

## Геофизика и технологии разработки коллектора

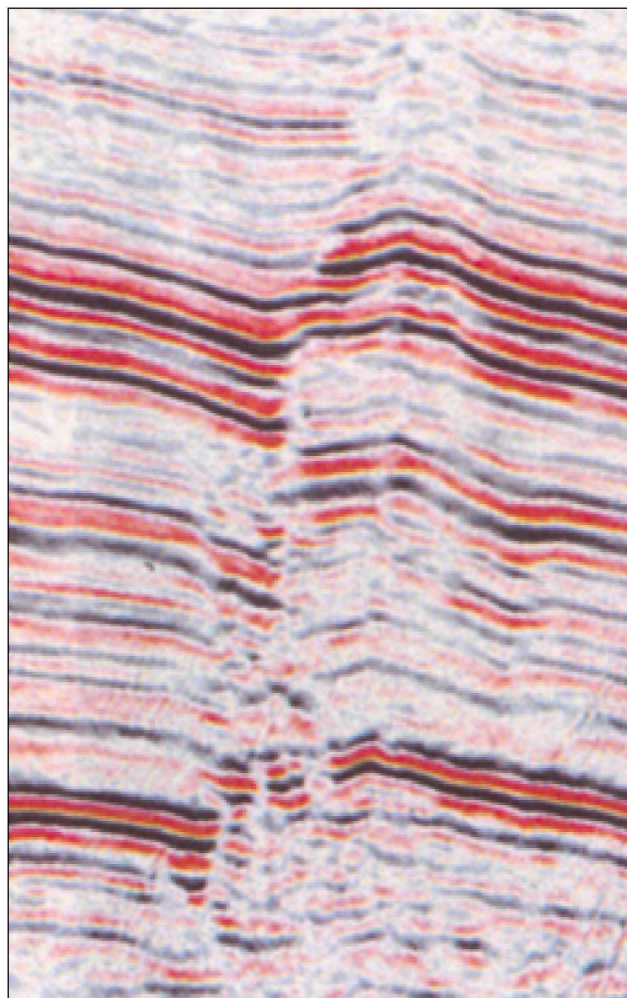
### Геомеханика разрывных нарушений: воздействие на сейсмическое изображение. Geomechanics of faults: impacts on seismic imaging

Gary Couples\*, Jingsheng Ma, Helen Lewis, Peter Olden, Juan Quijano, Tomi Fasae, и Rebecca Maguire, из Heriot-Watt Institute of Petroleum Engineering описывают некоторые методы, в которых степень деформации пород может сказываться на изображении и интерпретации разрывных нарушений.

Сейсмические исследования представляют один из главных методов характеристики пространственной изменчивости резервуаров. Карты могут отображать несколько регионов с различными сейсмическими характеристиками внутри целевого интервала; они могут способствовать выявлению литологических и диагенетических особенностей резервуара и созданию ограниченных геомodelей межскважинных участков. Могут быть закартированы конфигурации резервуаров и отрисованы более крупные разрывные нарушения в них в виде пересечения горизонталей и их смещений. Сейсмика, однако, не очень эффективна при определении структурных деталей в пределах разломной зоны (рис. 1). Должны быть предусмотрены другие методы, чтобы обеспечить оценки воздействия разломов на движение флюидов. Наблюдения на дневной поверхности некоторых хорошо известных разломов позволило исследовать местность, чтобы разработать типичную модель пространственных структур, которые обычно имеют место в разломных зонах, воздействующих на разрез кремнеобломочных пород. Мы можем назвать такую пространственную структуру зоной разломного нарушения. Идеальная зона разломного нарушения (FDZ) состоит из узкой центральной зоны, которая включает в себе интенсивно расколотые породы (которые именуются как тектоническая брекчия), окруженной областями менее деформированных пород. Центральная зона разлома и зона деформаций более мощные, когда увеличивается смещение по разлому, наводя на мысль о прогрессирующем развитии разломного нарушения.

Центральная зона разлома для большинства разломов в кремнеобломочных породах содержит много тектонической брекчии (рис. 2), чьи характеристики пористости и проницаемости обычно ухудшены по сравнению с таковыми исходных пород. По этой причине мы обычно считаем такие разломы барьерами. Глинистые и илистые частицы, которые являются либо исходными компонентами последовательности пластов породы, либо могут быть созданы процессами перемалывания, действующими в течение образования разрывов или сбросов, концентрируются в центральной зоне разлома и могут быть размазаны по ней. Вместе с тем, это описание привело к разработке подходов (таких как вычисление коэффициента заполнения трещин глинистыми сланцами ((shale gouge ratio) или SGR), которые могут быть использованы для достоверной оценки эффекта пластической деформации с акцентом на роль тонкозернистых компонент. Различные методы используют значения SGR (или подобные параметры) в алгоритмах, которые позволяют эффект пластической деформации включить в резервуарные геомodelи и имитационное моделирование пластической деформации (Manzocchi et al., 2002).

В пределах окружающей зоны деформаций часто наблюдают развитие более



**Рисунок 1** Часть сейсмического профиля, который пересекает разломную зону. Отметим, что невозможно четко идентифицировать геометрию и свойства нарушенных пород, но существует очевидное расчленение разлома от одной плоскости (на малоглубинном уровне) на множество плоскостей глубже. Чтобы представить эффект искажения, должен быть проведен анализ разломных нарушений.

мелких разломов, формирующих сложные сетки двумерных структурных особенностей, которые разрывают целостность вмещающих пород. В таких случаях, подбирая подходящие методы моделирования (Ma et al., 2007), возможно оценить эффективную проницаемость пород зоны деформации. Зоны деформации могут быть также открытыми проводящими структурами. Моделирование потока можно также привлечь для определения эффекта таких структур (Jourde et al., 2002).

\* gary.couples@pet.hw.ac.uk.  
© 2007 EAGE

## Геофизика и технологии разработки коллектора



**Рисунок 2** Примеры центральной части разломных зон с множественными компонентами нарушенных пород. Отметим четкие рисунки линзообразных тел.

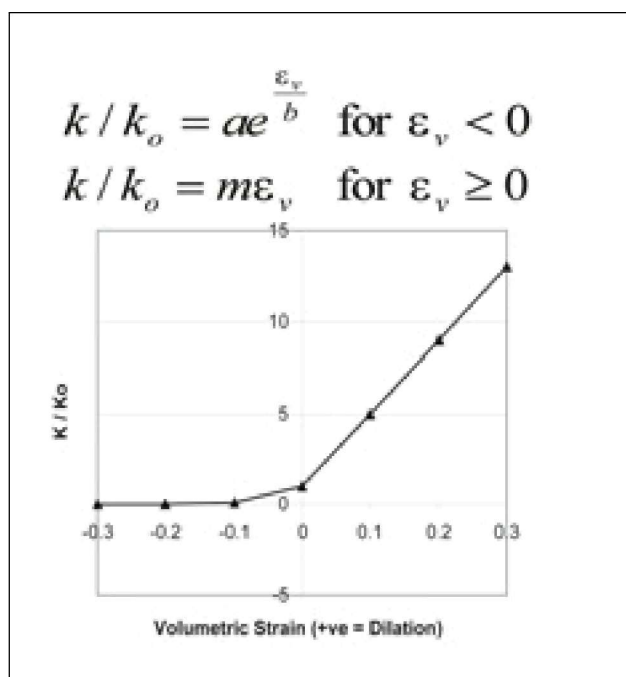
Достаточен ли этот уровень понимания? Конечно, нет. Ясно, что характеристики разломных зон меняются в зависимости от пород, прилегающих к разлому, и от свойств пород, которые перемещены через какую-либо точку на разломе. Разломные характеристики также зависят от конкретной геологии деформации (например, имеет место образование разломов на небольшой глубине, или глубже?). Но непосредственные наблюдения ограничены такими выходами на поверхность (обнажениями), которые преподнесла нам природа, и они не являются исчерпывающими или достаточными, и, следовательно, невозможно получить полное эмпирически обоснованное понимание свойств FDZ, которые могли бы быть использованы для характеристики резервуара.

В 2002 г. был создан консорциум, финансируемый отраслевыми компаниями (через Производственного Технологического Посредника – Industry Technology Facilitator), включающий Heriot-Watt, Leeds (Исследование Деформации Пород), Texas A&M и Кентский Университет. Этот консорциум обратился к решению фундаментальных проблем, связанных с разрывными нарушениями, и в настоящее время результаты исследования (первоначально доложенные инвесторам) опубликованы в соответствующих изданиях несколькими группами исследовательского коллектива. Один из главных разделов этого проекта консорциума включал использование геомеханического имитационного моделирования для развития нового понимания процесса образования разрывов или сбросов. Это моделирование обнаружило сложные, но самоупорядоченные деформационные процессы, которые представляют неожиданно возникающие явления. Некоторые детали имитационного моделирования могут быть найдены в Couples et al. (2007) и Lewis et al. (2007) с другими сопровождающим эту работу публикациями. В этой короткой статье охарактеризовано несколько последующих исследований, которые были выполнены во время магистерских студенческих работ Heriot-Watt, в которых мы использовали геомеханическое имитационное моделирование для воспроизведения разломных зон. Это позволило нам проверить некоторые полученные в результате прогнозы, которые могли быть сделаны, и эффект разломных зон в сейсмическом изображении. Это изображение зависит от акустических свойств пород системы и эффектов, связанных с флюидами. Следовательно, нам необходимо рассмотреть, как влияют деформации и на реологические и на акустические свойства, и использовать эту информацию для создания

сценариев, которые демонстрируют возможность прогнозирования и выявляют определенные интересные артефакты.

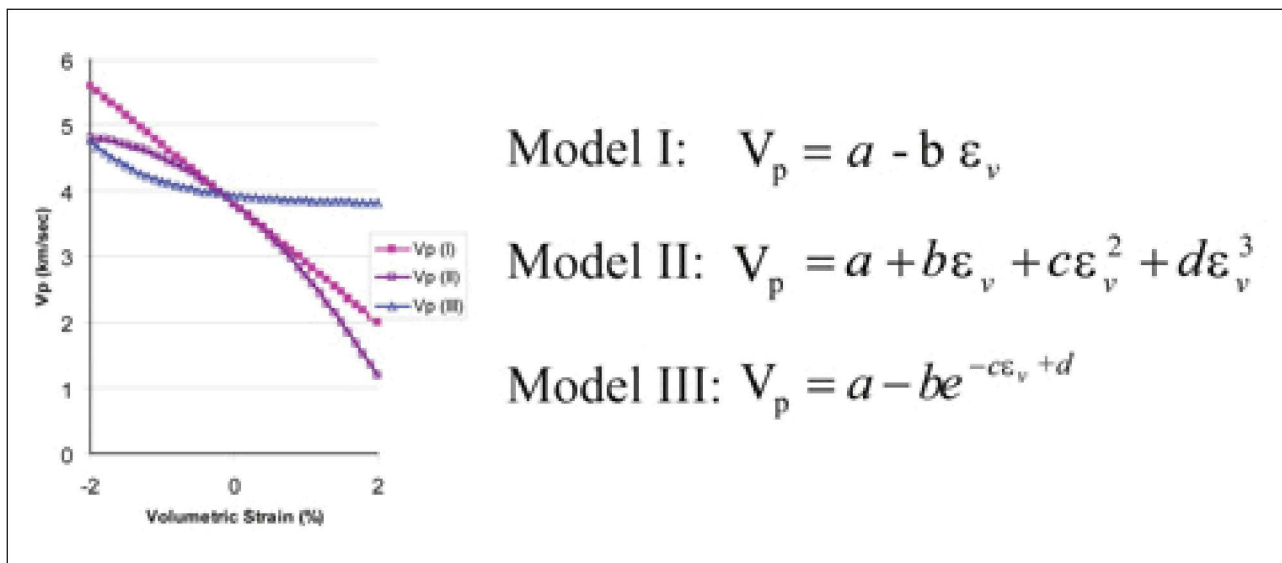
### Влияние деформации на свойства пород

Когда породы испытывают необратимую деформацию, это означает, что они достигли предела текучести (они перешли порог эластичности). Необратимая деформация называется пластической деформацией, а для интересующих нас пород, которые являются пористыми, соответствующей теоретической основой является поро-пластичность. Поро-пластичность является нелинейным откликом материала, и не существует простой зависимости между деформирующей силой и напряжением в течение деформации. В целом, поро-пластическая деформация включает в себя важный объемный компонент, который обозначает, что породы претерпели изменения в пористости во время деформации. Для хорошо литифицированных пород, которые испытали деформации в условиях более низкого давления, обычным результатом является наличие дилатационного напряжения. Дилатация может быть проявлена в виде сети микроструктур, которая может вызвать существенный сейсмический анизотропный отклик, одновременно приводя к увеличению проницаемости. Для менее консолидированных пород деформация часто проявлена в форме уплотнения, породы становятся менее эластичными по сравнению с тем, какими они были до деформации. Проницаемость обычно уменьшается либо вследствие обширной перекомпоновки частиц, либо вследствие создания



**Рисунок 3** Преобразование проницаемости, основанное на объемной деформации.  $K/K_o$  является отношением деформированной проницаемости пород к их исходной проницаемости. Дилатационная деформация приводит к увеличению проницаемости, в то время как деформация уплотнения приводит к уменьшению проницаемости.

## Геофизика и технологии разработки коллектора



**Рисунок 4** Иллюстрация некоторых возможных преобразований скорости, которые зависят от объемной деформации. Дилатационная деформация ведет к уменьшению скорости, в то время как компактная деформация уменьшает скорость.

планарной сдвиговой полосы, чей тонкозернистый обломочный материал действует как барьер для пластической деформации. Когда этих планарных барьеров много, размеры пластической деформации существенно уменьшаются. Таким образом, поро-пластическая деформация заслуживает пристального внимания при разработке моделей потоков в разломных зонах.

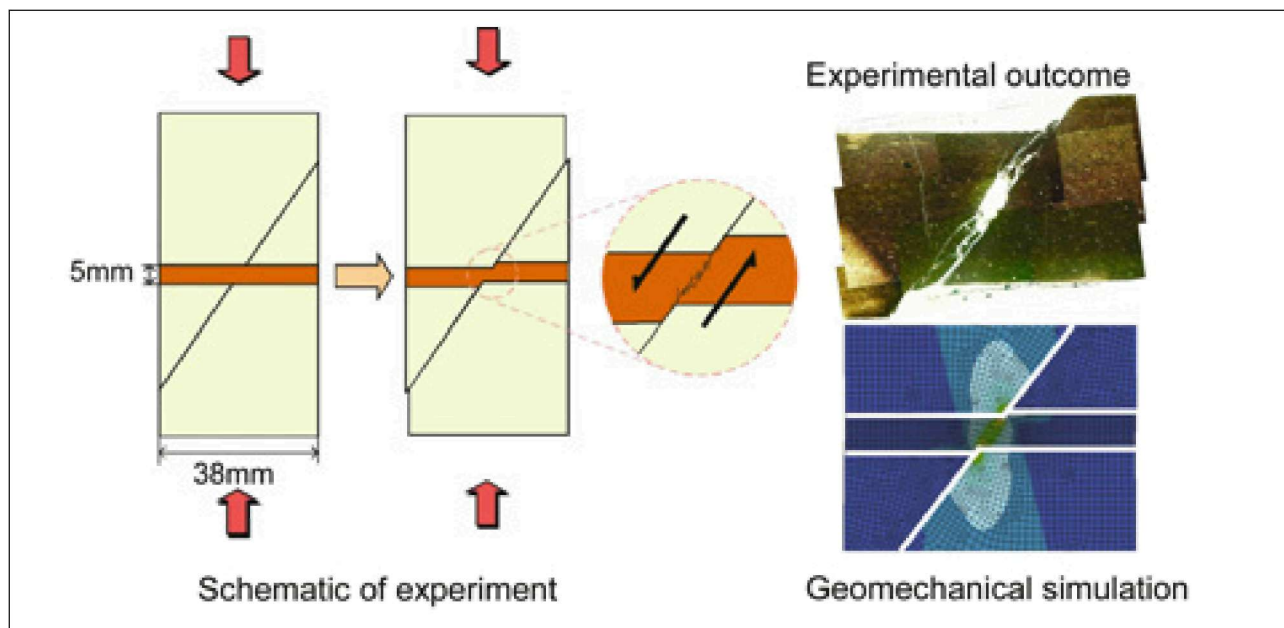
Необходимо подчеркнуть, что, по нашему мнению, свойства пород больше связаны с деформацией, чем с напряжением. Эти свойства (здесь мы концентрируем внимание на свойствах пластичности и акустических свойствах) являются фундаментально определенными природой частиц и конфигурациями любых флюидных фаз, которые представлены в поровой системе. Мы можем сослаться на зернисто-пористую систему как текстуру пород. Таким образом, именно текстура пород и содержащиеся в них флюиды обуславливают свойства пород. Текстура изменяется под действием пластических деформаций (и до небольшой степени под действием поро-эластических деформаций), и, таким образом, очень важно получить функциональные зависимости между деформациями и свойствами. Эти зависимости могут быть использованы для преобразования режима деформации в соответствующие изменения свойств, поскольку они могут быть рассчитаны в процессе геомеханического имитационного моделирования. Нет смысла пытаться связать свойства с напряжением, поскольку режим напряжения неоднозначно связан со спецификой деформации (текстура) — за исключением, вероятно, внутренних частей поро-эластической области (области, изученной в результате многих лабораторных исследований). Для необратимых деформаций мы должны использовать деформацию, и мы предполагаем, что правильной стратегией может быть принятие деформации в качестве независимого параметра во всех петрофизических и физических исследованиях горных пород.

Поро-пластическая деформация также воздействует на акустические свойства пород — опять же, поскольку она изменяет текстуру. Мы ограничим наши комментарии методом, когда деформация изменяет акустический импеданс (для простоты мы рассматриваем изотропный случай). Изменение плотностной компоненты в акустическом импедансе непосредственно связано с изменением пористости, которое имеет место в течение воздействия поро-пластической деформации. Изменение скоростной компоненты может быть понято в терминах сопряженных эффектов, связанных с изменениями текстуры. Пористость осуществляет изменение таким образом, что присутствует эффект Wyllie. Но скелет тоже меняется. И, так как система пор различна, необходимо учитывать влияние флюидов. Эта статья не является подходящим местом для описания полного, основанного на использовании деформации, подхода к составлению прогноза акустического импеданса, но позволяет сказать, что текстура и флюидные изменения, обусловленные поро-пластическими деформациями, представляют правдоподобную причину для изменения акустических свойств. Несомненно, существует поле для значительных теоретических и лабораторных исследований по этой проблеме.

Так как нашей основной целью здесь является исследование в первую очередь влияния деформации на сейсмическое изображение разломных зон, мы выберем два простых представления (изображения) для функциональной зависимости между приращениями поро-пластической деформации и последующими воздействиями ее на свойства горных пород. Для проницаемости мы предполагаем, что дилатационные деформации связаны с увеличением проницаемости, а деформации уплотнения с уменьшением проницаемости. Мы обнаружили, что удобно представить эти эффекты (рис. 3), соотнося измененную проницаемость породы с ее исходным (до деформации) значением в виде отношения ( $k/k_0$ ). Опубликованные лабораторные данные по изменениям проницаемости часто представлены как функция изменения состояния напряжения, таким образом, мы должны провести некоторые оценки деформаций на основании соответствующей информации, чтобы иметь возможность использовать эти данные. Для определения изменения плотности мы просто вычисляем новую плотность, базируясь на изменении пористости. Для скорости мы принимаем без доказательства, что скорость (в данном случае  $V_p$ )



## Геофизика и технологии разработки коллектора



**Рисунок 5** Экспериментальная установка, которая воспроизводит зону разломных нарушений и (часть) соответствующая геомеханическая имитационная модель. Имитация деформации воспроизводит то, что мы наблюдаем в эксперименте (рис. 6).

увеличивается с уплотнением и уменьшается с дилатацией. Функция, описывающая эти зависимости, не известна, поэтому мы рассмотрели несколько возможных случаев (рис. 4).

#### Прогнозы, основанные на деформации

На основании доказательств, представленных в других публикациях (см. Couplés et al., 2007), мы предполагаем, что логично трактовать получаемую информацию по геомеханическому имитационному моделированию как устанавливающую связь с действительностью. Следуя этому, мы находимся в сфере количественных данных по пространственному (пропорционально увеличивающемуся) распределению параметров деформации (и напряжения). В этой статье мы используем один из сценариев имитационного моделирования (рис. 5), в котором зона скалывания перерабатывает первоначально однородный материал в результате смещений вдоль границы. Эти смещения вызвали деформации в модели, подобные деформациям при нормальном сбросе. Мы интерпретируем имитированную зону скалывания как аналог разломной зоны (FDZ) с находящимися внутри нее участками деформации большей или меньшей степени, которые формируются в структуры, имеющие сходство с теми, что видны на обнажениях (рис. 6).

Существует несколько подходов, которые могут использовать результаты имитационного моделирования, чтобы по-новому взглянуть на способы воздействия разломной деформации на сейсмический отклик. В одном подходе мы можем преобразовать деформацию в распределение проницаемости и использовать это для вычисления распределения флюидного давления. Мы могли бы преобразовать получающиеся в результате флюидные давления в изменения поро-эластического состояния, а затем определить ожидаемый сейсмический отклик. (Работа такого рода, которая не фокусируется на роли разломов, уже представлена в литературе для геохимического моделирования, и такой подход представляет в настоящее время собственный путь в методах коммерческого резервуарного имитационного моделирования.)

Здесь мы показываем потоковые эффекты в разломной зоне (FDZ) для двух ситуаций: одна представляет поступательное развитие разломного барьера по мере воздействия его на горизонтальный поток (рис. 7), а другая ситуация представляет собой бреши в перекрывающей породе, обусловленные ростом разлома (рис. 8). Эти примеры демонстрируют функциональность преобразования растяжения в проницаемость. Однако мы не прибегаем непосредственно к вычислению синтетического сейсмического отклика, обусловленного этими флюидными изменениями. Причина этого заключается в том, что пластическая деформация будет также изменять текстуру пород, и, таким образом, акустические свойства, и эти эффекты необходимо учесть перед вычислениями сейсмического отклика. Простое вычисление поро-эластического типа (например, изменения скорости в результате изменения флюидного давления) не может быть адекватным в этом случае.

Для примера, приведенного здесь, мы выбрали  $V_p$  в зависимости от модели деформации, именуемой как «Модель Г» на рис. 4. Основываясь на этом преобразовании, мы можем вычислить скорость во всех точках модели. Результат аналогичен тому, которые получены при использовании других преобразований, так как строгий вид преобразования менее важен, чем определяемая зависимость между скоростью и объемной деформацией. Объемная деформация каждой ячейки геомеханической модели позволяет рассчитать изменение плотности, поэтому мы можем получить акустический импеданс по всей модели. Изменение порового давления в нашем примере является небольшим, поэтому для ясности мы игнорируем здесь (очень маленький) поро-эластический эффект, связанный с изменением давления.

Используя распределение акустического импеданса, мы можем создать синтетический сейсмический профиль (рис. 9). Изображения, показанные здесь, используют частоту выше нормальной (150Hz) и расстояние между сейсмическими трассами короче нормального (6.25 м).

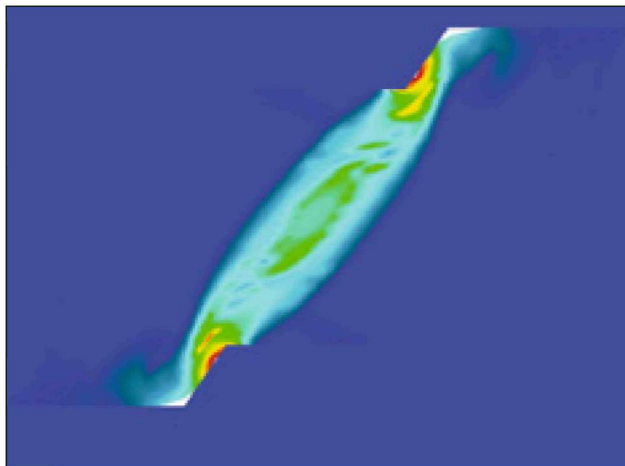
## Геофизика и технологии разработки коллектора

На этих синтетических профилях разломная зона показана как зона бифуркации (одна разломная плоскость на малоглубинном уровне раскалывается на две погружающиеся разломные плоскости). Рефлектор, возникающий на подошве слоя, также деформируется (особенно в случае, когда прогноз скорости базируется на значениях напряжения). Ни бифуркация разломной плоскости, ни аномальная форма подошвы слоя не являются действительно реальными. Зато они являются артефактами скоростного распределения (заметим, что область деформации создает участки с низкой и высокой скоростью, которые проявлены в виде линз). Преобразование напряжения обеспечивает правильное представление и поро-эластического эффекта, и эффектов, возникающих от явлений, зависящих от поро-эластичности. Специфика изображений этих артефактов должна быть исследована, используя методы более высокого порядка, но мы предполагаем, что ответ подтвердит преломление лучей, связанное с линзообразной скоростной аномалией.

Также отметим, что (реальные) более низкие частоты и большее расстояние между пунктами взрыва ослабит проявление перекоса разлома на синтетическом изображении, так как акустическое изображение разломной зоны занимает только одну, или две трассы при нормальном (25 м) расстоянии между пунктами взрыва, а более низкая частота также вносит вклад в размывание изображения. Стандартные съемки могут нетипично представлять эффекты, проиллюстрированные здесь. Мы также можем видеть вариации амплитуды (и, таким образом, рефлекторы) в разломной зоне (FDZ) (даже в случае единственного слоя), и особенности этих вариаций могут обеспечить (в настоящее время неизвестную) полезную информацию о причине аномального изображения.

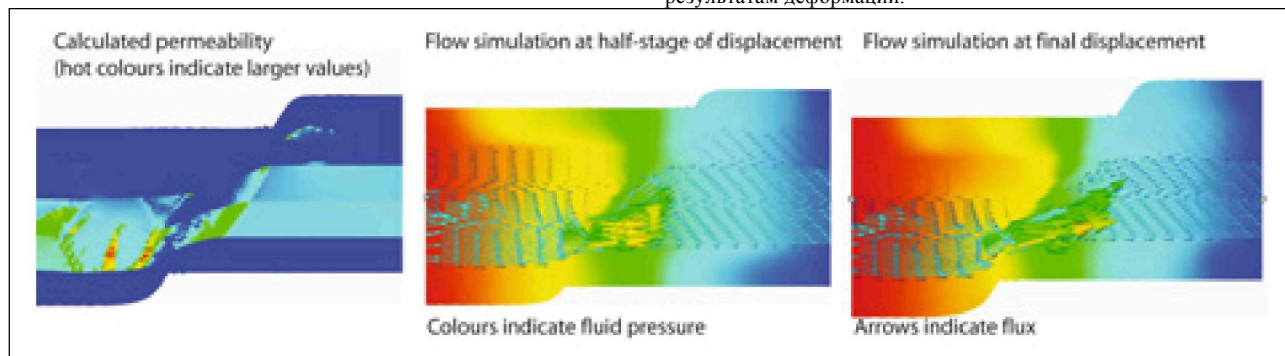
Интересно, что только высоко разрешающие сейсмические исследования могут гарантировать определение особенностей разломных зон. Только при этих условиях можно охарактеризовать различные конфигурации разломных зон (FDZ), и, таким образом, сделать возможные выводы о литологических подробностях, или особых условиях деформации. Для некоторых разломов эта информация может отсутствовать. Если некогда установленное (по обычной съемке) положение разлома известно, технически просто получить новые данные наблюдения на более высоких частотах с небольшими расстояниями между трассами.

Чтобы проиллюстрировать последовательность действий, выполняемых для прогноза временного градиента (time-lapse), существует только одно дополнительное требование: преобразовать состояние деформации в многофазовые свойства потока и выполнить имитационное моделирование резервуара, используя зависящие от деформации входные данные. Однако необходима имитационная гидродинамическая модель на сетке достаточного разрешения, чтобы представить архитектуру разломной зоны (FDZ).



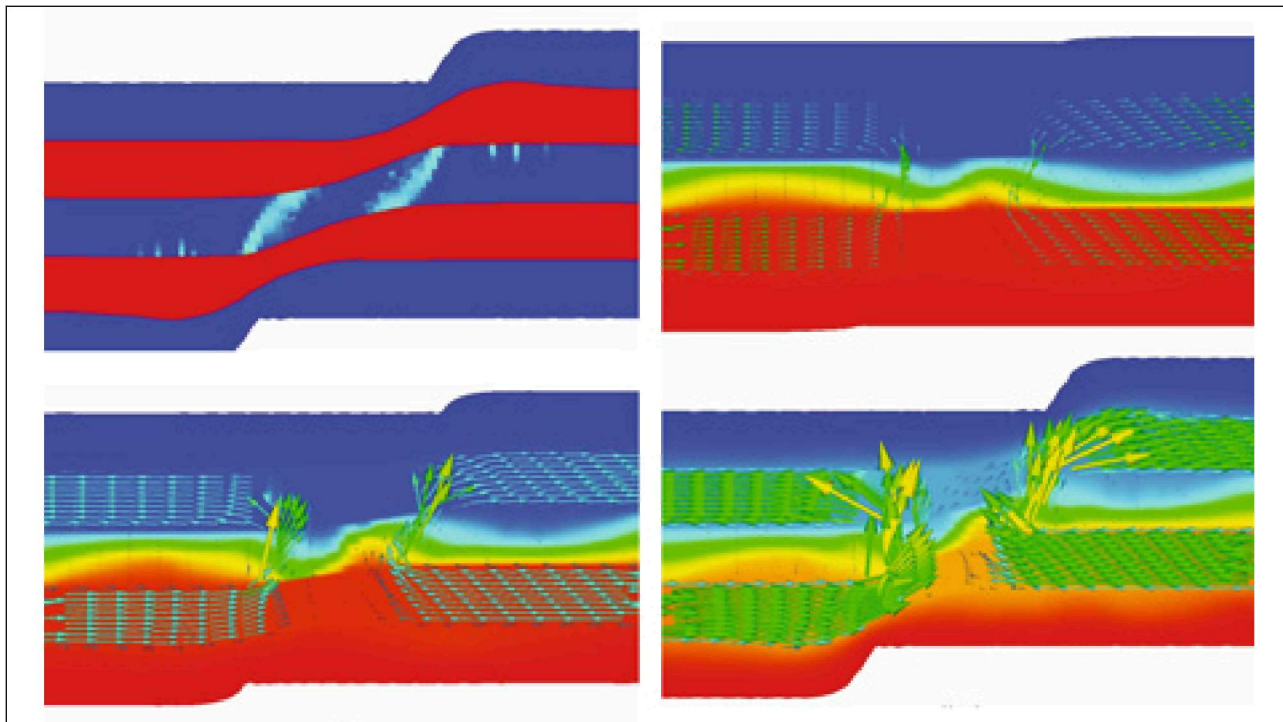
**Рисунок 6** Плот эффективной пластической деформации (метод измерения, который комбинирует объемную и деформированную компоненты в скалярный параметр) для увеличенной версии (слой мощностью 50 м) конфигурации, показанной на рис. 5. Отметим, как деформация самоорганизуется в области более высоких и более низких значений. Эти макеты очень похожи на те, которые наблюдаются в естественном разломном обнажении (рис. 2).

Существует недостаточно лабораторных работ по многофазовым свойствам деформированных пород, чтобы позволить провести какое-либо обобщение по опубликованным данным. Однако, мы утверждаем, что многофазовые свойства деформированных пород достоверно могут быть определены по их текстуре (которая будет также влиять на фазовое заполнение пор). Таким образом, мы можем сделать выводы об общем виде зависимостей, если мы предполагаем, что текстуры деформированных пород могут быть уподоблены текстурам «нормальных» пород. Например, мы можем предположить, что интенсивно расколотые (трещиноватые) породы резервуара, деформированные в условиях, приведших к уплотняющим объемным деформациям, будут иметь уменьшенный размер частиц (зерен) и меньший средний размер пор. Вероятно, можно сделать предположение, что этот деформированный материал имеет пластические свойства, аналогичные свойствам алевроитового песчаника. Дилатированные породы могут иметь свойства, которые больше напоминают раздробленный материал. Хотя эти простые выводы не объясняют (все еще) непосредственно процесс, в котором деформация имеет тенденцию концентрироваться в определенных местах (см. Couples и Lewis, 2007), наш подход обеспечивает способ определения многофазовых свойств по результатам деформации.



**Рисунок 7** Имитационная пластическая модель, основанная на расчетной проницаемости (левое изображение, использующее преобразование, приведенное на рис. 3). Среднее изображение показывает неполный пространственный разлом, развитый после умеренного разломного смещения. Правое изображение показывает более мощный барьер пластичности, созданный большим разломным смещением (отметим более резкий градиент давления). Длины стрелок в изображении потока масштабированы так, что максимальный поток в каждом случае изображается тем же самым вектором. Действительный максимум потока на правом изображении на приблизительно два порядка меньше по магнитуде (для тех же самых граничных условий).

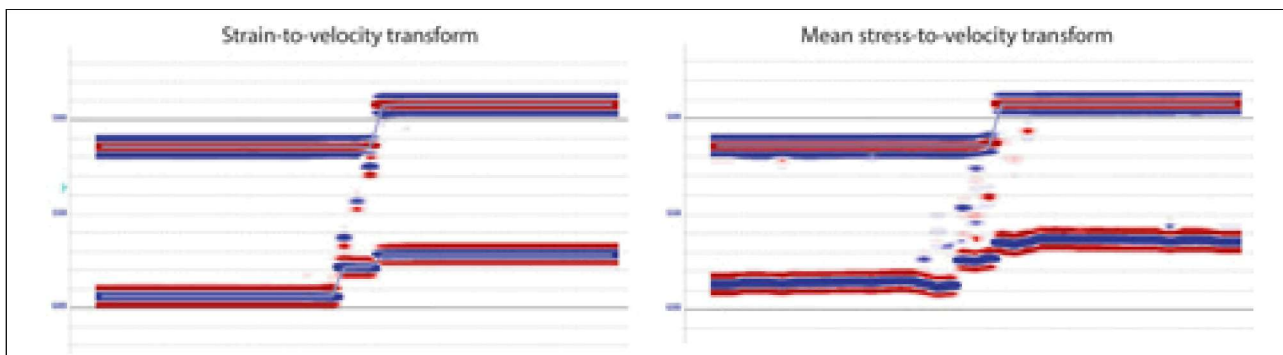
## Геофизика и технологии разработки коллектора



**Рисунок 8** Распределение проницаемости (верхний левый) и имитационная модель потока для случая нарушения верхней покрышки в результате раскалывания. Граничные условия для имитационной модели потока базируются на существовании высокого давления вдоль подошвы и более низкого давления вдоль кровли модели. Отметим, что поток пользуется преимуществом существования более высокопроницаемых областей вдоль краевых частей разломной зоны, чтобы пробить брешь в покрышке. Пояснительные комментарии в заголовке к рис. 7.

В примере, приведенном здесь, мы разделили поропластическую деформацию, полученную по геомеханическому моделированию, на пять классов. Каждый класс определяется парой кривых относительной проницаемости и кривой  $P_c$ , полученными для «нормальных» пород, которые, мы предполагаем, должны быть соответствующими ориентирами. Действительная проницаемость определяется для каждой ячейки модели резервуара, применяя выше приведенный алгоритм, но используется только ограниченное число кривых действительной проницаемости, в зависимости от того, к какому классу принадлежит ячейка, судя по пластической деформации. Мы предполагаем, что система является водонасыщенной.

Имитационная модель резервуара предполагает, что нагнетательная скважина работает на левой стороне разломной зоны (FDZ), а эксплуатационная скважина на правой стороне. Флюидонасыщенность меняется в течение времени в несколько раз. Обычная формула позволяет нам рассчитать акустический импеданс каждой ячейки в каждое время как функцию насыщения (по имитационной модели резервуара), давление и скорость/плотность, определенные по деформации ранее описанными методами. На ограниченном наборе данных мы нашли, что изменения AI (акустического импеданса) с дебитом имеют порядок 1-2% (рис. 11). По сравнению с изменениями AI в сопоставимой модели, которая предполагает простой однородный разломный барьер, мы нашли, что сигнал временного градиента имеет тот же порядок. Но пространственное положение вариаций временного градиента различается.



**Рисунок 9** Два синтетических сейсмических профиля, иллюстрирующих эффект пластической деформации, относящийся к изображению разломной зоны. Эти изображения воспроизводят случай одного слоя, поэтому нет стратиграфического усложнения. Отметим проявление отражений внутри разломной зоны (показывающие границы раздела скорости/сопротивления), и особенно отметим, как в основании слоя проявляется бифуркация разлома (которой не существует). Синтетические профили рассчитаны с использованием программного обеспечения by Colin MacBeth (см. MacBeth et al 2005). Сопоставьте с рис. 1.



## Геофизика и технологии разработки коллектора

Таким образом, существует возможность усовершенствовать модель резервуара (замещающая упрощенный разлом реальным разломом), и, таким образом, улучшая базис для интерпретации сейсмического отклика для этого поля. Эта возможность зависит от наличия высоко-разрешающих сейсмических данных для разлома и методов анализа, используемых для компонент сейсмического отклика — особенно для тех, которые связаны с пластическими деформациями.

### Заключение и выводы

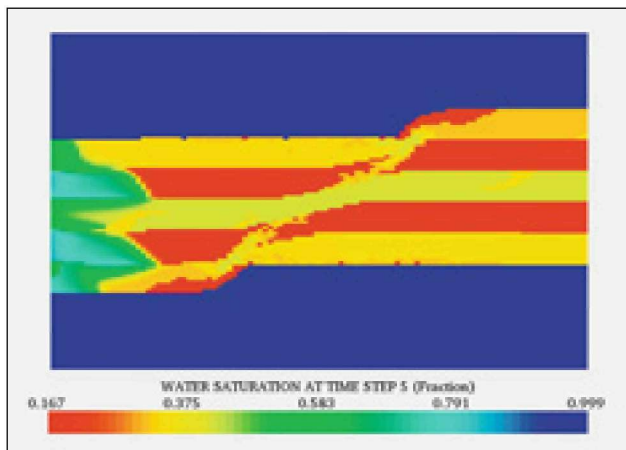
Результаты, которые мы кратко прокомментировали здесь, показывают, что состояние деформации разломных зон (FDZ) может оказывать существенное влияние на сейсмическое изображение разлома. В реальном случае может быть много одновременно действующих факторов, но каждый из них связан с другими либо непосредственно, либо опосредованно через распределение деформации. В результате большого объема работ различные исследователи (e.g., MacBeth et al., 2006) в настоящее время в состоянии разделить сигнал временного градиента типового резервуара на компоненты, связанные с насыщением и связанные с изменением давления (которые являются на самом деле геомеханическим эффектом). Мы полагаем, что могут быть найдены сопоставимые методы, чтобы идентифицировать различные вклады, приводящие к сложному изображению, которое мы можем получить для разломной зоны. Основная цель этой статьи показать, что существует потенциальный смысл в продолжении работ, чтобы исследовать способ, с помощью которого особенности разломных зон становятся выраженными на сейсмическом профиле или карте. Если мы способны использовать сейсмическую инверсию, чтобы получить информацию о деформированных породах, мы можем сделать работу лучше, включив разломы в особенности наших резервуаров. Даже до того, как цель достигнута, мы считаем, что группа исследователей реализует долю пользы, рассматривая деформацию в качестве исходного параметра для описания изменения свойств. Очень долго сообщество оперировало в псевдо-эластическом мире, где напряжение и деформация могут чередоваться, приводя к ложному ощущению, что напряжение является полезным показателем. Основной влияющий фактор заключается в текстуре горных пород, и изменения в текстуре непосредственно связаны с деформациями.

Наша цель в этой статье не состоит в объяснении специфических реальных наблюдений. Мы стремились оценить важность деформационных дефектов в разломных зонах, и как деформации влияют на пластичный и акустический отклик. Базируясь на обзорном анализе, приведенном здесь, кажется, должна существовать обоснованная возможность для извлечения дополнительной информации по сейсмическим исследованиям разломных зон, если подтверждена возможность изменения свойств, вызванного деформацией.

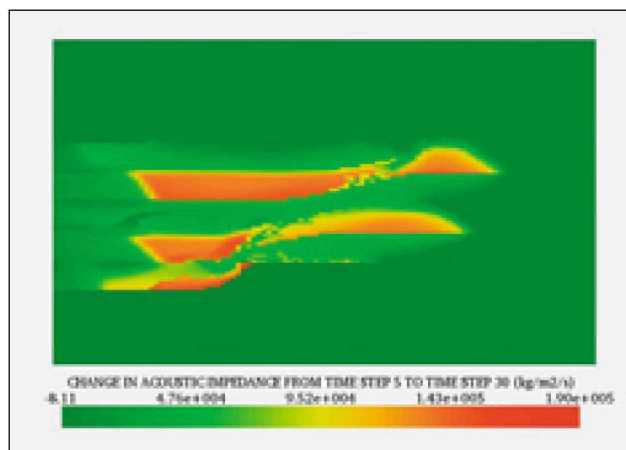
### Благодарности

Мы хотим выразить признательность инвестиционным компаниям (Amerada Hess, BP, BG, ConocoPhillips, Department of Trade and Industry, Kerr McGee, Shell, Statoil, Total) of the BMFFFS (Behaviour and Modelling of Fault/Fracture/ Fluids Systems) Project, и особенно их техническим представителям, которые обеспечили взаимодействие и поддержку нашим усилиям в развитии нового геомеханического понимания процесса разломной деформации. Мы также благодарим George Workman of Applied Mechanics за

постоянную поддержку и усовершенствования, его систему программного обеспечения SAVFEM геомеханического имитационного моделирования.



**Рисунок 10** Плот водонасыщенности после короткого по времени периода впрыскивания воды (на левом краю модели, здесь показана только часть ее), использующий двухфазные свойства, полученные по анализу пластической деформации. Правая сторона этого изображения показывает исходную водонасыщенность, которая меняется от слоя к слою из-за неоднородности свойств до деформации.



**Рис. 11** Плот, показывающий изменения акустического импеданса (около 2%), поскольку имеет место флюидное метасоматическое выполнение в имитационной модели потока, основанное на свойствах потока, контролируемого разломом, и акустических свойствах пород с компактной деформацией. На этом плот фонт воды проходит разлом (сравните с рис. 10, который показывает водонасыщенность на ранней стадии имитации потока). Изменения акустического импеданса достаточно велики, чтобы быть обнаруженными в инвертированной модели, полученной при наблюдении временного градиента. Изменения, отображенные здесь, включают эффект флюидного метасоматического выполнения и (предполагаемые помехи) неоднородности поля акустического импеданса, которые созданы деформацией. Разделение AI компоненты на динамическую и статическую предполагает те же самые выводы, что и в случае резервуара с крупномасштабной расчетной сеткой (see MacBeth et al., 2006).

## Геофизика и технологии разработки коллектора

### Литература

- Couples, G.D. and Lewis, H. [2007] Introduction: relationships between damage and localization. *In: Lewis, H. & Couples, G.D. (Eds) Relationships Between Damage and Localization*, Geological Society of London, Special Publications 289, in press.
- Couples, G.D., Lewis, H., Olden, P., Workman, G.H., and Higgs, N.G. [2007]. New insights into the faulting process from numerical simulations of rock-layer bending. *In: Lewis, H. & Couples, G.D. (Eds) Relationships Between Damage and Localization*, Geological Society of London, Special Publications, 289, in press.
- Jourde, H., E. A. Flodin, A. Aydin, L. J. Durlofsky, and X.-H. Wen (2002) Computing permeability of fault zones in eolian sandstones from outcrop measurements. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 86, 1187-1200.
- Lewis, H., Hall, S.A., Guest, J., and Couples, G.D. [2007] Kinematically-informed geomechanical simulations of structural evolution: importance of correct loading for open fracture prediction. *In: Jolley, S., Barr, D., Knipe, R., and Walsh, J. (Eds) Structurally Complex Reservoirs*, Geological Society of London, Special Publications, **291**, in press.
- Ma, J., Vaszi, A., Couples, G.D., and Harris, S.D. [2007] The link between a heterogeneous model and its flow response: examples from fault damage zones highlighting issues in domain discretisation and flow simulation. *In: Jolley, S., Barr, D., Knipe, R., and Walsh, J. (Eds) Structurally Complex Reservoirs*, Geological Society of London, Special Publications, **291**, in press.
- MacBeth, C. Floricich, M., and Soldo, J. [2006] Going quantitative with 4D seismic analysis. *Geophysical Prospecting*, 54, 303-317.
- 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.
- Manzocchi, T., Heath, A.E., Walsh, J.J., and Childs, C [2002] The representation of two-phase fault-rock properties in flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 8, 119-132.