

Обнаружение углеводородов в разрезе с помощью электромагнитных зондирований

Subsurface hydrocarbons detected by electromagnetic sounding

С. Е. Йохансен (S.E. Johansen)¹, Х. Е. Ф. Амундсен (H.E.F. Amundsen)², Т. Ростен (T. Rosten)³, С. Эллингсруд (S. Ellingsrud)¹, Т. Эйдесмо (T. Eidesmo)¹ и А. Х. Буйан (A.H. Bhuyian)⁴.

Методы сейсморазведки позволяют обнаруживать потенциальные ловушки углеводородов (УВ), но понять, что содержит ловушка – воду или УВ – до сих пор непросто. Обнаружение углеводородов в разрезе с помощью методики электромагнитного зондирования (ЭМЗ), называемого КМД – «каротаж морского дна» (seabed logging, SBL), дало обнадеживающие результаты, но все возможности этой методики еще не были раскрыты. В этой работе представлены данные КМД по газоносной провинции Западный Тролль (Troll West Gas Province, TWGP) у берегов Норвегии, которые дают бесспорный пример прямого обнаружения глубинного скопления УВ с помощью ЭМЗ. Использование больших токов в питающей линии АВ позволило получить над скопление газа аномалию в 170%. Эти результаты открывают новые рубежи в поисках УВ.

Введение

Дистанционные методы регистрируют изменения петрофизических параметров, таких как акустические или электрические свойства. Сейсморазведка, один из самых распространенных методов такого рода, использует акустические волны для обнаружения границ между слоями с различными акустическими свойствами. Данные сейсморазведки дают детальное строение слоистой толщи, но по ним сложно установить состав поровой жидкости. Определяется положение структур, где в пористых осадочных породах могут скапливаться УВ, но вопрос, содержат поры соленую воду или УВ, остается нерешенным. Поэтому во многих районах лишь 10-30% эксплуатационных скважин вскрывают промышленные запасы нефти или газа.

Суть ЭМЗ состоит в обнаружении перепадов удельного электрического сопротивления (УЭС) в разрезе с помощью пропускания тока в линии АВ. Изменения УЭС пород в целом связаны соотношением непроводящего (УЭС 10^{11} – 10^{14} Ом·м) минерального скелета и поровой жидкости – проводящей минерализованной воды (УЭС 0.04–0.19 Ом·м) и/или непроводящих УВ (Rider, 1996). Для плотных кристаллических пород, таких как океаническая кора, типичны высокие УЭС (100–1000 Ом·м), изменчивость которых связана с содержанием минерализованных жидкостей в системе трещин. УЭС осадочных пород меняется в широких пределах (0.2–1000 Ом·м) и, помимо свойств поровых флюидов и температуры, зависит также от пористости, проницаемости и геометрии каналов, соединяющих поры (Rider, 1996; Schlumberger, 1987).

Контраст высоких (30–500 Ом·м) УЭС коллекторов, содержащих УВ, и низких 0.5–2 Ом·м) УЭС коллекторов, содержащих минерализованные воды, делает в принципе возможным применение ЭМЗ для обнаружения УВ в разрезе. Хотя ЭМЗ известны уже много лет, их применение в морских работах на УВ началось лишь недавно. Полномасштабные испытания, проведенные в 2000 г. у берегов Анголы, показали, что КМД – новая методика ЭМЗ, может быть эффективна при прямых поисках УВ в глубоких горизонтах (Ellingsrud *et al.*, 2002; Eidesmo *et al.*, 2002). До сих пор применение КМД сдерживалось недостатком статистически значимых результатов испытаний, показывающих, что глубинные скопления УВ действительно обнаруживаются по этой методике. Но с появлением нового мощного источника появилась возможность улучшить сбор, обработку и интерпретацию данных КМД.

В этой работе представлены данные КМД по газоносной провинции Западный Тролль у берегов Норвегии. Увеличение ЭМ отклика среды связано с отражением и преломлением ЭМ энергии на непроводящем скоплении УВ на глубине около 1100 м под дном моря. Эти данные соответствуют результатам моделирования и являются первым свидетельством прямого обнаружения глубинного скопления углеводородов с помощью ЭМЗ.

Методика КМД

В электроразведке с контролируемым источником (controlled source EM sounding, CSEM [сильнее всего похоже на ЗС-ЗИ – зондирование становлением поля с закрепленным источником – прим. перев.] горизонтальный электрический диполь (Young and Cox, 1981, Cox *et al.*, 1986), испускающий ЭМ сигнал на ультранизкой частоте, буксируют на небольшой высоте над дном, регистрируя при этом сигнал на неподвижных донных датчиках. Также поступают и в КМД, который является разновидностью CSEM. На рис.1 показано, что донные датчики регистрируют ЭМ сигнал, состоящий из энергии, распространяющейся непосредственно по воде, а также отраженной и преломленной на границе вода-воздух, на морском дне, и, возможно, в непроводящих слоях разреза.

Низкочастотный ЭМ сигнал затухает с расстоянием z (м) по экспоненте как $e^{-z/\tau}$, $\tau = 2\pi/\sqrt{8 \cdot 10^{-7} \cdot \rho^2 f}$ где ρ и f – УЭС (Ом·м) и частота. Расстояние, на котором сигнал

¹ Electromagnetic Geoservices, Stiklestadveien 1, N-7041 Trondheim, Norway. Correspondence to E-mail: sj@emgs.no ² 1. Earth and Planetary Exploration Services (EPX), Jac Aalls gt 44b, N-0364 Oslo, Norway

² 2. Physics of Geological Processes, Univ. of Oslo, PO Box 1048 Blindern, N-0316 Oslo, Norway

³ Statoil Research Centre, Postuttak, 7005 Trondheim, Norway

⁴ Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology, S. P. Andersens vei 15a, 7491 Trondheim, Norway

затухает в e раз (0.37 от исходного) называется толщиной скин-слоя и на частоте 0.25 Гц составляет в морской воде (УЭС 0.3 Ом·м) 551 м, в осадках (УЭС 2 Ом·м) – 1424 м и в воздухе (УЭС 10^{10} Ом·м) – 10^8 м.

ЭМ сигналы быстро затухают в воде и в донных осадках, насыщенных соленой водой, и именно эти составляющие будут преобладать в сигналах на малых (~ 3 км) расстояниях источник-приемник (разносах). В относительно тонких (20 – 200 м) непроводящих слоях, таких как УВ-содержащие коллекторы (УЭС 30 – 500 Ом·м), энергия распространяется и затухает в меньшей степени, что связано с критическим углом падения (Kong *et al.*, 2002). Распространяющаяся ЭМ энергия постоянно преломляется в направлении дна, где регистрируется датчиками ЭМ поля. Энергия также отражается и преломляется на границе вода-воздух. Эта энергия (обычно ее называют «воздушной волной») преобладает на больших (~ 6 км) разносах; ее зависит от глубины моря. Энергия, преломленная на глубоких непроводящих слоях, преобладает над энергией, распространяющейся в воде на разносах, сравнимых или превышающих глубину залегания слоя. Основу КМД составляет регистрация этой преломленной энергии (Ellingsrud *et al.*, 2002).

Газоносная провинция Западный Тролль

Комплекс месторождений Тролль, открытый недавно на континентальном шельфе Норвегии, расположен в относительно мелководной (300 – 360 м) зоне в северо-восточной части Северного моря (Gray, 1987).

Месторождения распадаются на три отдельных группы. Крупнейшим является Восточный Тролль, содержащий $2/3$ запасов УВ. Испытания КМД проводились на значительно меньшем Западном Тролле (рис. 2). Коллекторы приурочены к юрским песчаникам (согнефьордская свита - Sognefjord Fm.) с суммарной мощностью продуктивных горизонтов до 160 м. УВ-насыщенные пески имеют в целом высокие (200 – 500 Ом·м) УЭС и находятся на глубинах около 1400 м под дном. УЭС водонасыщенных песков и перекрывающей толщи находится в пределах 0.5 – 2 Ом·м. Западный Тролль является подходящим местом для испытания КМД, поскольку УЭС коллекторов велики, границы месторождения отчетливы, УЭС перекрывающей толщи низки и мало меняются, глубина моря постоянна, дно ровное, и УВ равномерно заполняют коллектор.

Прямая задача КМД

При интерпретации данных КМД важно сравнить ЭМ отклик над скоплением УВ с откликом вмещающего разреза в области, непосредственно примыкающей к скоплению. Важно также выделить аномалии от непроводящих объектов, не являющихся скоплениями УВ. Кроме того, решение прямой задачи КМД может также ответить на другие важные вопросы, связанные с планированием работ, их проведением и заверкой результатов.

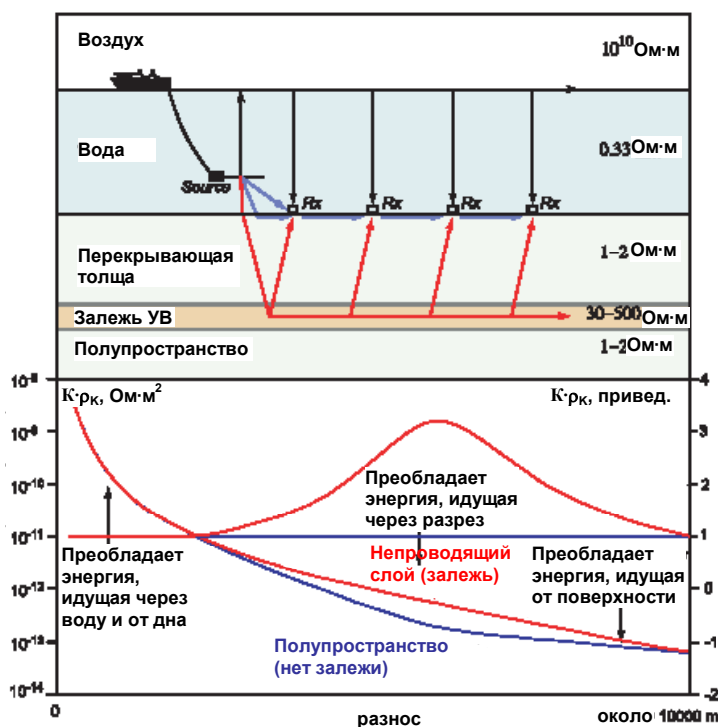


Рис. 1. (Вверх) Схема строения разреза и размещение приемников (Rx) на дне при буксировке ЭМ источника. Для примера даны типичные УЭС воздуха, воды, осадков и залежи УВ. Черными стрелками показано преломление ЭМ сигнала на поверхности воды. Синими стрелками показан ход ЭМ сигнала прямо через воду и с преломлением на дне моря. Красными стрелками обозначено преломление ЭМ сигнала в погребенном непроводящем слое (залежи УВ). (Внизу) ЭМ сигнал на одном из приемников как функция разноса [кривая зондирования; кажущееся сопротивление умножено на коэффициент установки – прим. перев.]. Красная кривая соответствует модели с непроводящей залежью УВ, синяя (меньшей амплитуды) – модели без залежи. (Вверху) Чтобы подчеркнуть различие кривых для этих моделей, кривую для модели с УВ (красную) поделили (отнормировали) на кривую для модели без УВ (синюю).

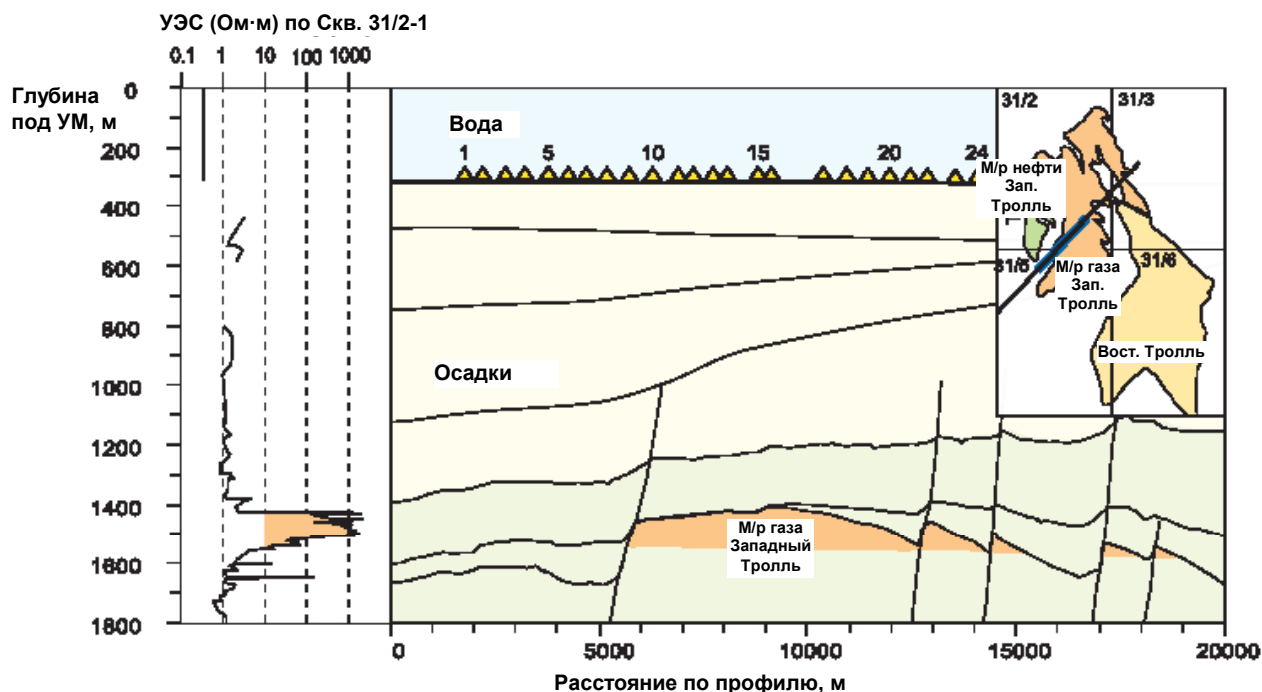


Рис. 2. Упрощенный геологический разрез месторождения газа Западный Троль с данными электрического каротажа по Сква. 31/2-1. Контуры месторождения и положение профилей дано на врезке. Тонкой линией показан маршрут буксировки источника КМД, жирной – профиль приемников КМД. Точное положение приемников дано на рис. 4.

Для моделирования данных использованы решение задачи для горизонтально слоистой среды (ГСС) методом Фурье в плоской постановке (plane layer FK-modelling; см. Chave and Cox, 1982) и решение 3D задачи методом конечных разностей во временной области. (Berenger, 1994; Chew and Weedon, 1994; Masnae, 1984; Rappaport, 1995). Программа решения 3D прямой задачи разработана компанией Electromagnetic Geoservices (emgs). Решение задачи для ГСС позволяет оценить ожидаемую аномалию от объекта и искажения, связанные с воздушной волной. Если, как на Западном Тролле, объект достаточно велик, можно также увидеть различия в отклике над скоплением УВ и вне его. Решение 3D задачи показывает влияние геометрии пласта, а также расстановки приемников, на ЭМ отклик. Влияние воздушной волны в данной реализации 3D задачи не учитывается. На применяемых в КМД ультранизких (0.25 Гц) частотах, сигнал на донных датчиках определяется изменениями УЭС в разрезе. Все данные, как полевые, так и расчетные, нормируются к опорному уровню, соответствующему разрезу без УВ.

Решение прямой задачи преследует две цели: во-первых, установить оптимальное размещение профиля съемки и приемников; во-вторых, получить оценки ожидаемой аномалии над скоплением УВ относительно вмещающего разреза.

Важными факторами, которые следует учитывать при планировании работ КМД, являются глубина моря, состояние моря и морского дна, мощность и электрические свойства перекрывающей толщи,

геометрические и электрические свойства коллектора, и электрические свойства подстилающих пород. При планировании работ КМД на Западном Тролле следовало также смоделировать пересечение залежи под косым углом к простиранию.

Геоэлектрические модели и результаты моделирования представлены на рис. 3. Под индексами D, C, B и A даны результаты 3D моделирования при нарастающей ширине коллектора. Средние значения УЭС при моделировании заданы по имеющимся данным по скважинам. За УЭС коллектора Западного Тролля (250 Ом·м) принято среднее по скважине 31/2-1 (рис. 2).

Расчетный сигнал приведен к уровню 2D модели без УВ. Под индексом B приведены результаты моделирования по профилям, пересекающим залежь под углами, показанными на рис. 2. Под индексами E и F даны результаты моделирования в рамках модели ГСС. Под индексом E даны результаты над залежью, приведенные к той же модели без залежи, а под индексом F – к модели вмещающего разреза в стороне от залежи (рис. 3).

В результатах моделирования над месторождением отмечается сильное возрастание аномалии КМД по выбранному профилю. Аномалия возрастает также при увеличении ширины залежи, превышая сигнал от вмещающего разреза более чем в три раза при ширине залежи 5 км. При планировании работ было важно обойти расположенное рядом месторождение нефти Западный Троль, чтобы исследовать разрез без УВ (рис. 2). Таким образом, профиль пришлось вести в направлении с юго-запада на северо-восток. Моделирование показало, что

пересечение Западного Тролля под этим углом не приведет к сильному уменьшению аномалии. Снижение значений на варианте В по сравнению с А связано также с уменьшением ширины залежи с 5 км до 3.5 км.

Рассмотренные результаты получены без учета влияния воздушной волны. Энергия, преломленная на границе вода-воздух, возвращается и искажает расчетный ЭМ отклик, особенно на больших разносах. Для оценки этого эффекта полезно моделирование в рамках модели ГСС включающей слой воздуха. Такое моделирование полезно также при оценке сигнала КМД над залежью и над вмещающим разрезом. Общая картина и приведенная амплитуда максимумов в модели ГСС и в 3D модели близки (рис. 3Е, F). На больших разносах заметно влияние воздушной волны, а отклик от разреза значительно ослабевает. Несоответствие результатов объясняется слишком сильным упрощением геологической обстановки в рамках модели ГСС и различной организацией вычислений. На основании многообещающих результатов моделирования было принято решение о проведении испытательных работ КМД на Западном Тролле.

Сбор данных

Работы проведены с использованием 24 датчиков ЭМ поля, размещенных вдоль профиля, пересекающего Западный Тролле, как показано на рис. 2 и 4. Установка датчиков проводилась путем сброса с борта судна с последующей привязкой с помощью акустической системы. На дне моря датчики фиксировались бетонными грузами. По окончании записи по акустическому сигналу с судна груз сбрасывался, и датчики всплывали на поверхность.

Питающая линия длиной 230 м (горизонтальный электрический диполь) состояла из двух электродов, находящихся в гальваническом контакте с водой. Электроды размещались в толще воды на косе с нейтральной плавучестью, которая буксировалась с помощью буксировочного узла, на котором размещался источник тока. Источник непрерывно давал ток в форме меандра с постоянным знаком с частотой 0,25 Гц и амплитудой 1000А. Высота источника над дном поддерживалась на уровне 40 м и непрерывно отслеживалась с помощью эхолота. Глубины питающей линии и буксировочного узла устанавливались длиной буксировочного трос-кабеля, закрепленного на судне.

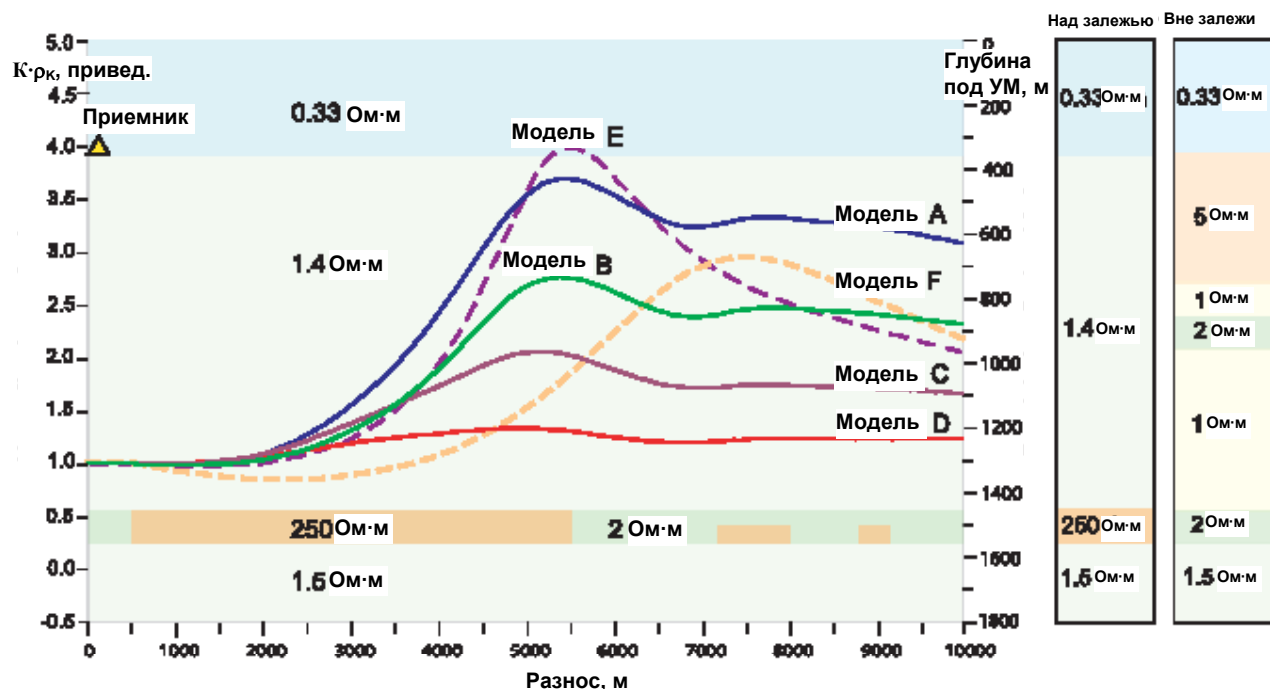


Рис. 3. Результаты моделирования данных КМД по упрощенным моделям Западного Тролля. Колонки справа соответствуют моделям над залежью (ON) и вне нее (OFF). Различия УЭС перекрывающей толщи в моделях ON и OFF связано, скорее всего, с изменением литологии по латерали. Разрез составлен на основе модели рис. 2. Приведены результаты моделирования в рамках 3D модели (сплошные линии) и модели ГСС (штриховые линии). Кривые А, С и D соответствуют различной ширине залежи (соответственно, 5 км, 2.5 км и 1.25 км поперек профиля). Для кривой В ширина увеличивается 3.5 км (слева) до 5 км (справа), что соответствует пересечению месторождения Западный Тролле под углом. Кривые Е и F – результаты расчетов в рамках модели ГСС.

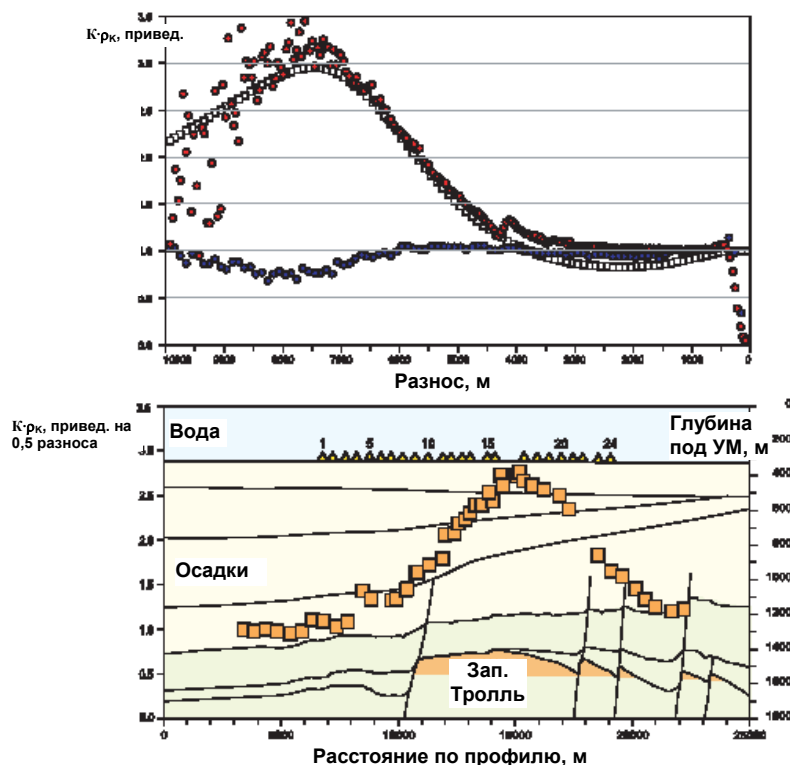


Рис. 4. (Вверху) Теоретические и полевые кривые КМД на профиле через Западный Троль. Красным дана типичная кривая над залежью (приемник Rx24), отнормированная на опорную кривую вне залежи (приемник Rx2). Источник перемещался с ЮЗ на СВ, кривые получены при положении источника к ЮЗ от приемника. Синим дана опорная кривая, отнормированная на теоретическую по модели OFF. Белым дана теоретическая кривая для модели ON отнормированная на теоретическую по модели OFF. (Внизу) График кажущегося сопротивления на разносе 6.5 ± 0.5 км (медиана по интервалу разносов) по профилю через Западный Троль. Горизонтальные положения даны по координатам ОГТ (3.25 км от приемника). Для наглядности график наложен на упрощенный геологический разрез по профилю. Положения месторождения и аномалии КМД отлично согласуются.

Подача питания на источник и передача сигнала с буксировочного узла осуществлялись по тому же трос-кабелю. Положение питающей линии и ее глубина под судном отслеживались акустической системой с двумя приемо-передатчиками – на буксировочном узле и на дальнем от него электроде.

Данные записывались в виде временной последовательности отсчетов, затем обрабатывались путем полосовой фильтрации в частотной области и представлялись в виде значений поля, нормированного на амплитуду поля на данном разносе на частоте меандра [кажущегося сопротивления – прим. перев.]. Качественные данные с достоверной информацией получены на разносах до 8 км.

Результаты и их обсуждение

Типичные кривые кажущегося сопротивления на двух датчиках (в пределах залежи – ON, и за ее пределами – OFF) приведены на рис. 4. Кривые ON и OFF примерно совпадают до разноса 3.5 км, а далее до разноса 9 км кривая ON всегда идет выше кривой OFF. Там же приведены теоретические кривые, рассчитанные в рамках модели ГСС. Сходство теоретических и полевых кривых можно объяснить значительными горизонтальными размерами залежи и учетом при решении прямой задачи, как влияние перекрывающей толщи, так и воздушной волны.

Кривые OFF на всех разносах близки к 1, что соответствует находящимся в этой части профиля осадочным породам, содержащим только воду. Кривые ON близки к 1 на разносах до 3.5 км, достигают уровня 3 к разносу 7.5 км, и далее постепенно понижаются с увеличением разноса. Измеренные значения близки к расчетным для соответствующей (над скоплением газа) части профиля (рис. 4).

Для оценки результатов ЭМЗ по всему профилю построен график кажущегося сопротивления по медианным значениям на разносе 6.5 ± 0.5 км (рис 4). На этих средних разносах наблюдается максимальное различие значений кажущегося сопротивления на кривых ON и OFF, а шумы отсутствуют. В юго-западной части профиля (к ЮЗ от Западного Троля – зона кривых OFF), достигает 2.7 над сводом залежи (зона кривых ON) и постепенно снижается до 1.2 за северо-восточным краем месторождения. Постепенный подъем связан с тем что, отражение энергии максимально, когда и источник, и приемник находятся над скоплением УВ. На Западном Троле это происходит лишь в узкой зоне над средней частью скопления УВ. Заметно также, что западный фланг аномалии круче восточного. Это можно объяснить асимметрией залежи, которая на западе ограничена тектонической границей, а на востоке постепенно выклинивается, как показано на рис. 4.

Помимо Западного Тролля, по профилю КМД нет других непроводящих отложений, присутствием которых можно объяснить повышение УЭС. Эта часть Северного моря хорошо разбурена и покрыта сейсмической съемкой, поэтому геологическое строение района хорошо известно.

Выводы

Методы сейсморазведки позволяют обнаруживать потенциальные ловушки углеводородов (УВ), но понять, что содержит ловушка – воду или УВ – до сих пор непросто. Обнаружение углеводородов в разрезе с помощью методики КМД дало обнадеживающие результаты, но все возможности этой методики еще не были раскрыты из-за недостатка статистически значимых результатов испытаний, показывающих, что скопления УВ действительно обнаруживаются по этой методике.

Данные КМД по профилю через газоносную провинцию Западный Тролль дают первые свидетельства прямого обнаружения скопления УВ с помощью морских ЭМЗ. Используя мощный дипольный источник, удалось получить над Западным Троллем аномалию в 170%, связанную с отражением и преломлением ЭМ энергии на непроводящем скоплении газа на глубине 1100 м под дном моря. Результаты полевых работ согласуются с данными моделирования и открывают новый этап разведки углеводородов.

Благодарности

Авторы благодарят компанию Statoil за разрешение на публикацию этих материалов, а также Ферейдона Данешвара (Fereidoon Daneshvar), Ларса Лозета (Lars Loseth), Пэла Габриэльсен (Pal Gabrielsen), Стейна Фанаволда (Stein Fanavold), Катрин Рингстад (Cathrine Ringstad) и Эрика Скогена (Erik Skogen) за ценную помощь в ходе реализации проекта.

Литература

- Berenger, J.P. [1994] A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Computational Physics*, **114**, 185-200.
- Chave, A.D. and Cox, C.S. [1982] Controlled Electromagnetic Sources for Measuring Electrical Conductivity Beneath the Oceans 1. Forward Problem and Model Study. *Journal of Geophysical Research*, **87**, B7, 5327-5338.
- Chew, W.C. and Weedon, W.H. [1994] A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, **4**, 268-270.
- Cox, C.S., Constable, S.C., Chave, A.D., and Webb, S.C. [1986] Controlled source electromagnetic sounding of the oceanic lithosphere. *Nature*, **320**, 52-54.
- 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.
- Gray, D.I. [1987] Troll, In Spencer, A. M. et al. (Eds) *Geology of the Norwegian Oil and Gas Fields*. Graham and Trotman, London, 389-401.
- Kong, F.N., Westerdahl, H., Ellingsrud, S., Eidesmo, T. and Johansen, S. E. [2002] Seabed logging: A possible direct hydrocarbon indicator for deepsea prospects using EM energy. *Oil & Gas Journal*, May 13.
- Macnae, J.C. [1984] Survey design for multicomponent electromagnetic systems. *Geophysics*, **49**, 265-273.
- Rappaport, C.M. [1995] Perfectly matched absorbing boundary conditions based on anisotropic lossy mapping of space. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, **5**, 90-92.
- Rider, M.H. [1996] *The Geological Interpretation of Well Logs*. Whittles, Roseleigh House, Latheronwheel. ISBN 1-870325-36-2.
- Schlumberger [1987] *Log Interpretation Principles/ Applications*. Schlumberger Educational Services, Houston, Texas.
- Young, P.D. and Cox, C.S. [1981] Electromagnetic active source sounding near the East Pacific Rise. *Geophysical Research Letters*, **8**, 1043-1046.