

Ценность данных CSEM при поисково-разведочных работах

Arild Buland,* Lars Ole Løseth, Andreas Becht, Malgven Roudot и Tage Røsten на основании анализа базы данных CSEM компании Statoil показывают, что эффективность электромагнитного метода с контролируемым источником (CSEM) при поисково-разведочных работах к настоящему времени существенно повысилась.

Компания Statoil в конце 1990-х годов начала использование электромагнитного метода с контролируемым источником (CSEM) для дистанционного выявления углеводородов в морских условиях (Eidesmo et al., 2002). Метод, называемый Sea Bed Logging (SBL), был успешно испытан в 2000 году на морской акватории Африки (Ellingsrud et al., 2002), а последующие пилотные испытания подтвердили, что CSEM это метод, способный прогнозировать скопления углеводородов до проведения бурения.

Первоначальные технические успехи первых испытательных съемок, в частности калибровочная съемка 2003 года, вызвали огромный коммерческий интерес. Отрасль быстро приняла новую технологию и расширила её области применения. Среди успешных примеров попадались некоторые неопределенные и неубедительные результаты, и коммерческий интерес снизился. В 2009 году компания Statoil приняла решение проанализировать базу данных и исследовать несколько ключевых вопросов: что мы до сих пор извлекали из данных CSEM? Какова эффективность и точность прогнозов? И каково промышленное значение данных CSEM?

Мы обсуждаем эти проблемы в свете результатов внутреннего анализа базы данных компании Statoil, где промышленное значение во всех случаях измеряется степенью влияния риска на основании модификации Байесовского риска. Мы показали, как промышленное значение данных CSEM может быть спрогнозировано по анализу стоимости информации (VOI), основанному на теории анализа решений (например, Bratvold и др. (2009) и Eidsvik и др. (2008)). Промышленное значение данных CSEM непосредственно связано с тем, как данные влияют на принятие решения. При принятии решения *бурить* или *пропустить* данные CSEM имеют большое значение, если их привлечение может изменить решение с *пропустить* на *бурить* на основании положительных результатов CSEM, и наоборот. Стоимость информации (VOI) в основном растет с ростом эффективности прогнозов, но рискованные модификации при отсутствии влияния на выбор решения по определению не имеют промышленного значения.

Методика CSEM

Метод CSEM обычно использует источник в виде горизонтального электрического диполя с заданными частотами. Источник буксируется вдоль «линии буксирования», обычно по возможности ближе к морскому дну. В традиционной 2D съемке приемники располагаются на морском дне вдоль буксировочного троса. В 3D съемке приемники

располагаются на морском дне по 2D сети, см. рисунок 1.

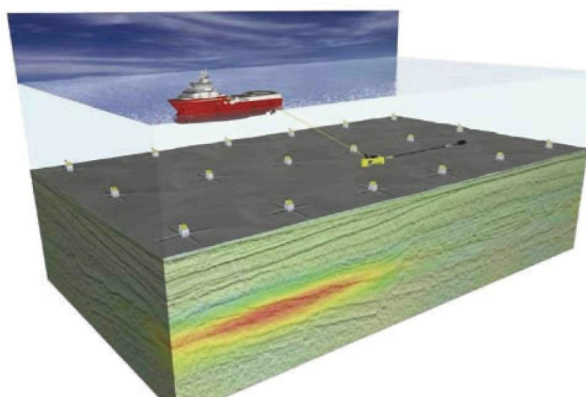


Рисунок 1 Съемка CSEM. С лобового разрешения EMGS

На каждом приемнике регистрируются компоненты электромагнитного поля в виде временных последовательностей. Обработка этих временных последовательностей может быть выполнена различными способами. Общепринятый подход заключается в извлечении определённой частотной компоненты для заданного временного интервала, затем она объединяется с навигационными данными и данными источника для соответствующего временного интервала. Эта процедура в сочетании с выбранными методами фильтрации для увеличения отношения сигнал-помеха, даёт так называемые характеристики зависимости магнитуды от удаления (MVO) и зависимости фазы от удаления (PVO). Вследствие большого изменения магнитуды откликов CSEM, реальные и синтетические данные часто представлены в терминах относительного изменения по сравнению либо с опорными (эталонными) приемниками (реальными данными), либо смоделированным сигналом из синтетической эталонной модели (синтетических данных). Данные магнитуды могут быть нормализованы относительно опорных (эталонных) данных, а фазовые данные можно по аналогии рассматривать как отклонение от опорных (эталонных) данных. Когда имеются данные по нескольким приемникам вдоль 2D профиля, на график могут быть нанесены, как показано на рисунке 2, нормализованные отклики для всех приемников по определенным интервалам удаления. Такое отображение данных является быстрым способом проверки изменения сигналов вдоль профиля и может быть использовано для контроля качества данных. На эти графиках обычно дополнительно наносятся глубины приемников, чтобы дать интерпретатору представление о возможном влиянии рельефа морского дна.

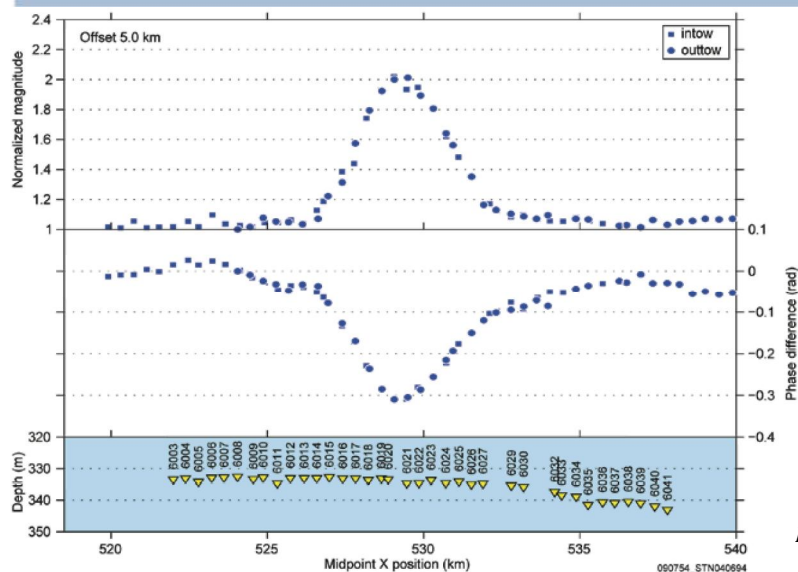


Рисунок 2 Нормализованный отклик

В реальных геологических условиях использование нормализованных графиков для интерпретации данных CSEM может быть опасно. Аномалии удельного сопротивления могут быть связаны с разными геологическими условиями в недрах. Таким образом, при интерпретации данных CSEM график на рисунке 2 необязательно связан с изменениями удельного сопротивления. Лучше использовать все имеющиеся данные и постараться согласовать измеренные данные с одной или более синтетическими моделями, используя для этого алгоритм инверсии. Затем по синтетическим моделям из зарегистрированных данных получают карты распределения удельного сопротивления. Эти распределения удельного сопротивления могут быть сопоставлены с сейсмическими структурами. Пример совместного изображения удельного сопротивления и сейсмического разреза показан на рисунке 3.

Промышленная история CSEM

Поисково-разведочные исследования CSEM на углеводороды имеют короткую промышленную историю всего в 8 лет, но мы видим огромное развитие и совершенствование всех элементов от приобретения данных (съёмки) до методов обработки данных, анализа и интерпретации в течение этих лет. Точность измерений значительно повысилась, количество приемников возросло от 20 в 2003 году до 140 и более в 2009 году. Ранние съёмки в основном были представлены 2D профилями, в то время как в 2009 году проведено более 90% 3D съёмок. Методы обработки переместили CSEM из глубоководных методов (>1000 м) к методам, которые в настоящее время применимы для глубин воды в 100 м и даже меньше. Процесс интерпретации в настоящее время включает создание геологической модели и как стандарт - моделирование и инверсию.

Первые годы использования CSEM для поисково-разведочных исследований на углеводороды могут быть разделены на три основных периода:

Период испытаний в течение 2000-2002 годов. Метод был внедрен как глубоководный (>1000 м), а глубоководная область Норвежского моря стала для

компании Statoil полигоном для начала испытаний нового метода.

Ранний промышленный период в 2003-2006 годах. Оглядываясь назад, качество съёмки в этот период страдало из-за проблем калибровки приемников, например, из-за плохой калибровки часов. Анализ данных был простой, преобладала прямая интерпретация кривой нормализованной магнитуды (пример на рисунке 2).

Современный промышленный период с 2007 года. Этот период характеризуется лучшим качеством данных и более продвинутой методологией интерпретации, включающей моделирование и инверсию (пример на рисунке 3). Что более важно, приведенные ниже статистические данные показывают четкое изменение от слабых или неубедительных результатов в начальном периоде к убедительным результатам в настоящее время. Однако CSEM все еще является новой технологией, находящейся на стадии быстрого развития. По данным 2010 года мы продолжаем отмечать успехи в точности благодаря усовершенствованиям в технологии калибровки и развитию систем сбора данных, а также постоянным усилиям, направленным на развитие методов анализа.

Эффективность прогнозирования

При оценке перспективности конечной целью геофизического анализа является принятие лучшего решения. Обычно самой важной исходной информацией для принятия решения на основе геологического и геофизического анализа является оценка риска и объёмов. Имеются разные определения шанса на успех, но общепринято связывать успех с обнаружением большего объёма углеводородов, чем заданный минимальный объём. При обычной оценке поисковых рисков пригодная нефтяная система разделяется на ряд требуемых геологических факторов, кратко описываемых как источник, резервуар и ловушка. Шанс на успех при поисках может быть определен умножением шансов на успех каждого из этих факторов, в предположении, что они независимы.

Геофизические анализы, однако, часто дают прямые признаки скоплений углеводородов (DHI),

EM/Potential Methods

например, амплитуда сейсмической аномалии, аномалия типа «плоское пятно», или соответствие аномалии CSEM перспективной площади и предполагаемому сигналу от углеводородов. Геофизический ДНІ (прямой признак УВ) обычно не связан с одним или несколькими геологическими факторами, а может потенциально затрагивать все. Результаты геофизического анализа могут быть включены в оценку степени риска с помощью процедуры байесовской модификации риска (BRM). Байесовская модификация риска является практической и статистически обоснованной процедурой для включения дополнительной информации. Модифицированная (последующая) вероятность геологического сценария S_i после модификации риска в результате использования данных CSEM задается законом Байеса в виде

$$P(S_i | D) = P(D | S_i) P(S_i) / P(D),$$

где $P(S_i)$ – априорная вероятность для сценария i , оцененная без CSEM, а $P(D/S_i)$ – вероятность данных CSEM для заданного сценария i . Нормирующий множитель

$$P(D) = \sum_{i=1}^n P(D | S_i) P(S_i),$$

с суммой по всем геологическим сценариям $i=1, \dots, n$, гарантирует, что сумма апостериорных вероятностей равняется 1. Байесовский процесс требует оценки всех существенных геологических сценариев.

Основой для вероятностной оценки является хорошая связь между геологическими моделями и данными. Ожидаемый сигнал от всех значимых геологических моделей должен быть оценен и сопоставлен с реальными данными. Инверсия является важным методом в процессе создания моделей, объясняющих данные, но так как результат инверсии недостоверный и неоднозначный, центральной частью процесса являются анализ чувствительности и поиск других возможных решений. Обычно сценарий, в котором модельный сигнал хорошо согласуется с реальными данными, более вероятен, чем сценарий с плохим согласованием. Это непосредственно связано с невязками между модельными и реальными данными и достоверностью данных. Данные превосходного качества и высокой степени достоверности позволяют четко отличать хорошее совпадение от плохого, при этом высокая вероятность получается только при очень малой невязке. Если качество данных плохое и достоверность низкая, сценарий

может иметь высокую вероятность только при большой невязке. В худшем случае данные с нерелевантной информацией приводят к одинаковым вероятностям для всех сценариев и к неубедительным результатам.

Оцениваемые сценарии в первую очередь характеризуются геологической обстановкой, так что оцениваются все релевантные модели, но также играют роль и характеристики геофизических методов. Например, для сейсмического анализа важно ввести низкое насыщение как неудачную модель, поскольку небольшое количество газа может дать четкие сейсмические аномалии, похожие на сигнал для благоприятного случая. Для EM методов релевантные сценарии несколько другие. Один аспект связан с низкой разрешающей способностью CSEM, приводящей к неопределенности в точном позиционировании начала аномалии. Возможные объяснения аномалии всегда должны включать увеличение фонового удельного сопротивления (внешний объект), обычно связанное со структурой, а также возможность наличия других литологических разновидностей пород с высоким удельным сопротивлением, например вулканические породы или галоиды. Отсутствие аномалий в благоприятном случае может также иметь различные объяснения для сейсмических и EM данных. Один пример для сейсмических данных - сигнал от тяжелой нефти может быть почти идентичен отклику от насыщенных солевых растворов. Для EM данных всегда следует рассматривать вероятность коммерческого случая с низким удельным сопротивлением резервуара, если CSEM используется для снижения перспективности из-за отсутствия отклика.

Рисунок 4 иллюстрирует Байесовскую модификацию риска от априорной вероятности до апостериорной вероятности для различных коэффициентов правдоподобия CSEM. Вероятности CSEM здесь упрощены путем сведения всех сценариев к двум классам: успех и неудача. На рисунке вероятности и успеха и неудачи изменяются от 0.1 до 0.9 (с шагом 0.1), а кривые соответствуют отношениям успеха к неудаче 0.9/0.1 (сверху) до 0.1/0.9 (внизу). Когда вероятность успеха больше вероятности неудачи, возможность успеха увеличивается (зеленые линии), и наоборот (красные линии). Если вероятности успеха и неудачи равны, результаты CSEM являются неубедительными и не влияют на риск (черная линия).

Оценка рисков по EM тесно связана с

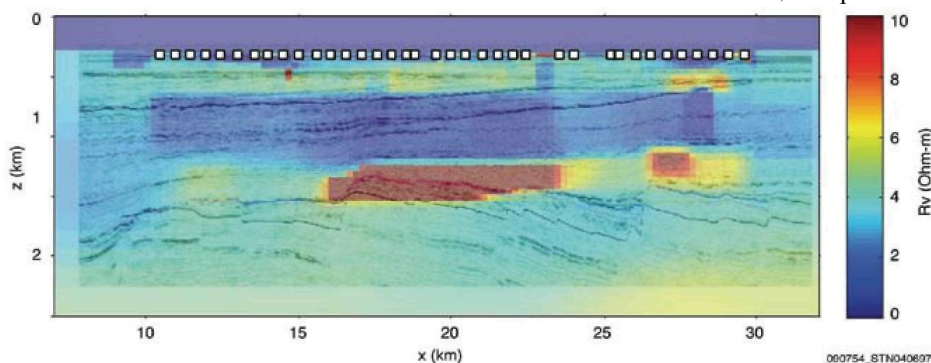


Рисунок 3 Распределение удельного сопротивления по глубине по инверсии данных CSEM. Фон представлен соответствующим сейсмическим разрезом

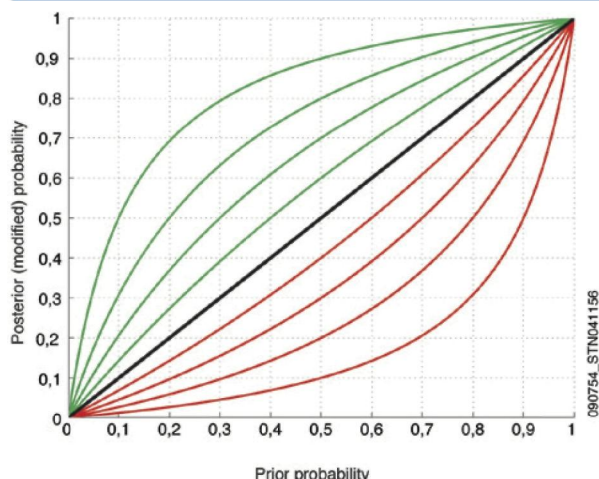


Рисунок 4 Эффекты модификации риска для различной вероятности успеха по отношению к вероятности провал

размером резервуара и объемами углеводородов. Обычно мы можем ожидать четкой аномалии и влияния на риск от резервуара большого объема (P10), более слабых аномалий и влияния на риск от резервуара среднего объема (P50), и возможно, отсутствие аномалий от резервуара небольшого объема P90. Эта связь между объемом и риском важна при оценке перспективного участка и для оценки полезности информации в вероятностном анализе, но далее в настоящей статье это не рассматривается.

Мониторинг

Мониторинг имеет большое значение при оценке метода CSEM в качестве устойчивого поисково-разведочного средства и для калибровки оценки рисков, чтобы гарантировать, что мы правильно оцениваем информацию, заключенную в данных CSEM. Недавно опубликованы два исследования Johansen и др. (2008) и Hesthammer и др. (2010). Первая статья дала положительное заключение по техническому успеху, но не рассматривала поисково-разведочный успех. Вторая статья показало как CSEM повлиял на обнаружение на основании только нормализованного амплитудного отношения.

Между 2001 и 2008 годами компания Statoil провела около 60 съемок CSEM, большинство из них было использовано для оценки перспективных площадей. Соответствующая база данных содержит 32 случая с контролем по скважинам, а 21 из них были получены до бурения. В 2009 году мы провели калиброванную оценку вероятности всех релевантных объектов в базе данных для «измерения» и отображения эффективности информации в данных CSEM. Объекты включали недоразведанные структуры, перспективные площади, а также известные открытия и месторождения. Оценка была калибрована в том смысле, что все объекты были оценены по одному и тому же критерию, включая случаи со скважинами и без скважин, все были классифицированы и сопоставлены друг с другом. Оценка основывалась на существующей информации, поскольку временные рамки исследования не предусматривали

переобработку и новый анализ всех случаев. Дальнейшая работа может поменять оценки, особенно для случаев с ограниченным объемом анализа. Оценка базировалась на состоянии технологии в 2009 году.

Чрезвычайно интенсивные сигналы от Troll West Gas и малоглубинного резервуара Peon являются самыми яркими случаями в базе данных. Качество данных этих съемок, проведенных в 2003 и 2005 годах, не соответствуют современному стандарту, но для них оно достаточно. На основании интенсивных и согласованных сигналов мы использовали их как лучшие случаи калибровки. Вероятностное отношение большой успех/неудача требует присутствия небольшой геологической неопределенности и небольшой возможности анти-моделей с высоким удельным сопротивлением. Для реальных поисково-разведочных сценариев с интенсивными откликами, аналогичными двум примерам с наилучшей калибровкой, геологическая неопределенность и высокая вероятность других анти-моделей с высоким удельным сопротивлением может привести к более низкой вероятности, чем на Troll и Peon.

Малоглубинная перспективная площадь, аналогичная примеру Peon, представляет пример наихудшей калибровки. Основным критерием для понижения категории перспективности площади является то, что мы ожидаем интенсивный сигнал от объекта, а данные не показывают никакой аномалии. Огромный объем этой перспективной площади почти наверняка должен дать интенсивный сигнал, но в данных сигнала нет. Вероятность успеха здесь низкая, но все еще можно иметь в виду возможность, что перспективный участок содержит большие объемы углеводородов несмотря на отсутствие сигнала CSEM. Ложный отрицательный результат CSEM в основном связан с низким удельным сопротивлением резервуара на уровне, близком к фоновому.

Все практические примеры при помощи нашего критерия оценки были классифицированы от самого негативного до самого позитивного. Мы не можем привести всех статистических подробностей и сгруппировали все примеры только в два класса: примеры практических данных с плохими или неубедительными результатами, и примеры

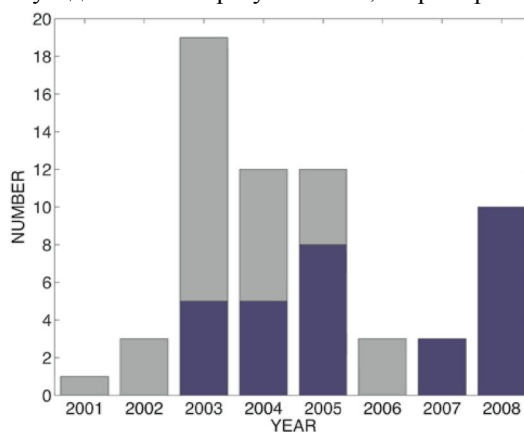


Рисунок 5 Практические примеры по годам (слабые или неудовлетворительные практические примеры данных показаны серым цветом, удовлетворительные – синим цветом)

EM/Potential Methods

практических данных с четкими выводами, либо положительными, либо отрицательными. Результаты приведены на рисунке 5, где практические примеры данных отсортированы по годам проведения съемки. Примеры с ненадежными выводами (серый цвет) по сравнению с примерами с надежными выводами (синий цвет) почти равномерно уменьшаются со временем. Съемки по 2006 году представляются как исключение с положительным трендом, где все практические примеры данных классифицированы как слабые. Поэтому без проведения соответствующего анализа и выводов эти съемки являются неопределенными. Следующее поразительное наблюдение заключается в том, все практические примеры данных по 2007 и 2008 годам оценены как убедительные, некоторые из них положительные и некоторые отрицательные. Напоминаем, что лишь некоторые из недавних случаев были заверены бурением, и мы не утверждаем, что все случаи в дальнейшем позволят делать четкие выводы. Другое замечание заключается в том, что оценка основана на проделанной работе, а дальнейшая работа может в принципе изменить результаты, надеемся, что в положительном направлении. Таким образом, картина показывает очень положительные тенденции со временем.

Факторы интерпретации

Чтобы лучше понять и объяснить улучшения производительности, мы включили подробную оценку трех факторов: качество данных CSEM, высокий уровень развития и основательность выполненного анализа и возможности реализации, определяемые геологическими условиями. Количественный показатель для каждого из этих трех факторов определяется от 1 до 6, где 6 – самый высший показатель. Показатель использовался для того, чтобы отобразить взаимосвязь между этими факторами и сделать вывод, являются ли примеры данных слабыми/неубедительными или бесспорными (отрицательными или положительными). Была исследована связь между этими составляющими и предварительно рассчитанной эффективностью прогнозирования, обнаружен общий прогресс в возможности прогнозирования по данным CSEM, который объясняется улучшениями по всем трем составляющим. Если одна составляющая плохая, это может быть источником неубедительных результатов, и наоборот, если вероятностная составляющая очень хорошая, результаты могут быть убедительными, даже если другие составляющие плохие. Примером являются данные по газовой провинции Troll West, где качество данных в 2003 году и кривые простой нормализованной магнитуды были достаточными для получения убедительного результата. Для более сложных случаев особенно важным для повышения точности и устойчивости прогнозов было развитие методологии CSEM.

Распределение показателей данных EM приведено на рисунке 6. На основании отчетов о съемках качество данных для большей их части характеризуется как хорошее или отличное. Оценка качества данных в отчетах была основана на уровне

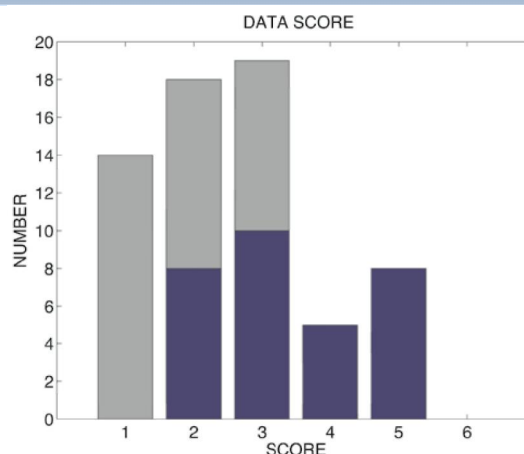


Рисунок 6 Показатель EM данных (слабый или неудовлетворительный серым цветом, удовлетворительный – синим)

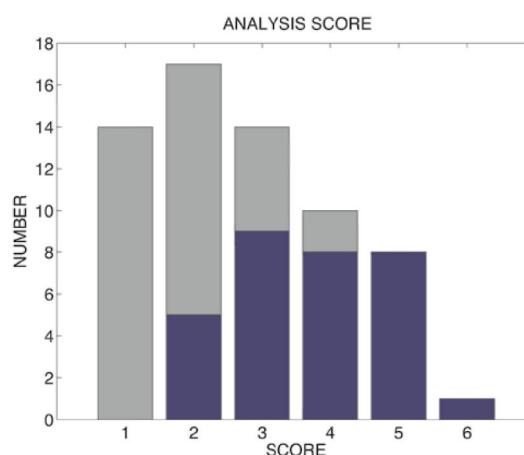


Рисунок 7 Показатель анализа EM данных (слабый или неудовлетворительный серым цветом, удовлетворительный – синим)

(технологии) времён получения данных, поэтому, чтобы получить обновленную оценку, основанную на современном уровне, мы должны погрузиться глубже в детали технологии получения данных и методов обработки. Короче говоря, показатели 1 и 2 присваиваются данным плохого качества с точностью, типичной для раннего периода 2000-2003 годов. Низкий показатель может также присваиваться при плохом покрытии целевого объекта, или в случае использования неподходящих частот. Показатели 3 и 4 отражают посредственное качество данных, покрытия и набора частот, обычных для технологии съемки, использованной в 2004-2006 годах. Показатели 5 и 6 представляют высокое качество данных по стандарту 2009 года, хорошее покрытие и адекватный набор применяемых частот. Обычно это данные по сети или 3D данные с азимутальными компонентами.

Самые поразительные наблюдения из гистограммы показателей данных заключаются в том, что все случаи с показателем 1 классифицируются как слабые/неубедительные; тогда как все примеры с показателем 4 и выше классифицированы как убедительные. Корреляция между показателем данных и убедительностью четкая, но не удивительная. Мы не присваиваем

EM/Potential Methods

никаким данным показатель 6. Причина заключается в том, что самые «свежие» данные этого исследования получены в 2008 году, и что мы наблюдаем существенные изменения в системе получения современных данных.

Распределение показателей EM анализа приведено на рисунке 7. Показатель EM анализа больше сосредоточен на том, что необходимо сделать, чтобы истолковать сигнал, чем на том, как много работы было выполнено. Как и для показателя данных, показатель анализа оценивается относительно современного уровня и методологии.

Показатели 1 и 2 относятся к случаям, где анализ проводился ограниченно или его вообще не было. Низкий показатель присваивается, если связь между геологическими моделями и данными не установлена и не исследована, и если устарела методология. Это тот случай, когда анализ основывается исключительно на просмотре данных нормализованной магнитуды и разности фаз. Показатели 3 и 4 присваиваются случаям с интерпретацией, не полностью соответствующей современным стандартам. Могут быть использованы частично устаревшие методы, и устанавливается и проверяется только хорошая связь модели с данными. Показатели 5 и 6 представляют хорошую или полную интерпретацию на современном уровне с современным анализом и современными методами. Связь между моделями и данными хорошо установившаяся и исследуется на успех и анти-модели.

Все случаи с показателем анализа 1 и значительная часть случаев с показателем 2 в этом исследовании классифицируются как слабые/неубедительные, как и для показателей качества данных. Почти все примеры с показателем 1 относятся к самым старым съемкам (с 2000 до 2003 года). Все примеры с высшими показателями 5 и 6 классифицируются как убедительные.

Распределение EM показателя геологии приведено на рисунке 8. Идея этого фактора заключается в том, чтобы оценить, насколько подходит EM для обеспечения информацией о сопротивлении резервуара в конкретной геологической ситуации. Это очень похоже на анализ применимости, но мы здесь оценили показатель геологии на основании существующей информации без проведения дополнительного анализа. Поэтому некоторые показатели могут быть обновлены в соответствии с анализом применимости с построением модели и опережающим моделированием.

Хорошо известными важными факторами, определяющими геологический показатель, являются глубина до целевого объекта, мощность и протяженность по латерали, удельное сопротивление объекта и фоновое сопротивление, сложность в геологическом отношении и количество возможных анти-моделей. Новая информация об этих факторах может изменить геологические показатели в худшую или лучшую сторону.

Показатели 1 и 2 присваиваются случаям, в которых предполагаемый отклик от целевого объекта слабый, возможно, из-за того, что он находится на

большой глубине, слишком маленький или слишком мало отличается по удельному сопротивлению. Самые низкие показатели даются также случаям со слишком сложной для текущей методологии геологической ситуацией; например, если имеются серьезные проблемы с отделением сигнала целевого объекта от фоновых эффектов, или слишком высокая геологическая неопределенность в связи с отсутствием или слабой информацией о возможных анти-моделях. Показатели 3 и 4 представляют случаи с умеренными предполагаемыми сигналами и умеренной геологической сложностью и неопределенностью. Показатели 5 и 6 присваиваются случаям с предполагаемым интенсивным откликом, простой геологической обстановкой и низкой геологической неопределенностью, особенно в отношении анти-моделей.

Все примеры с геологическими показателями 1 и 2 классифицируются как слабые/неубедительные. В нашей базе данных имеется множество сложных случаев; глядя назад, значительная часть этих съемок не должна была состояться. Здесь может быть несколько причин, почему мы все-таки имеем эти данные. Многие из этих съемок относятся к раннему периоду, и на проведение большинства из них оказало влияние сочетание большого доверия к новым методам и желания исследовать пределы, в которых можно работать с EM, плюс готовность рисковать, используя новую методологию. Также фактором могло быть качество раннего анализа применимости. Другим важным объяснением была ограниченная информация об удельном сопротивлении в различных геологических ситуациях, особенно при электрической анизотропии. Электрическая анизотропия зачастую значительна и важна, и это и сегодня остается важной темой исследований.

Значительная часть случаев с признаком 4 или более в этом исследовании оценена как убедительные (положительные или отрицательные), а все случаи до показателя 6 убедительные. Для случаев с признаком 5 только старый случай по съемке 2003 года определяется здесь как неубедительный, за исключением его высокого геологического

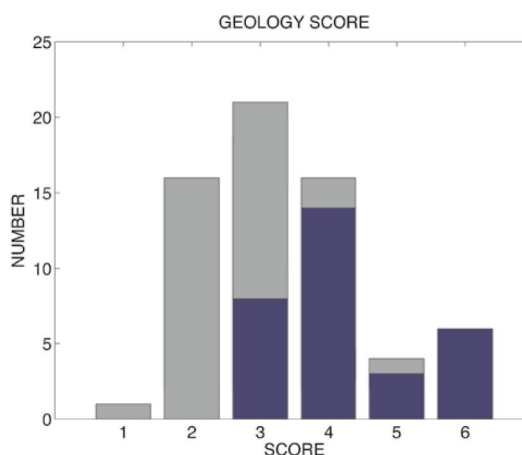


Рисунок 8 Показатель EM геологии данных (слабый или неудовлетворительный серым цветом, удовлетворительный – синим)

показателя. Этот ранний пример может быть объяснен низкими показателями качества данных (1) и анализа (2).

Итак, рисунки 6-8 показывают четкую тенденцию, что улучшение всех трех факторов (качество данных, анализ данных и геологическая применимость) дает более убедительные прогнозы CSEM. Более того, лучшее качество данных и лучший анализ данных открывают возможности определения более мелких и более глубинных целевых объектов в более сложных геологических условиях.

Ценность информации

Ценность данных CSEM зависит от того как они влияют на принятие решения при поисках и разведке. Представим простую ситуацию *бурить или не бурить*, где затраты на бурение - C , чистая приведенная стоимость - V (включая стоимость бурения), а априорный шанс на успех без информации CSEM - $P(S)$. Предполагаемая (или рискованная) чистая приведенная стоимость без CSEM тогда составляет

$$E(V) = P(S)V - C.$$

Затем выберем простое правило принятия решения, на основании которого мы бурим перспективный участок, если предполагаемая ценность положительна, в противном случае не бурим. Проблема теперь заключается в том, выгодно ли приобретать данные CSEM перед принятием решения *бурить, или не бурить*.

Ценность данных CSEM определяется как предполагаемая ценность с данными CSEM минус предполагаемая ценность без данных CSEM. VOI (ценность информации) представляет максимум, который мы хотим заплатить за данные. Мы упрощаем условия, считая, что на вероятность успеха влияет только CSEM, и пренебрегая возможным влиянием размера перспектив и чистой приведенной стоимостью. Мы определяем здесь сигнал CSEM как двоичный показатель, где CSEM положителен, если увеличивает шанс на успех (вероятность успеха больше, чем вероятность провала), в противном случае - отрицателен.

На рисунке 9 приведен пример ценности данных CSEM как функции априорного шанса на успех (без CSEM), а чистый доход представляет величину, когда стоимость бурения составляет $C = \$100$ миллионов. Пример основан на нашем опыте работы с базой данных и представляет типичный и реальный перспективный участок; шанс положительного CSEM составляет 0.8, если случай благоприятный, и 0.2 при неудаче. Модифицированные (апостериорные) возможности вычислены по закону Байеса для положительных и отрицательных сигналов CSEM, а предполагаемый чистый доход представляет ценность перспективного участка, когда используется информация CSEM. Выбор принятия решения основан на модифицированной конечной вероятности, а не только на показаниях CSEM.

Экономическая ценность данных CSEM обычно растет с увеличением эффективности прогнозирования. Очевидно, что неубедительные данные не имеют ценности, в то время как полная информация представляет верхний предел ценности. Данные CSEM должны рассматриваться как несовершенная информация с реальными возможностями для правильного и ошибочного прогнозирования. Мы отмечаем, что правильное принятие решения не всегда гарантирует желаемый результат, но, в конечном счете, он будет лучшим на основании имеющейся информации.

Ценность информации (VOI) всегда самая высокая в трудных условиях принятия решения, когда предполагаемая ценность проекта близка к нулю, и небольшие изменения в параметрах ввода могут изменить выбор решения *бурить, или не бурить*. На типичном примере (рисунок 9) мы видим, что в случае, когда трудно принять решение *бурить или пропустить*, ценность может быть более \$50 миллионов. Ценность данных CSEM имеет непосредственное отношение к изменению решения - либо планы на бурение отменяются на основании отрицательного CSEM, либо на основании положительного CSEM бурится незапланированная скважина. Если стоимость съемки CSEM составляет \$5 миллионов, пример показывает, что

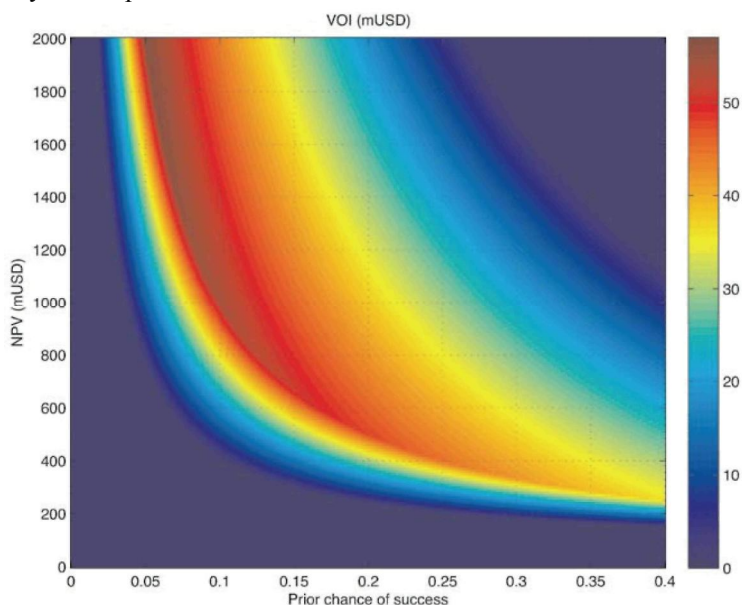


Рисунок 9 Ценность данных CSEM (\$ миллион) как функция априорной вероятности успеха и чистой прибыли представляет стоимость проекта

предполагаемая ценность информации CSEM может быть больше 10-кратной стоимости съемки. В условиях принятия решения *бурить или не бурить* абсолютным верхним пределом VOI является стоимость бурения.

Ценность CSEM более низкая, когда выбор принятия решения более простой. Если перспективная площадь с высокой ценностью и высокими шансами на успех будет разбурена, что бы ни показывали данные CSEM, ценность их равна нулю. И наоборот, если перспективная площадь с низкой рисковой стоимостью пропущена, то что бы ни показывали данные CSEM, ценность их также равна нулю. VOI никогда не будет отрицательной до закупки данных, мы можем минимизировать количество невыгодных съемок и довести до максимума ценность данных CSEM.

Концепция VOI, представленная здесь, включает только ценность, связанную с реальным принятием решения *бурить или не бурить*, пренебрегая потенциальной ценностью данных при других условиях, например, картирование контура перспективной площади, принятие решения о местоположении буровой и проектная производительность последней используются как калибровка для других практических случаев. Реальная ценность данных CSEM может поэтому быть значительно больше, чем предварительно рассчитанная VOI.

Обсуждение и заключение

CSEM при поисково-разведочных работах на углеводороды имеет короткую промышленную историю - менее 10 лет, и в течение этих лет мы наблюдали устойчивое развитие технологии. Оценка базы данных CSEM компании Statoil показывает, что последние данные имеют четкое влияние на риски, тогда как старые съемки во многих случаях являются слабыми и неубедительными.

Положительные тенденции связаны с улучшениями качества данных, анализа данных и способности применять поисково-разведочные работы методом CSEM в соответствующих геологических условиях.

Мы думаем, что дальнейшие улучшения точности измерений, конфигурации съемки и интенсивности источника, вместе с более точным моделированием и инверсиями позволят обнаруживать более глубокозалегающие объекты малых размеров в областях более сложного геологического строения. Дополнительно к улучшениям качества данных CSEM и анализу, возрастающий опыт использования комплексной интерпретации будет определяющим при более полном использовании информации, содержащейся в данных CSEM. В этом отношении весьма важным для выполнения количественных прогнозов будет использование сейсмической структурной информации и данных петрофизики.

Таким образом, хотя оценка нашей базы данных CSEM до 2008 года показывает, что технология CSEM постоянно прогрессировала, и что теперь мы получаем больше данных, чем раньше, мы также видим, что необходимо дальнейшее развитие,

чтобы применять метод к более широкому набору поисковых объектов. Мы считаем, что возможен дальнейший прогресс технологии.

Экономическая ценность данных CSEM может быть спрогнозирована для конкретных поисково-разведочных условий с помощью стандартного анализа принятия решения. На основании исторического анализа и обзора эффективности прогнозирования по данным CSEM типичные и реальные показатели означают высокую ценность CSEM для принятия лучших решений.

Литература

- Bratvold, R., Bickel, J. E. and Lohne, H. P. [2009] Value of Information in the Oil and Gas Industry: Past, Present and Future. (SPE 1103778), *SPE Reservoir Engineering and Evaluation*, 12(4), 630—638.
- Eidesmo, T., Ellingsrud, S., MacGregor, L., Constable, S., Sinha, M. C., Johansen, S., 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, 144—152.
- Eidsvik, J., Bhattacharjya, D. and Mukerji, T. [2008] Value of information of seismic amplitude and CSEM resistivity. *Geophysics*, 73(4), R59-R69.
- Ellingsrud, S., Sinha, M. C., Constable, S., Eidesmo, T., MacGregor, L. and Johansen, S. [2002] Remote sensing of hydrocarbon layers by sea bed logging (SBL): Results from a cruise offshore West Africa. *The Leading Edge*, 21, 972-982.
- Hesthammer, J., Stefatos, A., Boulaenko, M., Fanavoll, S., and Danielsen, J. [2010] CSEM performance in light of well results. *The Leading Edge*, 29(1), 34-41.
- Johansen, S., Brauti, B., Fanavoll, S., Amundsen, H. E. F., Wicklund, T. A., Danielsen, J., Gabrielsen, P., Lorentz, L., Frenkel, M., Dubois, B., Christensen, O., Elshaug, K. and Karlsen, S. A. [2008] How EM survey analysis validates current technology, processing and interpretation methodology. *First Break*, 26, 83-88.

Corresponding author, E-mail: abu@statoil.com