

Будущее морских работ методом CSEM

В 2002 году Норвежская компания Electromagnetic Geoservices (EMGS) вывела на рынок новую концепцию морских электромагнитных съемок с контролируемым источником для поисково-разведочных работ на углеводороды. Ныне, почти 10 лет спустя, Jens Danielsen, вице президент по геологии и геофизике, и Bekker,* CEO, обсуждают как развивалась в свете коммерческого опыта компания, ее технология и представления.

Прошло почти десять лет со времени проведения первой промышленной морской электромагнитной съемки с контролируемым источником (CSEM). Новый метод, названный впоследствии геофизические исследования морского дна или SBL (Sea Bed Logging), снискал множество одобрений и часто упоминался в прессе как «революционный» и «новаторский», слова, которые с такой готовностью применяются к новым идеям. Так оправдал ли метод первоначальные ожидания?

Пожалуй, есть ощущение, что в течение первых пяти лет возможности морских исследований CSEM были переоценены, хотя результаты съемок всегда представлялись осмотрительно и осторожно. Статистические анализы тех съемок CSEM, для которых имеются скважинные данные, не оставляют сомнения в том, что метод работает. Проблема заключается в той ценности, которую метод может добавить к поисково-разведочным работам, особенно в сочетании с сейсмическими и другими данными. В этой статье мы рассказываем о современном состоянии метода, описываем последние достижения и излагаем представление компании EMGS относительно завтрашнего дня морских исследований CSEM.

Широкое признание

Так как морская съемка CSEM может дать информацию об удельном сопротивлении геологической среды, на которое существенно влияет порово-флюидное удельное сопротивление, она часто рассматривается как идеальный «партнер» для сейсмических съемок, которые в первую очередь оценивают строение пород. Не секрет, что представление зачинателей морских съемок CSEM заключалось в том, чтобы новый метод регулярно использовался совместно с сейсмическими съемками. В конце концов, почему бы геологоразведчики стали бурить без предварительного анализа удельного сопротивления, которое является важнейшим показателем присутствия углеводородов в нефтегазовой отрасли с 1920-х годов? Так ли широко использовался метод?

Мы можем говорить только на основании нашего собственного опыта. Компания EMGS в настоящее время провела более 500 промышленных морских съемок CSEM, которые включают расстановку и сборку более 21100 приемников и буксируемых источников на расстоянии более 74000 км (Рисунок 1). Нашими услугами воспользовались более 40 нефтяных и газовых компаний, включая национальные нефтяные компании, крупнейшие и независимые компании, а также государственные органы. Мы также провели несколько успешных

компаний с участием нескольких заказчиков, на общей площади в 20000 км².

Съемки были выполнены во всех нефтяных и газовых провинциях мира и во всех геологических условиях - от Арктики до Австралии, от определения потенциальных потребителей в слабоизученных регионах до анализа (оценки) перед закрытием в зрелых бассейнах, и при глубинах дна от 30 м до 3400 м.

Все больше компаний открывает преимущества морских исследований методом CSEM. В частности, в течение последних шести месяцев был «бум» вокруг методов CSEM, который напоминает оживление 2005/2006 годов. Несколько компаний регулярно используют метод в своих комплексах исследований, особенно для классификации и снижения рисков перспективных участков до выполнения обязательств по бурению.

Ускорению адаптации метода способствовал быстрый переход от 2D к 3D данным CSEM, которые могут быть более эффективно соотнесены с 3D геологическими и 3D сейсмическими данными. Существенно, что несколько компаний разработали внутреннюю экспертизу морского CSEM и повысили доверие к ее использованию благодаря опыту и собственным исследованиям. Еще больше компаний близки к достижению этого уровня доверия.

Конечно, крупные энергетические компании начинают завладевать технологией путем финансирования общепромышленных проектов (JIP). Например, компании Shell и EMGS имеют JIP по планированию и конструированию источника следующего поколения для 3D морского CSEM, приемника и системы позиционирования. Этот проект нацелен сделать шаг вперед в изменении глубины проникновения и разрешающей способности исследований CSEM. Есть надежда, что система следующего поколения, по крайней мере, удвоит количество перспективных нефтегазоносных участков, которые могут быть оценены с помощью CSEM.

Признание метода будет продолжаться, если компании смогут увидеть преимущества объединения данных CSEM, сейсмических, скважинных и других данных для снижения рисков поисково-разведочных работ и для целей разработки, оценки и подсчета запасов.

Доказательство полезности

Данные съемки и результаты бурения являются коммерчески важными. Это затрудняет оценку вклада новой технологии. Однако почти десять лет после первой коммерческой съемки существует информация для анализа по 50

EM/Potential Methods

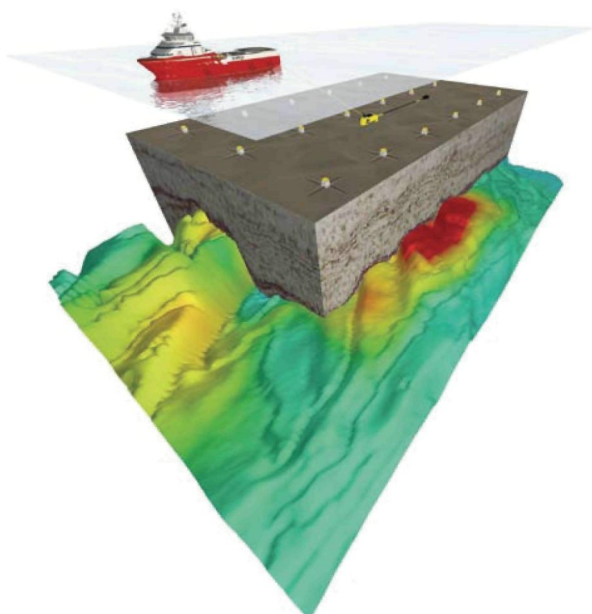


Рисунок 1 Метод CSEM: судно, ведущее съемку, буксирует мощный электромагнитный (EM) источник. Чувствительные донные датчики регистрируют энергию EM, которая наведена телами, расположенными в геологической среде и имеющими электрическое удельное сопротивление, включая углеводородные резервуары.

скважинам, пробуренным на площадях, перспективных по данным морских съемок методом CSEM; например, обзор Fanavoll и др., 2010. Авторам статьи было неизвестно множество параметров, и не были предприняты попытки проинтерпретировать какие либо данные, за исключением определения в электрическом поле на опорных частотах некоторого элементарного наблюдаемого нормализованного аномального амплитудного отклика. Это улучшило согласованность при сравнении разных массивов данных. Нормированный аномальный сигнал (NAR) является реакцией на изменение удельного сопротивления чего-то с аномальным сопротивлением относительно фонового удельного сопротивления в геологической среде.

Из 50 морских съемок CSEM, проанализированных Fanavoll и др., 30 имело NAR более 15%, что в условиях отсутствия полного анализа указывало на то, что бурение вероятнее всего вскрыет углеводороды. Из этих 30 вероятных перспективных участков 21 были отнесены к скважинам обнаружения – коэффициент результативности разведочного бурения 70% по сравнению с коэффициентом результативности 35% для NAR менее 15%. Хотя очевидно, что морские съемки CSEM не исключают риск, подобные этому исследованию показали, что при правильном применении они могут существенно уменьшить риск.

3D – предпочтительная съемка

Благодаря многим преимуществам, 3D методы морских CSEM почти полностью заняли место 2D съемок. За минувшие два года более 95% дохода EMGS было получено от 3D съемок. За это время мы спустили на воду два судна, построенных для целей 3D CSEM, с возможностью эффективно обслуживать огромное количество приемников, требуемых для 3D

съемок (Рисунок 2). Каждое судно может разворачивать плотную сеть приемников, что существенно увеличивает производительность 3D съемки. Наши рабочие статистические данные показали, что каждое судно может проводить в месяц 3D съемку CSEM на площади более 1000 км².

Морские исследования CSEM на углеводородные резервуары с использованием 3D сетей по сравнению с 2D профилями значительно расширили применение метода. В 3D съемке приемники регистрируют данные вдоль и вкрест линии буксируемого источника. Преимущества 3D съемки включают лучшую разрешающую способность и лучшее оконтуривание границ как по площади, так и по вертикали, что дает улучшенные объемные оценки для анализа и повышенную объектную (целевую) достоверность благодаря лучшим представлениям о трендах фонового удельного сопротивления и анизотропии. Например, информация о мощности резистивного тела содержится в набортных данных CSEM, поэтому 3D данные улучшают разрешение по мощности углеводородного резервуара при анизотропной инверсии.

Быстрому росту 3D съемок CSEM вероятно способствовало более легкое использование их данных. В большинстве случаев, прежде чем может быть оценена значимость аномального сигнала, съемка CSEM должна быть настроена на соответствующую геологическую и геофизическую среду. Сбор и обработка 3D данных дает лучшее и более устойчивое истолкование фонового сигнала, что важно, если интерпретаторам нужно обнаружить аномалии. Тренды в данных CSEM, наблюдаемые также и в сейсмических данных, помогают подтвердить правильность фоновых моделей. В 2D исследовании имеется гораздо больше неопределенностей, связанных с фоновым сигналом, а у небольших аномалий мало шансов повторной регистрации.

Улучшенная интеграция

Существует два разных, в равной мере важных, аспекта интеграции: первый – совместная визуализация и визуальный контроль нескольких массивов данных, и второй – использование двух массивов данных в алгоритме обработки. Первый аспект извлекает пользу из второго, но преимущество и ценность первого подхода достигаются большим



Рисунок 2 До 200 приемников может храниться на борту судна с большим водоизмещением, принадлежащего компании EMGS и ведущего съемку 3D CSEM. Больше количество приемников означает более крупную и более сложную съемку и больше точек наблюдения на км² для улучшенного покрытия 3D данными.

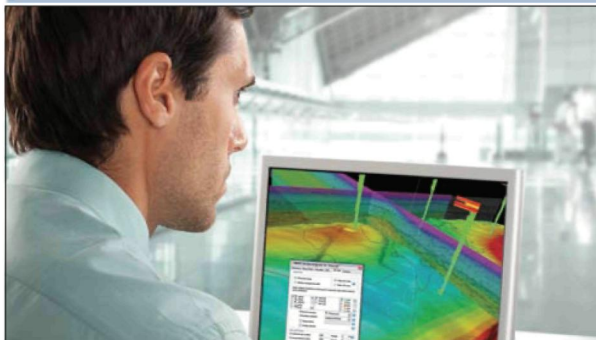


Рисунок 3 Снимок экрана со встроенным модулем Bridge Electromagnetics Petrel, показывающий объединенные CSEM, сейсмические и скважинные данные.

опытом. Квалифицированные интерпретаторы с широким кругозором могут извлечь много пользы просто построением кросс-плотов и совместной визуализацией сейсмических атрибутов и CSEM.

В то время как за последние несколько лет обработка и моделирование стали более сложными, данные морского CSEM стало легче интегрировать и интерпретировать. Модели и 3D кубы удельного сопротивления даются в стандартных форматах SEG-Y, и в настоящее время существуют дополнительные модули Petrel, такие как Bridge Electromagnetics в Blueback Reservoir, разработанные совместно с компаниями EMGS (Рисунок 3) и EMConnect (WesternGeco).

Данные CSEM должны стать неотъемлемой частью «сюжета» перспективных площадей, «сюжета», который объясняет присутствие или отсутствие EM аномалии, точно так же они должны быть согласованы с сейсмическими и другими данными и иметь геологически правдоподобные нефтематеринские породы, пути миграции и покрывки. Ответственность за интерпретацию этого материала лежит на геологической и геофизической группе энергетической компании. Хотя многие нефтегазовые компании по-прежнему полагаются на экспертов в геофизических компаниях, мы надеемся, что эта ситуация меняется по мере приобретения опыта интеграции и интерпретации данных CSEM.

Второй подход к интеграции, основанный на алгоритме, больше направляется геофизикой и основан на моделировании и инверсии данных CSEM. За исключением качества данных и эффективности их получения, это те случаи, когда ведется борьба за лидерство в технологии среди подрядчиков CSEM. Полная 3D инверсия является дорогостоящим процессом и имеет больше общего с сейсмической инверсией полного сейсмического сигнала, чем с сейсмической глубинной миграцией. Она требует недель для подготовки и вычислений, именно поэтому мы в EMGS приложили так много усилий для разработки эффективных алгоритмов.

Важность рассмотрения анизотропии показана на примере по Юго-Восточной Азии. Интерпретации основанные на изотропных и анизотропных 3D инверсиях, отличались, первые были неспособны согласовать данные по профилям, поперечным к линии буксирования источника, а последние

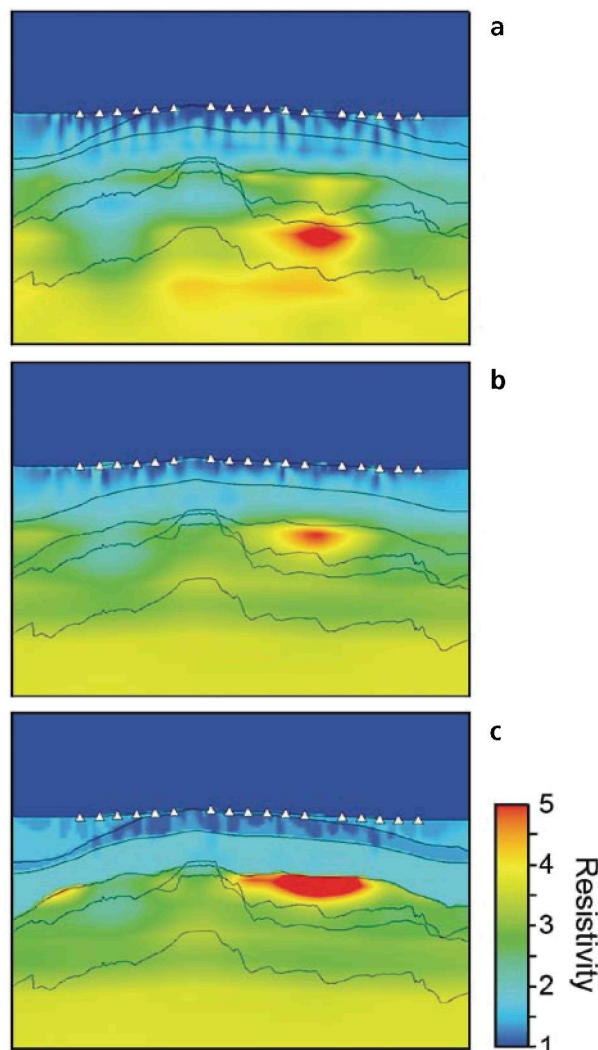


Рисунок 4 Изотропный (a), анизотропный (b) и ограниченный в структурном отношении анизотропный (c) результаты 3D инверсии для полного 3D массива данных. Улучшенная интерпретация изменила представление заказчика о ценности перспективной площади.

согласовали данные и соответствовали геологической модели, построенной до съемки. Заключительная интерпретация с использованием анизотропных 3D инверсий предполагала, что продуктивность ограничена одной третью от исходной перспективной площади. Это существенно сократило ее потенциал и показало, что наиболее перспективное место для бурения не находится в самой высокой точке структуры (рис. 4a и b) (Mohamad et al., 2010). В этом случае выполнение анизотропной 3D инверсии дало возможность заказчику обновить классификацию по перспективности и принять решение о перемещении места бурения или изменении очередности проведения буровых работ.

Наши алгоритмы и вычислительные возможности позволяют нам регулярно проводить глубинное преобразование огромных массивов данных EM в анизотропные кубы удельного сопротивления. Элемент интеграции вводится с использованием структурной информации, полученной по сейсмическим данным, информации об удельном сопротивлении, полученной по данным скважинного каротажа, и другой информации. Затем,

по мере поступления дополнительной информации, снова выполняется инверсия. С помощью дополнительных сейсмических данных отдельные структурные модели и модели удельного сопротивления затем могут быть объединены в единую модель (структурная+удельное сопротивление), рисунок 4с (Mohamad et al., 2010).

Окончательный комплексный инструмент обработки - объединенная инверсия, особенно сейсмических данных и данных CSEM. Реальная ценность совместной инверсии состоит не в добавлении структурных ограничений, которые обычно уже введены, а в том, что акустические импедансы по сейсмической инверсии объединяются с информацией удельного сопротивления порового флюида по инверсии CSEM. Дополнительные результаты количественной обработки по совместной инверсии будут особенно важными для оценки резервуара и подсчета запасов.

Объединение с сейсмическими, каротажными и другими данными очень важно для извлечения максимальной пользы из морских съемок CSEM. Мы обратили внимание, что включение информации по сейсмическим данным в совместную интерпретацию могло бы повысить разрешающую способность. И наоборот, интеграция может быть также важной для извлечения максимальной пользы из сейсмических данных. Хотя сейсмические методы являются основными в поисково-разведочных работах и имеют большую разрешающую способность, чем методы CSEM, они мало говорят нам о насыщении резервуара, потенциально содержащего углеводороды. Объединение с данными CSEM может способствовать уменьшению рисков при бурении нерентабельных резервуаров.

К тому же данные CSEM могут помочь интерпретаторам сейсмических данных сосредоточиться на самых перспективных площадях богатого деталями массива данных. Картирование антиклинальных структур является важной частью сейсмической интерпретации, но иногда, например в Niger Delta, мощные пески-коллекторы могут быть связаны с руслами и конусами выноса и не обязательно совпадают с деформационными структурными замыканиями. Хорошие коллекторы (резервуары) могут быть связаны со стратиграфическими ловушками, которые часто трудно выявить по сейсмическим данным. Данные CSEM в равной степени чувствительны к структурным и стратиграфическим ловушкам. В этом сценарии объединение сейсмических и CSEM данных может помочь интерпретатору сейсмических данных найти стратиграфические ловушки по сейсмическим данным и ответить на основной вопрос - сохранила ли углеводородное заполнение клиноформа, выявленная по сейсмическим данным.

Расширение области применения EM

Хотя в расширении области применения морского CSEM был достигнут большой прогресс, в частности, в увеличении диапазона глубин дна, в настоящее время морской метод CSEM имеет более узкую область применения, чем сейсмические методы. Конечно, некоторые объекты не могут быть

выявлены с помощью современной технологии CSEM, так как они находятся слишком глубоко или слишком малы, или залегают под солевыми отложениями и базальтами и т.д. Непрерывное расширение области применения является одной из самых важных задач для таких как мы геофизических подрядчиков, поскольку они стремятся расширить свои целевые рынки.

Глубина воды

Морские CSEM были восприняты как глубоководная технология из-за сильной интерференции поверхностных волн на малых глубинах. Последние разработки, в частности 2.5D и 3D схемы анизотропной инверсии, теперь могут справиться с дополнительной сложностью данных, измеренных на малых глубинах воды. Было выполнено несколько успешных съемок на водных акваториях с глубинами менее 100 м. В течение минувшего года мы провели пять съемок, предпринятых на акватории с глубиной менее 100 м.

В настоящее время полностью запущена в серийное производство новая схема расстановки, в которой электроды традиционного источника CSEM подвешены на двух буйах, позиционируемых по GPS, которые буксируются на глубине 10 м под водой. Расстановка имеет лучший контроль над положением источника и ориентацией, наряду с улучшенной скоростью и маневренностью. Результат этих и других разработок заключается в том, что минимальная глубина съемки теперь ограничивается только техническими требованиями к безопасности судна. При помощи глубоководного буксируемого источника мы получили глубину регистрации 3449 м (в процессе исследований для компании PEMEX в Мексиканском заливе).

Соль и базальт

Большинство съемок CSEM было выполнено для снижения рисков перспективных площадей и оценки — содержат ли они значительные объемы углеводородов. Однако появляется еще одно приложение, в котором EM и другие данные объединяются для изучения региональной геологии. Оно является чрезвычайно полезным для геологических ситуаций, в которых сейсмическая интерпретация или отображение сейсмических данных осложняется присутствием соли и вулканических пород, имеющих высокий импеданс.

Компания Statoil продемонстрировала использование данных CSEM для получения солевого изображения в Баренцевом море; и мы видели, что небольшие объекты, подтверждаемые результатами бурения, были обнаружимы с помощью 3D данных CSEM в соленосной провинции в Мексиканском заливе.

Морские магнитотеллурические данные (MT) могут быть особенно полезными для интерпретации региональной геологии, когда присутствуют соль и вулканические породы. Морские съемки MT по существу проведены одновременно со съемками CSEM. В этом году в Красном море мы будем проводить крупную морскую съемку EM с упором на данные CSEM и MT, преимущественно в поддержку

EM/Potential Methods

построения скоростной модели для создания изображения широко-азимутальных сейсмических данных.

Завершение эксплуатации месторождения

Классификация перспектив и снижение рисков перспективных площадей признанные приложения морских исследований CSEM. Однако метод также применяется в конце эксплуатации месторождения для определения пропущенных запасов. Например, исследование морского CSEM было использовано, чтобы определить местоположение и качество труднодоступного, как предполагалось, газа, который остается в месторождении Frigg Северного моря на основании воспроизведения истории эксплуатации месторождения и оригинальных оценок, а также пропущенного продуктивного пласта в сегментированных участках резервуара.

Съемка встретила сложности, такие как влияние трубопроводов, которые мало распространены при поисковых работах на неисследованных площадях. Для съемки такого типа система 3D данных CSEM по сети со всеми приемниками, регистрирующими азимутальные данные, имеет очевидное преимущество над 2D съемкой. Придонные трубопроводы, являлись причиной промышленных помех, особенно, если линия буксируемого источника и трубопровод были параллельны.

Конфигурация 3D съемки подразумевала здесь хорошее покрытие азимутальными данными, даже там, где значительное количество данных пришлось удалить. 3D моделирование, проведенное после съемки, подтвердило, что после редактирования для удаления промышленных помех съемка сохранила покрытие вдоль линии буксирования источника достаточное, чтобы детально исследовать структуры, представляющие интерес.

Области применения 4D мониторинга

Методы морских исследований CSEM возможно применять для мониторинга резервуара. В компании EMGS мы исследовали технические возможности 4D съемки CSEM с ограничениями по сейсмическим и/или скважинным данным для картирования удельного сопротивления в пределах крупных резервуаров. Повторные съемки для мониторинга добычи и заводнения, включающие различия между разными видами заводнения, уже являются технически выполнимыми, а усовершенствования в навигации и обработке, вероятно, улучшат повторяемость съемки.

4D морские исследования CSEM имеют приложения также при мониторинге секвестрации двуокиси углерода. Исследования показали, что 4D съемки CSEM для мониторинга инъецированного плюма двуокиси углерода при секвестрации на газовом месторождении Sleipner Ost в Северном море технически выполнимы. Как и при поисках нефти и газа, в этом приложении CSEM и сейсмические методы взаимно дополняют друг друга, при том, что первый чувствителен к полному объему резистора, а второй предлагает превосходное структурное разрешение. Необходимость этой области

применения расширяется, учитывая подчеркнутую International Energy Authority (2010) важность улавливания и хранения CO₂, как основных мер для смягчения изменений климата.

Области применения при мониторинге и оценке требуют преимущественно количественную интерпретацию. Кубы углеводородной насыщенности могут быть созданы путем объединения информации о пористости, полученной в результате сейсмической инверсии, с данными водонасыщенности по инверсиям CSEM, с ограничением данных обоих методов по данным каротажа.

Чем больше количественных данных интерпретации, тем более важно, что они получены по 3D массивам данных хорошего качества, и сейсмическим, и CSEM, с помощью устойчивых алгоритмов инверсии. Любые значительные неопределенности в данных и глубинном преобразовании непосредственно отражаются в кубах свойств пород. Компания EMGS сотрудничала с компанией Fugro-Jason для создания 3D кубов свойств пород на основании CSEM, сейсмической инверсии и петрофизического анализа. Результаты вскоре будут опубликованы.

Объекты меньше, глубина больше

Увеличение разрешающей способности метода CSEM и глубины проникновения требует улучшения основных принципов: качества данных и основных этапов обработки. Первое особенно требует существенных капиталовложений, чтобы можно было получить более точные данные с более высоким отношением сигнал-помеха.

Не-эксклюзивные приложения

Использование не-эксклюзивных сейсмических данных в поисково-разведочных работах - признанная бизнес-модель в поисках и разведке. Компания EMGS выполнила CSEM в условиях работы с несколькими клиентами и провела несколько крупных 3D кампаний в течение прошедших 2-3 лет. В настоящее время наш архив содержит более 20000 км² площадей, покрытых съемкой 3D CSEM, в Индии, Мексиканском заливе и Норвегии, и мы планируем несколько новых проектов.

Информация об удельном сопротивлении особенно ценна для высококачественного покрытия в сочетании с 2D и 3D сейсмическими данными, это дает поисковым компаниям конкурентное преимущество на этапе лицензирования. В течение 20 и 21 раундов лицензирования в Норвегии наше обширное покрытие данными CSEM в Баренцевом море было активно использовано несколькими поисково-разведочными компаниями и принесло некоторым из них первый недорогой опыт использования данных CSEM.

Ключом к успеху этих не-эксклюзивных кампаний CSEM явилась способность получать с оптимальными затратами обширные, широко-азимутальные 3D данные. Мы рассчитываем, что бизнес-модель работ с несколькими клиентами

продолжит развиваться и станет важным механизмом, с помощью которого будет расширяться адаптация данных CSEM.

* Corresponding author, E-mail: rbekker@emgs.com

Будущее

В компании EMGS наше представление относительно того, какими бы мы хотели видеть морские исследования CSEM, остается прежним. Они должны стать стандартными инструментами анализа и поисково-разведочных исследований на углеводород, которые повседневно обеспечивают ценность энергетических компаний, помогая им более эффективно и с меньшим воздействием на окружающую среду обнаруживать углеводороды, так что они принимают более обеспеченные информацией решения по поиску, добыче и снижению рисков. Мы также видим новые области применения, такие как помощь при построении сейсмического изображения на проблемных площадях; мониторинг и оценка резервуаров; и мониторинг углеродной секвестрации.

В ближайшей перспективе мы видим данные морских CSEM и МТ, которые используются совместно по умолчанию, даже для крупных 3D съемок. Будут также получены более устойчивые кубы свойств пород, рассчитанные по сейсмическим и CSEM данным, и значительно улучшенные алгоритмы инверсии.

Если говорят о разработке технологии CSEM, интерпретация является аспектом, который часто игнорируется; не в плане методов инверсии, а в плане человеческого фактора — геологов и геофизиков, старающихся осмыслить детальные массивы данных. Что касается сейсмических данных общеизвестно, что лучшими интерпретаторами являются те, кто признал, что значительная часть данных включает в себе смысл. Геофизические подрядчики станут лучше представлять и передавать информацию, способствующую продвижению вперед технологии, а интерпретаторы нефтяных компаний будут постоянно наращивать свой опыт.

За некоторым исключением, компании морских CSEM в настоящее время выполняют значительную часть работ по интеграции и интерпретации для нефтяных и газовых компаний. Поскольку энергетические компании совершенствуют опыт и приобретают уверенность в использовании данных морских CSEM, они будут запросто интегрировать и интерпретировать данные — как часть своей обычной деятельности по поискам, разведке и разработке месторождений. Когда это произойдет, рынок исследований EM несомненно взлетит вверх.

Литература

- Fanavoll, S., et al. [2010] Controlled source electromagnetic technology and hydrocarbon exploration efficiency. *First Break*, 28(5), 61-69.
- International Energy Authority [2010] *Energy Technology Perspectives 2010*.
- Mohamad S. A. et al. [2010] A practical example why anisotropy matters — A CSEM case study from South East Asia. *79th SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts, 29, 1, 696-700.