

Применение данных электромагнитных зондирований с контролируемым источником в исследовании прибрежных месторождений юго-восточной Бразилии

Experience with CSEM offshore southeast Brazil

Michael S. Costello*

Введение

В течение 2004 и 2005 гг. компания Shell Brasil (SBEP) приобрела на особом основании данные электромагнитных зондирований с контролируемым источником по следующим бассейнам юго-восточной Бразилии: Campos, Santos и Espirito Santo (рис. 1). Данные 2004 г. (~1600 км) были получены компанией PGS, а данные 2005 г. (~1200 км) — компанией Electromagnetic Geoservices (EMGS).

Shell оценил данные электромагнитных зондирований с контролируемым источником по ряду аналогичных месторождений, включая открытие в 2002 г. компанией Shell месторождение O-North в бассейне Campos. По ходу мы получили калибровку методики и успешный прогноз электромагнитного поля до бурения прежде, чем Shell открыл месторождение Nautilus. При интерпретации данных этих больших съемок мы также столкнулись с местоположениями, где технология электромагнитного зондирования с контролируемым источником была неэффективна. После этого опыта мы теперь имеем более практичное представление о сильных и слабых сторонах метода. В итоге мы пришли к выводу, что электромагнитные зондирования с контролируемым источником можно часто использовать в комплексном подходе для принятия разведочных решений. Мы также испытываем новую технологию для повышения разрешающей способности электромагнитных зондирований.

Результаты калибровки и прогнозируемый успех

До настоящего времени Shell получил данные электромагнитных зондирований с контролируемым источником по четырем месторождениям, для трех из

которых результаты могут быть интерпретированы. В данном разделе мы обсуждаем результаты электромагнитных исследований по двум разнотипным месторождениям. Для первого месторождения, открытого Shell (O-North/B-West в Блоке BC-10 бассейна Campos), мы получили превосходные результаты. Для второго месторождения, в промышленной скважине бассейна Santos, мы получили плохие результаты для глуболежащего резервуара, плохо проявившегося из-за приповерхностных слоев большого сопротивления. Мы также обсуждаем прогнозный успех открытого нами месторождения Nautilus, расположенного около аналогичного месторождения O-North.

Месторождения O-North и смежное с ним B-west сложены соответственно эоценовыми и палеоценовыми отложениями (рис. 2). Резервуары, по-видимому, связаны друг с другом через эрозионное окно в канальных палеоценовых песках месторождения B-west в несогласии в кровле эоцена. Границей ловушки для O-North является несогласное трансгрессивное залегание эоценовых песков выше по падению, на север и восток. Для комплекса трехмерные данные и четыре участка выхода нефти в скважинах, включая очень тонкий нефтяной коллектор, обозначенный как O-South, обеспечивающие хорошими калибровочными данными для построения модели резервуара. Чуть к югу от части месторождения, где получены выходы нефти, наблюдаются некоторые слабые амплитудные аномалии, что может указывать на наличие тонких дополнительных коллекторов в данном месторождении.

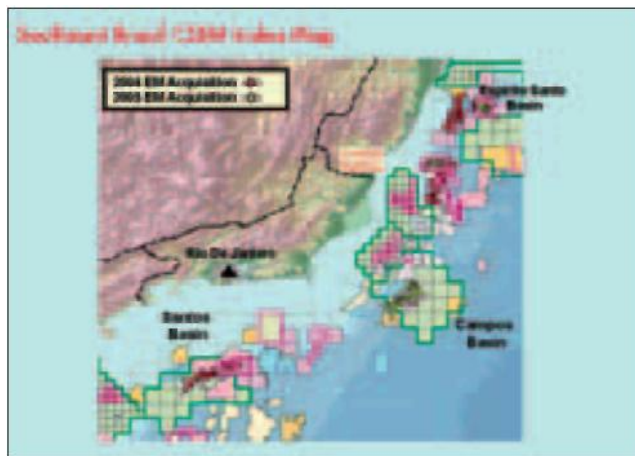


Рис. 1. Карта расположения бассейнов юго-восточной Бразилии. Показаны области, где в 2004 и 2005 гг. проводились электромагнитные съемки.

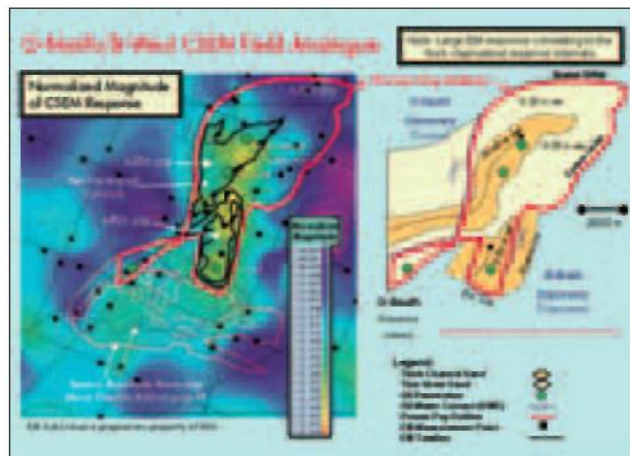


Рис. 2. Электромагнитные амплитуды и модель резервуара для O-North/B-west.

*michael.costello@shell.com

Резервуары данного комплекса располагаются на глубине в приблизительно 1300 м ниже линии глин и примерно на 1600 м ниже глубины моря. Песчаный коллектор имеет размеры от нескольких метров в месте выклинивания резервуара до 70 м в середине палеоценового канала. Продуктивный песчаник имеет удельное сопротивление 20-30 Ом*м, а фоновое удельное сопротивление составляет 1-2 Ом*м. Мы получили электромагнитные данные по этим месторождениям для целей калибровки. На рис. 2 приведена зависимость картированного Shell электромагнитного отклика от изопакит коллектора, полученных по детальным моделям резервуара.

Мы использовали традиционную методику получения карты электромагнитных амплитуд, где значения компонент электромагнитного поля на общем удалении расположены в средней точке между источником и приемником. Это черные квадраты на карте электромагнитных амплитуд, приведенной на рис. 2. Эти величины безразмерны, поскольку они представляют собой отношение между напряженностью электромагнитного поля в обозначенных точках и напряженностью на «базовом» приемнике, расположенном далеко от любого потенциального резистора. После масштабирования по базовому приемнику измерения считаются нормализованными электромагнитными откликами. Выбор базового приемника может иметь большое значение для картируемых значений, поэтому при его выборе нужно быть внимательным. Позже в данной статье мы обсудим область, где базовые амплитуды проявляют сильную латеральную изменчивость, поэтому она принимается за «базовое поле».

По рис. 2 видно, что северо-восточная область комплекса O-north показывает слабый электромагнитный отклик, что обосновано тонкостью песчаных коллекторов из-за несогласного трансгрессивного залегания. Напротив, более толстые интервалы песка, связанные с системой каналов, показывают сильный отклик в пределах нефтеносной структуры, но слабый — за пределами этой структуры. На рис. 3 приведен сейсмический профиль через скважины, вскрывшие нефтеносные горизонты. Этот профиль соответствует профилю электромагнитного зондирования. В пределах альбского яруса мы интерпретируем глубоколежащую соль, а также региональный карбонатный разрез. Это слои очень высокого сопротивления, но они расположены достаточно глубоко относительно продуктивных песчаников, поэтому их влияние на величину удельного сопротивления мало по сравнению с эффектом коллекторов. Для других областей,

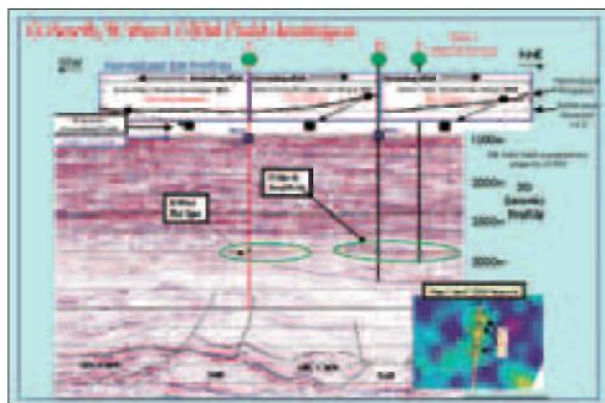


Рис. 3. Сейсмический разрез с электромагнитными профилями по месторождениям O-North and B-West.

как мы увидим позже в данной статье, в процессе интерпретации необходимо внимательно учитывать влияние карбонатов. Нормализованные отклики на двух приемниках по всем удалениям источника отмечены на сейсмическом разрезе. Наблюдается четкий рост электромагнитного сигнала над месторождением. В общем, мы заключаем, что электромагнитный отклик хорошо коррелируется с границами коллекторов. Кроме того, наша модель показала, что электромагнитный отклик для продуктивного интервала согласован по глубине.

Nautilus, месторождение, недавно открытое Shell в BC-10 приблизительно в 20 км к юго-западу от O-North, является примером точного прогнозного успеха электромагнитных зондирований. На рис. 4 также приводится сравнение до бурения одномерной модели и фактических электромагнитных данных. Вообще, модель подобрана хорошо. Электромагнитные амплитуды хорошо коррелировались с границами коллекторов, а также с соседним открытым месторождением. Таким образом, перед бурением мы пришли к уверенности в удельном сопротивлении после испытания на эксплуатационной скважине. Скважина в общей сложности прошла 43 м продуктивных отложений в двух главных зонах, Палеоцен и Кампанский ярус верхнего мела (см. рис. 4). Мы также столкнулись с некоторыми тонкими резистивными карбонатными солями Кампанского яруса, вклад которых в электромагнитный отклик небольшой. После бурения планируется более детальная оценка результатов электромагнитного зондирования.

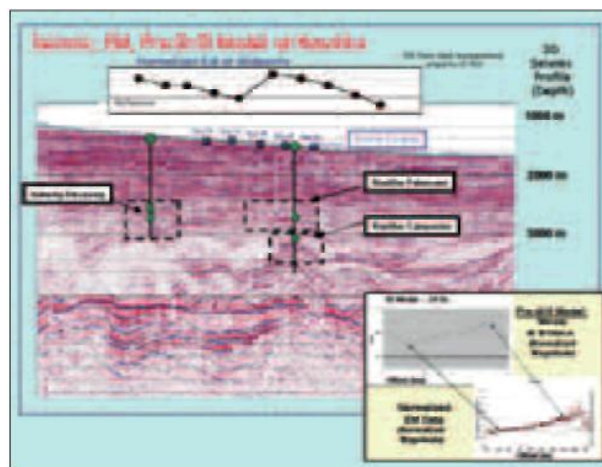


Рис. 4. Прогнозируемый успех в месторождении Nautilus.

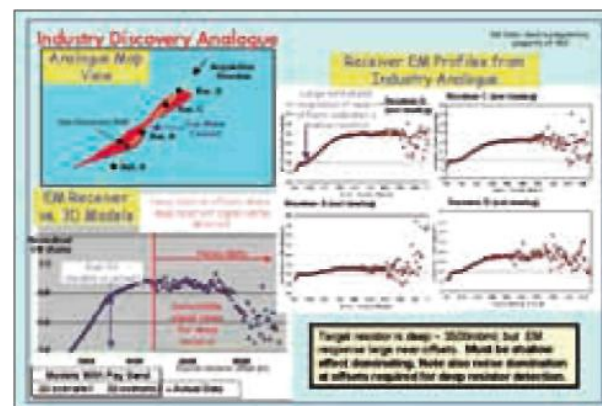


Рис. 5. Промышленный аналог Santos.

Nautilus, O-north и ряд подобных месторождений в крупной области BC-10 представляют класс резервуаров, идеально подходящих для электромагнитных зондирований. Они имеют относительно мало мощные покрывающие толщи, удельное сопротивление превышает фоновые значения и они не характеризуются сильной интерференцией от других тел. С другой стороны, метод электромагнитных зондирований требуется для выявления более тонких, особенно глубоких, горизонтов. Хорошим примером является скважина в бассейне Santos. Мы протестировали две трехмерные модели — первая без, а вторая с воздушной волной, включенной в отклик. Обе модели включали глубокий резистивный слой и были нормализованы на основе базовой фоновой модели, без этого слоя (рис. 5). Здесь мы интерпретировали поверхностный резистивный слой, искажающий любой отклик от глубоких слоев, поскольку обе модели продемонстрировали четкое несоответствие нормализованных откликов на ближних удалениях. Этот поверхностный резистивный слой, скорее всего, представляет собой слой мергеля. Мы также выяснили, что, поскольку резервуар расположен глубоко, то на удалениях, считающихся ключевыми для интерпретации, в сигнале преобладали шумы.

Из предыдущего примера мы узнали насколько важно на всех стадиях интерпретации данных электромагнитного зондирования полагаться на модели. Мы, как положено, запустили одномерное моделирование, как чрезвычайно быстрый метод анализа динамики грубого сигнала. Трехмерное моделирование более времяемко, однако, дает более точную прямую модель сигнала с ожидаемой напряженностью. Мы построили модели как с целевыми резистивными слоями, так и без них и посчитали отношение между этими моделями. Это отношение является функцией удаления от приемника. В самой простой форме эта функция аппроксимирует нормализованный отклик на коллекторе, соответствующий базовому приемнику, расположенному далеко от коллектора. Его форма коррелируется с глубиной резистивных тел, так как поверхностные резистивные слои обнаружены на более малых удалениях.

Мы часто сталкиваемся с ограничениями метода электромагнитных зондирований, однако теперь мы лучше понимаем, как обращаться со многими из них. Мы интерпретируем крупномасштабные региональные тренды, чтобы разделить истинные аномалии от большого количества региональных вариаций. Как пример, в одной области мы обнаружили большой региональный фон электромагнитного отклика, обоснованный удельным сопротивлением глубокой региональной карбонатной пачки. Рис. 6 показывает базовое «поле», вычисленное подборкой группы приемников, расположенных далеко от любых потенциальных залежей углеводородов. Мы проанализировали диаграммы каротажа сопротивлений, чтобы определить мощность карбонатных резистивных слоев данной области, вычисляя результат умножения толщины слоя на его удельное сопротивление и изображая график, как функцию глубины ниже линии глин. Мы также построили карту глубин ниже линии глин для карбонатного резистивного слоя по сейсмическим данным. Мы заметили хорошую корреляцию между базовым электромагнитным полем и уменьшением глубины залегания резистивных карбонатов к северо-западу по обеим скважинам и сейсмическим данным. Мы пришли к выводу, что более замысловатые методы, такие как инверсия электромагнитных данных, должны разделить переменную «фоновую» геологию от истинного углеводородного удельного сопротивления.

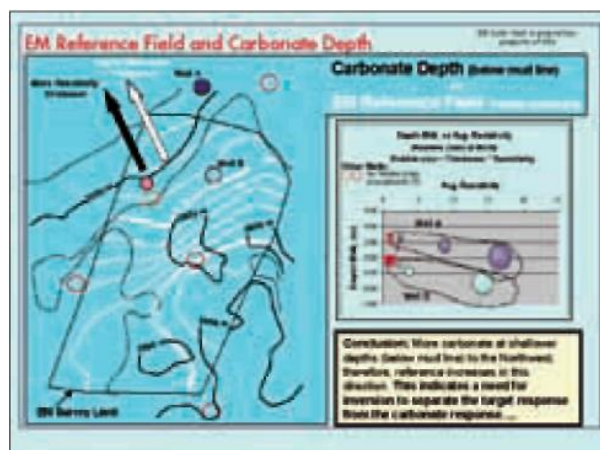


Рис. 6. Вариация опорного электромагнитного сигнала, вызванная удельным сопротивлением карбонатов.

Мы имели небольшие успехи в интерпретации для областей, осложненных солью и вулканокластическими отложениями. Такие ситуации требуют внимательного внедрения в процесс моделирования сейсмических и петрофизических данных. Другой большой проблемой является присутствие «воздушной» волны, которая может доминировать над сигналом в мелководье. Последние съемки мы проводили с дополнительными магнитными приемниками, которые в комплексе с электрическими приемниками позволили отчасти ослабить воздушную волну. Самым большим ограничением метода, конечно, является глубина интерпретируемости сигнала. Во всех случаях надежность конечной интерпретации может быть оценена пространственным положением аномалии относительно интерпретированного коллектора и соотношением амплитуды и фазы модельного электромагнитного отклика резервуара с фактическими значениями электромагнитных данных.

Риск и роль имеющегося опыта

Shell распознал нефтегазоносные структуры на юге бассейна Campos несколько лет назад, но был неспособен на адекватную разведку для подтверждения дальнейших действий. Ожидалось, хотя это очень рискованно, что коллектор содержит объемы больше одного миллиарда баррелей нефтяного эквивалента. Shell определил программу электромагнитных зондирований на 2005 г. как проверку жизнеспособности верхней части и обеспечение возможности уменьшения риска разведки.

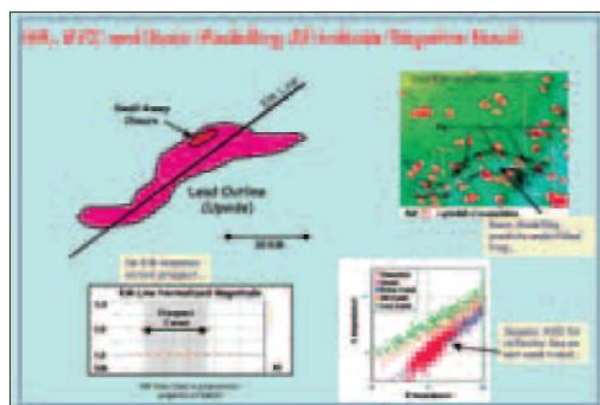


Рис. 7. Комплексная интерпретация по месторождению Campos.

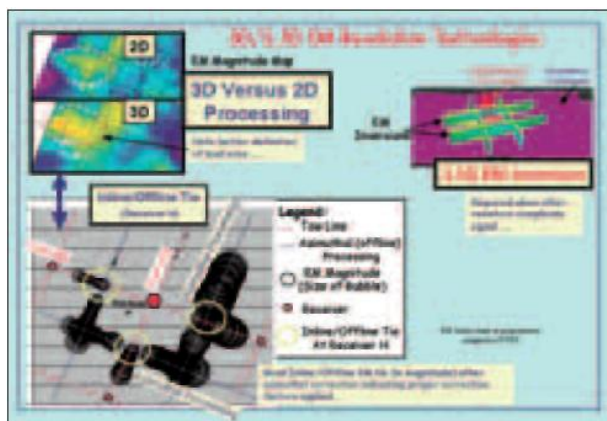


Рис. 8. 3D (азимутальная обработка) и 2.5D инверсии.

Вследствие ограничения времени на доказательство эффективности разведки, мы использовали имеющуюся ручную одномерную программу инверсии пакета Matlab для того, чтобы выполнить интерпретацию за один месяц после получения данных. Мы изменили программу, чтобы результаты моделирования были отображены в амплитуде, фазе и всех обработанных частотах, для получения наилучшего совпадения. Вместе с этим, мы выполнили полный пересчет многоволновой сейсмической инверсии и моделирование бассейна для поисковых целей.

Одномерная инверсия данных электромагнитного зондирования показала аномальное удельное сопротивление только для наиболее воздымающейся области и отрицательный результат для верхней части коллектора. Интересно, что мы получили такой же результат через изучение сейсмической инверсии, и наша оценка модели бассейна показала высокую вероятность незаполненной ловушки. Таким образом, мы использовали три метода доказательства, каждый в отдельности с высокой интерпретационной неопределенностью, для достижения единой интерпретации. Мы решили не проводить разведку из-за непривлекательности объемов и не включили данный случай в наш пакет (см. рис. 7).

Применение методики

Методика электромагнитных зондирований с контролируемым источником быстро продвигается, особенно в трехмерную область. Программа электромагнитных наблюдений 2004 г. включала 5-километровую приемную сетку электромагнитных исследований для поиска объектов на всей исследуемой площади. Shell заключила договор с Offshore Hydrocarbons Mapping (OHM) в Абердине на переобработку данных, кроме тех, которые были предоставлены на специальных условиях.

Мы оценили эффективность разведки, используя электромагнитные данные, обработанные отдельно (азимутально), так же как и в продольном направлении. В результате получили довольно плотную сетку данных с хорошими отдельными/продольными привязками для интерпретации (рис. 8). Эти данные дали более точную электромагнитную обрисовку ловушек, которые находятся между приемными узлами вычисленной сетки.

Данные, которые OHM передала для обработки, также включали некоторые специфические 2.5D инверсии по областям ловушек. 2.5D инверсия, в этом случае, означает инверсию с использованием входной трехмерной модели с инверсией, выполненной для обновления двумерной резистивной модели. Для одной из ловушек

была сделана 2.5D инверсия на ряде профилей. Цель состояла в том, чтобы посмотреть, можно ли объяснить наблюдаемый электромагнитный отклик наличием резистивной ловушки, в противоположность основному резистивному карбонатному слою. Эта попытка, ставшая научно-исследовательской работой для OHM, показала очень хорошую глубинную и латеральную привязку к интерпретированному перспективному интервалу по данным сейсмике и дала надежду увеличения разрешающей способности электромагнитных зондирований (рис. 8).

Выводы

Shell Brasil создал большую базу данных электромагнитного зондирования на бассейнах Campos, Santos и Espirito Santo юго-восточной Бразилии. Мы провели интерпретацию данных электромагнитного зондирования на ряде ловушек, месторождений и аналогичных областях в Бразилии и предсказали успех на одном месторождении, открытом Shell. Мы делаем вывод, что методика электромагнитных зондирований, по-видимому, помогает при разведке месторождений с маломощными покрывающими пластами, где мало усложняющих геологических факторов или они хорошо ограничены. Методика и разрешающая способность электромагнитных зондирований быстро улучшаются, и мы рассматриваем электромагнитные зондирования как полезный инструмент в случае комплексирования с другими методами исследования, и мы намереваемся расширить его приложение, поскольку методика электромагнитных зондирований постоянно развивается.

Благодарности

Особенно хочется поблагодарить PGS Geophysical, EMGS, OHM и Petrobras, партнеру совместного предприятия, за разрешения использовать примеры данных, показанные в данной статье. Особая благодарность также сотрудникам Shell Jochen Moser, Mike Tompkins и Elizabeth Harvey.

Специальный раздел *First Break*

Междисциплинарная задача

Мы должны согласиться, что определение «междисциплинарный» применимо к содержанию специального раздела этого месяца, для того, чтобы выразиться короче. Мы собрали некоторые интересные приложения геофизических исследований, которые демонстрируют длительный и определенный поиск решений для ряда областей дисциплины. В этом контексте статья WesternGeco про методику «сверху/снизу» регистрации морских сейсмических данных на буксируемой косе показывает положительный пример компании, стремящейся разрушить шаблоны. Методика «сверху/снизу» не представляет ничего нового. Ее пробовали в 1980-ых, тогда она была отброшена как слишком сложная. Кажется, появление управляемой косы могло бы изменить взгляды. Теоретический потенциал метода на многообещающих высокоразрешенных данных, возможно будет особенно полезным в контексте временемкой 4D съемки, может, наконец, быть реализован.

Статья Paradigm едва могла быть другой; тем не менее, его намерение похвально в том, что компания предлагает как-то упорядочить создавшийся беспорядок множества сейсмических атрибутов, который превратил жизнь интерпретатора в кошмар. Описанный процесс классификации фаций может только быть полезным для решения данной проблемы.

Наконец, мы имеем детальное исследование, поддерживающее давнишнюю просьбу доктора Nio и его коллег рассмотреть климатические изменения в течение долгого времени в качестве уместного и важного критерия стратиграфической классификации по стандартным чувствительным к фациям каротажных диаграммам. Было сделано серьезное заявление насчет этого подхода, которое, несомненно, найдет как сторонников, так и противников.

Будущие специальные разделы

Январь	<i>Информационные технологии/управление данными</i>
Февраль	<i>Наземная сейсморазведка</i>
Март	<i>Визуализация и интерпретация данных</i>
Апрель	<i>Нефтяная геология</i>
Май	<i>Скважинная сейсморазведка</i>
Июнь	<i>Междисциплинарная задача</i>
Июль	<i>Обучение и тренинг / Добыча</i>
Август	<i>Экологическая прикладная геофизика</i>
Сентябрь	<i>Обработка данных</i>
Октябрь	<i>Резервуарная геофизика и разработка</i>
Ноябрь	<i>Несейсмические методы/агрогеофизика</i>
Декабрь	<i>Морская сейсморазведка</i>

В течение года могут быть добавлены новые специальные разделы.