

## Определение размера уплотненного резервуара Elgin по измерению вызванной напряжением анизотропии. Defining the extent of the compacting Elgin reservoir by measuring stress-induced anisotropy

Keith Hawkins<sup>1</sup> описывает метод определения размера уплотнения продуктивного резервуара Elgin в Северном море по оценке в естественном залегании 4D анизотропии, созданной вокруг резервуара, используя неперпендикулярные 4D временные сдвиги.

Многие продуктивные месторождения, полностью или частично запечатанные, испытывают понижение давления в результате истощения пласта, начинающееся с исходного давления, которое может существенно превышать давление веса толщи воды (гидростатическое давление или нормальное давление), и падающего в сторону очень низких давлений у устья скважины, которые ближе к атмосферному давлению. Это уменьшение давления приводит к уплотнению резервуара, растяжению перекрывающих пород и/или растяжению подстилающих пород. С уплотнением происходит увеличение скорости, в то время как растяжение дает соответствующее уменьшение скорости. Эти изменения скорости и мощности четко проявляют себя как 4D временные сдвиги между сейсмическими наблюдениями, приобретенными в разное время в течение продуктивного периода месторождения. Обычно запаздывания временного сдвига из-за растяжения перекрывающих и подстилающих пород более значительное, чем изменение времени, связанное с уплотнением резервуара. Поэтому принято наблюдать запаздывания временного сдвига по более поздним сейсмическим данным после периода разработки месторождения и, возможно, некоторое реверсирование, когда позднее производится закачивание воды или газа. Потенциально, эти временные сдвиги могут быть проанализированы и инвертированы для создания напряжений, которые генерируются в резервуаре и вокруг него, следовательно, влияют на планирование разработки месторождения.

Резервуар Elgin является одним из таких НР/НТ юрских резервуаров, где после четырех лет добычи давление упало более чем на 500 бар от исходного давления в 1100 бар. 4D вертикальные временные сдвиги, генерированные на Top Reservoir (кровле резервуара) Elgin и на соседних месторождениях Franklin и Shearwater, документально зафиксированы De Gennaro et al. (2008) и Hawkins et al. (2007). Рис. 1а показывает карту 4D вертикального

временного сдвига на кровле последнего из двух резервуаров. Отметим, что резервуар Franklin показывает меньший суммарный временной сдвиг, чем Elgin и Shearwater, даже если выработка резервуара Franklin была не меньше, чем выработка резервуара Elgin. Возможное объяснение заключается в том, что структура непосредственно над резервуаром Franklin прочнее и более способна поддерживать перекрывающие породы по мере того, как резервуар уплотняется. Это подтверждается рис. 1b, который показывает карту вычисленных интервальных 4D вертикальных напряжений внутри резервуаров (Hawkins et al. 2007). Вертикальное напряжение внутри резервуара Franklin сходно с таковым внутри резервуара Elgin, как должно было ожидаться исходя из того, что они одинаково выработаны. Рис. 1c и 1d показывают вертикальные профили суммарного 4D временного сдвига и вычисленного интервального 4D вертикального напряжения, соответственно. Так как вертикальное напряжение является интервальной характеристикой, оно более чувствительно к шуму, но оно содержит более интерпретируемую информацию. Оно показывает сильное сжимающее напряжение внутри резервуара и более слабое пространственное и растягивающее напряжение в перекрывающих породах, особенно в меловой формации Nod.

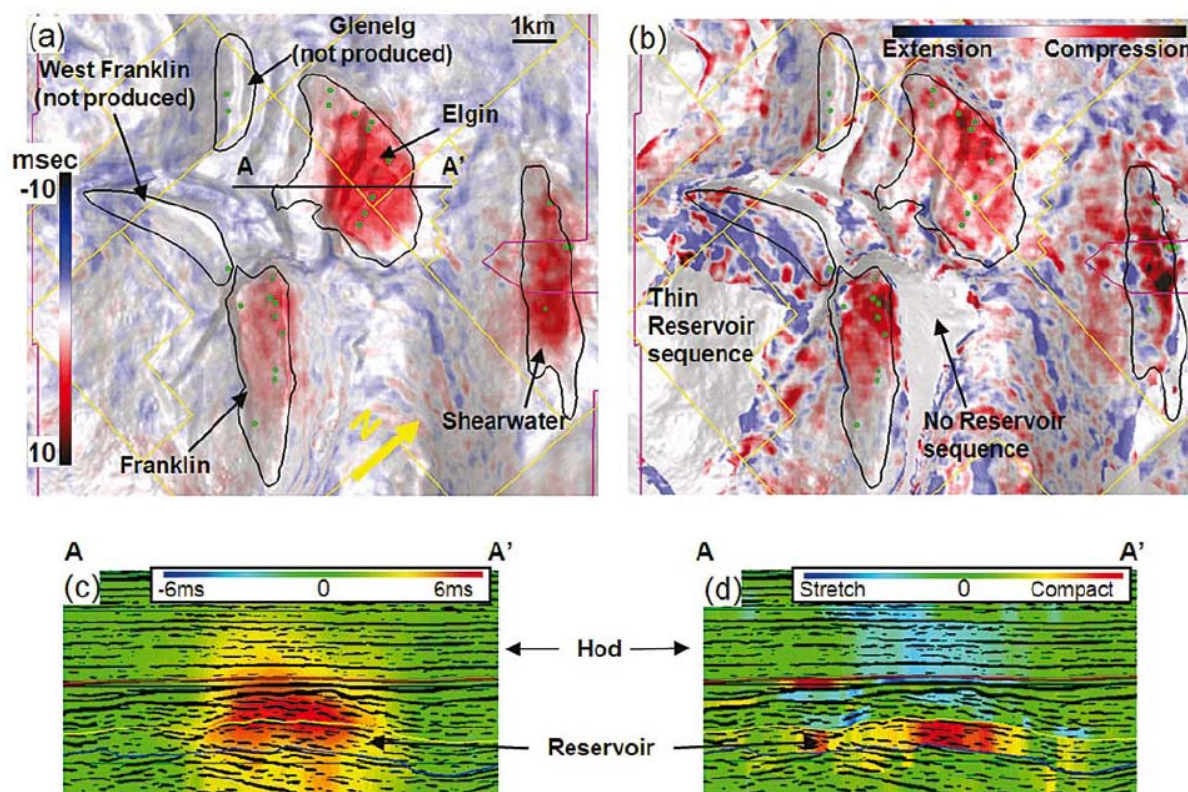
Только вертикальное напряжение без латерального напряжения имеет ограниченный объем информации, которая может исходить только из анализа полной апертуры сейсмической информации по временному сдвигу. Хотя сейсмическая апертура часто превышает 45°, в случае юрского резервуара Elgin максимальный вынос сейсмической косы в 4700 м ограничивает апертуру до угла наклона приблизительно в 25°.

Характер зависимости выноса от временного сдвига, или сдвига от выноса (SVO), был использован Hawkins et al. (2006) при попытке скорее измерить, чем постулировать R ограничение, введенное Hatchell et al. (2005). Это ограничение было использовано для преодоления неоднозначности зависимости вертикального временного сдвига между 4D изменением скорости и напряжением. Это математически определено как отрицательное отношение частичного 4D изменения скорости к 4D напряжению и позволяет простой переход от вертикальных временных сдвигов непосредственно к напряжению. Первоначально Hatchell et al. (2005) предположил R открытой константой, но позже R был изменен Hatchell и Bourne (2005). Hawkins et al. (2007) использовал изотропное трассирование луча для получения значений R по SVO. Несмотря на получение достаточно пригодных относительных изменений R с глубиной, методика подтвердила несогласованность их с существующей информацией по уплотнению.

<sup>1</sup> CGGVeritas, Crompton Way, Manor Royal Estate, Grawley, West Sussex RH10 9QN, UK. Email: keith.hawkins@cggveritas.com.

## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

Рис. 1 Карты (a) полных 4D временных сдвигов на верхнем коллекторе; (b) инвертированного вертикального 4D напряжения внутри резервуара; вертикальных разрезов,



показывающих (c) полные 4D временные сдвиги и (b) интервальные вертикальные 4D напряжения по резервуару Elgin.

Данных по уплотнению, непосредственно измеренных на резервуаре Elgin, не существует. Однако, Staples et al. (2007) опубликовал данные каротажа по уплотнению на Shearwater, которые очень схожи с геологией резервуара. Они показывают уплотнение резервуара менее чем на метр в течение аналогичного периода добычи. Уплотнение Elgin такое же, как и Shearwater, что наводит на мысль, что основание резервуара не погрузилось и нет очевидных признаков погружения морского дна. Составлена таблица интерпретированных  $R$  (рис. 2а), основанная преимущественно на этих данных по уплотнению с некоторой степенью опоры на SVO в третичное время. В течение третичного времени осредненные значения  $R$  около 5 согласуются со значением, полученным Hatchell et al. (2005) для третичного времени по месторождению Valhall Chalk. Однако, в более твердых породах мела и юры необходимо экстремально высокое значение  $R$ , равное 40, чтобы соблюсти данные уплотнения.

Рис. 2b и 2c показывают измеренные 4D временные сдвиги для небольших и больших углов. Можно видеть, что для Elgin градиент SVO положителен при временных сдвигах при больших углах и больше, чем таковой, при малых углах. Так не всегда, и это обусловлено тем, что в резервуаре Elgin очень большое среднее значение  $R$ , которое вытекает из сочетания довольно большого временного сдвига (временной сдвиг в 6 мс за 4.2 сек) и очень небольшого напряжения на глубине (погружение на глубине более 5000 м менее 1 м). Это резко противоречит данным уплотнения на некоторых месторождениях мелового возраста в Северном море, таких как Valhall и Ekofisk, где среднее напряжение на глубине обычно в 20 раз выше, хотя временные напряжения только в 2 раза выше, приводя к средним значениям  $R$  меньше десятой части того значения  $R$ , что в Elgin.

Измеренные временные сдвиги, приведенные на рис. 2b и 2c, могут быть сопоставлены соответственно с рис. 2d и 2e, которые представляют изотропные синтетические временные сдвиги для диапазонов эквивалентных углов, построенные при использовании таблицы  $R$  рисунка 2а. Несмотря на положительный градиент SVO измеренных временных сдвигов, синтетические временные сдвиги при больших углах (рис. 2e) предполагают, что градиент SVO может быть даже интенсивно положителен. Если обсужденные допущения относительно уплотнения убедительны, вероятно, большая часть объяснения для этого различия заключается в том, что влияние 4D анизотропии не значительно, и измеренные временные сдвиги (рис. 2c) уменьшены влиянием 4D анизотропии.

Рис 3 обеспечивает понимание поведения SVO как функции  $R$  и 4D анизотропии при совместном использовании профиля скоростей и 4D временных сдвигов, которое схоже с ситуацией резервуара Elgin. Важно отметить, что все фактические данные временных сдвигов измерены по данным, которые изображены по анизотропной досуммированной глубинной миграции (APSDM). Более того, данные не являются NMO корректными, так что временные сдвиги не нарушены растяжением NMO. Это означает, что поведение временного сдвига существенно отличается от рассчитанного Landro и Stammeijer (2004), которые использовали NMO допущения, чтобы осмыслить расширение временных сдвигов в их алгоритме SVO. Hawkins (2008) рассматривает это более подробно. Рис. 3а использует значение  $R$ , равное 5, значение, которое предположил Hatchell et al. (2005) в качестве безусловного представителя многих условий среды. Рис. 3b показывает поведение SVO для изотропного предельного



## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

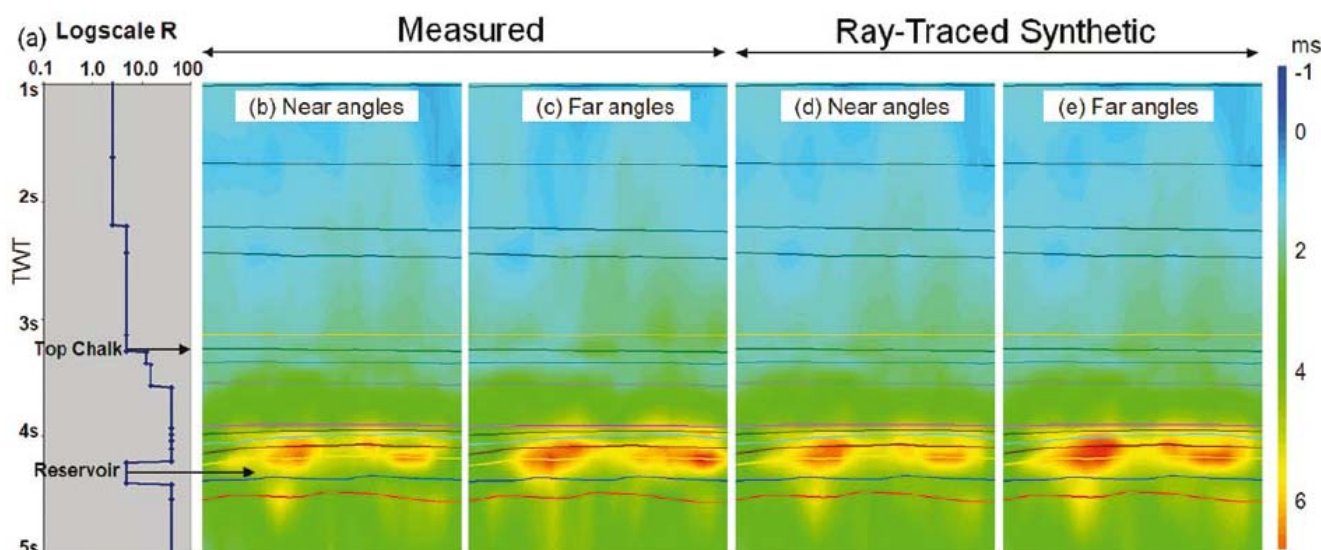


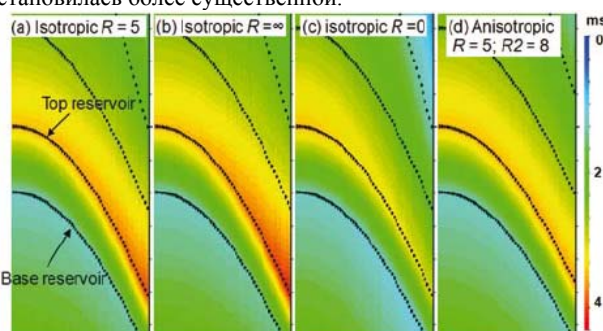
Рис. 2 (a) Таблица интерпретированных  $R$  по рассмотрению уплотнения; измеренных временных сдвигов для (b) небольших углов; (c) для больших углов; изотропных синтетических временных сдвигов для (d) небольших и (e) больших углов. Отметим, что синтетические большие углы сопоставимы с измеренными большими углами.

случая, где  $R$  безгранично и 4D изменение скорости является доминирующим фактором, генерирующим временные сдвиги. Высокие значения  $R$  в резервуаре Elgin должны быть ближе к этому сценарию. Рис. 3с показывает результаты другого изотропного крайнего случая, где  $R$  равно 0 и 4D растяжение генерирует временной сдвиг. Это может быть более представительным для месторождений Valhall и Ekofisk, которые имеют погруженное морское дно приблизительно до кровли резервуара ( $R$  равно 0 в водном слое). Рис. 3d показывает влияние сильной 4D анизотропии при значении  $R$  равном 5. Сопоставление с рис. 3а показывает значительное уменьшение SVO, вызванное этой сильной анизотропией.

#### Проблемы вызванной напряжением 4D анизотропии

Предположение, что уплотненные резервуары создают вызванную напряжением 4D анизотропию, не является новым. Различные авторы в настоящее время отстаивают ее значение (Herwanger et al. 2007, Fuck et al. 2007). Сегодня, вероятно, самое неотразимое строгое доказательство, особенно для того, чтобы объединить анизотропию в анализе SVO со всей ее специфической сложностью, вытекает из работы Holt et al. (2005a and 2005b). В этой работе были использованы образцы сланцев из керна для измерения скорости  $p$ -волн, перпендикулярных и параллельных напластованию, как функции сети напряжения моделируемой добычи. Был рассчитан параметр анизотропии  $\epsilon$  (Thomsen 1986) как функция набора напряжений по измерениям скорости по двум направлениям напластования. Было обнаружено, что даже когда изменения напряжения в ходе добычи были гидростатическими, т.е. равными по всем направлениям, частичное изменение  $\epsilon$  как функции изменения напряжения было приблизительно в четыре раза больше, чем частичное изменение скорости  $p$ -волн. Более того, в

случае, когда напряжения в результате разработки резервуара (добычи) были трехосными или с независимым направлением, а также представляли напряжения на краю резервуара, тогда анизотропия, вызванная напряжением, становилась более существенной.



Главный недостаток при введении в SVO анализ анизотропии заключается в том, что в аналогичном методе с ситуацией, где анизотропия включена в 3D сейсмическое изображение, оно зависит от строгих скважинных калибровочных данных или другой априорной информации, чтобы отделить эффект анизотропии от скоростного эффекта. Хотя для 3D сейсмического изображения необходимость скважинных данных охотно используется в виде обнаружения и оценки скважинных глубинных данных, как мы видим, данные 4D уплотнения не приобретаются ежедневно. Однако, при предположении, что таблица  $R$  (рис. 2а) убедительна, оценка анизотропии может быть сделана сопоставлением измеренных временных сдвигов при большом угле (рис. 2с) с синтетическими временными сдвигами, полученными при анизотропном прослеживании хода лучей.

Рис. 3 Синтетические выборки трасс, иллюстрирующие, что независимость смещения 4D временных сдвигов (цветное изображение) перекрывается отражениями базовой съемки при различных установках параметров – различных изотропных (a, b и c) и анизотропной (d) для  $R$  и  $R2$  (см. для объяснения текст).

### Измеренная на практике усредненная 4D анизотропия

На основании результатов Holt et al. (2005a), по-видимому, уместно ограничить предполагаемую вызванную напряжением анизотропию. Hatchell et al. (2005) использовал R ограничение физики горных пород, чтобы преодолеть неоднозначность между 4D частичными изменениями скорости,  $dv/v$ , частичным изменением мощности (напряжений),  $dz/z$ , как генераторов (источников) 4D временных сдвигов

$$R = - \frac{dv/v}{dz/z} \quad (1)$$

Здесь аналогично использовано уравнение (2) в качестве ограничителя параметров анизотропии

$$R2 = - \frac{dA/A}{dv/v} \quad (2)$$

Здесь  $dA$  является вызванная напряжением (или 4D) анизотропия, а  $A$  представляет анизотропию, присущую внутренним горизонтам Земли до разработки резервуара (до добычи).  $dA$  и  $A$  могут представлять каждый из двух параметров Thomsen (1986), ( $d\sigma$  и  $d\varepsilon$ ) и ( $\sigma$  и  $\varepsilon$ ), соответственно. В этой работе, так как диапазон апертуры угла падения ограничен,  $R2$  предполагался с одинаковым значением для связи обеих фракций ( $d\sigma/\sigma$  и  $d\varepsilon/\varepsilon$ ) с  $dv/v$ . Однако, если данные позволяют достаточную степень точности, нет причины, почему не могут быть разделены параметры  $R2\sigma$  и  $R2\varepsilon$ . Параметры  $\sigma$  и  $\varepsilon$  всегда определяются в течение анизотропной досуммированной глубинной миграции (APSDM) в рамках программы обработки. Для оценки  $\sigma$  и  $\varepsilon$  APSDM ограничивается, чтобы связать глубины формации по скважинам. Они подтверждены сопоставлением времен пробега APSDM при прослеживании хода лучей со временами первых вступлений множества волн по VSP (БСП-вертикальное сейсмическое профилирование), зарегистрированных приемниками, помещенными над резервуаром и точно под отложениями мелового периода. APSDM выполнен по данным, полученным в 1996 г., до начала добычи.

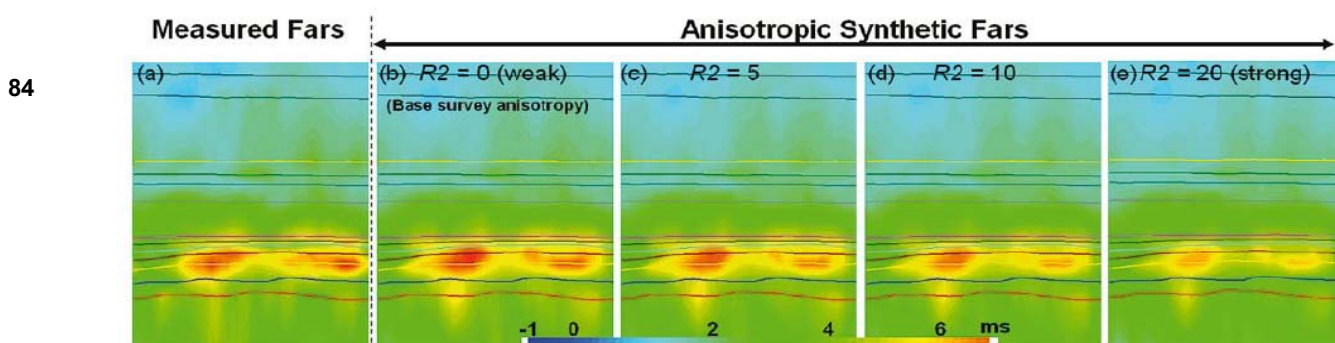
Как предполагалось в более ранней дискуссии, Holt et al. (2005a) нашел, что  $R2$  равен приблизительно 4 для изменений гидростатического напряжения и выше 10 для трехосных напряжений, предполагаемых на краях резервуара. На рис. 3d сильная синтетическая анизотропия была создана с  $R2=8$ . В отличие от  $R$ , который для любой данной геологии совершенно стабилен,  $R2$ , можно ожидать, довольно изменчив, особенно около краев резервуара. Однако, в стороне от непосредственной близости к резервуару 4D напряжения могут быть намного менее изменчивы и, следовательно,  $R2$  станет также постоянным.

Рис. 4 показывает сопоставление между измеренными при больших углах наклона временными сдвигами, взятыми из таблицы 3с, с анизотропными синтетическими временными сдвигами, полученными в широком диапазоне значений  $R2$ . Рис. 4 представляет измеренные временные сдвиги, которые лучше всего совпадают с  $R2=5$  (рис. 4с), совершенно похожие на найденные Holt et al. (2005a) для изменений гидростатического напряжения.

### 4D вариации анизотропии, вызванной напряжением

Хотя проведена оценка средней 4D анизотропии в окрестности резервуара Elgin, потенциально более интересна изменчивость этой 4D анизотропии. В особенности вариации, обусловленные радиальными изменениями напряжения около краев уплотненного резервуара, которые, если выявлены, могут определять пространство выработанного (истощенного) резервуара. Чтобы понять, как изменяется анизотропия, вызванная напряжением, вокруг резервуара, были взяты рис. 5а и 5b из работы Holt et al. (2005b). Они показывают правую половину смоделированных 4D вертикальных (рис. 5а) и радиальных (5b) напряжений, созданных резервуаром, имеющим форму диска. Elgin приблизительно имеет форму диска, и существует сходство между оцененными вертикальными напряжениями вокруг резервуара Elgin (рис. 1d) и смоделированными вертикальными напряжениями (рис. 5а). Оба рисунка показывают сильное напряжение сжатия внутри резервуара и намного меньшее отрицательное напряжение растяжения над резервуаром. С другой стороны, свойства пород резервуара Elgin являются такими, что уплотнение резервуара только растягивает и ослабляет перекрывающие породы, тогда как модель резервуара в форме диска растягивает и подстилающие и перекрывающие породы в равной степени.

Рис. 4 Сопоставление между (а) измеренными временными сдвигами при больших углах наклона и (b)-(е) – диапазон анизотропного синтетического эквивалента для временных сдвигов при больших углах с возрастающей интенсивностью 4D анизотропии от анизотропии без изменений ( $R2=0$ ) к очень сильной 4D анизотропии ( $R2=20$ ).  $R2=5$  дает самое лучшее согласование.



## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

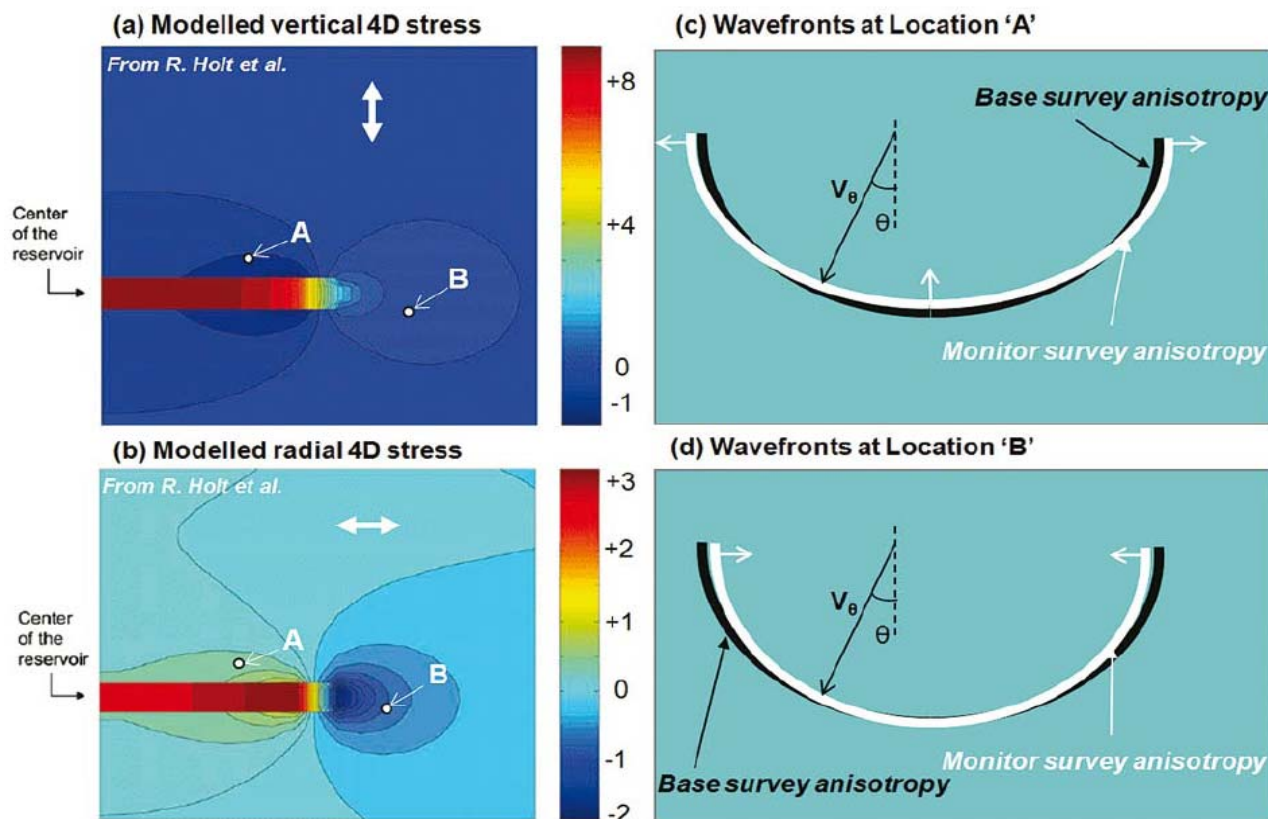


Рис. 5 (a) вертикальное и (b) радиальное 4D напряжения над половиной модели резервуара, имеющей форму диска; (c) предполагаемое 4D изменение скорости анизотропного волнового фронта на объекте «А» и (d) «В».

На рис. 5a и 5b показаны два объекта А и В по оценкам вертикальных и радиальных напряжений. Рис. 5c и 5d, соответственно, иллюстрируют, как эти 4D напряжения могут изменить эллипсы анизотропной скорости (черный цвет) в эллипсы мониторинговой съемки (белый цвет) на двух объектах. На объекте А, который расположен точно над кровлей резервуара, вертикальное 4D напряжение ведет к более низкой скорости (рис. 5c), создавая запаздывание времени, которое обычно видно на мониторинговых съемках по кровле резервуара. Однако, радиальное 4D напряжение на объекте А является положительным, так как резервуар уплотняется в направлении добывающей скважины, расположенной в центре резервуара, и захватывает перекрывающие породы, уплотняющиеся также в радиальном направлении. Следовательно, радиальная скорость (рис. 5c) увеличивается, вызывая при мониторинге фронт волны, который имеет более сильную эллиптичность, чем базисный волновой фронт, или положительное возрастание R2. Здесь опять присутствует сходство с резервуаром Elgin, где положительный R2=5 измерен над резервуаром (рис. 4).

На объекте В на сторонах и основании резервуара существует полностью различная ситуация. Как предполагалось, радиальные уплотняющие напряжения резервуара генерируют очень интенсивное радиальное растяжение на внешней стороне уплотненного резервуара, а изменение вертикального напряжения мало, почти 0-ое. Следовательно, рис. 5d показывает уменьшение эллиптичности волнового фронта мониторинговой съемки относительно волнового фронта базисной съемки, или отрицательный R2.

Предположено, что, если «А» движется вниз по резервуару до того же уровня, как и «В», должно быть небольшое изменение относительных форм в едином волновом фронте рисунка 5c. Это происходит потому, что: 1) Hatchell и Bourne (2005) показали, что изменение фракционной скорости внутри уплотненных резервуаров является небольшим по сравнению с таковыми, связанными с растяжением вне резервуара; и 2) 4D напряжения внутри резервуара положительны и уплотнение идет по всем направлениям. В результате, вариации анизотропии, вызванной напряжением, через края базисного резервуара являются резкими и значительными, как проиллюстрировано рисунками 5c и 5d.



## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

В локальных местах, таких как кровля и дно углов резервуара, наклон оси симметрии мгновенной 4D анизотропии будет существенно отклоняться от вертикали. Однако, когда она объединяется в пределах разумной мощности, такой как мощность резервуара, любое отклонение оси симметрии единого волнового фронта от того положения, которое существовало во время проведения базисной съемки, будет меньше.

Рис. 6 Два волновых фронта различной анизотропии ( $d\sigma$  и  $d\varepsilon$ ).

### Методология, использованная для определения вариаций анизотропии, вызванной напряжением.\*

Математическое основание для качественной оценки параметров 4D анизотропии  $d\sigma$  и  $d\varepsilon$  иллюстрируется волновыми фронтами на рис. 6. По Thomsen (1986) фазовая скорость любой угловой фазы  $\theta$  дается:

$$v_{\theta} = v_0 \left( 1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \varepsilon \sin^4 \theta \right)$$

После некоторой разработки резервуара (добычи) изменение скорости и напряжения, вызванные 4D анизотропией, ( $d\sigma$  и  $d\varepsilon$ ), будут создавать мониторинговый волновой фронт с фазовой скоростью, измененной согласно:

$$v_{\theta st} = (v_0 + dv_0) \left( 1 + (\delta + d\delta) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (\varepsilon + d\varepsilon) \sin^4 \theta \right)$$

В случае, когда анизотропия остается неизменной по сравнению с исходной анизотропией, фазовая скорость волнового фронта становится:

$$v_{\theta} = (v_0 + dv_0) \left( 1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \varepsilon \sin^4 \theta \right)$$

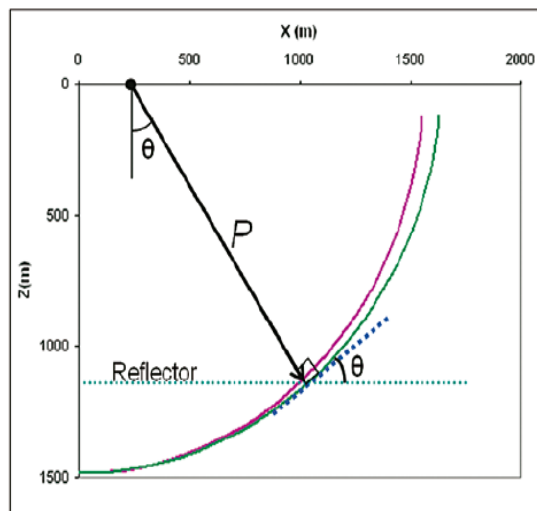
Увеличение этой скорости с временем пробега волнового фронта  $t_w$ , вычисление разности, замещение вертикальных радиусов волнового фронта  $P_0$  для  $V_0 t_w$  и падение в небольшой степени периода создает изменение радиуса кривизны:

$$dP/P_0 \approx \left\{ d\delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + d\varepsilon \sin^4 \theta \right\} \quad (3)$$

Мониторинговая съемка перегружена локальными вариациями вызванной напряжением анизотропии. Следовательно, для сопоставления кривизны волнового фронта подлинных мониторинговых данных с таковой синтетических мониторинговых данных (находящихся под влиянием только внутренние свойственной анизотропии) возможно использование уравнения (3) для получения изменений вызванной напряжением анизотропии  $d\sigma$  и  $d\varepsilon$ .

Хотя  $d\sigma$  может быть получено по ограниченным фазовым углам падения луча, возможность оценить  $d\varepsilon$  сильно зависит от полной апертуры существующего фронта волны. Для массива данных резервуара Elgin максимальное зарегистрированное смещение в 4700 м, ограничивающее юрскую апертуру до 25°, означало, что только  $d\sigma$  может быть достоверно определено. Если мы можем предположить эллиптическую вызванную напряжением анизотропию, тогда это влечет за собой  $d\varepsilon$ . Для малоглубинных задач, таких как месторождения мелового периода Valhall и Ekofisk, траектории лучей более способствуют обеспечению больших апертур с ограниченным смещением пары источник-приемник.

\* Патент заявлен



Качественная оценка анизотропии вокруг резервуара

Рис. 7 показывает резервуар Elgin, нулевое смещение 4D временного сдвига на (a) Base Chalk, (b) Top Reservoir, и (c) Base Reservoir. Показаны положения продуктивных скважин на Top Reservoir. Положение вертикального разреза на рис. 1c показано на рис. 7a. Рисунки 1c и 7a показали, что временные сдвиги созданы в основном благодаря нижней части Chalk (Hod). Эти временные сдвиги увеличиваются почти на 7 мс на Top Reservoir и заметны больше слева от эксплуатационной скважины. Как ожидалось, рис. 7c показывает некоторое уменьшение временного сдвига внутри уплотненного резервуара.

Рис. 7d является оценкой единой вызванной напряжением  $d\sigma$  на Top Reservoir. Оно существенно в положительном слева от эксплуатационных скважин, однако нейтральное справа от эксплуатационных скважин. Рис. 7e показывает оцененное значение  $d\sigma$  на Base Reservoir. Вызванная напряжением анизотропия по-прежнему больше слева от эксплуатационных скважин, но теперь область справа от эксплуатационных скважин также положительна. Вокруг резервуара существует отрицательное окаймление. Это окаймление интерпретировано (рис. 7f) как резкое изменение анизотропии, которое предполагается на краю уплотненной части резервуара.

### Обсуждение

Предполагая, что данные по уплотнению резервуара Shearwater применимы к соседнему и геологически похожему резервуару Elgin, показано, что поведение SVO 4D временных сдвигов над резервуаром Elgin находится в значительной степени под влиянием вызванной напряжением 4D анизотропии. Следовательно, один из основных выводов, который сделан, заключается в том, что 4D мониторинг уплотнения, по крайней мере, в одной скважине важен для калибровки оценки вызванной напряжением анизотропии по 4D сейсмическим данным. Полученные адекватные данные по истории уплотнения могут быть, следовательно, рассмотрены на ранней стадии планирования разработки месторождения, если 4D анизотропия ожидается пригодной. Если существуют такие калибровочные данные по уплотнению, тогда схема продемонстрировала, каким образом поведение SVO этих временных сдвигов может быть использовано для определения усредненной 4D анизотропии перекрывающих пород над уплотненным резервуаром. Более того, показано, что эта методология может быть распространена на выявление пространственных вариаций этой вызванной напряжением анизотропии, которая, как ожидается, имеет самое большое значение на краю уплотненного резервуара.

Интерпретация изменения вызванного напряжением

## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

анизотропии фактически может быть проведена параллельно с моделированием геомеханики и резервуара. Положительная область анизотропии, показанная (рис. 7е) и интерпретированная (рис. 7f) на Base Reservoir, является предполагаемой областью уплотненного резервуара. Текущая модель резервуара распространяется далее на север и юг от интерпретированной области рисунка 7f. Однако, вполне возможно, что осушение и уплотнение этих областей ограничило разломами область внутри резервуара, положение которых может быть согласовано с интерпретацией, представленной на рис. 7f.

Кроме необходимости калибровки данных уплотнения по скважине, существуют другие условия проведения методики: точные модели базовой скорости и базовой анизотропии, а также идеально зарегистрированное смещение, которое допускает большие углы падения луча (более 30 градусов). В случае резервуара Elgin, модели были получены в процессе анизотропной досуммированной глубинной миграции до начала добычи, а зарегистрированное смещение было достаточно для оценки  $d\sigma$ . Заключительное требование состоит в том, что для согласования с данными сделаны допущения в методике. Такими допущениями в методике были: адекватный уровень отношения сигнала к помехе; R пространственно устойчив относительно R2 и оси симметрии для всей анизотропии вертикальны. Если в результате проведения работ уровень шума может изменяться сильнее,

чем нормальный шум, рассматриваются методики ослабления кратных отражений, которые сохраняют информацию сигнала временного сдвига за счет некоторого высокочастотного сигнала. Ослабление шума, использованное в этой работе, было немного сильнее нормального, но по-прежнему умеренное (осторожное). Оси асимметрии анизотропии, конечно, зависят от структуры и, как ранее отмечалось, будут иметь локальные вариации. Однако, влияние этих локальных вариаций на кривизну единого волнового фронта ожидается минимальным. Более того, любые попытки предсказать локальные оси симметрии или основные направления напряжения в покрывающих породах около краев резервуара целиком зависят от точной информации о местоположении уплотненного края резервуара. Следовательно, предложенная методика с предположением исчерпывающей симметрии является логичным стартовым положением для объединенного моделирования, чтобы создать основные направления напряжения.

## Благодарности

Я благодарю владельцев Elgin Total E&P UK и их партнеров – Eni, BG Group, GDF, E. ON Ruhrgas, Chevron-Texaco, Exxon-Mobil, Dyas и Oranje-Nassau – за разрешение показать эту работу. Я благодарю Total E&P UK за поддержку, оказанную при оценке результатов этой работы, касающихся их концепций модели резервуара.

Я также признателен многим сотрудникам технологического отдела CGGVeritas за компетентность в сохранении целостности данных по временам сдвига на

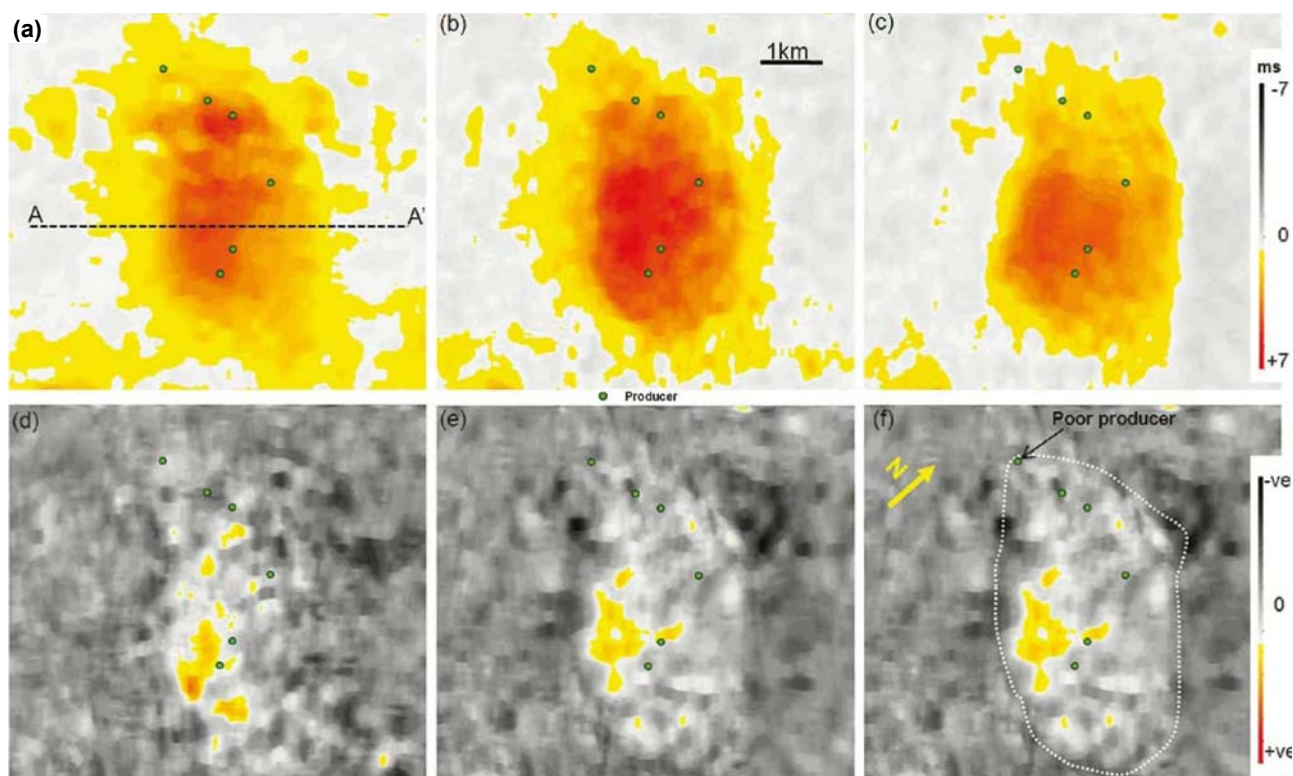


Рис. 7 4D временные сдвиги в резервуаре Elgin на (a) Base Chalk; (b) Base Reservoir. Эксплуатационная скважина на или вблизи интерпретированного края резервуара, аналогично другим эксплуатационным скважинам, испытывала постоянные проблемы при добыче. Для длинных периодов времени она (добыча) была приостановлена вообще.

всем протяжении процесса создания изображения и дружественным партнерам группы Crawley R&D за их конструктивные комментарии.

### Литература

- De Gennaro, S., Grandi, A., Escobar, L., Onaisi, A., Ben-Brahim, L., Joffroy, G., Tindle, C. and Neillo, V. [2008] Integrating 4D Seismic, geomechanics and reservoir simulations in Elgin and Franklin. *70<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition*, E019. Fuck, R., Bakulin, A. and Tsvankin, I. [2007] Time-lapse traveltimes shifts above compacting reservoirs: 3D solutions for prestack data. *77<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*. Hatchell, P., Kwar, R. and Savitski, A. [2005] Integrating 4D seismic, geomechanics and reservoir simulation in Valhall oil field. *67<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition*. Hatchell, P.J. and Bourne, S. J. [2005] Measuring reservoir compaction using time-lapse timeshifts. *75<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*.
- Hawkins, K., Conroy, G. and Harris, P. [2006] Estimation of production-induced stress changes from 4D finite offset time shifts. *76<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*.
- Hawkins, K., Howe, S., Hollingworth, S., Conroy, G., Ben-Brahim, L., Tindle, C., Taylor, N., Joffroy, G. and Onaisi, A. [2007] Production-induced stresses from timelapse timeshifts: a geomechanics case study from the Franklin and Elgin fields. *The heading Edge*, 26(5).
- Hawkins, K. [2008] Estimation of 4D anisotropy above the Elgin reservoir from 4D seismic time shifts and compaction considerations. *70<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition*, E006.
- Herwanger, J., Palmer, E., Schiott, R. [2007] Anisotropy velocity changes in seismic time-lapse data. *77<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*.
- Holt, R., Bakk, A., Fjcer, E. and Stenebraten, J. [2005a] Stress sensitivity of wave velocities in shale. *75<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*.
- Holt, R., Nes, O. and Fjaer, E. [2005b] In-situ stress dependence of wave velocities in reservoir and overburden rocks, *The heading Edge*, 24(12).
- Landro, M. and Stammeijer, J. [2004] Quantitative estimation of compaction and velocity changes. *Geophysics*, 69, 949-957.
- Staples, R., Ita, J., Burrell, R. and Nash, R. [2007] Monitoring pressure depletion and improving geomechanical models of the Shearwater Field using 4D seismic. *The heading Edge*, 26(5).
- Thomsen, L. [1986] Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51, 1954-1966.