

Построение модели разреза с использованием различных типов характеристик среды на основе комплексирования данных с целью улучшенного отображения

По мере того, как разведка углеводородов перемещается в районы с все более сложным геологическим строением, для построения более адекватных моделей среды требуется комплексирование разнообразных геофизических измерений. E. Tartaras,* L. Masnaghetti, A. Lovatini, S. Hallinan, M. Mantovani, M. Virgilio, W. Soyer, M. De Stefano и F. Snyder (WesternGeco); Javier Subia (Petrobras); и Thierry Dugoujard (Perenco) демонстрируют, как это делается.

Сейсморазведка длительное время играла роль «рабочей лошадки» геофизики в нефтегазовой индустрии. Она решала задачи построения изображений разреза, а также служила ориентиром при принятии решений в области разведки и разработки. Хотя это утверждение все еще остается в силе, в настоящее время стало ясно, что для построения улучшенных моделей среды требуются разнообразные геофизические измерения. Это особенно справедливо сейчас, когда разведка углеводородов перемещается в районы с все более сложной геологической обстановкой. Примерами задач, требующих большого напряжения, является ультраглубоководная разведка (там, где высоки риски, связанные с бурением), а также разведка под солевыми отложениями и под зонами надвигов (в таких районах построение сейсмических отображений сталкивается с существенными сложностями).

Несейсмические методы способствуют сокращению рисков, связанных с разведкой и улучшают процесс принятия решений при разработке путем получения дополнительной информации для построения более точной модели разреза. Электромагнитные (ЭМ) методы осуществляют измерение электромагнитных полей, распространяющихся в разрезе, и в основном дают информацию об удельном сопротивлении. Эту информацию можно использовать в целях структурного картирования (например, для оценки мощности проводящих отложений, подстилающих омический базальтовый слой) или для оценки/распределения по категориям коллекторов/перспективных объектов (базирующейся на том, что углеводородсодержащие породы характеризуются более высоким сопротивлением, чем водосодержащие). Методы потенциальных полей, такие как измерения гравитационного и магнитного полей, а также градиентометрические

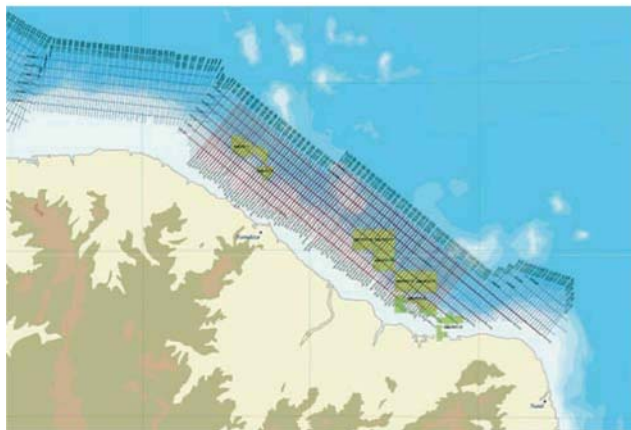


Рис. 1. Бассейн Potiguar-Ceará, северо-восток Бразилии.

наблюдения, дают информацию о плотностях и магнитной восприимчивости, которые поступают в качестве ограничений на вход модели разреза.

До недавнего времени данные сейсмических и несейсмических методов часто обрабатывались отдельно, и затем окончательные результаты комбинировались на стадии интерпретации. Различный «язык», используемый двумя сообществами, и нехватка подходящего программного обеспечения, тормозили комплексирование на современном уровне. Такая интерпретация скорее вуалирует преимущества, которые могут извлекаться из комплексирования на более ранних стадиях. Уровень комплексирования может варьировать от проектов по разведке, объединяющих различные методы на стадиях получения данных и моделирования до продвинутых технологий, которые позволяют производить одновременную инверсию различных наборов данных. В приводимых практических примерах демонстрируются возможности потоков обработки комплексных данных.

Проект комплексных исследований Potiguar

В контролируемом ЭМ источнике (CSEM) используется высокоомощная низкочастотная дипольная антенна, которая буксируется за научно-исследовательским судном на расстоянии до 30 метров от дна и излучает низкочастотное ЭМ поле. По мере распространения этих сигналов в разрезе, их амплитуда и фаза изменяются в зависимости от омических свойств пород, в которых они распространяются. Расстановка электромагнитных приемников, развернутая на морском дне, (при этом конфигурация расстановки соответствует цели исследований) измеряет те характеристики, по которым можно получить изображение структуры электрического сопротивления разреза. Осадки, насыщенные соленой водой, обладают высокой электропроводностью (низким сопротивлением), тогда как осадки, насыщенные углеводородами, имеют гораздо более высокое сопротивление. Этот большой контраст сопротивлений может быть обнаружен дистанционно с помощью метода CSEM, который помогает выделять и описывать формации, располагающиеся до 3000 м ниже морского дна. В настоящее время широко известно, что CSEM может давать максимальную пользу при использовании в комбинации с другими методами, вопреки изначальной рекламе, когда его продвигали как метод, который может применяться самостоятельно для принятия решений. Хотя сейсмические данные могут давать непрерывную структурную геологическую информацию о разрезе на больших областях, данные CSEM являются другим источником информации: этот метод является мощным аппаратом при обнаружении комплексов, которые более резистивны, чем вмещающие породы, но с более низкой степенью структурного разрешения. Эффективное комплексирование с сейсмическими, каротажными и другими типами данных может уменьшить неточности интерпретации данных CSEM, и в то же время даст нам возможность сократить разведочные риски, благодаря сильным сторонам этого метода.

* Автор-корреспондент, E-mail: etartaras@slb.com

Рис. 2. Пример построения ячеек инверсии 3D на основе использования поверхностей горизонтов (слева) и после заполнения ячеек данными о сопротивлении (справа).

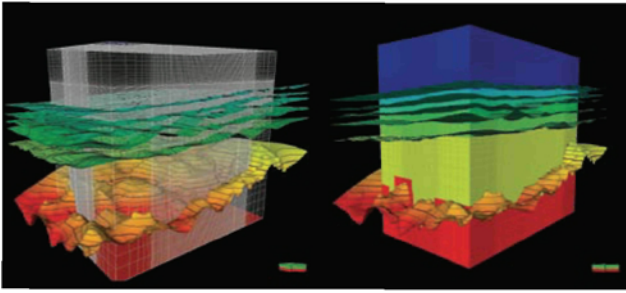
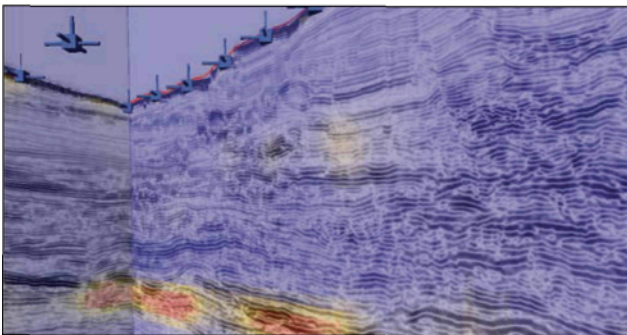


Рис. 3. Выходной куб вертикального сопротивления, полученный совместно с сейсмическим разрезом. Белым показаны приемники, тогда как красная линия – траектория перемещения источников.



Этот проект по комплексированию данных выполнялся на акватории бассейна Potiguar, и части прилегающего бассейна Ceará, от северного побережья восточной части Бразильской континентальной окраины (Рис. 1). На берегу, бассейн Potiguar, расположенный преимущественно в Rio Grande do Norte State, лишь малая часть принадлежит Ceará State, второму по продуктивности бассейну Бразилии. В настоящее время проводится добыча на акватории близ берега, в то время как на глубоководье проводится мало разведочных работ и не ведется добыча.

В данном проекте комплексироваются недавно полученные данные CSEM с несколькими существующими источниками информации, имеющимися в распоряжении компаний WesternGeco и Schlumberger (Lovatini et al., 2010). Обширные данные о коллекторах, в которых идет добыча, в районах вблизи берега и на побережье, были объединены с анализом нефтяных пленок, наблюдаемых на морском побережье, а также данными, полученными в результате обработки спутниковых наблюдений, и явились входными данными в программу моделирования нефтяных систем (PSM). В качестве других исходных данных послужили каротажные данные, переобработанные сейсмические данные, а также данные геохимического анализа образцов нефти. Геохимический анализ включал идентификацию биомаркеров, что может способствовать определению термальной зрелости или температуры захороненных осадков, а также указывать на тип материнских пород, пути миграции, и историю изменения углеводородных отложений.

Данные морской сейсмической съемки 2D, полученные в 1999 г., которые изначально были обработаны с помощью миграции во временной области до суммирования, были переобработаны с помощью процедур подавления кратных, связанных с поверхностью (SRME),

ЭМ/Потенциальные методы

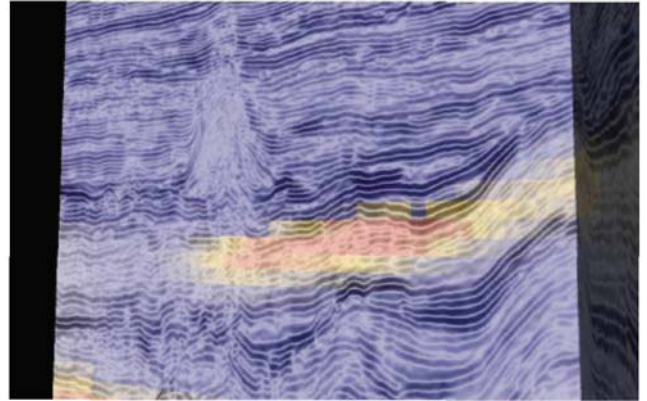


Рис. 4. Полученный на выходе куб сопротивлений, совместно с сейсмическими разрезами. Отсутствие аномалии сопротивлений в трубообразной структуре на сейсмическом разрезе не дает ее интерпретировать как вулканическую структуру, тогда как рост сопротивления в ее окрестности может дополнить интерпретацию сейсмических данных.

и миграции в глубинной области до суммирования (PSDM). Данные были проинтерпретированы для получения горизонтов регионального масштаба, и затем использовались в качестве входных, совместно с другой геологической и геохимической информацией, в программу моделирования нефтеносных систем в масштабе бассейна. Интерпретация подчеркнула некоторые возможные структурные и стратиграфические ловушки. Эти данные, а также участки с нефтяными пятнами на поверхности моря, использовались для идентификации тех областей, где данные CSEM наиболее вероятно, дадут дополнительную информацию в деле сокращения разведочного риска.

Четыре отдельных перспективных объекта (все современные концессии) в конечном счете, были выбраны на основе анализа возможности выделения по CSEM и сейсмическим характеристикам. Съемка CSEM включала более 250 км профилей, которые отработаны 136 многокомпонентными ЭМ приемниками. После первоначальной набортной обработки к наборам данных CSEM впоследствии применялись потоки обработки инверсии и интерпретации:

- Качественная интерпретация
- 1D анизотропная инверсия, с ограничениями мощности в соответствии с сейсмическими горизонтами в целях получения горизонтальных и вертикальных фоновых сопротивлений
- Апскейлинг до 2D и 3D кубов сопротивлений (Рис. 2)
- Прямое моделирование для проверки правильности фоновой модели
- 2.5D анизотропная инверсия
- 3D анизотропная инверсия
- Комплексирование с сейсмическими и другими данными с помощью программы Petrel для перевода сейсмических данных в рабочий поток имитационного моделирования.

В данном проекте все 3D инверсии (Mackie et al., 2007) включали данные как по инлайну, так и данные поперечного выноса, и использовали широкополосные данные для улучшения чувствительности инверсии и глубинной разрешенности. Комплексирование кубов сопротивлений, получаемых на основе 3D анизотропной инверсии пяти наборов данных CSEM, дало новый подход к лучшему пониманию модели строения разреза для PSM и исследований перспективности бассейна акватории Potiguar (Рис. 3 и 4). Дополнительная информация может использоваться в качестве ориентира для будущего анализа и интерпретации перспективных областей

на сейсмических данных, что подчеркнет значимость применения ЭМ технологий как аппарата ранжирования перспективных объектов. Что более важно, совокупный поток комплексирования данных демонстрирует то, как комплексирование с другими данными, выполненное на ранней стадии (в данном случае сейсмических, скважинных и спутниковых данных) может способствовать разработке более высококачественной съемки CSEM и получению лучшего результата инверсии, что, в свою очередь, помогает при интерпретации исходных сейсмических изображений.

Ограничения на модели МТ, полученные по каротажным кривым

Проблемы построения сейсмических изображений для практически вертикальных структур складчатых поясов в данном регионе увеличивают риск, связанный с разбуриванием глубинных газовых коллекторов. Вмещающие структуры часто смещены по латерали относительно обнажающихся антиклинальных структур, расположенных под взбросами (Ravaut et al., 2002).

Кривые удельного сопротивления (Рис. 5) демонстрируют явное увеличение сопротивления в кровле относительно чистых вмещающих коллекторских песчаников среднедевонского возраста, по сравнению с более низкими значениями сопротивлений в малоглубинных формациях. Для этих глубинных структур контраст является достаточным с тем, чтобы его можно было закартировать в процессе выполнения магнитотеллурических (МТ) съемок. Съемка 3D МТ, включающая 165 МТ зондирований с шагом 500-1000 м вкостр простирания, на удалении 2-3 км, проводилась над перспективным объектом до заканчивания бурения компанией Petrobras.

На Рис. 6 демонстрируется наложение двух подходов к построению моделей инверсии МТ. Контурная линия представляет собой инверсию без наложенных ограничений (вслепую), выполненную до бурения, тогда как цветная сетка представляет собой более позднюю модель инверсии с ограничениями. Для последней, потребовалось выполнить инверсию и получить отклонения удельного сопротивления для увязки

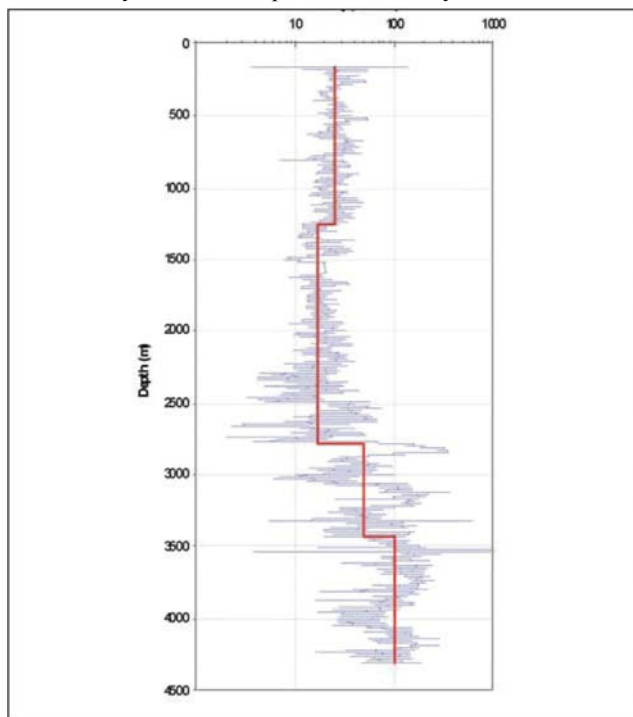


Рис. 5. Пример кривой сопротивлений, демонстрирующий существенное увеличение сопротивлений с глубиной.

ЭМ/Потенциальные методы

с наблюдаемыми данными МТ там, где выполнялось комплексирование рабочей геологической модели и кривой сопротивлений (предоставленной Petrobras) для контроля геометрии «слоистой» структуры и сопротивлений в стартовой модели.

Инверсия «вслепую» и инверсия с ограничениями продемонстрировали омическое ядро, смещенное относительно скважины, что согласуется со структурой и кривыми сопротивлений по скважинам (Рис. 6).

Настоящий практический пример демонстрирует то, как комплексирование различных геофизических измерений, выполненное на различных стадиях интерпретации, улучшает картирование глубинных газовых коллекторов в районах, в которых получение сейсмических изображений затруднительно, а также, помогает сократить риски, связанные с бурением.

Обнаружение солей путем одновременной комплексной инверсии

Многие примеры со всего мира говорят о том, что традиционная томография на основе трассирования лучей может давать сбои при наличии соляных отложений. Общеизвестно, что отражения от подошвы соляных отложений часто искажаются из-за сложного строения соляных тел, а в случае, если фоновая модель, основанная на сейсмических данных, не может точно восстановить структуру солей, становится невозможным и модификация модели на основе лучевой томографии. Следствием этого являются вертикальные искажения и то, что маркирующие подолевые толщи также будут отображаться весьма некорректно (Рис. 7). Томография, основанная на интерпретации сейсмических данных, будет некорректна ввиду того, что подошву солей часто трудно интерпретировать, она прерывиста, или на нее наложены артефакты процедуры миграции. По той же причине, маловероятно, что томография на основе поля углов падения даст требуемые результаты.

Гравиразведка дает ключевые индикаторы присутствия солей в районах с подобным типом сейсмической картины. Метод может выделять

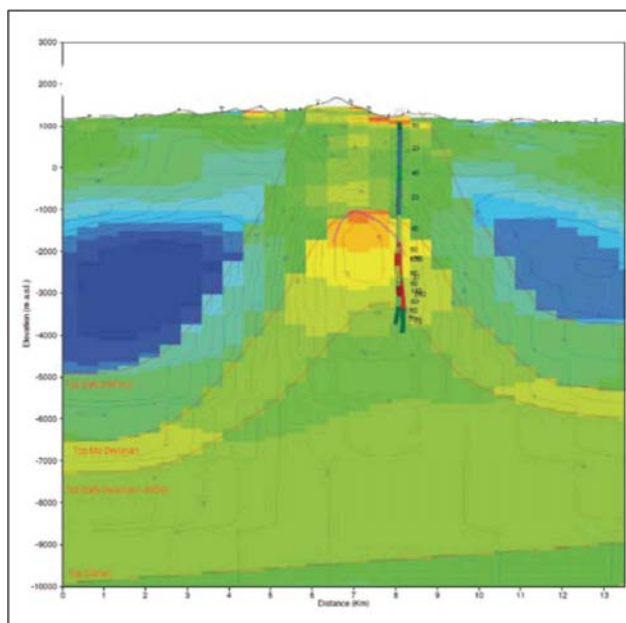


Рис. 6. Разрез сопротивлений по падению, сравниваются инверсия сопротивлений 3D с ограничением (цветная сетка), и без ограничений (вслепую) 3D инверсия (изолинии), поверхности интерполированы на основе рабочей структурной модели в целях построения начальной модели сопротивлений, и уплотненных каротажных кривых сопротивлений. Короткая фиолетовая линия - это кровля осевого омического слоя, полученная на основе 3D инверсии вслепую.

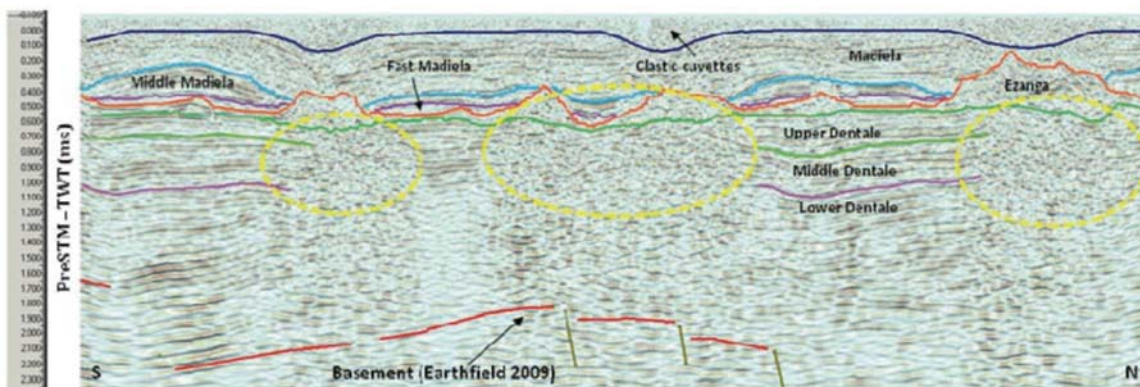


Рис. 7. Сейсмический тестовый профиль 1 PSTM прошлых лет. Обратите внимание на плохое качество изображения толщи под соляными куполами.

низкоплотную по латерали соль, а при комплексировании с сейсмическими отображениями в целях улучшения вертикальной разрешенности, имеется возможность определять положение солей, даже при отсутствии возможности определения их формы. Путем одновременного увеличения разрешения скорости и плотности, совместная инверсия может помочь обнаружить участки присутствия солей в многопараметрической модели, поскольку дает отчетливое противоречие с принятым фоновым соотношением скоростей и плотностей, например, таким как соотношение Гарднера.

Разведка на нефть и газ в Южно-Габонском суб-бассейне дала много крупных нефтяных открытий; между тем, построение точных глубинных карт подсольевых объектов остается труднодостижимой задачей. Четкость горизонта подошвы солей по вертикали – основной покрывки – часто меньше или равна погрешности, присущей построению глубинной модели. Подтвержденные нефтяные месторождения имеют достаточно скважинных данных для построения глубинных карт, которые более точны, чем карты, основанные только на сейсмических данных. Однако глубинные карты в разведываемых областях часто основаны только на сейсмических данных.

Perenco выдвинула гипотезу о том, что данные гравиразведки могут использоваться на разведываемых областях в целях улучшения построения сейсмических изображений подсольевых рефлекторов путем добавления входных данных в PSDM. В качестве теста два сейсмических 2D профиля прошлых лет были переобработаны с применением технологии одновременной комплексной инверсии (SJI), разработанной WesternGeco (Colombo, Mantovani et al., 2007, Colombo et al., 2007, Colombo et al. 2008). Результаты теста вдохновили Perenco и партнеров на продолжение применения потока обработки к набору сейсмических данных 2D в районе исследований.

В изучаемом районе имеются мощные пески и глины формации Dentale барремского возраста фазы рифтинга, несогласно перекрываемые песчаниками Gamba (Mantovani and Dugoujard, 2011). Этот комплекс перекрывается агтской эвапоритовой толщей Ezanga, которая является основной покрывкой песчаных коллекторов Gamba или Dentale. Покрывающие породы сформированы мощным и сложным по строению карбонатным слоем Madiela. Изменения в фациях и мощности формации Madiela – как вертикальные, так латеральные – препятствуют заданию модели скоростей для данного слоя.

Данные аэрогравиразведки были получены вдоль профилей, простирающихся с севера на юг на расстоянии 250 м один от другого, а профили-связки, идущие в направлении восток-запад, были получены с шагом 2500 м. После приведения данных к одному уровню и обработки

компанией WesternGeco и Perenco начали совместную работу над созданием реалистичной входной модели для объединенной инверсии. Объединенная инверсия использовалась в качестве теста на чувствительность сейсмической интерпретации и допустимого исключения негеологических сценариев, при сохранении сценариев, правдоподобных с точки зрения геофизики (Mantovani and Dugoujard, 2011).

В процедуре SJI делается попытка одновременной подгонки гравитационных и сейсмических наборов данных, путем поиска наилучших скоростных и плотностных моделей, с соблюдением двух наборов ограничений. Первый набор ограничений накладывает требования структурного подобия к гравитационной и скоростной моделям, по мере того, как выполняется инверсия аномалий разреза для откликов сейсмического или гравитационного поля, для одних и тех же формаций разреза. И, таким образом, ожидается, что они имеют сходное распределение. Второй набор ограничений преобразовывает скорости в плотности и, наоборот, путем применения петрофизических зависимостей. Такие зависимости могут состоять из эмпирических или аналитических функций, таких как уравнение Гарднера, или функций, задаваемых пользователем и полученных на основе каротажных кривых, как в случае с солями Ezanga.

Для стандартного SJI соль является исключением в том, что касается взаимной зависимости скорости и плотности. Объект разведки можно описать, как если бы он был внутри однородного пространства, для которого справедливо правило Гарднера, но единичное тело отклоняется от этого правила и вместо этого отвечает произвольному тренду скорость-плотность. Если используется корректная интерпретация изолиний, то влияние исключения становится невидимым для системы и SJI может действовать, как обычно, на основе минимизации невязки. Если интерпретация соли некорректна, то аномальный тренд скорость-плотность, полученный на основе каротажа, заменяющий правило Гарднера (Gardner et al., 1974), замещается, и SJI проявляет серию известных артефактов. Тогда интерпретация настраивается в интерактиве до тех пор, пока эти артефакты не будут устранены. Вслед за этим запускается новая итерация SJI для подтверждения интерпретации для солей, и так далее. Асимптотой этой процедуры является получение корректной интерпретации. В качестве вторичного результата, SJI может дать корректную скоростную и плотностную модель.

Одновременная совместная инверсия может помочь в обнаружении некорректной интерпретации для солей, и привести интерпретатора к корректировке границ солевой толщи.

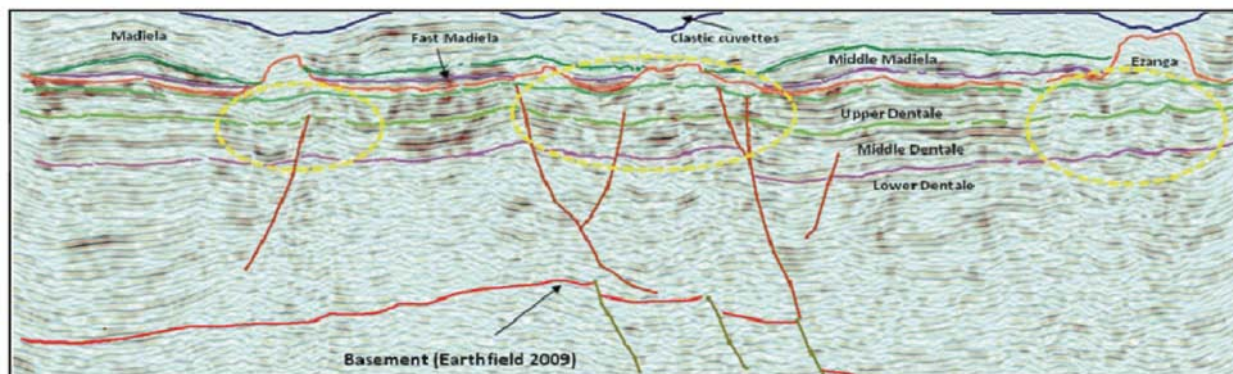


Рис. 8. Сейсмический тестовый профиль 1 PSDM, преобразованный обратно во временную область.

Это справедливо даже в случаях, когда, как и в описанном примере, информация, полученная из сейсмического разреза или распределения скоростей, недостаточна. Рабочий поток, направленный на обнаружение солей, включает в себя внедрение ожидаемого тренда, не соответствующего формуле Гарднера, в модель интерпретируемой соли, вслед за этим производится инверсия и получение формы солей.

Там, где ранее выполненная интерпретация до-солевого разреза этого Южно-Габонского под-бассейна, была ограничена плохим качеством изображения, особенно это касается области под соляными куполами (Рис. 7), анализ переработанных сейсмических профилей демонстрирует улучшение прослеживаемости (Рис. 8). Новые данные подтверждают корреляцию формаций Dentale между скважинами, и позволяют лучше понять разломообразование и структуру участка. Глубина подошвы соли, возможно, не настолько точна, как этого бы хотелось, но ожидается, что планируемая обработка данных плотной сетки профилей уточнит положение относительного уровня подошвы солей.

Одновременная совместная инверсия 3D сейсмических и магнитотеллурических данных

Многочисленные сросшиеся аллохтонные соляные покровы, покрывающие потенциальные коллекторские структуры, являются основной проблемой разведки в глубоководной части Мексиканского Залива. Грамотная интерпретация этих соляных структур является ключевой к пониманию и созданию точных томографических скоростных моделей, которые, в свою очередь, являются необходимыми для определения правильного местоположения и построения отображений подсолевых целевых объектов. Путем лучшего комплексирования данных геологии и геофизики мы улучшаем наши модели. Это особенно важно в областях Green Canyon-Garden Banks-Keathley Canyon-Walker Ridge, где сложность геологического строения соляной толщи представляет проблему, даже при наличии современных методов получения и обработки широкоазимутальных данных.

Были предложены различные подходы обработки и интерпретации (Gallardo and Meju, 2004; De Stefano and Colombo, 2006) при комплексировании и выполнении измерений во многих областях. В настоящей работе мы покажем, как применять методику 3D SJI сейсмических и МТ данных, направленную на более детальное выделение подошвы солей и улучшение построения изображений подсолевой толщи (Virgilio et al., 2010).

Как было показано на практическом примере исследований в Габоне, SJI производит одновременную инверсию сейсмических и несейсмических данных, в отличие от инверсии каждого набора данных в отдельности. Как уже упоминалось, связи между различными областями в алгоритме SJI либо геометрические, либо эмпирические.

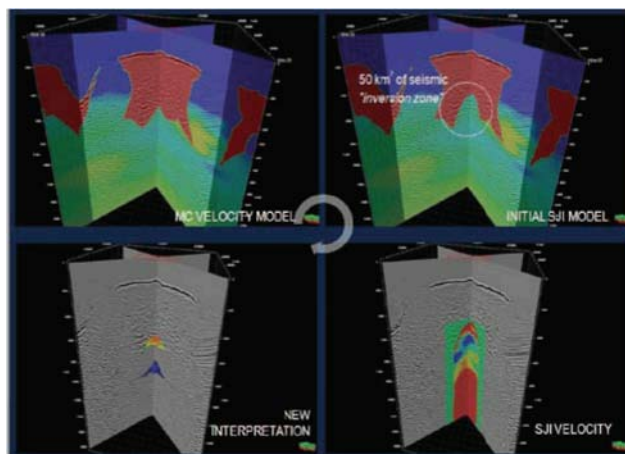


Рис. 9. 3D изображение скоростей (в цвете) с наложенным сейсмическим разрезом (черно-белое изображение).

Геометрические связи говорят о том, что различные 3D модели имеют сходные геометрические вариации путем градиентных расчетов их контуров. Эмпирические законы связывают абсолютные величины скорости и сопротивления путем известных уравнений, адаптированных и настроенных на специфику проекта.

Морские магнитотеллурические данные (ММТ) были получены с помощью расстановки донных приемников, регистрирующих горизонтальные электрические и магнитные поля для получения оценок полного тензора МТ импеданса. После чего временные ряды ММТ обрабатываются с использованием устойчивого алгоритма дистанционного обращения. Обработанные данные оказались данными хорошего качества в предполагаемом частотном диапазоне. Для доказательства концепции 3D SJI в районе северного хребта Walker, мы начали работу с существующей сейсмотомографической моделью на основе отраженных волн, из которой была убрана часть солей (Рис. 9, вверху справа), с целью получения начальной скоростной модели. Для получения окончательной скоростной модели SJI вместе с соответствующей моделью сопротивлений было выполнено несколько итераций 3D SJI данных сейсморазведки МОВ совместно с данными ММТ (Рис. 9, внизу справа). В нижней левой части Рис. 9 показано, как 3D SJI помогло добиться новой 3D интерпретации подошвы аллохтонных солей (цветом), а также показано местоположение кровли автохтонных солей (синим).

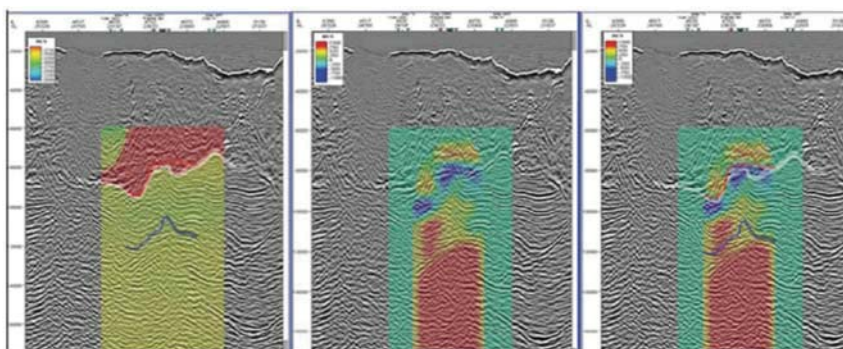


Рис. 10. Старое изображение после миграции на основе волнового уравнения, на которое наложена скорость, полученная по старой томографии на отраженных волнах (слева), модель скоростей SJI (посередине: уточнение исходной модели – синим цветом показаны низкие значения уточненной модели, а красным – высокие значения уточненной модели, совместно с интерпретацией (справа)

На Рис. 10 представлено старое изображение, полученное после миграции на основе волнового уравнения, на которое наложена скорость, полученная по ранее выполненной томографии на отраженных волнах (слева), и скоростная модель SJI (посередине: уточнение исходной модели – синим цветом показаны низкие значения уточненной модели, а красным – высокие значения уточненной модели, совместно с интерпретацией (справа)). Низкоскоростная зона непосредственно под солями была полезна при интерпретации граничных соляных осадков: белый горизонт является интерпретацией аллохтонной соли на основе сеймики в одной области, красным показана интерпретация SJI для той же формации (разница в интерпретациях достигает 700 м), синим показана интерпретация SJI кровли автохтонной соли, согласующаяся с указанием глубинной высокоскоростной области, полученной по SJI. Отметим, что высокие скорости для автохтонной соли отсутствуют на скоростной модели при интерпретации данных в одиночной области (слева) и присутствуют только на скоростной модели SJI (посередине и справа) если по ММТ известна омическая аномалия солей.

Использование 3D SJI для сейсмических данных и ММТ в северной части Мексиканского залива дало новую интерпретацию аллохтонных и автохтонных солей. Одновременная совместная инверсия сокращает погрешности инверсии, указывает на новую стратегию интерпретации подсолевых толщ; таким образом, она подчеркивает роль несейсмических методов в построении улучшенных сейсмических глубинных изображений.

Выводы

Представленные практические примеры четко демонстрируют как ЭМ методы и данные, полученные методами потенциальных полей могут способствовать построению точной модели разреза. Тем не менее, для максимизации этой роли, требуется выполнять интерпретацию этих данных не в изоляции, а на основе комплексного подхода, насколько это возможно, и на самом раннем этапе работы с другими имеющимися данными G&G. Комплексирование может заключаться в объединении различных наборов данных в совместной интерпретации на этапе одновременной инверсии в целях построения единой модели среды по двум различным наборам данных. В любом случае, финальной целью является сокращение рисков, которые несут в себе все решения, принимаемые при разведке и разработке месторождений.

Благодарности

Авторы признательны Gabon Direction Generale des Hydrocarbures (DGH), Perenco, Petrobras, Tullow Oil и, WesternGeco за разрешение на публикацию данной работы.

Литература

- Colombo, D. and De Stefano, M. [2007] Geophysical modelling via Simultaneous Joint Inversion of Seismic, Gravity and Electromagnetic data: application to Pre-Stack Depth Imaging. *The Leading Edge*, 26(3), 326-331.
- Colombo D., Mantovani, M., De Stefano, M., Garrad, D. and Al Lawati, H. [2007] Simultaneous Joint Inversion of Seismic and Gravity data for long offset Pre-Stack Depth Migration in Northern Oman. *Canadian SEG Annual Meeting*, Calgary.
- Colombo, D., Cogan, M. Hallinan, S., Mantovani, M., Virgilio, M., and Soyer, W. [2008] Near Surface P-velocity Modeling by Integrated Seismic, EM, and Gravity Data: Examples from Middle East, *First Break*, 26(10), 91-102.
- De Stefano, M. and Colombo, D. [2006] Geophysical modeling through simultaneous Joint Inversion of Seismic, Gravity and Magnetotelluric data. *SEG Workshop on Integration of Seismic and Electromagnetic Measurements*.
- Gallardo, L.A. and Meju, M.A. [2004] Joint 2D resistivity and seismic inversion with cross-gradients criterion: *Journal of Geophysical Research*, 109, 1-11.
- Gardner, G., Gardner, L. and Gregory, A. [1974] Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39(6), 770-780.
- Lovatini, A., Myers, K., Watterson, P. and Campbell, T. [2010] An integrated approach to exploration data in the Potiguar Basin, offshore Brazil. *First Break*, 28(5), 55-59.
- Mackie, R. Watts, D. and Rodi, W. [2007] Joint 3D inversion of marine CSEM and MT data. *77th SEG Annual Meeting*. Expanded Abstracts, 26, 1, 574-578.
- Mantovani, M. and Dugoujard, T. [2011] Salt detection and interactive interpretation by seismic-gravity simultaneous joint inversion. *First Break* (submitted).
- Ravaut, P., Russell, S., Mallard, P., Ballard, J.-F., Watts, M.D., Mackie, R. and Hallinan, S. [2002] 3D Magneto-tellurics for imaging a Devonian reservoir (Huamampampa) in the southern Sub-Andean basin of Bolivia. *72nd SEG Annual Meeting*. Expanded Abstracts 21, 2417-2421.
- Virgilio, M., De Stefano, M., Re, S., Golfè Andreasi, E and Snyder, F.F.C. [2010] Simultaneous Joint Inversion of Seismic, Gravity and EM data for Sub-Salt Depth Imaging in Gulf of Mexico. *73rd EAGE Conference & Exhibition, K045*.