K. and Bull, J.M. [1997] Modelling rough interfaces on seismic reflection profiles-the application of fractal concepts. *Geophys. Res. Lett.* 24, 16, 2067-2070.
- Warren, R.K. and Srnka, L.J. [1992] Exploration in the basalt-covered areas of the Columbia River Basin, Washington, using electromagnetic array profiling (EMAP). *Geophysics* 57, 8, 986-993.
- Wild, A.J., Hobbs, R.W., and Frenje, L. [2000] Modelling complex media: an introduction to the phase screen method. *Phys. Earth Plan. Int.* 120, 219-225.
- Ziolkowski, A., Hanssen, P., Gatliff, R., Jakubowicz, H., Dobson, A., Hampson, G., Li, X-Y., and Liu, E., [2003] Use of low frequencies for sub-basalt imaging. *Geophysical Prospecting* 51, 169-182.