

Высокоомные аномалии в районе дуги Модгунн в Норвежском море High-resistivity anomalies at Modgunn arch in the Norwegian Sea

Анвар Буян (Anwar Bhuiyan),¹ Тор Викалунд (Tor Wicklund),² и Стейл Йохансен (Stale Johansen)³

Введение

Обычно данные сейсморазведки дают информацию о строении слоистого разреза. Кроме того, по сейсмическим данным можно охарактеризовать формацию с точки зрения литологии и флюидонасыщенности. Характеристики формации, определенные по данным сейсморазведки, могут быть заверены с помощью каротажа. Бурение скважин, однако, довольно дорого, а вероятность успешной постановки эксплуатационных скважин по данным сейсморазведки составляет 10-30% (Johansen et al., 2005). Для сокращения неопределенностей, связанных с бурением, можно использовать иные дистанционные методы исследования разреза, например, электроразведку. При изучении глубоких непроницаемых слоев велик потенциал недавно разработанного метода каротажа морского дна (КМД; SeaBed Logging, SLB) (Eidesmo et al., 2002).

Различие удельных сопротивлений (УЭС) слоев разреза дает возможность применять КМД для выделения высокоомных слоев, содержащих углеводороды, и иных высокоомных объектов, таких как соляные купола, вулканические породы или интрузивные тела. Первые полномасштабные работы КМД, проведенные у берегов Анголы в 2000 г. (Ellingsrud et al., 2002), открыли новые горизонты в разведке углеводородов. Позднее был поставлен ряд работ на известных месторождениях у берегов Норвегии. Результаты опытных работ в Ормен Ланге (Ormen Lange) и в газоносной провинции Западный Тролл (Troll Western) представлены в работах (Rosten et al., 2003) и (Johansen et al., 2005), соответственно.

В этой работе представлены данные КМД, полученные по профилю через дугу Модгунн (Modgunn) в Норвежском море. Интерпретация данных КМД состоит в определении распределения УЭС в слоях, выделенных по данным сейсморазведки. Для дуги Модгунн характерны четкие сейсмические аномалии, часть которых может соответствовать зонам высокого УЭС. В данных КМД по этому району местами проявляются высокоомные слои. Анализ данных КМД позволяет говорить о наличии слоев и пород с высоким УЭС, но из-за низкой разрешающей способности определить точную геометрию непроницающей структуры только по данным КМД затруднительно. При установлении количественных связей между сейсмическими аномалиями и распределением УЭС в слое, КМД и сейсморазведка

дополняют друг друга. Интегрированный подход к интерпретации данных КМД и сейсморазведки дает близкое к реальному и менее неоднозначное распределение УЭС в разрезе. Интерпретация данных по амплитуде электрического поля из этого набора данных рассмотрена в работе (Bhuiyan et al., 2005).

Основы метода КМД

Метод КМД детально описан в работах (Eidesmo et al., 2002) и (Kong et al., 2002). В качестве питающей линии используется горизонтальный электрический диполь, порождающий мощные электромагнитные сигналы ультранизкой ($\sim 10^{-5}$ Гц) частоты. Диполь буксируется в 30-40 м над морским дном. Энергия распространяется по воде, вдоль поверхности моря (воздушная волна) и по слоям разреза (рис. 1). Сигналы, прошедшие через среду, измеряются датчиками ЭМ поля, расположенными на дне. Согласно работе (Ward & Hohmann, 1988), на частотах ниже 10^5 Гц, коэффициенты пропускания α и поглощения β в проводящей среде определяются выражением

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$$

ω , μ и σ - круговая частота, магнитная проницаемость и проводимость соответственно. В немагнитных породах, которые, как правило, преобладают в осадочных бассейнах, магнитная проницаемость $\mu = \mu_0$ (магнитной проницаемости вакуума). Таким образом, при неизменной геометрии поглощение ЭМ энергии определяется только частотой, проводимостью и расстоянием от источника до приемника (разносом).

На ультранизких частотах ($\sim 10^{-1}-5$ Гц), в том числе в КМД, энергия быстро поглощается в морской воде и придонных осадках, насыщенных проводящей соленой водой. Таким образом, энергия, прошедшая от источника к приемнику напрямую через морскую воду (первичное поле) преобладает в сигнале лишь на малых разносах. Интервал разносов, на котором преобладает воздушная волна (падающее поле), определяется частотой, глубиной моря, распределением УЭС в воде и в разрезе и значениями разносов. При больших глубинах моря (>1000 м), воздушная волна преобладает обычно на больших разносах (скажем, $>6-8$ км). В сравнительно тонких (10-50 м)

¹Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Electromagnetic Geoservices, Geology and Geophysics, S. P. Andersens vei 15a, Trondheim 7491, Norway
Email: bhuiyan@stud.ntnu.no

²Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Electromagnetic Geoservices and Geology and Geophysics, Norway

³Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Department Electromagnetic Geoservices, Norway

непроводящих (20-1000 Ом·м) слоях, ЭМ энергия распространяется с большей скоростью, как головная волна с малым поглощением, и возвращается вверх (восходящее поле) к датчикам на дне. Восходящее поле превышает первичное на разнотах сравнимых или превосходящих удвоенную глубину залегания слоя под дном. Обнаружение отклика от такого сравнительно тонкого высокоомного слоя разреза лежит в основе КМД (Ellingsrud et al., 2002).

Дуга Модгунн

Дуга Модгунн расположена в Норвежском море в Блоках 6403/5 и 6403/6, принадлежащих компании Statoil. Глубина моря в этом районе достигает 1100-2200 м. (рис. 2)

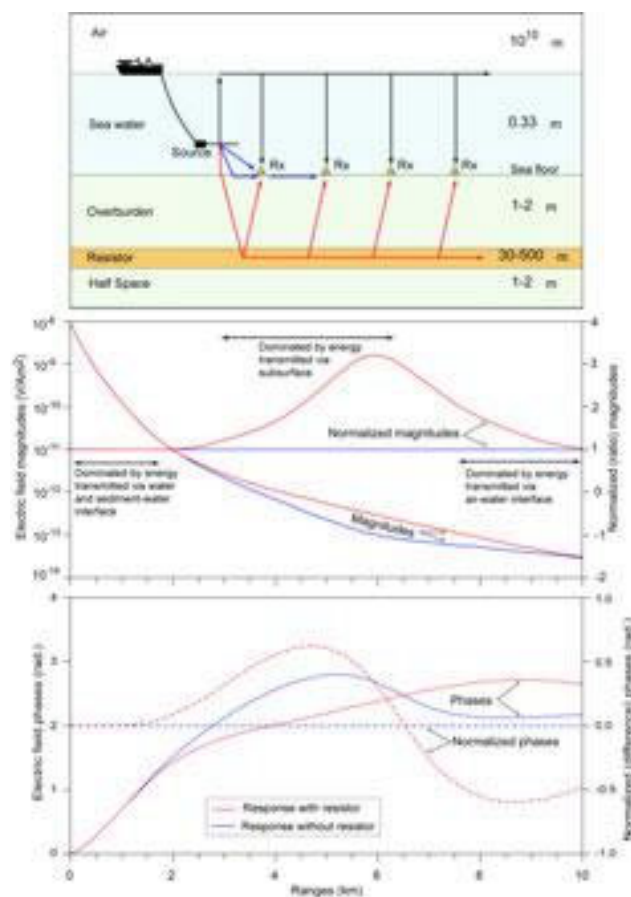


Рис.1 Схема наблюдений КМД (вверху) и расчетные кривые КМД. Для справки приведены типичные УЭС воздуха, морской воды, осадков и высокоомного слоя. Черными стрелками показано нисходящее поле (воздушная волна), синими - первичное поле (путь распространения энергии по прямой), красными - восходящее поле от погребенного высокоомного слоя. Сигнал представлен в виде амплитудных кривых (АК) и нормализованных АК (в середине) и в виде фазовых кривых (ФК) и нормализованных ФК (внизу). Красным и синим даны, соответственно, кривые для разрезов с высокоомным слоем и без него.

Дуга Модгунн представляет собой куполообразную структуру, возникшую, как и ряд других инверсионных структур континентального склона Норвежского моря, в результате тектонической инверсии в олигоценное время (Dore & Lundin, 1996). Согласно данным сейсморазведки, структура погружается в трех направлениях от вершины, расположенной в северо-восточной части. Отложения здесь представлены в основном сланцами, реже - чередованием песков и сланцев с несколькими пластами песчаников (Dalland et al., 1988; Swiecicki et al., 1998).

Для юго-западной части купола характерны прерывистые отражающие границы с сильными аномалиями, сравнимыми с отражениями от региональных опорных горизонтов. Эти границы могут быть связаны с внедрениями магматических пород в слоях позднемерзлого - раннепалеогенового возраста (Swiecicki et al., 1998). Контрастные аномалии в основном параллельны, хотя некоторые секут менее контрастные границы. Несколько контрастных границ пересекают горизонтальные и субгоризонтальные слои под большим углом (~70°), что говорит о том, что они связаны с дайками. Горячие пятна, восходящие потоки и несоответствие отражающих горизонтов говорит о наличии гидротермальных жил. Для позднегерценовых отложений характерны непрерывные параллельные

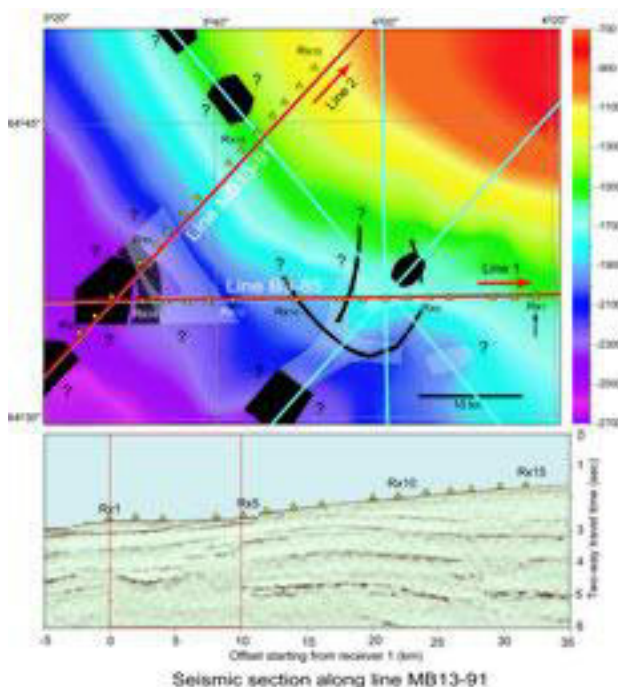


Рис. 2. Вверху: Карта фактического материала КМД и схема геологического строения по данным 2D сейсморазведки, наложенные на карту рельефа морского дна. Внизу: сейсмический разрез через дугу Модгунн по профилю MB13-93 (ПР2 работ КМД); желтыми треугольниками показаны положения датчиков. Геологическая привязка интервалов дана по (Swiecicki et al., 1998). Черной стрелкой показан опорный датчик.

отражающие горизонты, изредка нарушаемые мелкими разломами. В западной части района рельеф дна и строение приповерхностных отражающих границ определяется влиянием оползня Storegga (Storegga). Для них характерны крутые углы падения и оползневой рельеф. (Bugge et al., 1988; Bunz et al., 2003).

Выполнение работ

В 2003 г. компания Electromagnetic Geoservices поставила сложные работы методом КМД в интересах нескольких заказчиков. По сейсмическим профилям, пересекающим дугу Модгунн (рис. 2), с борта судна был установлен 31 датчик: 16 по профилю В3-85 (ПР1) и 15 по профилю МВ13-91 (ПР2). Эта работа написана по материалам ПР2, направленного с ЮЗ на СВ. Каждый ЭМ приемник был снабжен двумя электрическими и одним магнитным датчиком, ориентированными по осям x и y . SBL данные были записаны в виде временных последовательностей на протяжении всей съемки.

Питающая линия (антенна) состояла из двух электродов (заднего и переднего), находящихся в гальваническом контакте с морской водой, разнесенных примерно на 220 м. Амплитуда тока (меандр с центральной частотой 0.25 Гц) в питающей линии достигала 1000 А. Буксировка питающей линии по ПР1 велась с запада на восток, а по ПР2 – с ЮЗ на СВ. Среднее расстояние от дна при этом составляло 40 м и 30 м для ПР1 и ПР2 соответственно. Такое значительное (10 м) различие объясняется, возможно, рельефом дна (рис. 2). Детальное описание аппаратуры метода КМД и принципа ее действия дано в работах (Webb et al., 1985) и (Sinha et al., 1990).

Обработка данных

Перед визуализацией и интерпретацией данные КМД прошли несколько этапов обработки, первый из которых состоял в соединении навигационных данных и полевых записей. Сначала была определена длина записи, соответствующая времени работы источника. Это называется определением окна записи (windowing); окно записи соответствует полной длине профиля. После этого данные были переведены из временной области в частотную с помощью преобразования Фурье в коротком окне. После этого было принято, что значения разносов возрастают с шагом 100 м.

После фильтрации была проведена калибровка данных, т. е. отсчеты были преобразованы в значения ЭМ поля.

Далее было учтено влияние источника; это можно сделать путем нормирования на момент диполя (произведение амплитуды тока на длину антенны). После нормирования данные уже не зависят от тока на источнике. Нормализация выполнена на каждой частоте путем деления комплексного значения данных на соответствующее значение комплексного момента диполя на этой частоте.

Для улучшения отношения сигнал/шум в электрической компоненте применялись отбор каналов или суммирование. Если уровень шумов в каналах был различен, данные с более шумного канала отбрасывались, а если уровень шумов был одинаков, данные с обоих каналов суммировались.

Датчики КМД после сброса с борта судна погружались свободно, поэтому ориентация каналов x и y могла быть любой. Данные следует повернуть так, чтобы каналы x и y были правильно ориентированы (параллельны или перпендикулярны) относительно заданной линии профиля. Если питающая линия располагается вдоль профиля, то x -компонента электрического поля (вдоль профиля) и y -компонента магнитного поля (поперек профиля) будут велики, а их, соответственно, y - и x -компоненты – малы и зашумлены; последние поэтому следует отбросить. Таким образом, мы работаем с компонентами E_x и H_y .

Качество данных после обработки позволило провести интерпретацию для разносов до ~7 км. Данные были представлены в виде амплитудных и фазовых кривых зондирования (в зависимости от разноса) по электрическому и магнитному полям.

Данные КМД на дуге Модгунн

Амплитудные (АК) и фазовые (ФК) кривые со всех датчиков были нормализованы к уровню опорного датчика, что позволило проследить изменения от точки к точке. Нормализация АК проведена путем деления значений амплитуд каждого датчика на соответствующие значения амплитуд опорного датчика. Нормализация ФК проведена вычитанием значений фазы каждого датчика из соответствующих значений фазы опорного датчика. (Рис. 3). При нормализации АК на больших разносах (> 7 км) становятся слишком изрезанными из-за значительных изменений уровня шумов. Чтобы подавить эти изменения при нормализации в качестве кривой опорного датчика был использован аппроксимирующий полином (зеленая линия рис. 3). Пример нормализованных АК и ФК по электрической и магнитной компонентам (датчик Mo2_Rx01_out, расположенный в районе развития сильных отражающих горизонтов в ЮЗ части), полученных при удалении источника от датчика, приведен на рис. 3. Опорный датчик (Mo1_Rx01_out) расположен на ПР1 в ЮВ части участка, где нет сильных отражающих горизонтов (рис. 2).

Далее путем медианного осреднения (в окне ± 3.0 км от положения датчика) были построены сглаженные кривые по профилю (рис. 4). Чтобы показать изменения в данных КМД по всему ПР2, построены графики амплитуды и фазы (после нормализации и медианного осреднения) на разносе 6.0 ± 0.5 км с отнесением точки записи к середине расстояния между источником и приемником. Данные КМД обычно отбираются со средних разносов, чтобы избежать влияния первичного поля на малых (~2000 м) разносах и влияния воздушной волны и шумов на больших (в данном случае - >7 км) разносах. Диапазон разносов выбирается по результатам моделирования.

Нормализованные сглаженные АК и ФК имеют один и тот же тренд вдоль профиля. (Рис. 4). Нормализованные амплитуды электрической компоненты равны примерно 1.0 в северо-восточной части дуги Модгунн (где нет интрузий) и постепенно возрастают до 3.0 к вершине дуги, где отмечаются сильные отражающие границы. Нормализованные амплитуды магнитной компоненты меняются в пределах 1.0 - 2.3 и имеют тот же тренд, что электрическая компонента. Нормализованные фазы электрической компоненты меняются в пределах 0 - 1.4 рад, а нормализованные фазы магнитной компоненты - в пределах 0 - 1.0 рад с СВ на ЮЗ.

Моделирование

Моделирование (решение прямой задачи) КМД использовалось, чтобы построить по данным КМД модель геоэлектрического разреза. В данном исследовании применялась программа решения 2.5D прямой задачи во временной области методом конечных элементов. (Wang & Hohmann, 1993; Chen et al., 1997).

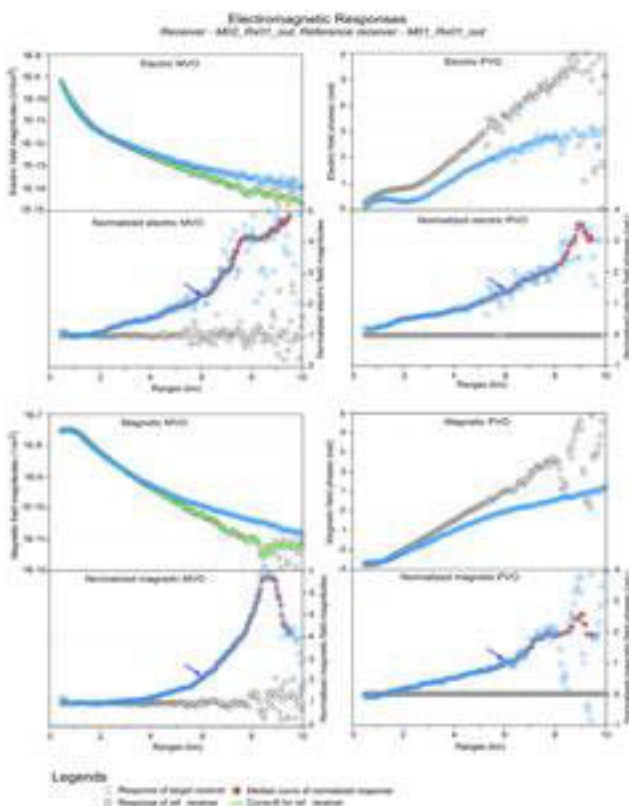


Рис. 3. Представление данных КМД. Слева верху: АК по электрической компоненте; справа верху: ФК по электрической компоненте; слева внизу: АК по магнитной компоненте; справа внизу: ФК по магнитной компоненте; Стрелкой показаны осредненные значения на разnose 6.0±0.5 км (основа для построения рис. 4)

При решении прямой задачи КМД следует учитывать глубину моря, рельеф дна, глубины слоев разреза, электрические свойства ВЧР, электрические свойства и геометрию искомого высокоомного слоя, и электрические свойства основания разреза. 2.5D моделирование позволяет увидеть, как сигнал зависит от геометрии и распределения УЭС в слоях разреза, которое меняется в двух направлениях – по глубине и по профилю, а также от геометрии установки.

Для сравнения полевых данных и результатов моделирования (неподвижный источник расположен на дне, а приемники расположены в 30 м над дном с шагом 100 м) использован принцип взаимности. Геометрия модели задана по результатам интерпретации данных 2D сейсморазведки (рис. 5, 6). Эти модели оказались адекватными для 2.5D моделирования. Вмещающий разрез примерно одинаков в пределах участка и в его

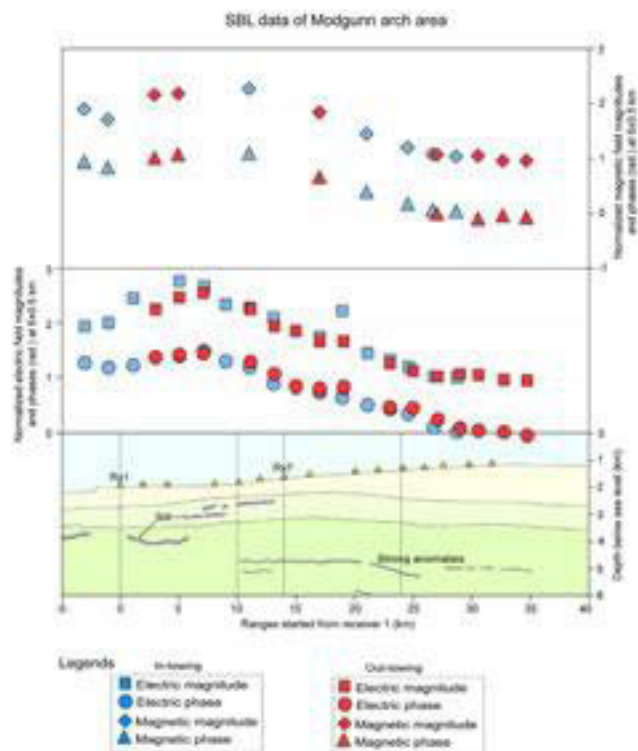


Рис. 4. График нормализованных данных КМД после медианного осреднения при буксировке от датчика (красная линия) и к датчику (синяя линия) на разnose 6.0±0.5 км по ПР2. Вверху: по магнитной компоненте (ромбы – АК, треугольники – ФК); в середине: по электрической компоненте (квадраты – АК, круги – ФК); внизу: упрощенный геоэлектрический разрез по профилю. Внизу показаны также положения датчиков и соответствующих моделей, использованных при 2.5D моделировании. Осредненные значения отнесены к середине установки (±3.0 км).

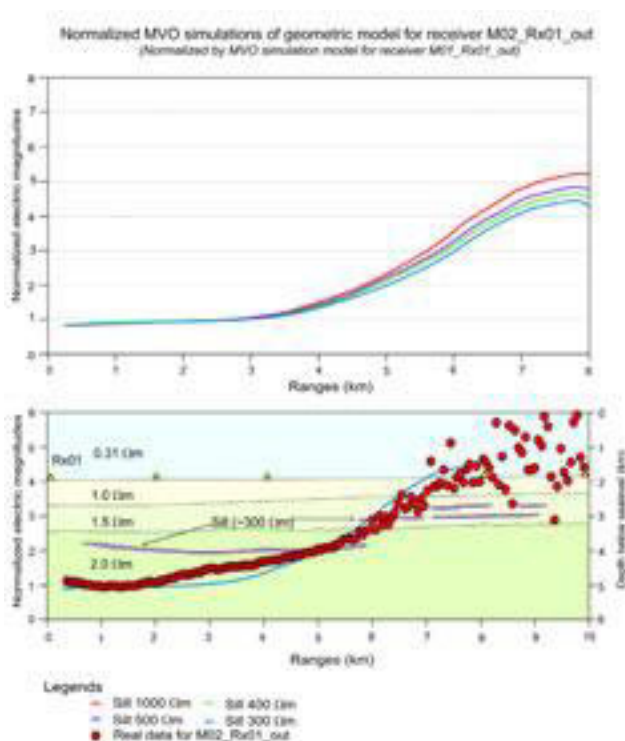


Рис. 5. Результаты 2.5D моделирования для различных геоэлектрических моделей (вверху). Расчетные и полевые сигналы КМД по дуге Модгунн (внизу). Красным показана типичная полевая кривая над разрезом с силлом (Mo2_Rx01_out), нормированная на кривую опорного датчика (Mo1_Rx01_out), находящегося вне силла. Синим показана расчетная кривая для 2.5D модели с силлом, нормированная на расчетную кривую для модели без силла.

окрестностях (Dalland et al., 1988; Swiecicki et al., 1998). Тем не менее, возможности выделения силлов и других высокоомных объектов при недостатке данных 3D сейсморазведки оказываются ограничены.

Средние значения УЭС в моделях заданы по данным каротажа в близлежащих скважинах (Скв. 6404/11-1, 6305/4-1, 6305/5-1, 6305/7-1, 6305/8-1 и др. в структурах Хавсуле (Havsuble) и Ормен Ланге в средней части континентального склона Норвегии. УЭС силлов составляет 100-1000 Ом·м, а УЭС перекрывающей толщи и основания разреза 1-5 Ом·м. В 1000 м под дном в модель введен слой умеренно высокого (10-50 Ом·м) УЭС (рис. 6).

Влияние воздуха при моделировании не учитывалось. В глубоководной обстановке (глубина моря 1100-2200 м), ЭМ энергия, отраженная от поверхности воды (воздушная волна), возвращающаяся в виде нисходящего поля, влияет на данные КМД лишь на больших разносах. Результаты моделирования хорошо и весьма хорошо соответствуют данным почти для всех положений приемника. Далее рассматриваются два типичных примера результатов моделирования.

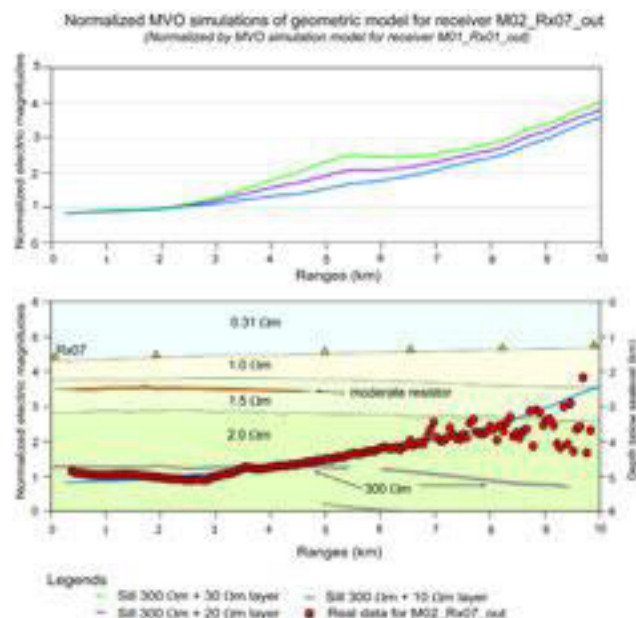


Рис. 6. Результаты 2.5D моделирования для различных УЭС высокоомного слоя на глубине 1000 м под дном при закрепленных УЭС силлов 300 Ом·м. Внизу показаны расчетная и полевая кривые КМД для датчика Mo2_Rx07_out. Красным показана полевая кривая над разрезом с силлами и, возможно, со слоем с умеренно высоким УЭС, нормированная на опорную кривую (для датчика Mo1_Rx01_out) для разреза без силлов. Синим показана расчетная кривая для 2.5D модели с силлом, нормированная на расчетную кривую для модели без силла.

На рис. 5 вверху показаны результаты моделирования (нормализованные АК электрической компоненты) для модели с геометрией, как на ПК1 ПР2, и с различными распределениями УЭС. Результаты моделирования приведены к опорному уровню (ПК 1 ПР1, где не предполагается наличие высокоомных объектов, при удаляющемся источнике). На рис. 5 отчетливо видно, что, как и ожидалось, в районе развития силлов АК идет вверх. Значения поля здесь более чем в 3.5 раза больше, чем там, где силлов нет.

На рис. 6 вверху показаны нормализованные АК электрической компоненты для модели с геометрией, как на ПК Mo2_Rx07 ПР2, включающей слой умеренно высокого УЭС на глубине 1000 м под дном моря. УЭС силлов принято равным 300 Ом·м. На рис. 6 видно, что значения поля увеличиваются с увеличением УЭС этого слоя, и на разносах более 7 км более чем вдвое превосходят значения поля в области, где силлов нет.

Сравнение результатов моделирования и полевых данных

На рис. 5 и 6 внизу представлены геологические модели и соответствующие полевые данные (красные кружки) и результаты моделирования (синяя линия). Измеренные

значения увеличиваются с разности 2 км и к 7.5 км достигают 4.0 относительно датчика Mo2_Rx01_out и 2.0 относительно датчика Mo2_Rx07_out.

Соответствие результатов 2.5D моделирования и полевых данных (рис. 5) достаточно хорошее. УЭС силлов принято равным 300 Ом·м. На средних разностях (2-5 км) измеренные значения поля несколько выше расчетных. Расхождение меньше для модели Mo2_Rx07_out, в которую на глубине 1000 м введен слой мощностью 50 м (задано по сейсмическим данным) с умеренным УЭС 10 Ом·м (рис. 6). УЭС силлов в этом случае также принято равным 300 Ом·м. Это значит, что упрощенная модель, содержащая лишь силлы, не может объяснить вид кривой. Слой с УЭС 10 Ом·м может быть истолкован как бедная залежь углеводородов или как очень тонкий, разбитый, прерывистый силл. Значение УЭС 10 Ом·м представляется все же слишком низким для силла. Если принять его УЭС равным 300 Ом·м, то этот силл должен быть очень тонким и может не проявляться в данных сейсморазведки. Для создания более детальной 3D модели нужны данные 3D сейсморазведки, но их нет.

Заключение

В данных КМД через дугу Модгунн непосредственно проявляются глубоко залегающие высокоомные силлы. Значения сигнала, порожденного мощным дипольным источником, в ЮЗ части района работ на 250% выше, чем в ЮВ части. Большие значения сигнала связаны с отражением и преломлением ЭМ энергии на силлах с УЭС 300 Ом·м, залегающих в 1100-2500 м под дном моря.

Полевые данные согласуются с результатами моделирования. Соответствие улучшается, если в модель выше силлов (на глубине 1000 м под морским дном) ввести слой с УЭС 10 Ом·м. Это значит, что упрощенная модель, включающая только силлы, не может объяснить результаты полевых наблюдений.

Благодарности

Авторы благодарят компанию Electromagnetic Geoservices за разрешение на публикацию их данных, а также Пэла Габриельсена (Pal Gabrielsen) за ценную помощь в работе.

Литература

Bhuiyan, A.H., Wicklund, T.A., and Johansen, S.E. [2005] Geophysical characterization of sub-seafloor strata of Modgunn arch from SBL data. 67th EAGE Conference, Madrid, Spain, Extended Abstracts, Bugge, T., Belderson, R.H., and Kenyon, N.H. [1988] The Storegga slide. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **325**, 357-388.

Bunz, S., Mienert, J., and Berndt, C. [2003] Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin. *Earth and Planetary Science Letters*, **209**, 291-307.

Chen, Y.H., Chew, W.C., and Oristaglio, M.L. [1997] Application of perfectly matched layers to the transient modeling of subsurface EM problems. *Geophysics* **62**, 1730-1736.

Dalland, A., Worsley, D., and Ofstad, K. [1988] A lithostratigraphic scheme for the Mesozoic and Cenozoic succession offshore mid- and northern Norway. *Norwegian Petroleum Directorate Bulletin*, **4**, 1-65.

Dore, A.G. and Lundin, E.R. [1996] Cenozoic compressional structures on the NE Atlantic margin: Nature, origin and potential significance for hydrocarbon exploration. *Petroleum Geoscience*, **2**, 299-311.

Eidesmo, T., Ellingsrud, S., MacGregor, L.M., Constable, S., Sinha, M.C., Johansen, S.E., Kong, F.N., and Westerdahl, H. [2002] Sea Bed Logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas. *First Break*, **20**(March), 144-152.

Ellingsrud, S., Sinha, M.C., Constable, S., MacGregor, L.M., Eidesmo, T., and Johansen, S.E. [2002] Remote sensing of hydrocarbon layers by Sea Bed Logging (SBL): results from a cruise offshore Angola. *The Leading Edge*, **21**, 972-982.

Johansen, S.E., Amundsen, H.E.F., Rosten, T., Ellingsrud, S., Eidesmo, T., and Bhuiyan, A.H. [2005] Subsurface hydrocarbons detected by electromagnetic sounding. *First Break*, **23**(March), 31-36.

Kong, F.N., Westerdahl, H., Ellingsrud, S., Eidesmo, T., and Johansen, S.E. [2002] SeaBed Logging: A possible direct hydrocarbon indicator for deep sea prospects using EM energy. *Oil & Gas Journal*, May 13.

Rosten, T., Johansen, S.E., Ellingsrud, S., Amundsen, H.E.F., and Brevik, I. [2003] A Sea Bed Logging (SBL) calibration survey over the Ormen Lange gas field. 65th EAGE Conference, Stavanger, Norway, Extended Abstracts, P058.

Sinha, M.C., Patel, P.D., Unsworth, M.J., Owen, T.R.E., and MacCormack, M.G.R. [1990] An active source electromagnetic sounding system for marine use. *Marine Geophysical Research*, **12**, 59-68.

Swiecicki, T., Gibbs, P.B., Farrow, G.E., and Coward, M.P. [1998] A tectonostratigraphic framework for the Mid-Norway region. *Marine and Petroleum Geology*, **15**, 245-276.

Wang, T. and Hohmann, G.W. [1993] A finite difference time-domain solution for three dimensional electromagnetic modelling. *Geophysics*, **58**, 797-809.

Ward, S.H. and Hohmann, G.W. [1988] Electromagnetic theory for geophysical applications. In: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* (Ed. M.N. Nabighian), pp. 131-311. *Investigations in Geophysics*, No. 3 (Volume 1, Theory).

Webb, S.C., Constable, S.C., Cox, C.S., and Deaton, T.K. [1985] A seafloor electric field instrument. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **37**, 1115-1130.