

Подбор параметров динамической модели месторождения Schiehallion на континентальном шельфе Великобритании по данным сейсморазведки (Seismic history matching in the UKCS Schiehallion field)

Karl D. Stephen и Colin MacBeth из института нефтепромыслового дела, университет Heriot-Watt, Эдинбург, Великобритания

Введение

Менеджеры по разработке коллекторов хотели бы знать текущее состояние месторождения и быть в состоянии смотреть в будущее, чтобы знать возможные изменения в коллекторе. Для решения первой задачи им нужна информация о текущей фильтрации флюида и об изменениях давления, в то время как для решения второй требуются инструменты для точного описания коллектора и выполнения прогнозов, такие как имитационная модель месторождения. В этом случае могут быть приняты важные решения относительно средств технического обслуживания и оптимизации скважины, но что еще более важно перспективные площади могут быть идентифицированы и новые скважины пробурены.

Традиционно, имитационные модели использовались для определения возможного состояния коллектора и предсказания его поведения. Моделирование обычно начинается с геолога, который создает множество статических моделей, часто ограниченных данными анализа керна и петрофизическими данными каротажа совместно с данными 2D или 3D сейсморазведки до начала добычи. После этого заглубленные модели изменяются инженером таким образом,

чтобы они соответствовали статическим и динамическим скважинным данным, включая дебиты нефтеотдачи и локальные значения давления. Поскольку скважины расположены далеко друг от друга, существует много возможных решений, при которых скважинные данные будут соответствовать модели. Многократные сейсмические наблюдения (4D) могут сократить неоднозначность путем выделения изменений в флюидонасыщенности и/или давлениях. Эта информация теперь доступна в качественной форме почти повсеместно во множестве месторождений Северного моря и Мексиканского залива, однако цель состоит в том, чтобы комплексировать эти данные количественно с применением моделирования и привлечением других доступных данных.

Для достижения этой цели, мы разработали автоматизированный алгоритм подбора параметров динамической модели, который принимает на вход столько данных о коллекторе, сколько необходимо и достаточно для достоверного прогноза, включая данные анализа керна и данные каротажа, сейсмические данные, данные добычи, SCAL, и т.д. В этой статье, мы применяем наш метод к коллектору Schiehallion на континентальном шельфе Великобритании, где мы обновляем модель оператора путем применения геостатистических подходов и получаем улучшенное соответствие результатов сейсмическим и промысловым данным. Наконец, проанализирована неоднозначность параметров и предсказанного режима поведения коллектора.

Метод

Подробности работы нашего метода (Рис. 1) могут быть найдены в работе Stephen и др., 2005. Мы проводим множественные моделирования потока флюида, с одновременным использованием соответствующей параметризации описания коллектора. Эти модели преобразуются к предсказанным сейсмическим данным и режиму работы скважины, и сравниваются с результатами измерений путем вычисления невязки. После чего выбираются параметры методом разделения пространства параметров на множества лучших моделей, и процесс прямого моделирования выполняется снова. Каждый итерационный шаг повторяется до тех пор, пока не будут созданы достаточно подходящие модели в количестве, возможно, сотен или тысяч.

Создание множественных моделей
Имитационные модели могут содержать десятки тысяч ячеек и в 10 или в 20 раз больше неизвестных параметров. Геостатистические методы понижают размерность пространства возможных параметров на много порядков

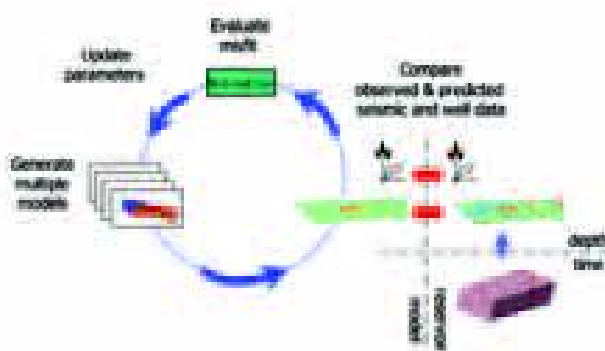


Рис. 1. Схема итерационного автоматического подбора параметров динамической модели. Преобразование время-глубина используется для создания карты наблюдаемых сейсмических данных, которые можно сравнивать с предсказанными сейсмическими данными совместно с данными добычи. После чего модели обновляются до получения набора лучших моделей. В результате этой процедуры рассчитывается функция плотности апостериорной вероятности (PDD), которая впоследствии может быть передискретизирована.

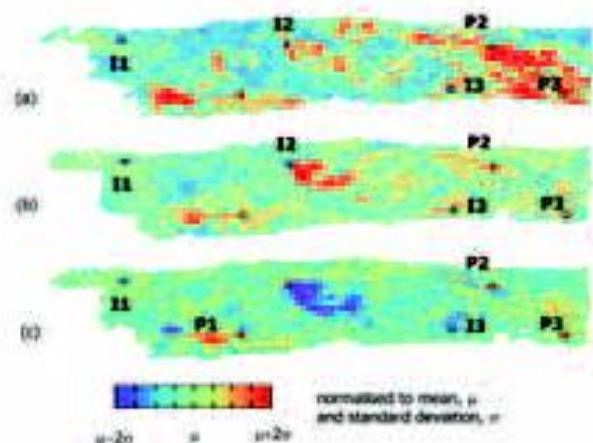


Рис. 2. (а) Карта RMS амплитуд для мигрированной суммы, и разности между суммой отрицательных значений «окрашенной» инверсии данных (b) до начала добычи, данных первого года (93-99) и данных (c) первого и второго годов (99-00). Амплитуды RMS и 4D сигналы были нормализованы путем вычитания среднего значения от соответствующей карты до начала добычи и деления результата на его среднеквадратичное отклонение. Поэтому разности представлены в этом масштабе, который используется для сравнения с предсказанными данными, подобно перемасштабированным. Нагнетательная скважина I2 активна только первый год, в то время как добывающая скважина P1 станет активной в начале второго года.

таким образом, модель становится зависимой от глобальной статистики, описывающей пространственные распределения параметров и связи между ними. Уменьшенное множество возможных параметров обычно включает в себя корреляционные интервалы для каждой переменной (например, пористости, проницаемости, отношение эффективных толщин к общим) а также для параметров, описывающих взаимосвязи (например, зависимости пористость - проницаемость).

Метод Пилотных Точек (Pilot Point method) с алгоритмом Kriging основан на таком методе. Набор пилотных точек выбирается на сетке моделирования в виде единичных ячеек, или в виде столбцов, а значения свойства определяются в процессе подбора параметров динамической модели. Точки эффективно обрабатываются как набор псевдо скважин так, чтобы свойства между ними определялись интерполяцией или, в этом случае, алгоритмом Kriging. Мы используем этот метод, чтобы обновлять распределение проницаемости посредством набора множителей. Мы также изменяем свойства разрывного нарушения, изменяя его множители проницаемости. Они изменяются как разрывные сегменты, которые могут быть группированы для уменьшения количества параметров. Местоположения разрывных нарушений очень трудно определить в автоматическом режиме, однако они должны быть выделены в процессе построения модели.

Сравнение сейсмических данных и модели коллектора

Мы вычисляем прогнозный сейсмический импеданс для каждой ячейки в имитационной модели, используя петрофизически реалистичную модель вместе со значениями флюидонасыщенности и давления, полученными в результате моделирования (например, MacBeth и др., 2005). Мы получаем объемный модуль, используя уравнение Гассмана, чтобы фиксировать эффект насыщения, в то время как эффект

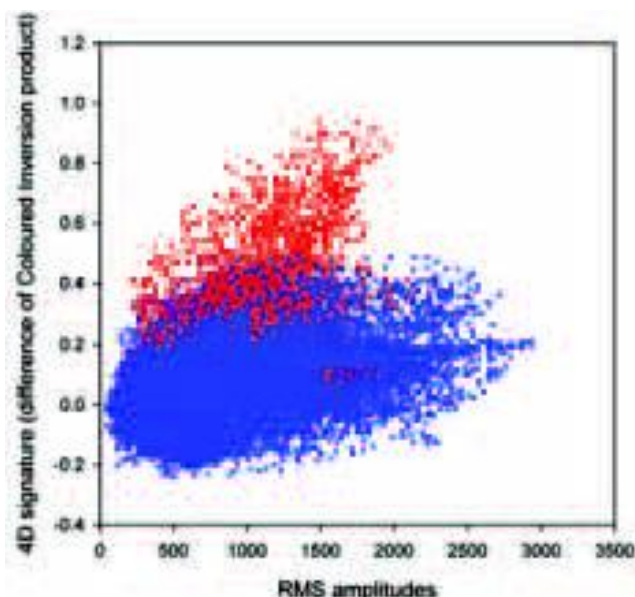


Рис. 3. Кроссплот наблюдаемого сигнала многократных сейсмических наблюдений определенного по сумме отрицательных значений «окрашенной» по сравнению с RMS амплитудами мигрированной суммы. Данные были разбиты согласно изменению давления в результате моделирования в той же самой точке. Здесь мы показываем только бины с увеличением давления при нагнетании, синий цвет - нулевое изменение давления, а красный цвет указывает на максимальное увеличение давления 17.24 МПа.

изменения давления представлен в виде объемного модуля сухой породы через эмпирическую зависимость (MacBeth, 2004). Параметры нашего упругого преобразования также включены в процесс подбора параметров динамической модели.

Чтобы сравнивать предсказанные значения импеданса с наблюдаемыми данными сейсморазведки, оба свойства преобразуются таким образом, чтобы представлять один и тот же куб данных, потому что предсказанный импеданс представляет собой плоские тонкие бины (обычно 100 м x 100 м x 4 м), по сравнению с наблюдаемыми данными в виде кубических бинов (25 м x 25 м x 25 м в нашем случае). Предсказанные значения импеданса преобразуются к карте путем увеличения шага сетки значений по вертикали и затем уменьшения шага данных до шага сейсмической сетки посредством интерполяции с взвешенными расстояниями между точками. Если наблюдаемые данные не дают абсолютного значения импеданса, то, для сравнения, мы нормализуем наблюдаемые и предсказанные наборы данных к их среднему значению до начала добычи и к среднеквадратичному отклонению перед сравнением.

Функция невязки используется для сравнения каждого значения наблюдаемой переменной с ее предсказанным эквивалентом, включая и сейсмические данные, и традиционные данные добычи из скважин. Хотя мы обычно предполагаем наличие корреляции ошибок в данных, то мы обнаруживаем, что для набора данных Schiehallion они в значительной степени некоррелируемы. Это уменьшает значение невязки к сумме квадратов, должным образом взвешенной на ошибку в данных, и они суммируются для всех моделей.

Анализ неопределенности

Согласно Байесовской теории, невязки дают условную вероятность каждой модели для исходных данных, и они используются для обновления предыдущих значений

вероятности в модели. Обновленные значения вероятности могут быть передискретизированы посредством методов цепи Маркова для метода Монте-Карло как часть анализа неопределенности неизвестных параметров, дающих в результате набор вероятностных распределений для каждого параметра. Эти вероятности могут также использоваться как веса для определения математического ожидания и дисперсии значений таких переменных, как насыщение или давление в каждой ячейке, в процессе долгосрочного прогноза режима коллектора. Так как мы ограничиваем пространство параметров вокруг наиболее вероятных моделей, то простое среднее значение может быть аппроксимировано взвешенным средним значением по всему множеству.

Результаты

Коллекторские свойства

Наш набор данных состоит из двух кубов данных Р-волн, мигрированной суммы и суммы «окрашенной» инверсии (например, Lancaster и Whitcombe, 2000), сделанных для трех съемок от 1993, 1999, и 2000. Добыча началась в 1998. Мигрированная сумма была скомпенсирована и калибрована посредством оператора, который выполнял фильтрацию и поворот фазы для формирования суммы «окрашенной» инверсии, т.е. псевдо относительного импеданса. Используя оператор для выполнения преобразования время-глубина и локализации пласта коллектора, мы создали карты атрибутов для каждой из съемок путем интегрирования данных в подходящих временных окнах.

Мы создаем карту среднеквадратичных (RMS) амплитуд мигрированной суммы и набора данных перед добычей (Рис. 2а), она соотносится с качеством коллектора, то есть со значением отношения эффективных толщин к общим толщинам как в маломощных коллекторах (Leach и др., 1999). Мы также создаем карты (Рис. 2б-с) разности суммы отрицательных значений «окрашенной» инверсии для каждой съемки, которые мы используем как разность псевдоимпеданса.

Сигнал от многократных сейсмических наблюдений (Рис. 2б и с) в значительной степени совпадает с ожидаемым режимом скважин с уменьшением напряжения в нагнетательных скважинах, в то время как извлечение газа может вызвать уменьшение напряжения в добывающих скважинах. Скважина I2 начала действовать только в этом году, и данные сейсмических наблюдений указывают на повышение напряжения на втором году эксплуатации по мере понижения давления к состоянию равновесия. Добывающая скважина P1 неактивна в этом году, и соседняя аномалия (Рис. 2б) отнесена к эффекту затемнения от активного слоя выше этого сектора (см. Ch.6, Soldo, 2005). Эффекты

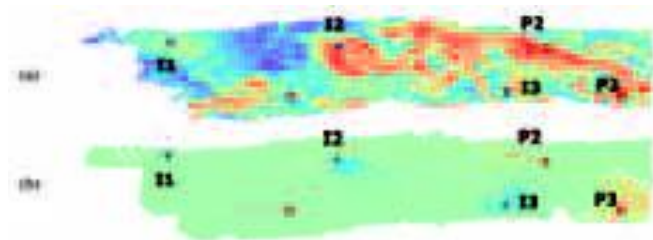


Рис. 4. Предсказанный (а) импеданс до начала добычи и (б) разность значений импеданса за первый год (93-99) для модели базового случая. Данные были нормализованы как на рисунке 2.б

водонасыщенности здесь не очевидны, хотя вызванное напряжение наблюдается во всех скважинах коллектора (Saxby, 2001).

Наконец, карта 4D атрибутов (Рис. 2б) демонстрирует значения, колеблющиеся между положительными и отрицательными величинами с периодом колебания несколько сотен метров. Этот динамический эффект может быть отнесен к шуму при создании 4D разности. Это происходит в областях, где изменения насыщения маловероятны и где давление должно уменьшаться от нагнетательной до добывающей скважины (например, на половине расстояния между нагнетательными скважинами I2 и I3). Визуальный осмотр говорит о том, что это изменение совпадает с изменениями RMS амплитуд мигрированной суммы. Однако мы наблюдаем повышенное напряжение в том месте где последние имеют низкие значения, и релаксацию там где они имеют большие значения. Возможно, что реакция давления зависит от литологического строения. Повышенное поровое давление в песчанике может сжать глину так, чтобы в ней возникнет избыточное механическое повреждение. На Рис. 3 показан кроссplot сигнал 4D – RMS амплитуда мигрированной суммы для каждого бина, в котором по прогнозам моделирования поровое давление возрастает. Они проявились в виде отдельных совокупностей в зависимости от величины и направления изменения давления.

Производительность модели в базовом случае

Моделирование базового случая имитационной модели, предоставленной полевым оператором, дает значения давления, которые качественно согласуются с сейсмическим откликом от коллектора (см. Stephen и др., 2005). Прогнозные значения импеданса были получены с использованием петроупругой модели с параметрами, выведенными для области работ (MacBeth, 2004). Сигнал 4D плохо сравнивается с наблюдаемыми данными. Базовые прогнозные значения

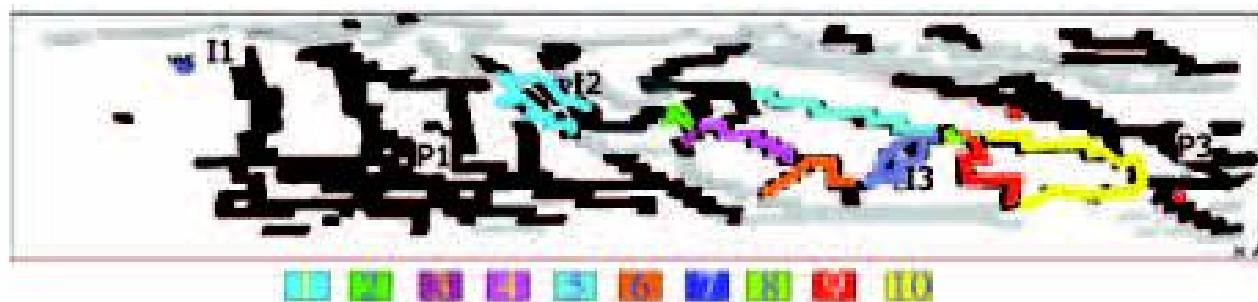


Рис. 5. Карта разрывных нарушений в модели в виде множителей проницаемости, присвоенных различным ячейкам. Разрывные нарушения определены как сегменты, каждый со своим множителем проницаемости. Был сделан подбор параметров путем группирования сегментов и применения масштабного коэффициента к каждой группе. Серый цвет показывает непроницаемые сбросы, а черный цвет показывает неизмененные сбросы. Цветами показаны различные группы нарушений, которые были исследованы в предварительном изучении (Stephen и др., 2005). Параметры разрывных нарушений из групп 2 и 3 изменялись в процессе подбора параметров, выполнявшегося в рамках данной работы.

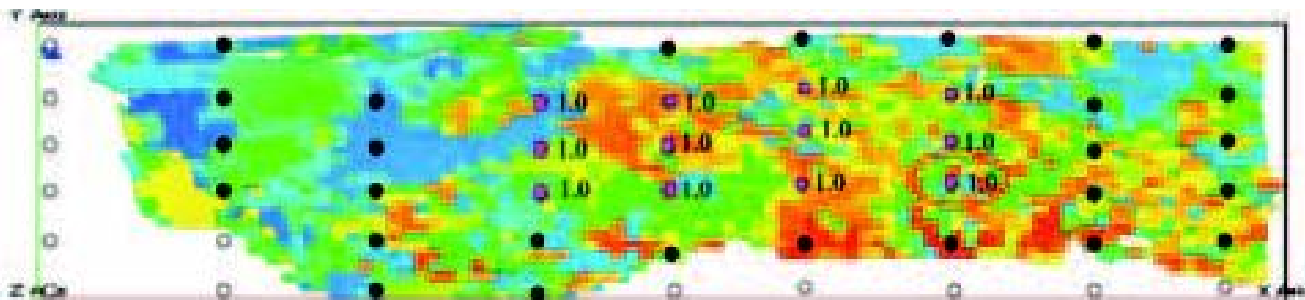


Рис. 6. Карта пилотных точек, используемых при подборе параметров модели на фоне поля проницаемости по данным оператора. Черные точки были зафиксированы, в то время как значения в розовых точках изменялись по предварительному исследованию. Значения в кружках изменялись при комбинированном подборе. Как только пилотные точки проницаемости были изменены, проницаемость в промежуточных ячейках рассчитывалась по алгоритму Kriging.

импеданса (Рис. 4а) весьма отличаются от наблюдаемой RMS амплитуды мигрированной суммы, что говорит о том, что большая часть значений отношения эффективных толщин к общему является завышенной, особенно в районе нагнетательных скважин I2 и I3. По значениям прогнозной разности импеданса (Рис. 4б) можно судить о том, что значения давления в модели являются заниженными, и присутствие большого количества песчаников приводит к преобладанию эффекта насыщения.

Подбор параметров динамической модели

Подбор параметров выполнялся в два этапа. Сначала,

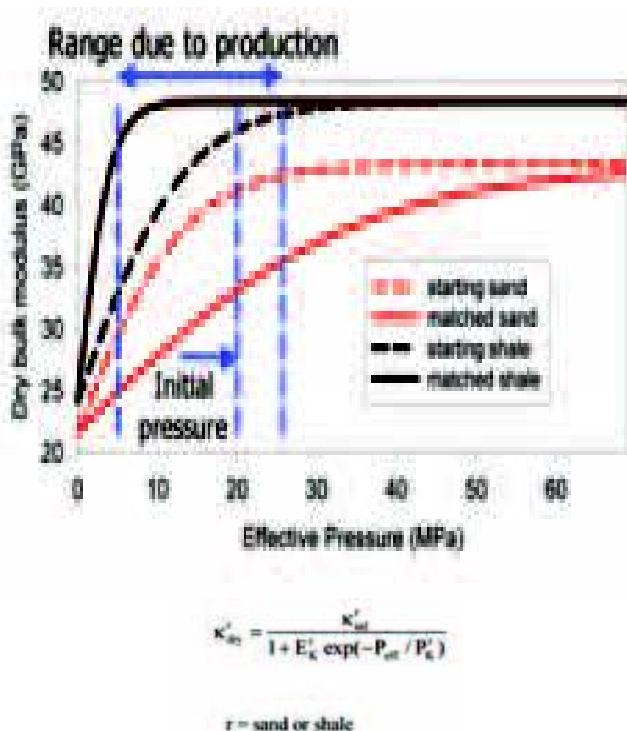


Рис. 7. Реакция давления для объемного модуля сухой породы для песчаника и глины. Штрихованные и сплошные линии соответствуют начальной и лучшей подобранной кривой. Красный и черный цвет обозначают песчаник и глину соответственно. Вертикальная линия в центре указывает начальное эффективное давление в коллекторе, а другие две указывают пределы давления при добыче. Уравнение для P_K (по MacBeth, 2004) определяет форму кривой. Значения до подбора, полученные по керну (MacBeth, 2004) одинаковы для песчаника и глины до подбора, но очень различаются после подбора.

статический куб порового пространства был обновлен таким образом, чтобы прогнозные изменения импеданса до начала добычи близко напоминали RMS амплитуды мигрированной суммы. Мы изменяем куб порового пространства путем изменения значений отношения эффективных толщин к общему (то есть отношение количества песчаника к количеству глины, последняя с нулевым объемом порового пространства) только потому, что оператор считал, что песок обладает почти однородной пористостью. Амплитуды RMS мигрированной суммы преобразованы в карту средних значений отношения эффективных толщин к общему толщинам коллектора и создано новое трехмерное распределение этих значений используя процедуру подбора тонкослойной модели среды по сейсмическим и другим данным методом глобальной оптимизации. Подробности опубликованы в работе Stephen и др., 2005. Хотя невязка уменьшилась, новая модель является теперь очень зависимой от давления, поскольку сама является некоторой комбинацией непосредственно давления или его влияния на сейсмический отклик.

На втором этапе значения проницаемости разломной зоны, проницаемости пород и давления в упругой модели обновлялись путем подбора параметров динамической модели. Общее количество разрывных нарушений весьма велико и они были сгруппированы (Рис. 5), а проницаемость была изменена на единицы для каждой группы. Проницаемости были обновлены по методу пилотных точек (например, Stephen и др., 2005) с применением алгоритма Kriging (Рис. 6). Параметры изменения давления по сейсмическим данным для песчаника и глины (P_K , Рис. 7) были обработаны отдельно, хотя модули всестороннего сжатия и модули сдвига в пределах литофаций, как предполагают исследователи, имеют одинаковые значения.

Предшествующие предварительные исследования на синтетических моделях (Stephen и др., 2004a и 2004b) и подбор параметров различного типа (Stephen и др., 2005) позволили исключить несколько параметров. Была выполнена одновременная инверсия пяти самых важных параметров, включая: две группы множителей в окрестности скважины I2 (Рис. 5), единственный множитель пилотной точки проницаемости в окрестности скважины I3 (Рис. 6) и переменные давления для песчаника и глины (Рис. 7).

На Рис. 8 показано, что невязка уменьшается по мере роста количества рассчитанных моделей, и параметры сходятся к лучшему решению. Предсказанные разности импеданса для лучшей модели (Рис. 9) демонстрируют заметное улучшение по сравнению со стартовой моделью, а значения давления уменьшаются в соответствии с уменьшением значений давления по сейсмическим данным. Реакция давления, первоначально взятая по данным анализа керна для песчаника (MacBeth, 2004), повысилась, для глины она понизилась (о другой реакции давления впоследствии сообщил оператор на этом месторождении). Это согласуется с реакцией давления,

интерпретированной по результатам измерений (иллюстрации 2 и 3). Мы видим, что данные добычи очень хорошо соответствуют скважинным данным (Рис. 10а) и в случае прогноза на более чем 25 лет, схожесть между моделями остается (Рис. 10b).

Невязка данных добычи намного меньше, чем невязка сейсмических данных в нашем случае и поэтому она менее полезна. Это, главным образом, происходит потому, что в случае базовой модели подбор данных добычи производился оператором с помощью традиционных методов и модель с обновленными значениями отношения эффективных толщин к общему была подобрана с той же самой точностью (Рис. 10а). Невязка нагнетания не равна нулю для обеих моделей, однако проницаемость в окрестности скважины I3 оказалась слишком маленькой. Скважина достигает предельного давления, и скорости нагнетания перестают совпадать. Эта задача разрешена в процессе подбора параметров, даже когда мы не используем невязку нагнетания.

После подбора параметров, мы анализируем апостериорную плотность вероятности, чтобы определить вероятностные распределения этих пяти параметров (Рис. 11). Параметры реакции давления для объемного модуля сухой породы имеют узкое распределение, в то время как все ещё имеет место неопределенность значений проницаемости разломных зон и множителя проницаемости. Мы также исследовали то, как параметры воздействуют на модели в режиме прогноза. На Рис. 12 изображено среднее насыщение и распределение давления на период четыре года наряду с неопределенностью, выраженной как среднеквадратичное отклонение для каждой ячейки. Большинство изменений больше связано с давлением, чем с насыщением, вследствие низкой пространственной частоты изменений параметров потока. Взвешивание, примененное в процессе осреднения является важной процедурой, потому что она позволяет нам должным образом оценить диапазон моделей, уменьшая вес недостоверных моделей. Изменения значений проницаемости пород и разрывных нарушений, которые получились в нашем случае, не имеют значительного влияния на результат прогноза.

Обсуждение

Подбор параметров динамической модели с использованием данных сейсморазведки может выполняться только с хорошими данными. В данном исследовании, набор данных ясно демонстрирует сейсмический отклик, но мы видим, что он мог быть достаточно шумным. Наш анализ (Soldo, 2005) показал, что более совершенный набор локализованных алгоритмов взаимного выравнивания сейсмических сигналов, типа трехмерных методик изменения масштаба (см. Rickett и Lumley, 1998; Hall и др., 2005) или разложение по собственным значениям для обработки данных многократным сейсмических наблюдений (Reid и др., 2005) может быть применен в будущем для уменьшения уровня невязки и нежелательного 4D отклика от пространственных несовпадений. Аномалии в окрестности скважины P1 появились в результате действий выше коллектора и мы не нашли способа для их удаления. Помня об этих погрешностях, теперь мы рассмотрим процедуру моделирования на примере улучшенных данных, чтобы определить, насколько качество данных может влиять на результат прогноза.

Анализ неопределенности параметров является крайне полезным для повышения качества определения коллекторских свойств. Параметры, которые являются очень недостоверными после подбора, могут игнорироваться путем понижения их вклада в результат или могут быть повторно включены в процесс позже, когда новые надо применить новые скважинные условия. Очень достоверные параметры могут утвердить или забраковать первоначальную модель со степенью уверенности, полученной при переборе моделей,

который мы проделали. В традиционном подборе параметров модели, где создается небольшое количество моделей, одна модель, найденная инженером, и демонстрирующая лучшее совпадение, может и не соответствовать первоначальной модели. Маловероятно, что процесс геологического моделирования, изменит свой ход из-за одной модели. То же самое может быть сказано относительно упругих параметров. Если результат подбора параметров не согласуется с данными анализа керна, может потребоваться дальнейший анализ. Здесь мы показали что, данные анализа керна могут использоваться как опорные, но они завышают прогнозные значения 4D отклика.

Анализ прогнозных значений без использования текущей модели также важен. Знание положения фронта вытеснения является критическим для оптимизации управления скважиной и выделения перспективных областей. Подобный

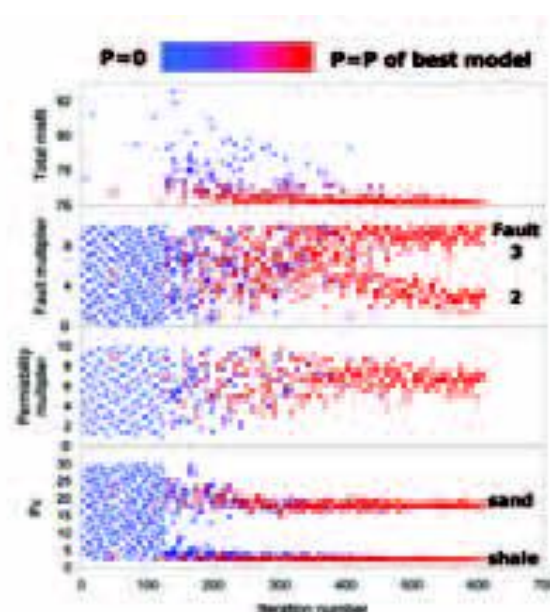


Рис. 8. Изменение (а) невязки, (б) множителя для проницаемости разрывных нарушений, (с) множителя проницаемости породы, и (d) P_k (см. Рис. 7), при одновременном изменении всех параметров. Символы окрашены в соответствии с весами вероятности относительно наиболее вероятной модели. Изначально были созданы 128 моделей, и из них многие имели невязку большую, чем диапазон значений на рисунке. 64 новых модели создавались на каждой итерации до получения 32 лучших моделей ($n_s = 64$, $n_r = 32$).

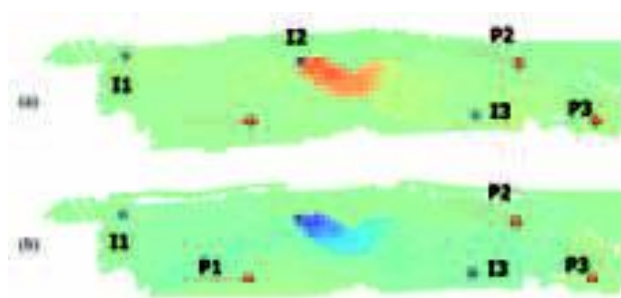


Рис. 9. Изменение предсказанного импеданса для лучшей модели, полученной в результате подбора параметров (а) 93-99 и (б) 99-00. Данные были нормализованы как на рисунке 2.

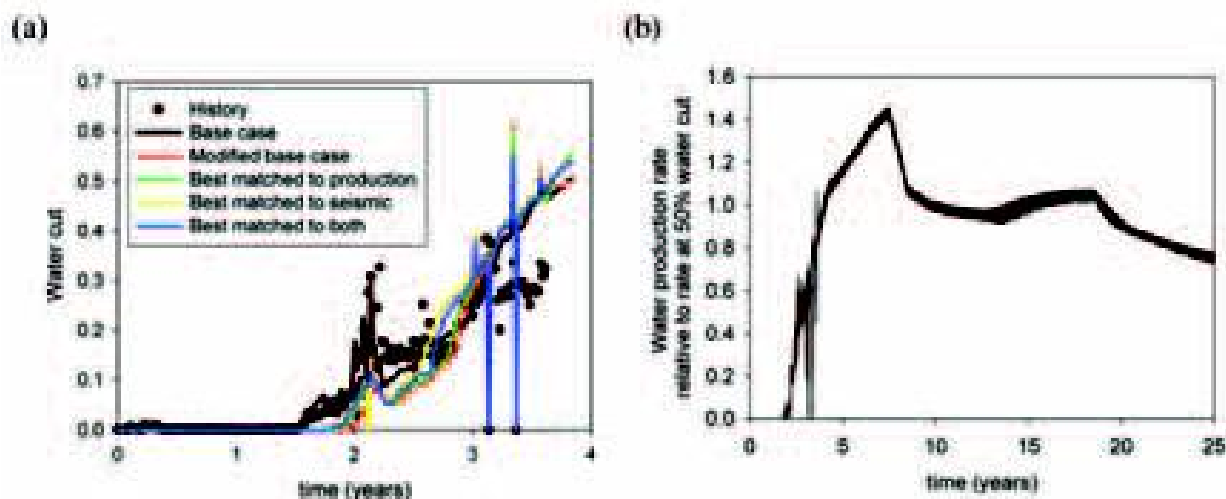


Рис. 10. (а) Сравнение содержания воды в скважине P2 за период четыре года, для которых имеются данные моделирования, для нескольких моделей, включая базовый случай и лучший результат подбора и (б) прогноз добычи воды на период более чем 25 лет для множества моделей, полученных в результате подбора, включая текущий период.

анализ давлений может быть сделан для предсказаний выбросов газа, и он также может помочь с оценкой изменений в сейсмическом сигнале для планирования будущих съемок.

Вышеупомянутые анализы сильно зависят от количественной оценки апостериорной вероятности для каждой модели. Это требует калибровки погрешности модели. Имитационная модель часто создается в крупных масштабах, таких, что на поток влияет численная дисперсия и избыточное сглаживание значений проницаемости (Christie, и др., 2005). В процессе преобразования крупномасштабных моделей к прогнозным сейсмическим данным, в них вносятся дополнительная ошибка из-за предположений о

распределениях насыщенности и их взаимодействии со значениями пористости в более мелком масштабе. Началась работа по калибровке погрешности модели с помощью мелкомасштабного моделирования, и мы надеемся применить интерполяцию погрешности к другим моделям, подобным тем, что описаны O'Sullivan (2004).

На апостериорную вероятность также влияет взаимное масштабирование данных, необходимое для обеспечения того, что свойства по сейсмическим данным представляют тот же самый куб данных. Некоторые коллеги уменьшают масштаб сетки значений насыщенности и давления перед применением упругого преобразования (Mezghani и др. 2004), хотя это, возможно, не оказывает никакого влияния. С другой стороны, сетка наблюдаемых данных может быть локально загружена, что может потребовать другого моделирования погрешности.

В целом, мы видим, что полученные данные должны соответствовать базовой съемке, чтобы улучшить наши возможности в 4D сейсморазведке. В общем случае

может быть выгодно изменить статическую модель в рамках цикла подбора параметров. Подход, использованный здесь, был более прагматическим. Мы были отделены от процесса первоначального геологического моделирования и могли лишь обновлять модель. Полностью комплексный подход в данное время исследуется.

Мы улучшили описание коллектора Schiehallion на континентальном шельфе Великобритании, повышая степень соответствия подобранных параметров сейсмическим данным.

Большая часть улучшений была сделана в окрестности нагнетательных скважин, в то время как в окрестности добывающих скважин, свойства были уже хорошо определены по результатам исходного подбора параметров динамической модели оператором.

Выводы

Был разработан многомодельный подход с систематическим учетом сейсмических данных, к процессу подбора параметров динамической модели месторождения. В применении подхода к коллектору Schiehallion на континентальном шельфе Великобритании мы выяснили следующее:

- Подбор базовых сейсмических параметров (RMS амплитуд) нужно выполнять до подбора параметров модели.

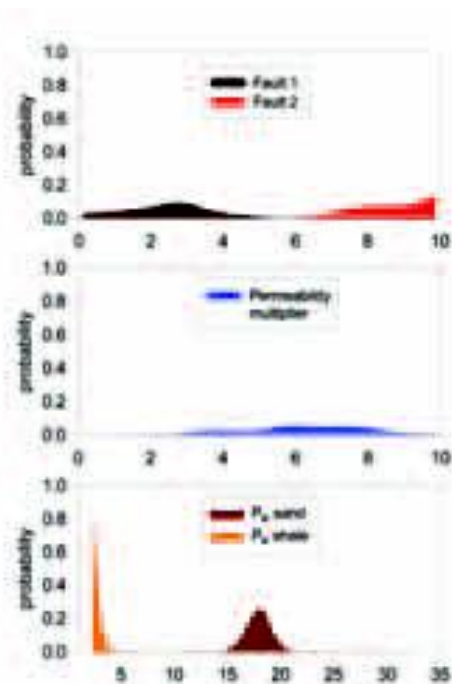


Рис. 11. Вероятностные распределения пяти параметров после передискретизации значений PDD для (а) проницаемости разломных зон, (б) множителя проницаемости породы и (с) констант давления для песчаника и глины.

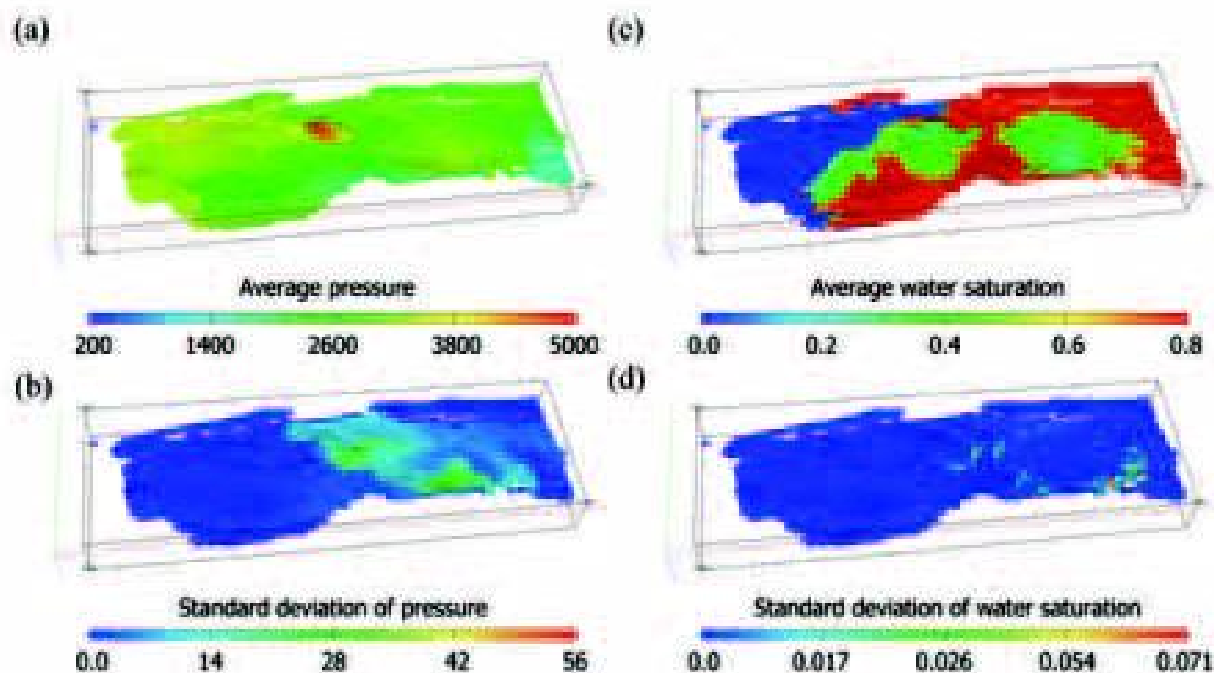


Рис. 12. Пространственное распределение свойств флюида по всем моделям, созданным за четыре года моделирования, отображающее (а) среднее насыщение и (б) его среднеквадратичное отклонение, (с) среднее давление и (д) его среднеквадратичное отклонение. Среднее значение и среднеквадратичное отклонение вычислены для каждой ячейки, путем взвешивания апостериорной вероятности каждой модели, полученной на основе невязки и плотности значений в пространстве возможных параметров.

- Такие параметры коллектора как множители проницаемости разломных зон и параметры петроупругого преобразования являются важными. Необходим одновременный подбор параметров.
- Реакция давления глины отличается от реакции давления песчаника, который хорошо виден на исходных данных и по результатам подбора параметров.
- Значения насыщения и давления предсказываются с низкой неопределенностью для параметров, изменяемых в данном исследовании. Это дает уверенность при управлении коллектором в будущем, включая выделение перспективных областей.

Благодарности

Благодарим следующие организации за финансовую поддержку из этой работы: BG Group, BP, Shell, Total, Департамент Торговли и Промышленности Великобритании, и Enterprise Oil. Мы также благодарим Schlumberger Geoquest и Hampson-Russell за возможность использования их программного обеспечения.

Ссылки на литературу

Christie, M.A., Glimm, J., Grove, J. W., Higdon, D. M., Sharp, D. H., and Wood-Schultz, M.M. [2005] Error analysis and simulations of complex phenomena. *Los Alamos Science*, **29**, 6-25.

Hall, S., MacBeth, C., Barkved, O. I., and Wild, P. [2005] Cross-matching with interpreted warping of 3D streamer and 3D OBC data at Valhall for time-lapse assessment. *Geophysical Prospecting*, **53**, 283-297.

Lancaster, S. and Whitcombe, D. [2000] Fast Track Coloured Inversion. *70th Annual SEG International Meeting*, 1572-1575.

Leach, H. M., Herbert, N., Los, A., and Smith, R. L. [1999] The Schiehallion development. In Fleet, A. J. and Boldy, S. A. R. (Eds). *Petroleum Geology of Northwest Europe*, Proceedings of the 5th Conference, 683-692. Geol. Soc., London, UK.

MacBeth, C. [2004] A Classification for the Pressure-Sensitivity Properties of a Sandstone Rockframe. *Geophysics*, **69**, 2, 497-510.

MacBeth, C., Stephen, K. D., and McNally, A. [2005] The 4D seismic signature of oil-water contact movement due to natural production in a stacked turbidite reservoir. *Geophysical Prospecting*, **53**, 183-203.

Mezghani, M., Fornel, A., Langlais, V., and Lucet, N. [2004]. History matching and quantitative use of 4D seismic data for an improved reservoir characterisation. SPE90420. *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA*.

O'Sullivan, A. E. [2004] *Modelling simulation error for improved reservoir prediction*. PhD Thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland.

Reid, F., Bertrand, A., McNally, A., and MacBeth, C. [2005] 4D Signal Enhancement Using Singular-value Decomposition: Application to Mapping Oil-water Contact Movement Across the Nelson Field. *Geophysical Prospecting*, **53**, 253-263.

Rickett, J. and Lumley, D. [1998]. A Cross-Equalization Processing Flow for Off-the-Shelf 4-D Seismic Data. *SEG International Annual Meeting, New Orleans, USA*.

Saxby, I. [2001] Impact of 4-D Reservoir Monitoring in the Schiehallion Field UKCS. *AAPG Annual Meeting, Denver, USA*.

Soldo, J. [2005] *Quantitative Integration of Time-Lapse Seismic Data*. PhD Thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland.

Stephen, K. D., Soldo, J., MacBeth, C., and Christie M. [2004a] Practical dynamic updating of reservoir models

using frequently acquired 4D seismic data. *66th EAGE Conference and Exhibition, Paris, France.*

Stephen, K. D., Soldo, J., MacBeth, C. and Christie M. [2004b] A multiple model approach to history matching and uncertainty analysis using time-lapse seismic. *9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Cannes, France.*

Stephen, K. D., Soldo, J., MacBeth, C., and Christie M. 2005. Multiple Model Seismic and Production History Matching: A Case Study. SPE94173. *14th Europec Biennial Conference, Madrid, Spain.*