

Новая Геофизика: ее влияние на добычу углеводородов и возможные сложности проведения сейсмомониторинга

The New Geophysics: implications for hydrocarbon recovery and possible contamination of time-lapse seismics

Стюарт Крэмпин Stuart Crampin*

Резюме

Самые последние данные теоретических исследований и практических наблюдений говорят о том, что флюидонасыщенные микротрещины в углеводородных коллекторах (а также в большинстве других пород в естественном залегании) настолько тесно расположены, что такие породы являются критической системой, которой грозит обрушение из-за трещинообразования. В результате чего коллектора являются высокоэластичными системами и реагируют на малые изменения, имея кривую чувствительности в виде 'крыльев бабочки'. Хотя это явление нельзя отобразить, используя стандартную технологию, более масштабные проявления этого феномена могут вызывать трудности при извлечении углеводородов. Этот феномен является предпосылкой к появлению Новой Геофизики, которая рассматривает отклик на изменение во флюидонасыщенной породе (например, при добыче углеводорода) как величину, которая изменяется как в пространстве, так и во времени, и поэтому, значимость детальных измерений снижается по прошествии времени их выполнения. Это означает, что этот характер поведения породы нельзя осреднять. Это ведет к тому, что многие (возможно большинство) стандартные промысловые процедуры неправомерны. Типичный процент извлечения нефти из большинства коллекторов (при этом крайне низкая) составляет 30%, по крайней мере, это частично может объясняться чувствительностью коллекторов и поведением, которое не поддается объяснению в рамках традиционной геофизики. Новая Геофизика объясняет по крайней мере некоторые трудности, которые встречаются при стандартном подходе к промысловым процедурам, но она же и обеспечивает громадные потенциальные преимущества, которые могут быть использованы. В этой статье рассматриваются новые пути мониторинга при добыче, при этом возможен расчет отклика коллектора на процесс добычи, предсказание его поведения, а в будущем управление, используя обратную связь.

Введение

Двойное преломление поперечных волн вдоль оси напряжений (что схематически проиллюстрировано на Рисунке 1) наблюдается практически во всех породах земной коры (включая практически все коллектора углеводородов) [1,2,3]. Величина наблюдаемой анизотропии скоростей поперечных волн (в процентах), вызванной распространением через флюидонасыщенные микротрещины, с учетом действующих напряжений, можно инвертировать в распределение трещин, как показано на Рисунке 2 [1,2,3]. Из Рисунка 2 следует, что даже в породах без видимых трещин (две диаграммы слева), микротрещины имеют такое большое влияние, что многие из пород близки к критическому состоянию и разрушению при трещинообразовании.

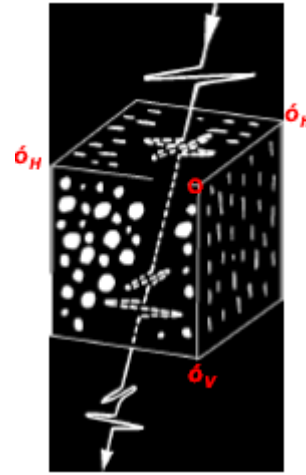


Рисунок 1 Схематическая иллюстрация к образованию двойкопреломленных поперечных сейсмических волн по оси напряжения [1]. Поперечно-поляризованные сейсмические поперечные волны, которые распространяются практически вертикально через серию параллельных вертикальных флюидонасыщенных микротрещин, разделяются на две перпендикулярных фазы – поляризованные параллельно и перпендикулярно к направлению действия максимального горизонтального напряжения. Такое явление образования двойкопреломленных поперечных волн, выровненных относительно линии напряжения, наблюдается почти во всех коллекторах и породах земной коры. Микротрещины имеют тенденцию к выравниванию (как и гидравлические разрывы) перпендикулярно к направлению минимального горизонтального напряжения, σ_h .

Стоит отметить несколько характерных особенностей.

- Поскольку плотность трещин ϵ приблизительно равна одной сотой процента максимальной анизотропии скорости поперечных волн, плотность трещин можно легко оценить из наблюдений по двойкопреломлению поперечных волн (см. Рисунок 2). Плотность трещин ϵ равна $N\alpha^3/v$, где N – число трещин с радиусом a в объеме v .
- Наблюдаемые значения анизотропии скоростей распространения поперечных волн от 1.5% до 4.5% указывают на узкий диапазон $0.015 \leq \epsilon \leq 0.045$ оценочной плотности трещин в неповрежденных породах. Этот диапазон не зависит от геологии (он одинаков для осадочных, вулканических и метаморфических пород), пористости (он один и тот же в гранитах с пористостью 1% и песчаниках с пористостью 30%), и истории тектонического развития, за исключением нескольких вполне объяснимых случаев.
- Критические разрывы связаны с порогом просачивания, который можно определить теоретически для случая распределения однонаправленных трещин как $\epsilon = 0.055$ (5.5% анизотропия скорости поперечных волн) [4].
- Ограниченный диапазон плотности трещин означает, что трещины во всех породах в естественном залегании являются критическими системами, которые ставят породы на грань разрушения (Рисунок 2).

*Группа по изучению поперечных волн, Школа наук о Земле, Университет Эдинбурга, Институт Гранта, West Mains Road, Edinburgh EH9 3JW, Scotland UK; также участник Эдинбургского проекта по анизотропии, Британская геологическая служба, Edinburgh EH9 3LA. scrampin@ed.ac.uk;
Оттиски и дополнительные экземпляры доступны по адресу <http://www.glg.ed.ac.uk/~scrampin/opinion/>.

СТАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ		
	Ref.	Ref.
Полевые наблюдения SWVA[‡] (глубина ниже 500м до 1000 м)	(Набл.)	(APE)
1) SWVA во всех породах не зависит от пористости и геологии.	[1]	[4]
2) Минимум SWVA в неразрушенной породе: наблюдаемый ≈ 1.5%; APE-моделированный ≈ 1.0%.	[1]	[4]
3) Максимум SWVA в неразрушенной породе: наблюдаемый ≈ 4.5%; APE-моделированный ≈ 5.5%.	[1]	[4]
4) Узкий диапазон плотности трещин: $0.025 \leq \epsilon \leq 0.045$.	[1]	[4]
5) Близость к критическому значению (при пороге просачивания) ≈ 5.5%.	[1]	[4]
Другие полевые наблюдения		
6) Предел критической трещиноватости задает распределение трещин в объеме с порядком величины - 9.	[7]	[8]
7) Изменение поляризации поперечных волн на $\pi/2$ (90°-поворот) в перегруженных породах, перегруженных коллекторах и сейсмически активных разломах.	[9,10,11]	[9,10,11]
ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ		
Временные изменения в SWVA в процессе добычи		
8) Изменения до и после тестов закачки.		
9) Изменения до и после инъекции CO ₂ под высоким давлением в карбонатном коллекторе	[12]	£
	[10]	[10]
Временные изменения в SWTD[†] перед землетрясениями		
10) Изменения запаздывания перед землетрясениями (в ретроспективе)	[13,14,15]	[4]
11) Успешное предсказание времени и магнитуды землетрясения с $M=5$ в юго-западной Исландии.	[14]	£
Временные изменения в SWTD до извержения вулкана		
12) Изменения SWTD за 5 месяцев до извержения вулкана Ватнайокулл 30 сентября, 1996, в Исландии, на расстояниях: 230 км на запад юго-запад; 170 км на юго-запад; и 240 км на север.	[15]	£
Измерения поперечных волн в лабораторных экспериментах		
13) Изменения SWVA и проницаемости в ячейках с одноосным напряжением.	[16]	[17]
14) Колебания (изотропии) скоростей поперечных волн как реакция на изменения горного давления и давления порового флюида для нефте-, водо-, и газо- (в сухой породе) насыщения в тензочувствительных элементах в керне песчаников.	[18]	[18]
15) Изменения скорости распространения и затухания волн для частот в диапазоне от акустических до сейсмических.	[19]	[20]

*APE - анизотропия упругости пористой

среды;

£Эффекты, совместимые с APE;

‡SWVA - анизотропия скорости поперечных волн;

†SWTD - запаздывание поперечных волн;

Таблица 1. Согласование моделирования APE*-с наблюдениями [2] (уточнено).

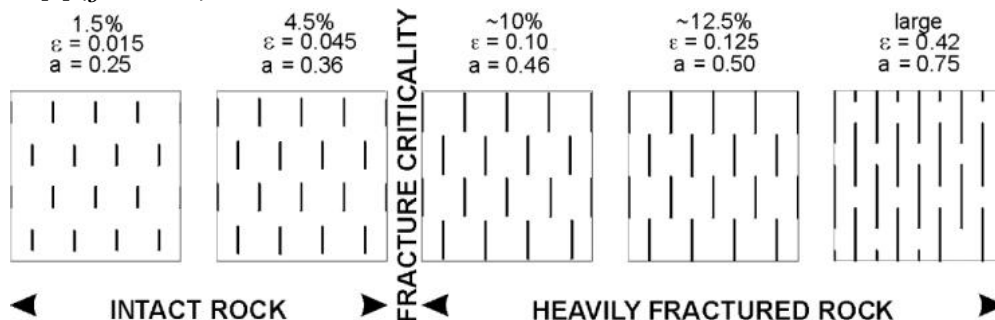


Рисунок 2 Схематическая интерпретация наблюдаемых процентов анизотропии скоростей поперечных волн [1,2,3], где ϵ - плотность трещин, a - радиус трещин. Узкий диапазон наблюдаемых значений плотности трещин в неразрушенных породах ниже критического значения ($\epsilon > 0.055$) говорит о том, что все породы настолько пронизаны микротрещинами, что находятся в критическом состоянии, возможно их разрушение.

Едва до породы дотрагиваются, как в ней уже образуются разломы, о чем свидетельствуют записи акустических волн, полученные с помощью чувствительных датчиков при извлечении углеводородов. Эффекты заключаются не просто в готовности к разломообразованиям. Микротрещины делают породы крайне податливыми и чувствительными к небольшим изменениям напряжения и давления [4]. Можно показать, что используя двойное лучепреломление поперечных волн, также известное как сейсмическое двулучепреломление, можно контролировать малые деформации коллектора еще до трещинообразования [4,5]. В теории имеются предположения, которые подтверждаются наблюдениями (смотрите Рисунок 6, ниже) о том, что породы земной коры настолько податливы и чувствительны к изменениям напряжения, что откликаются на малейшие возмущения, происходящие на значительных расстояниях [2,3]. Этот отклик пород может играть серьезную роль при традиционных способах извлечения углеводородов.

За последние годы мы значительно продвинулись в понимании процесса двулучепреломления поперечной волны (Рисунок 1), ключевого наблюдаемого процесса. Имеется несколько ссылок на эти достижения [2,3]. Ссылка на самые последние научные статьи дается на интернет сайте <<http://www.glg.ed.ac.uk/~scrampin/opinion/>>. Заметим, что в настоящей статье представлена исправленная и дополненная версия работы, опубликованной в журнале *PetroMin*. [6].

Механизм деформации пород

На Рисунке 3 показано, как серия флюидонасыщенных микротрещин реагирует на небольшие изменения напряжения (или изменение других условий) в процессе извлечения углеводородов. Движущим механизмом этого типа деформаций, известных как Анизотропная упругость пористой среды или АРЕ [2,4,5], является движение флюида вдоль линий градиента давления между соседними трещинами на границе зерен и пор при различной ориентации относительно поля напряжений [4]. Это ведет к образованию однонаправленных трещин и двулучепреломлению поперечных волн, которое проиллюстрировано на Рисунках 1 и 2. На Рисунке 3 приведена упрощенная (но количественно точная) иллюстрация эффектов, производимых малыми изменениями дифференциальных напряжений при произвольном распределении флюидонасыщенных микротрещин. Идея о существовании АРЕ согласуется с широким диапазоном различных явлений в геологии и геофизике, при условии существования критической системы флюидонасыщенных трещин [2,3].

Заметим, что тестирование (калибровка) АРЕ в глубокозалегающих породах трудна из-за высоких температур, давлений, а условия агрессивной среды не дают возможность осуществлять прямые измерения в условиях естественного залегания пород. В Таблице 1 перечислены множество косвенных методов моделирования АРЕ и связанных с этим параметром податливости и чувствительности породного массива и коллектора. В индустрии определение направления действия напряжения, которое получают по данным измерений поляризации поперечной волны, играет существенную роль.

Имеется три прямых иллюстрации моделирования АРЕ и податливости при критическом трещинообразовании в породном массиве.

1) Самая точная калибровка там, где АРЕ-моделирование совпадает с сейсмическим откликом на закачивание CO_2 как высокого, так и низкого давления в трещиноватый карбонатный коллектор в Нью Мехико [10]. На Рисунке 4 показаны трех-компонентные исследования МОВ до и после закачивания.

© 2004 EAGE

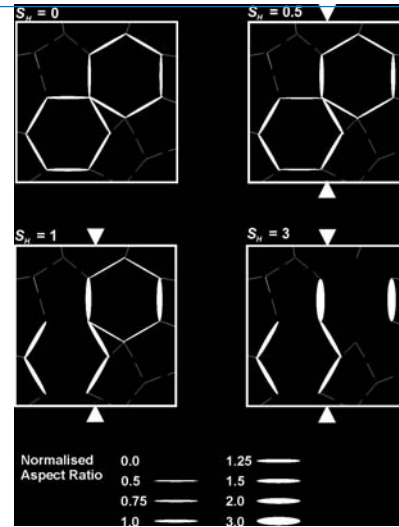


Рисунок 3 При моделировании анизотропии пористой среды (АРЕ) при деформации породы [2,3,4,5] рассчитывается отклик трещиноватых флюидонасыщенных пород на небольшие изменения напряжения. Движущим механизмом вариации геометрии микротрещин, вызванной напряжением, является движение поровой жидкости вдоль линий градиента давлений между соседними микротрещинами при различных ориентациях относительно поля напряжений. Хотя моделирование полностью трехмерное, этот двухмерный рисунок – просто схема (хотя количественно точная), которая иллюстрирует эффекты АРЕ на вертикальном распределении трещин с постоянной пористостью, равной $\phi = 6\%$, где ϕ – процентное содержание по объему.

- Слева сверху: разрез небольшого участка с произвольно ориентированными вертикальными трещинами (шестиугольники упруго-изотропны). При нулевом дифференциальном напряжении $s_H = s_h = 0$ и все трещины имеют равное соотношение геометрических размеров (равную ширину) и в горизонтальной плоскости нет анизотропии скорости распространения поперечных волн.
- Справа сверху: эффект небольшого увеличения дифференциального напряжения, s_H . Флюид приспособляется к изменению давления путем изменения соотношения геометрических размеров трещин, но все трещины остаются открытыми и анизотропии скорости распространения поперечных волн еще не возникает.
- Слева внизу: отклик, при котором критическое напряжение s_H (нормированное к единице) достаточно для того, чтобы закрылись трещины, нормальные к s_H . Анизотропия скоростей поперечных волн порядка 1%, минимум, который наблюдается для Земли, составляет 1.5% (Рисунок 2).
- Справа внизу: по мере увеличения напряжения, трещины начинают выравниваться, так, что среднее нормальное напряжение будет направлено по минимуму главного напряжения. В результате, при критическом для разломообразования значении (эквивалентном порогу просачивания для сквозных разломов), сопротивление скальванию исчезает и порода разламывается. Теоретически, эта относительно простая модель не зависит от пористости, и похожие эффекты наблюдаются как в гранитах с 1% пористости, так и в песчаниках с 30% пористости.

При вводе давления закачки в моделирование АРЕ наблюдается почти такой же отклик поперечных волн [10]. Успех моделирования АРЕ подтверждает теорию о критической системе трещин во флюидонасыщенных породах коры.

2) APE говорит о том, что увеличение напряжения должно вызывать изменения в двупреломлении поперечных волн в определенных направлениях, ориентированных по линии напряжения [2,4,5]. Такие изменения были зафиксированы перед десятками землетрясений по всему миру [13,15], а в Исландии было успешно предсказано время и магнитуда $M=5$ землетрясения [14]. Заметим, что двулучепреломление поперечных волн не несет никакой особой информации о локализации приближающихся землетрясений. Однако, если известно о приближении крупного землетрясения, другие предвестники могут указывать на эпицентр, как это случилось в случае с удачным предсказанием [14]. (Похожие изменения в лучепреломлении поперечной волны также наблюдаются перед извержением вулканов в нескольких направлениях на расстояниях до 240 км [15].)

3) Самым прямым подтверждением чувствительности породного массива является эксперимент по межскважинным сейсмическим исследованиям. На рисунке 5а показана поляризация поперечных волн, записанных на сейсмостанциях в Исландии с 1996 по 2000 г. г. На Рисунке 5б показаны землетрясения на трансформных разломах Срединно-Атлантического хребта в северной Исландии. Эксперименты по межскважинным исследованиям проводились на побережье рядом со станцией HED.

На рисунке 6 показаны вариации времен пробега P -волн, SH - и SV -волн, и анизотропии $SV-SH$ за 13 дней при глубине 500 м, между скважинами, расположенными на расстоянии 315 м. Времена пробега демонстрируют вариации в 6мс, 2мс, 2мс, и 0.2мс, соответственно, что коррелируется с группой небольших землетрясений в 70 км к северо-северо-западу на соседнем трансформном разломе, рядом со станцией GRI на Рисунке 5б [21]. Общее выделение энергии при этих землетрясениях меньше, чем энергия от одного землетрясения с магнитудой $M=4$. Это сравнительно маленькое сейсмическое возмущение и наблюдаемая чувствительность (в многослойных базальтах в Исландии) лежит за пределами, предсказываемыми традиционной геофизикой для хрупко-упругой коры.

Эти уникальные наблюдения регистрировались в спокойной обстановке ниже зоны приповерхностного шума, в эксперименте участвовал скважинный орбитальный вибратор (DOV) источник компании Geospace Engineering Research International, из Хьюстона. DOV испускал импульсы три или четыре раза в минуту, что позволяло осуществлять 100-кратное суммирование с точностью $\pm 0.02\text{мс}$ ($\pm 20\text{мкс}$) [21].

Исключительная чувствительность, показанная на Рисунке 6 P – это отклик критической системы флюидонасыщенных микротрещин на небольшие возмущения.

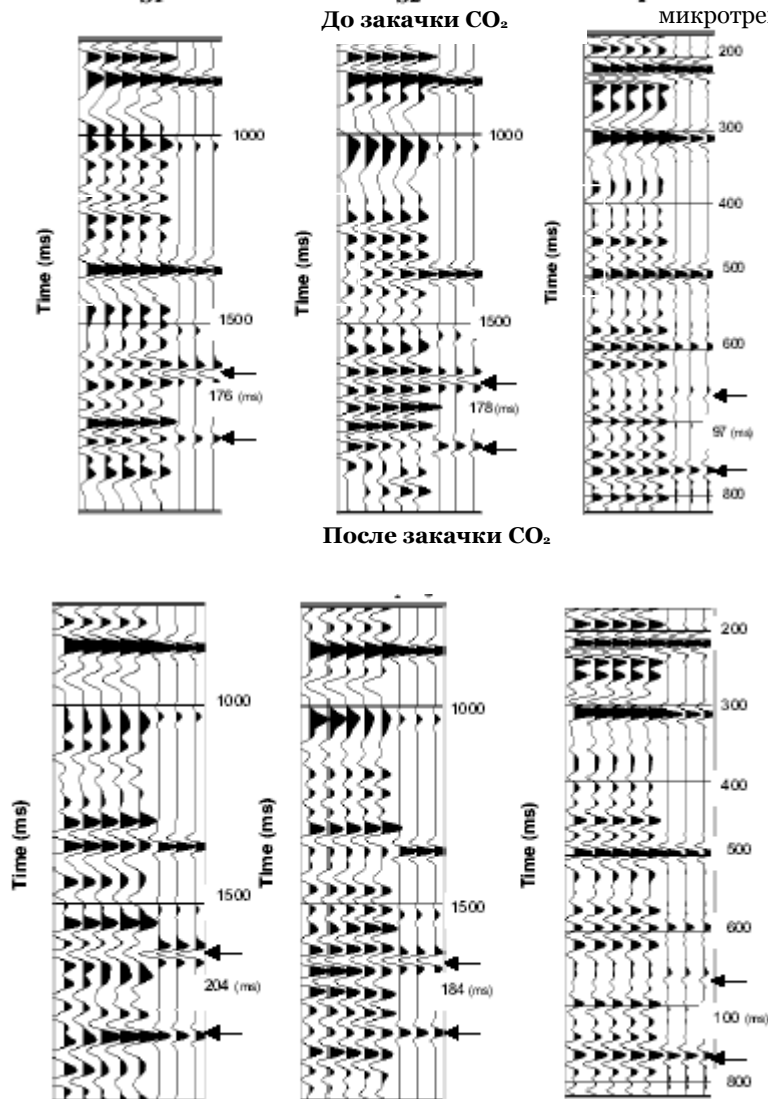


Рисунок 4 (а) Форма импульса при многокомпонентных почти вертикальных работах МОВ до закачки рядом с центром месторождения Вашиит, Нью Мехико, карбонатный коллектор. S_1 , S_2 , и P - участки записи с взаимно-ортогональной поляризацией, горизонтальные S_1 и S_2 , перешли во вступления поперечных волн параллельных (S_1) и перпендикулярных (S_2) направлению максимального горизонтального напряжения, соответственно. Пять трасс слева - наблюдаемые формы импульсов на соседних приемниках удаленных на 17 м, три трассы справа - синтетические сейсмограммы, моделированные с APE, отвечают временам прихода поперечных волн. Кровля и подошва зоны закачивания по поперечным волнам (определенные в результате анализа студентами из Колорадской Горной Школы) помечены стрелками с временными отметками в мс/км. (б) Формы волны после закачивания CO_2 под высоким давлением. Трассы слева - наблюдения, трассы справа - синтетические сейсмограммы, моделированные с APE как и в (а), давление закачки 17МПа. Кратные волны - реверберации не были использованы при моделировании. (По работе [10])

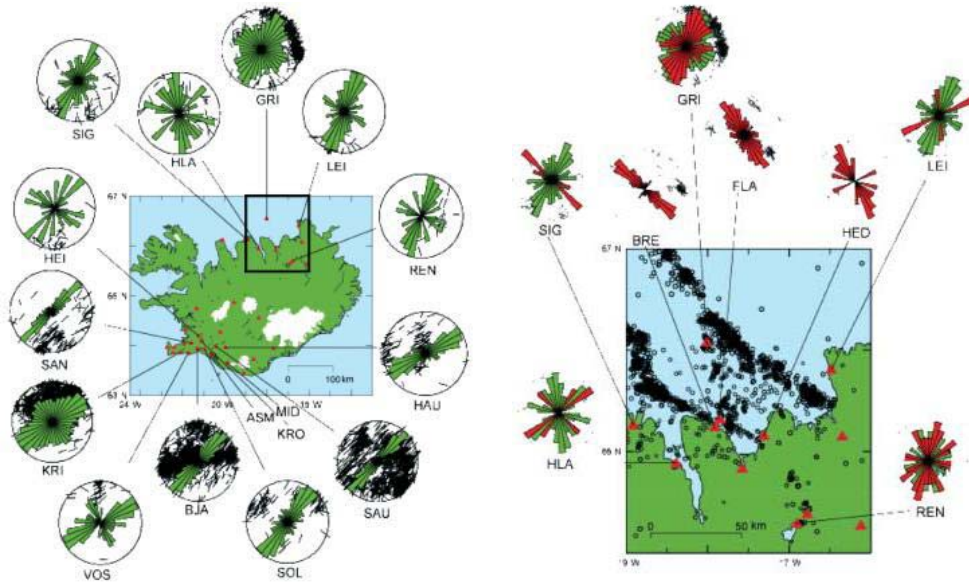


Рисунок 5 (а) Нормированные равноплощадные розы-диаграммы, наложенные на равноплощадные графики (до 45°) поляризации двупреломленных поперечных волн, наблюдаемых при землетрясениях Сейсмической Сетью Исландии (кратные треугольники) с 1996 по 2000 г. Ледники и ледниковые покровы показаны белым цветом. Треугольники относятся к области в (б). Розы-диаграммы для Зоны разломов Тьорн показаны в (а). Зелеными лепестками показана поляризация для землетрясений с 1996 по 2000г., а красными лепестками показаны поляризации в 2001, когда были установлены станции BRE, FLA, и HED. Локализация землетрясений показана за 2000 и 2001 г.. Розы-диаграммы на (а) и (б) нормированы для каждой станции, а зеленые и красные розы-диаграммы нормированы по-разному. (По [21])

Если влияние землетрясения с магнитудой $M=4$ заметно на расстоянии 70 км в относительно хрупких базальтах, влияние более крупных землетрясений с $M=8$, которое высвобождает, по крайней мере, в 10,000 раз больше энергии, можно видеть по всему земному шару, особенно в более податливых породах коллекторов. Вариации на Рисунке 6 являются прямой иллюстрацией того, что детальные сейсмические измерения, которые реагируют на изменения в геометрии микротрещин, чувствительны к небольшим возмущениям на значительных расстояниях. Это подтверждается образованием трещин, направленных по линии действия напряжения в критических системах флюидо-содержащих микротрещин пород коры [1,2,3].

Свойства критических систем трещин в коре

Критические системы – являются одной из проблем, которыми занимается Новая Физика сложных явлений, такие системы ведут себя стандартным образом до тех пор, пока не приблизятся к критической точке. Рядом с критической точкой, поведение уже нельзя объяснить докритической физикой, оно становится крайне чувствительным к малым вариациям начальных условий (чувствительность типа 'крыло бабочки'), а в критических точках отмечается эффект детерминистического хаоса [2]. А3 Системы близкорасположенных флюидонасыщенных микротрещин превращают земную кору в критическую систему, где критические точки соответствуют уровням критического разрывообразования (Рисунки 2 и 3), а хаотическое поведение – это разрывы и землетрясения [2,3].

Было показано, что критические системы рядом с критическими точками (такие как микротрещины в коре на Рисунке 2) ведут себя статистически скорее как

другие критические системы, чем как докритические [4,5]. Это причина того, почему почти беспараметрическое моделирование АРЕ удовлетворяет поведению крайне сложных гетерогенных пород земной коры [2,3]. На практике, это означает, что поведение аномалий на Рисунке 6 нельзя объяснить или понять в рамках стандартной до-критической геофизики. Естественно, у критических систем имеется ряд замечательных свойств [2,3,4,5].

- Некоторые из этих свойств представляют серьезные неудобства для стандартной нефтяной геофизики и традиционных нефтепромысловых работ.
- A1 Поведение коллекторов нестабильно во времени и пространстве, поэтому любые изменения могут терять свою актуальность во времени, как показано на Рисунке 6, где вариация данных измерений значительна во времени (и пространстве, что не показано).
- A2 Многие свойства коллекторов гетерогенны во времени и пространстве, во всех масштабах, поэтому осреднение возможно только при особых обстоятельствах.
- A3 Есть вероятность дальнего взаимодействия (i) между и (ii) внутри-, углеводородных коллекторов. Эффекты A3ii наблюдались на крупных зрелых месторождениях [22].
- A4 Детальное поведение (такое как поведение на Рисунке 6) может не отвечать или не объясняться традиционной геофизикой.

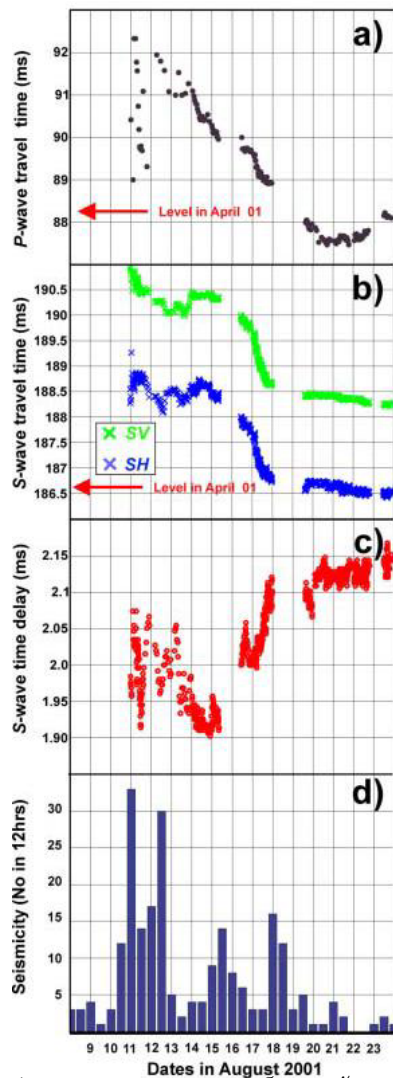


Рисунок 6 Аномалии времен пробега сейсмических волн, которые коррелируются с небольшим всплеском сейсмичности, 70 км к северо-северо-западу от станции GRI [21]. Вариации времен пробега сейсмических волн (с 11 по 24 августа, 2001) на глубине 500 м между скважинами, расположенными на расстоянии 315 м, параллельно Срединно-Атлантическому трансформному разлому на побережье северной Исландии: (а) Р-волна; (б) SV- и SH- волны; и (с) SV - SH задержка; совпадение с (d) численной гистограммой (за 12 часов) 106 малых землетрясений ($M < 2.8$) на расстоянии 70 км (общая энергия эквивалентна одному землетрясению с магнитудой $M < 4$). Уровни времен пробега P-и S-волн по предыдущим наблюдениям в апреле 2001 показаны в (а) и (б). (По [21]).

Несмотря на эти трудности и неудобства, есть другие свойства, которые потенциально могут принести огромную пользу при извлечении углеводородов. В1 Мониторинг текущей конфигурации геометрии трещин в недрах породного массива или коллектора можно осуществлять путем изучения двупреломления поперечных волн и оценивать с помощью АРЕ [2,3,4]. В2 Отклик породного массива или коллектора на известные изменения можно рассчитывать используя АРЕ [2,3,4].

В3 Откликом породного массива или коллектора можно управлять с помощью обратной связи, повторяя пункты В1 и В2 [2,3,4]. Если отклик можно рассчитывать или наблюдать, используя эффект двупреломления поперечной волны, оптимальный отклик и оптимальное извлечение можно контролировать путем регулировки входных параметров используя обратную связь.

В4 Важным дополнительным ограничением является то, что моделирование АРЕ (пункты В1 и В2) можно применять только к системам, для которых процессы релаксации напряжения и просачивания флюидов происходят естественным образом [2]. Только для таких систем можно рассчитывать отклик сложного гетерогенного коллектора на определенные измерения, или предсказывать АРЕ, как это уже упоминалось, в случае закачки CO_2 [по 10]. Времена релаксации напряжений неизвестны, требуется дальнейшее их изучение. Однако, предварительные данные, полученные из: i) CO_2 -закачки [10]; ii) межскважинных сейсмических исследований на Рисунке 6 [21]; и iii) изменений, происходящих перед землетрясениями [4,13,14,15], говорят о том, что отклик проявляется относительно быстро, и что эти эффекты можно моделировать с помощью АРЕ; длительность релаксации порядка одного-двух дней - вполне приемлемое время задержки при нефтепромысловых работах. Следствием агрессивных стратегий добычи является то, что коллектора становятся все более гетерогенными и этот эффект нельзя моделировать с помощью АРЕ, и таким образом, нефтеотдача будет уменьшена.

Эти недостатки и потенциальные преимущества открывают широкие возможности использования этого эффекта, ниже дается краткое описание некоторых возможностей.

Основные недостатки и польза для нефтедобычи

Вне всякого сомнения, наибольшие эксплуатационные неудобства представляют пункты А1 и А2, а также пункт В4, которое подразумевает то, что коллектора ведут себя предсказуемо, только если процессы проводятся медленно и между ними происходит релаксация напряжений.

Данные по А1: *Временная и пространственная нестабильность*, напрямую подтверждается вариациями на Рисунке 6, на котором данные повторяющихся измерений между фиксированными источниками и приемниками меняются во времени, эти изменения коррелируются с небольшими удаленными сейсмическими возмущениями.

Другие примеры [2,13,14,15] говорят о том, что эти вариации могут регистрироваться за недели до небольших землетрясений на расстоянии десятков километров, и за годы до крупнейших землетрясений и извержений, которые могут быть зафиксированы на всем земном шаре. Другим источником возмущений могут быть процедуры при добыче нефти, не обязательно на соседних месторождениях [22], земные приливы, и другие явления. АРЕ моделирование подразумевает, что земная кора находится в непрерывном состоянии изменения. Следовательно, детальные сейсмические наблюдения за коллектором могут давать разные значения со временем. Эти вариации, скорее всего, незначительны, но могут сильно усложнять сейсмомониторинг (4D) в разрабатываемых коллекторах.

А2: *Временная и пространственная неоднородность*, возможно даже более серьезное явление. Гетерогенность, скорее всего, обусловлена временными и пространственными вариациями геометрии микротрещин, одним из главных последствий этого являются вариации в геометрическом соотношении размера трещин

Необходимы новые способы проведения мониторинга коллекторов

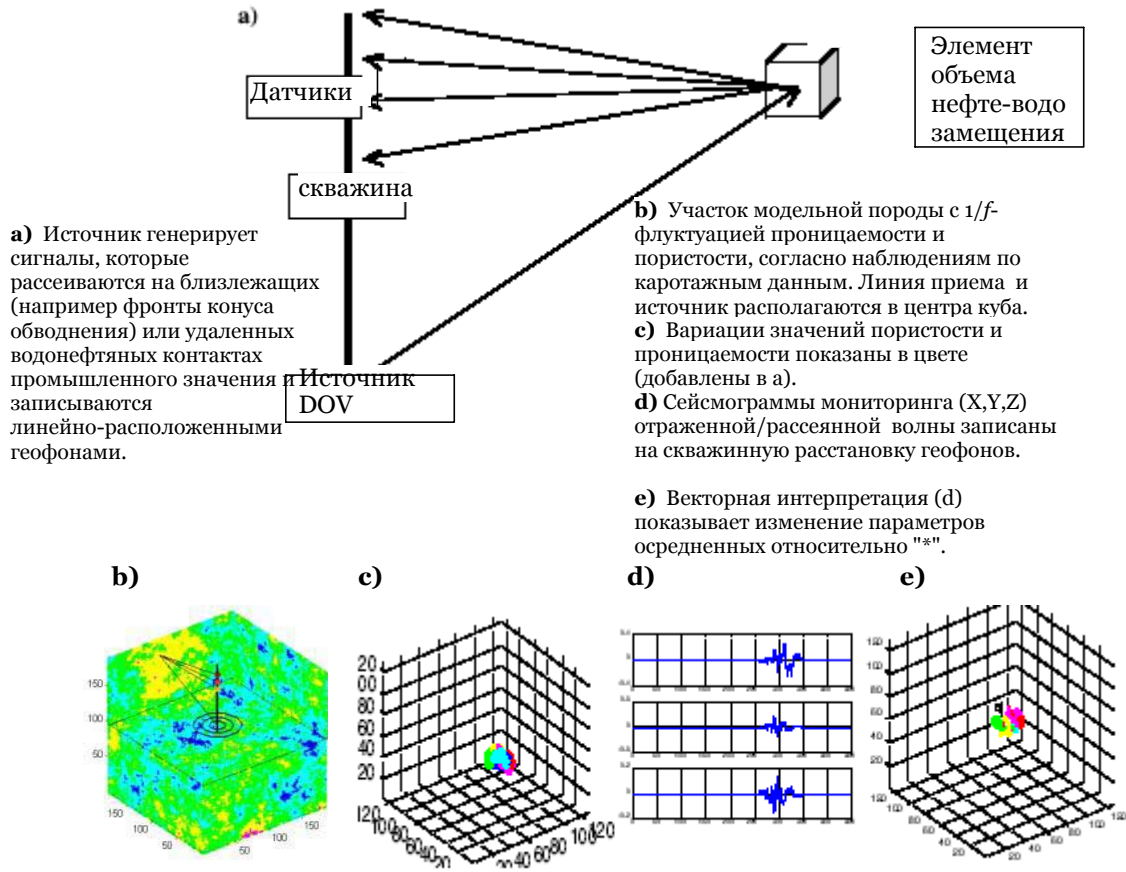


Рисунок 7 Моделирование изображения куба, получаемого в результате мониторинга одиночной скважины, с добавлением (на основе наблюдения) $1/f$ колебаний пористости и проницаемости, до и после незначительных вариаций в одном из углов.

(Рисунок 3). Это может приводить к вариациям проницаемости (особенно по различным направлениям). Поскольку доминантным механизмом, который влияет на добычу углеводородов, является просачивание флюида через пористые породы, временные вариации проницаемости могут существенно менять дебет скважин. Такие вариации сложно оценить, предсказать, и трудно назвать их причину. Вариации проницаемости зависят от направления закачки воды, например, говорят о том, что однонаправленные трещины имеют огромное влияние на просачивание углеводородов. А вариации соотношения геометрических размеров трещин (самого чувствительного параметра трещин) могут сильно влиять на проницаемость по различным направлениям и дебет углеводородов.

Эти эффекты были продемонстрированы при наблюдениях двулучепреломления поперечных волн над зонами неинтенсивных землетрясений [1,13,14,15]. Было показано, что огромный ($\pm 80\%$) разброс временных задержек над участками неинтенсивных землетрясений вызван незначительными колебаниями напряжений и порового давления после каждого землетрясения, что вызывает вариации в геометрии микротрещин и оказывает влияние на направление распространения сейсмических лучей, времена пробега, и в особенности на запаздывание поперечных волн [23].

Обобщением всего вышесказанного является следующее: породы земной коры – это критические системы высоко чувствительных эластичных флюидонасыщенных трещин, которые можно проследить только благодаря эффекту двупреломления поперечных волн. В частности:

- 1) Детальные сейсмические наблюдения характеризуются временными вариациями.
- 2) Чем длиннее траектория сейсмических лучей, тем возможны большие временные и пространственные вариации сейсмических наблюдений из-за временных и пространственных неоднородностей.
- 3) Относительно небольшие вариации в геометрии микротрещин могут иметь значительное влияние на пористость и проницаемость и следовательно, на добычу углеводородов.

Следствием этого является то, что традиционные сейсмические контактные наблюдения, при которых источник и/или приемники находятся на поверхности, могут давать временные и пространственные аномалии, необъяснимые в рамках традиционной геофизики. Необходимо проводить достоверные измерения как можно ближе к эксплуатационному объекту.

Построение изображения результатов мониторинга одиночной скважины (SWI)

Самый прямой способ регистрации сейсмических данных внутри действующего коллектора – построение изображения по данным мониторинга (4D) одиночной скважины (SWI). SWI – это многократное возбуждение импульсов скважинным источником (например DOV), и регистрация рассеянных отраженных и дифрагированных волн трехкомпонентными геофонами в той же скважине. Возможно, записи от одного возбуждения нельзя будет интерпретировать. Однако, если возбуждение будет периодически повторяться, в коллекторе возможны некоторые изменения; на Рисунке 7 показано, что мониторинг (последовательные записи) может принципиально помочь в определении направления изменения свойств.

SWI – это новая технология, которая имеет ряд преимуществ.

- 1) SWI мониторинг (4D) может помочь определить направление и дальность любого изменения, которое происходит в коллекторе (перемещение водонефтяного контакта, например). Majer и др. [24] зарегистрировали изменения SWI в зеркально отраженных Р-волнах, от известного разлома вслед за нагнетанием воздуха, в скважине на расстоянии нескольких метров от разлома, конфигурация приемной расстановки и источников была направлена на то, чтобы зеркальные отражения регистрировались измерительными приборами вдоль профиля. Запись осуществлялась гидрофонами, поперечные волны отсутствовали.
- 2) Локализация SWI изменений (как на Рисунке 7) не зависит от структуры коллектора. Это означает, что SWI одной скважины (в идеале эксплуатационной скважины) в действующем коллекторе может помочь: проследить перемещение водо-нефтяного контакта; предсказать образование конуса обводнения; определить местоположение целиков нефти в пласте, образовавшихся вследствие обхода потока нагнетаемой воды (как объемов, где не было движений флюида); определить положение разломов с помощью изучения малоамплитудных акустических волн (а при благоприятной геометрии с помощью сейсмических отражений, как в [24]); и с помощью этого получать прямые данные по управлению коллектором. В этом случае не требуется проводить дорогие структурные исследования.
- 3) Анализ достаточно прост, может проводиться автоматически, и не зависит от структуры, поэтому его можно проводить в реальном времени.
- 4) Имеется несколько значительных преимуществ над другими альтернативами мониторинга за добычей:
 - 4.1 SWI помогает определить основные параметры для моделирования APE.
 - 4.2 Процесс и обработка SWI выполняется в автоматическом режиме, достаточно быстро (почти мгновенно).
 - 4.3 Выполнение SWI стоит гораздо дешевле ($x \sim 1/100$), чем работы MOB 4D, особенно если геофоны расположены за обсадной колонной.

В результате, SWI открывает перед нами новые возможности сейсмомониторинга разрабатываемых коллекторов в реальном времени, а также дает возможность производить динамические изменения для оптимизации добычи углеводородов.

Выводы

В работе показано, что земная кора является критической системой близко расположенных флюидонасыщенных микротрещин, которые крайне чувствительны к малым возмущениям. Такая высокая чувствительность, граничащая с критической, является особенностью многих систем, она проявляется во многих явлениях, начиная с выбросов в пульсарах до квантовой электродинамики, от предсказания погоды до поведения транспорта и тенденций на Нью-Йоркской фондовой бирже. Критические системы являются признаками сложных интерактивных систем. Вовсе не удивительно, что породы земной коры, как многие другие явления природы являются критическими системами [2,3].

Если данные наблюдений за коллектором обладают низкой разрешающей способностью, то можно игнорировать положения Новой Геофизики (за исключением интерпретации двупреломления поперечной волны), но если выполняются более точные измерения, то их результат все более трудно объяснить по мере возрастания разрешающей способности. Это происходит потому, что вблизи критической точки система ведет себя как другие критические системы, а не как системы в понимании до-критической физики [2,3]. Нельзя понять поведение таких систем в рамках традиционной до-критической физики. Упорядоченность поведения таких сложных интерактивных систем, их управляемость, и предсказуемость – одно из чудес природы. Инженеры-практики и менеджеры, которым адресована настоящая статья, должны принять во внимание эти достижения современной физики, чтобы лучше оценить поведение коллекторов, и возможно, увеличить добычу нефти.

Мы вкратце изложили основные положения Новой Геофизики, и высказали мнение о том, что для детального понимания коллекторов и увеличения нефтеотдачи, необходимо проводить мониторинг коллекторов с помощью SWI. Технология SWI – это новая, еще мало испытанная технология. На Рисунке 7 показана принципиальная схема мониторинга методом SWI. Одним из необходимых условий ее развития является обработка реальных данных.

Сегодня SWI находится в том же положении, что и отражательная сейсмология 70 лет назад. Так же, как и в случае с отражательной сейсмологией, есть много известных и неизвестных проблем, которые ожидают своего решения. С помощью достижений, которые намечаются в технологиях и способах обработки, SWI может стать ключевой технологией в нефтяном промысле 21-го века.

Признательность

Эта работа частично финансирована Европейской Комиссией Готовых Проектов, номер контракта EVG1-ST2002-00073.

Литература

- [1] Crampin, S. [1994] The fracture criticality of crustal rocks. *Geophysical Journal International* **118**, 428-438.
- [2] Crampin, S. and Chastin, S. [2003] A review of shear-wave splitting in the crack-critical crust. *Geophysical Journal International* **155**, 221-240. (Paper scsc03)*
- [3] Crampin, S. [2003] The New Geophysics: shear-wave splitting provides a window into the crack-critical rock mass. *The Leading Edge* **22**, 536-549. (sc03a)*

- [4] Crampin, S. and Zatsepin, S. V. [1997] Modelling the compliance of crustal rock: II - response to temporal changes before earthquakes. *Geophysical Journal International* **129**, 495-506.
- [5] Zatsepin, S. V. and Crampin, S. [1997] Modelling the compliance of crustal rock: I - response of shear-wave splitting to differential stress. *Geophysical Journal International* **129**, 477-494.
- [6] Crampin, S. [2004] The New Geophysics: implications for hydrocarbon production. *PetroMin*, **30**, in press.
- [7] Heffer, K. J. and Bevan, T. G. [1990] Scaling relationships in natural fractures. *Society of Petroleum Engineers*, SPE Paper 20981.
- [8] Crampin, S. [1997] Going APE: I - Modeling the inherent anisotropy of intact rock. 67th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Dallas, *Expanded Abstracts* **1**, 952-955; see also 956-959; 921-924.
- [9] Crampin, S., Zatsepin, S. V., Slater, C. and Brodov, L. Y. [1996] Abnormal shear-wave polarizations as indicators of pressures and over pressures. 58th Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Amsterdam, *Extended Abstracts*, **O38**.
- [10] Angerer, E., Crampin, S., Li, X.-Y. & Davis, T. L., [2002] Processing, modelling, and predicting time-lapse effects of overpressured fluid-injection in a fractured reservoir. *Geophysical Journal International* **149**, 267-280. (ea+02)*; *Extended Abstracts* **P113**.
- Angerer, E., Crampin, S., Li, X.-Y. & Davis, T. L. [2000] Time-lapse seismic changes in a CO₂ injection process in a fractured reservoir 70th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Calgary, *Expanded Abstracts* **2**, 1532-1535.
- [11] Crampin, S., Volti, T., Chastin, S., Gudmundsson, A. and Stefansson, R. [2002] Indication of high pore-fluid pressures in a seismically-active fault zone. *Geophysical Journal International* **151**, F1-F5. (sc+02)*
- [12] Crampin, S. and Booth, D. C. [1989] Shear-wave splitting showing hydraulic dilatation of pre-existing joints in granite. *Scientific Drilling* **1**, 21-26.
- [13] Booth, D. C., Crampin, S., Lovell, J. H. and Chiu, J.-M. [1990] Temporal changes in shear wave splitting during an earthquake swarm in Arkansas. *Journal of Geophysical Research* **95**, 11,151-11,164; Crampin, S., Booth, D. C., Evans, R., Peacock, S. and Fletcher, J. B. [1990] Changes in shear wave splitting at Anza near the time of the North Palm Springs Earthquake. *Journal of Geophysical Research* **95**, 11,197-11,212; Crampin, S., Booth, D. C., Evans, R., Peacock, S. and Fletcher, J. B. [1991] Comment on "Quantitative measurements of shear wave polarizations at the Anza seismic network, southern California: implications for shear wave splitting and earthquake prediction." by Aster, R., Shearer, P.M. & Berger, J., *Journal of Geophysical Research* **96**, 6403-6414; Liu, Y., Crampin, S. and Main, I. [1997] Shear-wave anisotropy: spatial and temporal variations in time delays at Parkfield, Central California. *Geophysical Journal International* **130**, 771-785; Gao, Y., Wang, P., Zheng, S., Wang, M. & Chen, Y.-T., 1998. Temporal changes in shear-wave splitting at an isolated swarm of small earthquakes in 1992 near Dongfang, Hainan Island, Southern China. *Geophysical Journal International* **135**, 102-112.
- [14] Crampin, S., Volti, T. and Stefansson, R. [1999] A successfully stress-forecast earthquake. *Geophysical Journal International* **138**, F1-F5. (sc+99)*
- [15] Volti, T. and Crampin, S. [2003] A four-year study of shear-wave splitting in Iceland: 1. Background and preliminary analysis. In New insights into structural interpretation and modelling, ed. Nieuwland, D. A., Geological Society, London, *Special Publication*, **212**, 117-133; Volti, T. and Crampin, S. [2003] A four-year study of shear-wave splitting in Iceland: 2. Temporal changes before earthquakes and volcanic eruptions. In New insights into structural interpretation and modelling, ed. Nieuwland, D. A., Geological Society, London, *Special Publication*, **212**, 135-149; Gao, Y. and Crampin, S. [2004] Observations of stress relaxation before earthquakes. *Geophysical Journal International*, in press. (gysco4c)*
- [16] King, M. S., Chaudhry, N. A. and Ahmed, S. [1994] Experimental ultrasonic velocities and permeability of sandstones with aligned cracks. 56th Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Vienna, *Extended Abstracts* **P113**.
- [17] Zatsepin, S. V. & Crampin, S., 1996. Stress-induced coupling between anisotropic permeability and shear-wave splitting. 58th Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Amsterdam, *Extended Abstracts* **C030**.
- [18] Crampin, S., Rowlands, H. J., Zatsepin, S. V., Smart, B. J., Edlmann, K. and Crawford, B. [1997] Predicting the response to effective stress of cores with different pore fluids. 59th Conf. EAGE, Geneva, *Extended Abstracts* **2**, CO22; Crampin, S., Zatsepin, S. V., Rowlands, H. J., Smart, B. J. and Somerville, J. M. [1999] APE-modelling of fluid/rock deformation of sandstone cores in laboratory stress-cells. 61th Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Helsinki, *Extended Abstracts* **1**, 2-08.
- [19] Sothcott, J., O'Hara, S. G., Khazanehdari, J. and McCann, C. [2000] From sonic to ultrasonic - the acoustic properties of reservoir sandstones. 62nd Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Amsterdam, Glasgow, *Extended Abstracts* **D-39**; Sothcott, J., McCann, C. and O'Hara, S. G. [2000] The influence of two different pore fluids on the acoustic properties of reservoir sandstones at sonic and ultrasonic frequencies. 70th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Calgary, *Expanded Abstracts* **2**, 1883-1886.
- [20] Chapman, M., Zatsepin, S. V. and Crampin, S. [1998] Anisotropic dispersion in stress-sensitive poroelasticity. 60th Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Leipzig, *Extended Abstracts* **1**, 10-10; Chapman, M., Zatsepin, S.V. and Crampin, S. [2000] Incorporating

stress-sensitivity into dynamic poro-elasticity. 70th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Calgary, *Expanded Abstracts* **2**, 1536-1539.

[21] Crampin, S., Chastin, S. and Gao, Y. [2003] Shear-wave splitting in a critical crust: III - preliminary report of multi-variable measurements in active tectonics. *Journal of Applied Geophysics* **54**, 265-277. (sc+03a)*

[22] Heffer, K. J., Fox, R. J., McGill, C. A. and Koutsabeloulis, N. C. [1995] Novel techniques show links between reservoir flow directionality, Earth stress, fault structure and geomechanical changes in mature waterfloods. *Society of Petroleum Engineers*, SPE Paper 30711.

[23] Crampin, S., Peacock, S., Gao, Y. and Chastin, S. [2004] The scatter of time-delays in shear-wave splitting above small earthquakes. *Geophysical Journal International* **156**, 39-44. (sc+04a)*

[24] Majer, E. L., Peterson, J. E., Daley, T., Kaelin, B., Myer, L. R., Queen, J., D'Onfro, P. and Rizer, W. [1997] Fracture detection using crosswell and single well surveys. *Geophysics* **62**, 495-504.

*Маркировка работ приводится на веб-странице
<<http://www.glg.ed.ac.uk/~scrampin/opinion/>>.