

## Исследование статической связности на месторождении Atlantis: прогноз расчлененности коллектора до получения первой нефти. Atlantis static connectivity study: predicting compartmentalization prior to first oil

Jessica A. Kurtz<sup>1\*</sup> и Keith F. Angel<sup>1</sup>

### Краткое содержание

На каждом нефтяном месторождении с первых дней изучения и до окончания разработки существует проблема рассмотрения и описания модели, в том числе ее расчлененности. Эта проблема является еще более актуальной в регионах типа Мексиканского залива, где данные динамических исследований скважин редко появляются раньше, чем первый дебит. Следовательно, весьма важным становится использование всех доступных статических данных для прогноза характеристик месторождения, но возникает вопрос, как эффективно совместно использовать сейсмические данные, геологическую модель, результаты измерения давления и опробование скважинного флюида?

Группа глубинного изучения месторождения Atlantis взялась за эту проблему, совместно используя имеющиеся статические данные с результатами предшествующих исследований по изучению расчлененности резервуара, чтобы разработать оригинальный метод для оценки расчлененности его до начала добычи. Было установлено одиннадцать различных типов данных в качестве показателей возможной связи, каждый тип данных был оценен по критерию, установленному исследователями, и каждому типу данных присвоен весовой коэффициент с тем, чтобы можно было оценить вероятность результирующей связности. Результаты были использованы в первую очередь для оптимизации начального планирования скважин и составления плана мониторинга месторождения, они будут обновляться по мере поступления данных динамического изучения скважин и данных новых скважин. В конечном итоге, мы хотели бы определить, какие статические данные являются самыми показательными при изучении расчлененности коллектора и применить это знание для изучения других месторождений.

Открытое в 1998 месторождение Atlantis является гигантским скоплением нефти в глубоководной части Мексиканского залива (GOM). Компания BP эксплуатирует месторождение с 56% прямым долевым участием, ВНР Billiton имеет 44% долевого участия, добыча началась в четвертом квартале 2007 г. Флюиды коллектора поступают через подводную систему с глубины почти 2070 м на вторую по величине в Мексиканском заливе полупогруженную платформу. Основные нефтеносные коллекторы представлены латерально распространенными турбидитовыми песками средне-миоценового возраста, запечатанными с четырех сторон.

Сложная соляная крышка расположена над половиной месторождения и затрудняет интерпретацию сейсмических данных (рис. 1). Благодаря бурению в течение 2005 г. четырех разведочных скважин в южной части месторождения была установлена связь между некоторыми слабыми изгибами сейсмических отражений от частей коллектора и нарушениями, установленными по скважинным данным. Построенные в результате карты использовались для получения первой нефти на Atlantis; однако, выделение разломов остается важной задачей и, по-прежнему, с опорой на данные сейсморазведки. В 2006 г. с целью уточнения строения перекрытой солью северной части месторождения, предвзя динамическую оценку, запланированную на 2009 г., были проведены донные сейсмические исследования (OBS). Пока обработка данных по северной части месторождения продолжается, изображения по южной части месторождения, находящейся вне соляных куполов, способствовали установлению нарушений и повышению качества интерпретации.

В начале работ, в первом квартале 2006 г., на месторождении имелось 17 скважин с сопутствующей каротажной информацией, 3D сейсмические данные, обработанные с глубинной миграцией до суммирования, геологическая модель, более 950 измерений пластового давления и 121 образец скважинного флюида коллектора.

<sup>1</sup> BP, 200 Westlake Park Blvd., Houston, Texas 77079, USA.

\* Corresponding author, E-mail: JessicaA.Kurtz@bp.com.

С тех пор было пробурено четыре дополнительные скважины и осуществлено три кратковременных пробных отбора, чтобы проконтролировать эффективности заканчивания скважины. Результаты наблюдений по новым данным в целом согласуются с остальными результатами исследования.

### Методология

На начальном этапе были поставлены три условия, чтобы определить объем исследований. Первое, исследование расчлененности основывается на идее оценки статических данных между скважинами, чтобы получить цельную картину расчлененности всего месторождения. Поскольку Atlantis имеет хорошее покрытие статическими данными, были оценены только пары соседних скважин. Второе, хотя Atlantis имеет несколько расположенных друг под другом углеводородных продуктивных пластов, исследование было ограничено четырьмя основными коллекторами. И, наконец, была также оценена связность между коллекторами, контактирующими по поперечному сбору.

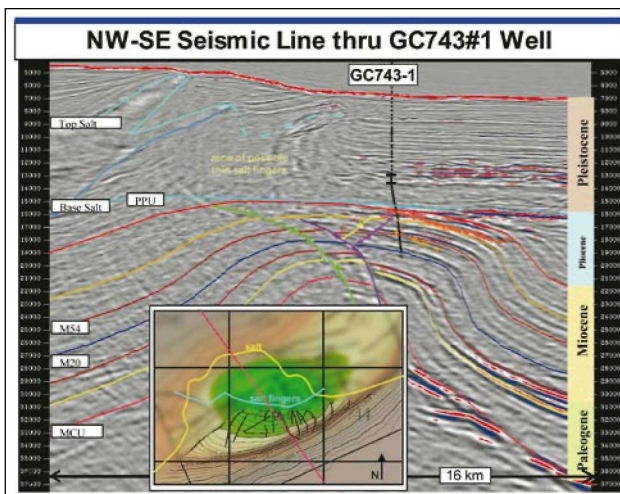


Рис. 1 Сейсмический разрез с буксируемой сейсмоприемной косой.

Учитывая эти условия, группа специалистов организовала данные связности в четыре основные дисциплины: геология и геофизика (G&G), петрофизика, PVT (PVT – давление, объем, температура) флюида и геохимия. Для определения того, какие данные являются самыми диагностическими, и установления соответствующего критерия связности для каждого типа данных были проведены рабочие сессии специалистов по каждой из четырех дисциплин. Чтобы обозначить возможность связности между каждой парой скважин и коллекторами, были определены критерии в диапазоне от невероятного до правдоподобного.

### Типы связности данных

Группой было установлено одиннадцать типов данных, которые составили основу изучения связности.

Для геологии и геофизики G&G первостепенным фактором расцененности признается удаление от нарушения, вторым – стратиграфическая выдержанность. Рис. 2 является иллюстрацией того, как осуществлялось вычисление расстояния от разлома по оценке мощности песчаников, расстоянию до разлома и числу разломов между парами скважин. С этими оценками критерий, использованный для оценки удалений от разломов, был определен как функция глинистости стратиграфического интервала. Если скважина А и скважина В расположены в чистых песках, значение 0.89 может быть классифицировано как «оранжевое», обозначающее ненадежность связности; в то время как в глинистом песчанике можно предполагать из-за наличия глины «красную» связность, что означает невероятную связность. Цветовые обозначения классов показаны в верхнем левом углу на рис. 4, где по всем типам данных и критериям проведено разделение на 5 классов от «красного», связность невозможна, до «зеленого», связность вероятна. Эти пять цветовых градаций постоянно использовались в исследовании при задании значения от -1 до +1 с тем, чтобы могла быть рассчитана вероятность связности для каждой пары скважин. В примере на рис. 2 класс «оранжевого» цвета для чистых песков отводит значение «-0.5» для этого типа данных для этой пары скважин. Вторым оцененным типом геолого-геофизических данных была стратиграфия. На месторождении Atlantis

стратиграфия изучена достаточно полно, поэтому легко прослеживается между всеми парами скважин; однако, этот тип данных может оказаться более существенным на других месторождениях.

Петрофизический критерий включал три типа данных: разница пластовых давлений между скважинами, градиенты пластовых давлений и зафиксированные флюидные контакты. Разницы пластовых давлений между скважинами обычно используются в отрасли для описания степени связности, и критерий, использованный в исследовании для оценки разницы давления, учитывает точность измерений модульного динамического пластоиспытателя (MDT)

(MDT) <http://www.slb.com/content/services/evaluation/reservoir/mdt.asp>) и точность определения глубины кабеля.

Учет точности при измерениях давления в скважинах не является единообразным в отрасли. Для настоящего исследования группа Atlantis приняла точность в 1 psia (фунтов на кв. дюйм) для кварцевого датчика, и это значение определило нижний предел регистрации разницы давлений. Так, на рис. 2 разница в давлениях между двумя скважинами в 1 psia классифицируется как «зеленый», связность вероятна. В качестве верхнего предела разницы давлений группа рассмотрела оценки точности глубины каротажного кабеля, данные разработчиками и коллегами, и решила, что различие давления в 8 psia является значительным для Atlantis, поэтому пары скважин с различием давления такой величины или выше будут классифицированы как «красные».

Градиент пластового давления был также оценен по графикам допустимых ошибок давления. В основном, критерий определялся на основании тех соображений, что градиент давления должен увеличиваться с глубиной и изменением состава флюида. На

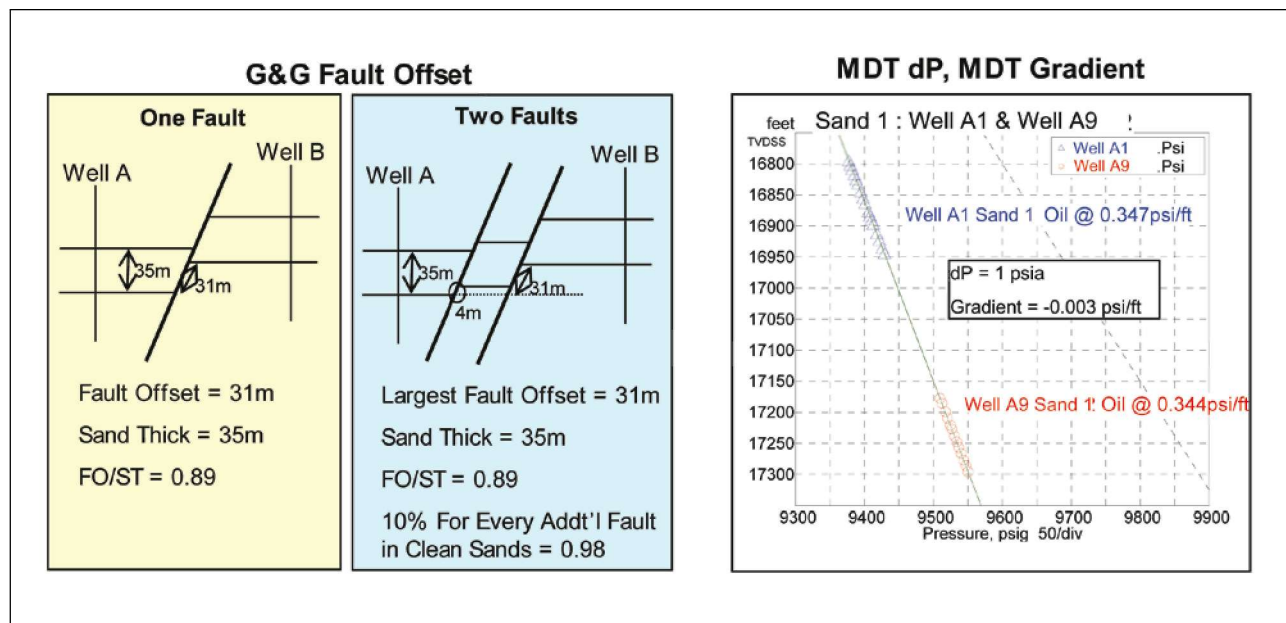


Рис. 2 Примеры типов данных «смещение разлома» и MDT (модульного динамического пластоиспытателя).

рис. 2 градиент в скважине A9 соответствует поровому флюиду более низкой плотности, чем предполагается по градиенту скважины A1, хотя скважина A9 более глубокая в коллекторе. Таким образом, критерий для этой пары скважин и типа данных будет классифицирован как «красный». Наконец, глубины зарегистрированных флюидных контактов в пласте формально свидетельствуют о расчлененности, если они различаются между скважинами.

Последний тип набора данных был получен по MDT измерениям нескольких флюидных образцов коллектора, отобранных из скважин по всему месторождению. Образцы были подвергнуты PVT и геохимическому анализу, и специалисты обеих дисциплин установили шесть типов связности.

Первый тип данных PVT характеризует давление насыщения как функцию глубины. С падением давления для фиксированного флюида при постоянной температуре, существует особое давление, когда флюид образует первый пузырь (McCain, 1990). Эта точка известна как точка пузыря, а давление как давление насыщения. Давление насыщения может зависеть от глубины в пределах резервуара со смешанным флюидом и большого диапазона глубин проб флюида. Группа Atlantis оценила разницу давления насыщения между парами скважин, устанавливая пределы градиента на основании ошибок, оцененных по лабораторным измерениям, и опыта работы в этой районе. На рис. 3 приведен график давления насыщения в зависимости от глубины для нескольких скважин в отдельной части резервуара. Как установлено в этом исследовании группой специалистов Atlantis, наклон линии, проведенной между двумя парами скважин, никогда не должен быть больше 0 psi/ft (что показывает рост давления насыщения с глубиной), или меньше -3 psi/ft (которое установлено в качестве нижнего предела для изменений сложных флюидов).

Три других важных свойства PVT это отношение газ/нефть (GOR), плотность нефтепродукта в градусах API и вязкость. Второй тип данных PVT отражает то, как близки эти свойства относительно друг друга по каждой паре скважин. Если все три

показателя похожи, критерий обозначается как «зеленый»; аналогично, если три типа свойств очень различаются, критерий отмечается как «красный». Степень сходства устанавливалась до некоторой степени произвольно путем нанесения всех данных по скважинам на график, чтобы можно было оценить изменчивость. Последний тип данных PVT отражает отношение метана к этану, которое должно быть в определенной степени постоянным для тех же самых песков.

Геохимические данные были оценены, используя три метода: идентификационная диаграмма по данным хроматографии газа (GCFP), диаграмма алкилбензола (AKB) и вариатность изотопов углерода между парами скважин. Диаграмма GCFP была получена вычислением двенадцати амплитудных коэффициентов по анализу хроматограммы газа (<http://www.intertek-cb.com/chromatography/gaschromatography.shtml>), в то время как диаграмма AKB была получена с 12 амплитудными коэффициентами по масс-спектрометрическому анализу хроматограммы газа. Интерпретация диаграмм заключалась в визуальной оценке степени подобия. На рис. 3 скважины A3 и A4 имеют один и тот же флюид коллектора, в то время как скважины A1 и A2 показывают слабое различие типа флюида. Последний тип геохимических данных отражает различие в концентрации изотопов углерода – метана и этана – между парами скважин.

#### Расчетная вероятность связности

Для каждой пары скважин пытались получить значение, характеризующее вероятность связности. Как ранее упоминалось, эти критерии принимают значения от -1 (красный, связность невозможна) до +1 (зеленый, связность вероятна). Дополнительно, каждый тип данных задавался весовым коэффициентом от 0 до 1 (рис. 4), который назначался исходя из совместного представления о том, насколько информативными являются эти данные при прогнозе связности на Atlantis. Например, рис. 4 показывает, что весовой коэффициент 0.55 был задан для удаления от разлома и разницы давлений MDT, так как группа решила, что эти два типа данных были самыми лучшими показателями связности. Типы данных с небольшим весовым коэффициентом оказывают небольшое влияние на результат исследования

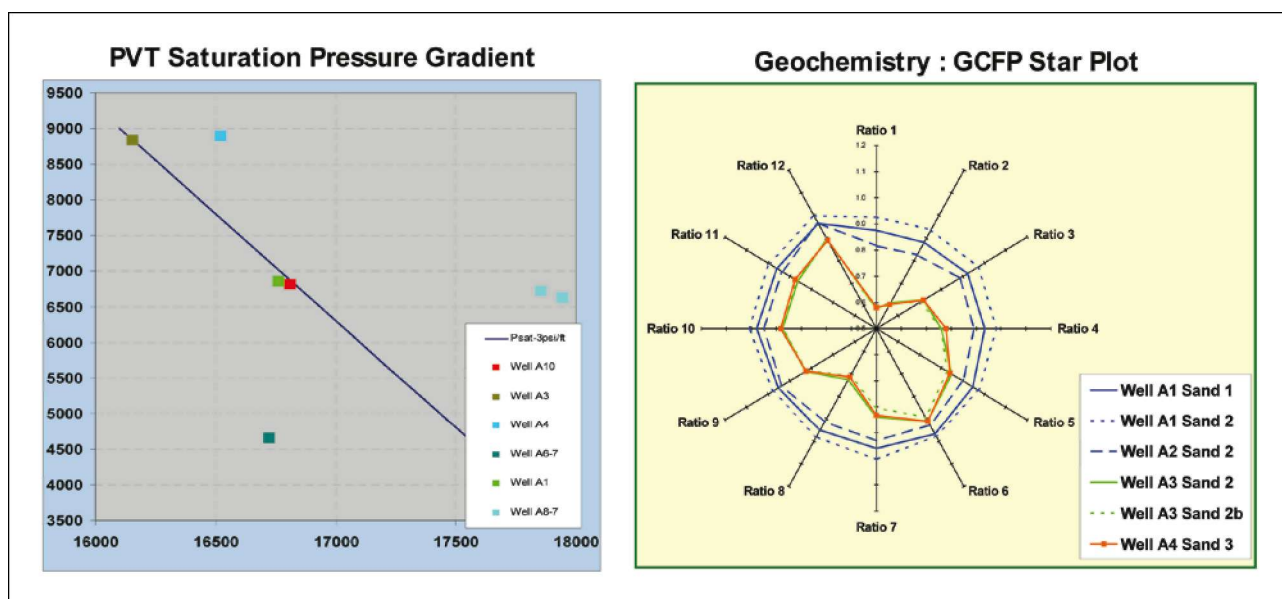


Рис. 3 Примеры типов данных давления насыщения и GCFP. Слева на графиках давление насыщения (по вертикальной оси) в зависимости от глубины (по горизонтальной оси).



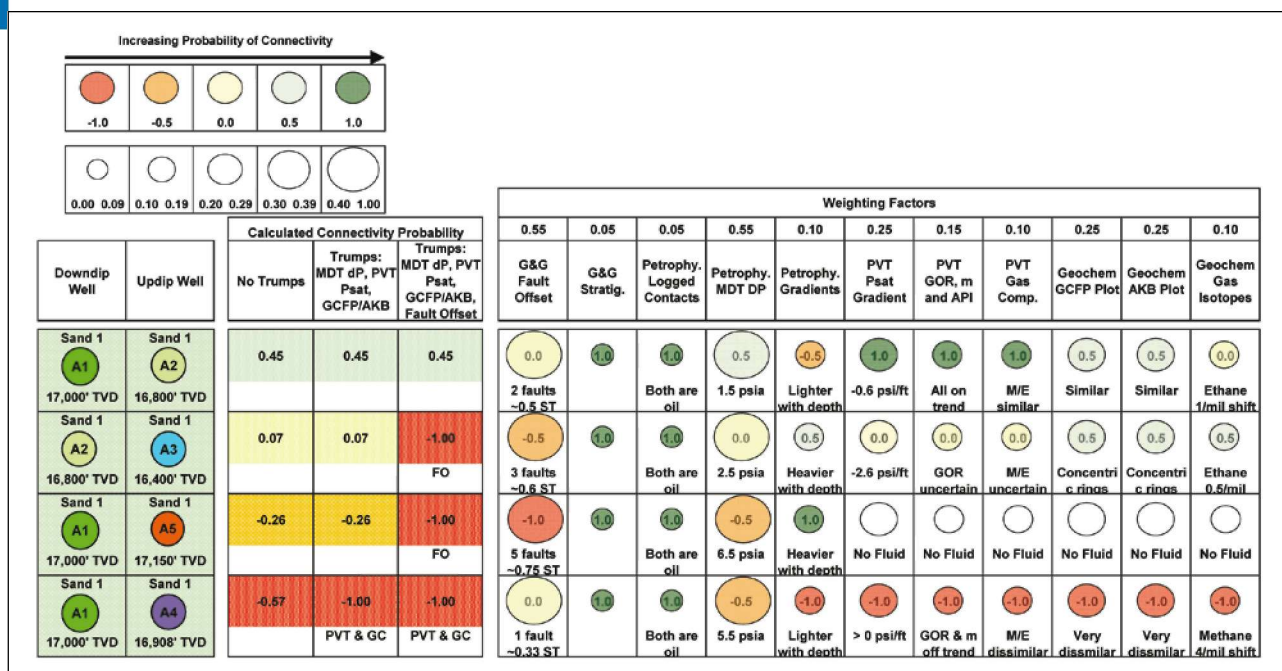


Рис. 4 Фрагмент матрицы по исследованию статической связности на месторождении Atlantis.

и могут считаться неважными, но планируется вернуться к статическим данным, когда будут доступны удовлетворительные динамические данные. Эти данные смогут подтвердить, что веса, которые были применены к статическим данным, были неподходящими.

Было принято решение использовать значения 0.55, 0.7 или 1.0 как самые высокие весовые коэффициенты для каждого из типов данных, исходя из соображений соблюдения пропорций для каждой дисциплины, также в расчет принималась допустимая точность данных и значимость с точки зрения связности. В настоящем исследовании наивысший коэффициент присвоен петрофизической дисциплине и равен 0.7, далее следуют геология и геофизика, геохимия и PVT. Используя метод взвешенного среднего, для каждой пары скважин были вычислены единственные значения «расчетной вероятности связности» (рис. 4, третья колонка).

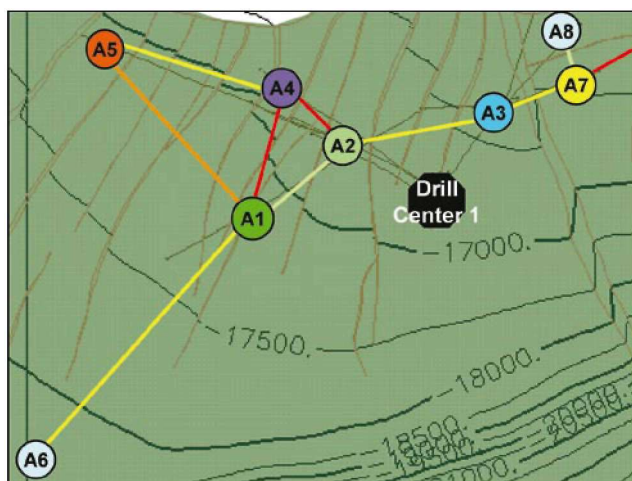


Рис. 5 Статическая связность для песчаников 1. Цветные линии между скважинами соответствуют второй колонке на рис. 4 рассчитанной вероятности связности, и дают наглядное представление о результатах исследования.

Применение весовых коэффициентов реализует идею, что определенные типы данных могут доминировать над другими. Рис. 4 содержит три примера рассчитанных вероятностей связности. Первая вероятность – грубый расчет, а следующие две – используют доминанты. Средняя вероятность предполагает, что определенный критерий для разности давлений MDT, градиентов давления насыщения PVT, или характерные признаки хроматографии газа и диаграммы алкилбензола являются более показательными при установлении статической расчлененности резервуара и, следовательно, будут преобладать над всеми другими данными. Например, если данная пара скважин имеет все зеленые точки, кроме красной для разности давления MDT, то эта пара скважин будет классифицирована как «маловероятная связность». Такой вероятностный подход позволил группе удовлетворительно оценить связность, но также желателен более традиционный подход. Таким образом, была получена вероятность с принятыми вышеуказанными избранными данными, но добавилось расстояние до разлома.

Сравнение расчетов по исходным данным в столбце 3 с расчетами по избранным данным в столбцах 4 и 5 быстро выявляет сочетания пар скважин, которые выявили наборы данных, влияющие на результаты исследования. Например, рассчитанные вероятности связности в скважинах A2 и A3 на рис. 4 выявили удаление от разлома в качестве основного показателя расчлененности. Три вероятности связности использовались разными способами исходя из оптимизации запуска скважинной последовательности и планирования контроля за месторождением для моделирования коллектора. Такой подход был внедрен, поскольку выяснилось, что категории, классифицированные как зеленые, не обязательно указывают на связность, скорее они показывают отсутствие данных, отражающих расчлененность. Таким образом, несмотря на то, что все основные данные указывают на связность скважин A2 и A3, часть данных отражает несвязность и уместность последующих исследований.



Как только эта стадия исследования связности была завершена, вся группа приняла участие в семинаре, чтобы проанализировать и обсудить полученные результаты по каждой дисциплине и сформулировать общие результаты исследования. Конкретные типы данных и критерии, использованные для изучения статической связности на месторождении Atlantis, вероятно не будут пригодны для всех месторождений, но разработанная методология может быть полезна и для других месторождений.

### Результаты

Главным результатом этого исследования является матрица изучения статической связности (рис. 4) и набор карт для каждого из основных стратиграфических интервалов коллектора (рис. 5), который представляет собой результаты сводной интерпретации статической связности на Atlantis.

Как было отмечено выше, после завершения исследований были пробурены еще 4 новые скважины и выполнены три быстрых перепроверки результатов. По новым скважинам были получены дополнительные данные о структуре и давлении, не противоречащие предшествующим данным. В 2006 году на участвовавших в исследованиях скважинах с полным набором каротажных данных были проведены три проверочные работы, также по всем этим скважинам были получены данные о давлениях и отобраны образцы флюидов. В первую очередь проверочные работы проводились для тестирования заканчивания скважины и ее эффективности, в то же время преследовалась цель выявления потенциальных расположенных рядом барьеров (находящихся рядом экранов). Оперативно, после заканчивания скважины, буровое оборудование перенаправило нефть на баржу. Давление в соседних стволах скважин не было измерено, так как буровая установка имела возможность следить одновременно только за одной скважиной; добывающее оборудование на месторождении Atlantis позволяет проводить мониторинг сразу всех скважин, но ко времени проверочных работ оно еще не было полностью смонтировано. Каждая скважина была активизирована в течение двух дней, и, чтобы оценить освоенную скважину, записывался протокол добычи. После фонтанирования скважина была остановлена на несколько часов для регистрации давления по скважинным измерительным приборам. Анализ результатов испытаний скважин не дал однозначных ответов, но он позволил получить представление о проницаемости, призабойной зоне и находящихся вблизи нарушениях. Графики подъема давления после остановки для каждой скважины (PBU) согласуются с результатами исследований статической связности и прогнозами поведения коллектора.

### Выводы

Поскольку мы считаем, что изучение связности дает нам правдоподобное представление о текущем состоянии резервуара, мы знаем, что, когда начинается добыча и перепад давления увеличивается, могут вскрываться разломы, и картина расчлененности будет изменяться.

Таким образом, мы подчеркиваем, что исследование представляет метод, при помощи которого устанавливается статическая связность, на основании которой могут быть приняты решения по управлению резервуаром, особенно в ситуациях, когда сложно получать динамические данные до получения первой нефти. Группа намеревается обновить результаты, когда появятся новые данные, а одно из направлений этого исследования заключается в определении того, какие статические данные наиболее информативны для установления расчлененности коллекторов. Мы также считаем, что полезно применять эту технологию к каждому месторождению из портфеля компании, но осознаем, что установленный нами набор данных может в точности не подходить ко всем месторождениям.

Важно также отметить, что исследование, подобное этому, невозможно без эффективного и скоординированного сбора данных на разных стадиях разработки месторождения. Необходимость записи каротажных данных, измерения давления и опробования флюидов обычно подвергается сомнению, однако эти данные могут явиться источником важной информации, которая будет использоваться на протяжении нескольких лет для лучшего понимания резервуара.

На основании этого исследования подготовлена четко выверенная последовательность введения в эксплуатацию скважин, которая гарантирует, что взаимное влияние данных и другие данные, приобретенные при введении скважины в эксплуатацию, прольют свет на участки с наибольшей неопределенностью. Более того, это исследование акцентирует внимание на оптимальной разработке месторождения и максимальной отдаче, которая может быть получена только при разумном плане наблюдения, построенном на интерпретации статических данных.

### Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить следующих сотрудников BP, участвовавших в работе: Pramod Singh, Ramsey Fisher, John Howie, Jerry Sharp, Connie Bargas, Dave Grass, Dave Bergman, Sean Cavaleiro, John Oldroyd, Ron Day, Eric Radjef, Pengju Wang, и Patrice Mahob. Авторы также благодарят членов группы, которые участвовали в изучении связности на Atlantis в 2003 году под руководством Gene Roberts.

### Литература

- Intertek, <http://www.intertek-cb.com/chromatography/gaschromatography.shtml>. McCain, W.D. [1990] *The Properties of Petroleum Fluids Second Edition*.  
PennWell Books, Oklahoma. Schlumberger, <http://www.slb.com/content/services/evaluation/reservoir/mdt.asp>.

Получено 9 ноября 2007; принято в печать 11 декабря 2007.