

## Газ в плотных породах

**Применение многокомпонентной сейсморазведки к изысканиям и добыче газа из плотного песчаника, месторождение Rulison, Колорадо. Multi-component seismic applications to tight gas sandstone exploration and production, Rulison Field, Colorado**Thomas L. Davis<sup>1</sup>\*, Elizabeth A. LaBarre<sup>2</sup>, и Robert D. Benson<sup>1</sup>

В рамках проекта Колорадской Горной Школы по определению характеристик коллектора (RCP) в настоящее время изучаются возможности применения многокомпонентной сейсморазведки к изысканиям и добыче газа в плотных песчаниках на месторождении Rulison, Колорадо. Результаты показывают, что тела трещиноватых песчаников характеризующиеся улучшенной проницаемостью, можно обнаружить, используя анализ высокоразрешенных данных по анизотропии поперечных волн. Многокомпонентное сейсмическое обнаружение трещин имеет большой потенциал для того, чтобы оказывать существенное влияние на будущую разведку и добычу газа в плотных породах.

**Месторождение Rulison**

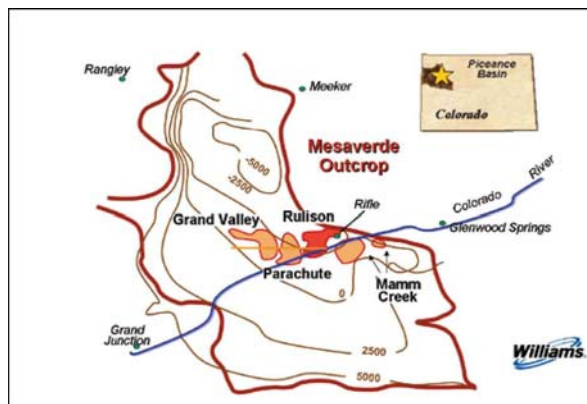
Месторождение Rulison расположено в бассейне Piceance в Колорадо (Рисунок 1). На нем производится добыча газа в плотных песчаниках формации Williams Fork позднего мела (Рисунок 2). Наилучшая продуктивность связывается с 'наиболее перспективным объектом' в центре месторождения, который является зоной естественной трещиноватости, где имеется система открытых сдвиговых разрушений. Скважины с высокой ожидаемой суммарной отдачей (EUR) связаны с этим продуктивным поясом. Многоуровневые, объединенные трещиноватые песчаные тела, соединенные между собой гидроразрывом, обеспечивают дренируемый объем и увеличенную проницаемость, что приводит к тому, что скважины характеризуются высокими EUR.

Трещиноватые песчаные тела на Rulison нельзя обнаружить с помощью традиционных сейсмических данных на Р-волнах. Поперечные волны несут в себе потенциал для обнаружения этих трещиноватых геологических тел благодаря контрасту упругого импеданса, который наблюдается между трещиноватыми песчаниками и окружающими сланцами. Песчаники, обладающие естественной трещиноватостью, разбуренные скважинами, представляют собой главную цель для бурения и заканчивания на месторождении Rulison. В результате, обнаружение трещиноватых тел может изменить стратегию размещения скважин с бурения по сетке на точное прицельное бурение, что улучшит экономическую эффективность разведки и разработки газа в плотных песчаниках.

Запасы на месторождении Rulison оцениваются в 135 млрд. куб. футов (bcf) на квадратную милю. До настоящего времени количество извлеченного газа с изучаемой области площадью 1.9 кв. миль с 87 скважин, равняется 74 bcf. Шестнадцать bcf было добыто с начала нашего исследования в 2003 г. Интервал между скважинами 10 акров в западной части области исследования и 20 акров в восточной части. Тестирование давления показало, что некоторые участки характеризуются зональным истощением, тогда как, другие участки – нет.

Многокомпонентные данные сейсмомониторинга имеют потенциал для идентификации зон истощения еще до бурения и заканчивания этих загущающих скважин. Можно достигнуть роста запасов, и улучшения эффективности извлечения, если зоны истощения можно избежать или пропущенные запасы можно извлечь посредством точного прицельного бурения. Гидроразрыв необходим и в настоящее время встречается на этажах с порядка 100 до 150 м интервала на этаж. Средняя стоимость для скважины, пробуренной до 2500 м составляет \$1 миллион, заканчивание скважины стоит эквивалентную сумму.

Скважины с высоким EUR обычно имеют дебит 600 тыс. куб. футов в день (mcf/d) до более чем млн. куб. футов в день при начальной добыче и спустя несколько месяцев добыча снижается и стабилизируется в диапазоне с 300 по 500 mcf/d. Позже снижение добычи становится более постепенным и в некоторых случаях в реальности имеет тренд, или из-за расчистки закупорки пор призабойной зоны, или связности с углями, или по обоим причинам. Определение характеристик коллектора важно для разведки и добычи газа в плотных песчаниках и является ключевым элементом для роста запасов и экономически эффективной разработки. Существует потенциал для мониторинга кривых давления в скважине с использованием периодических многокомпонентных сейсмических наблюдений. Этот потенциал реализуется RCP посредством сбора данных 4D, 9C на месторождении Rulison.



**Рисунок 1** Карта бассейна Piceance в западной части Колорадо, на которой показано положение месторождения Rulison и другие месторождения газа. Структурные изолинии соответствуют кровле формации Mesaverde. Добыча на месторождении Rulison осуществляется с 'выступа' антиклинальной структуры, погружающейся в северо-западном направлении. Рисунок любезно предоставлен компанией Williams RMT.

<sup>1</sup> Colorado School of Mines.<sup>2</sup> EnCana Oil & Gas (USA).<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: tdavis@mines.edu.

## Газ в плотных породах

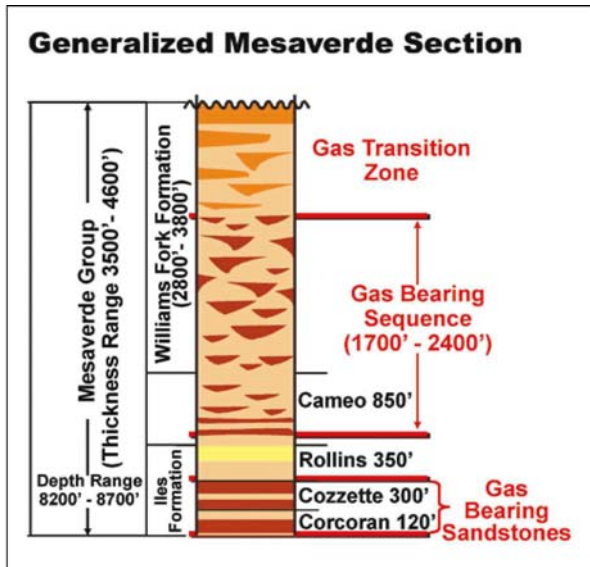


Рисунок 2 Стратиграфическая колонка группы пород Mesaverde в бассейне Piceance, на которой показаны изолированные линзообразные аллювиальные плотные газосодержащие песчаники, расположенные в формации Williams Fork. Эти геологические тела являются основными коллекторами газа в плотных песчаниках месторождения Rulison. Интервал угля Cameo является источником газа. Рисунок любезно предоставлен компанией Williams RMT.

## Разрывы и трещины

Месторождение Rulison расположено на антиклинали, которая погружается на северо-запад и называется выступ Rulison. Наличие ложных сбросов на интервале коллектора области исследования RCP приводит к сдвиговым деформациям, которые дают сложную систему ветвящихся разломов, известных под названием 'цветкообразных структур'. Эти разломы были подтверждены на изображениях каротажей и на данных бурения (Matesic, 2007). Многие из этих разломов имеют масштаб ниже сейсмического разрешения ввиду малой вертикальной амплитуды смещений в коллекторе, но некоторые крупные разломы очевидны на данных поперечных волн, поскольку они представляют собой разрыв упругих свойств, которые зависят от состояния напряжения в разрезе. На рисунке 3 показана карта, полученная по данным поперечных волн разломов, которые разрешены в сейсмическом масштабе в основании коллектора. Сейсмика на основе S-волн подтверждает, что эти разломы расширяются и ветвятся вверх по коллектору. Многие из скважин с высоким EUR расположены вблизи этой зоны разломов, но это характерно и для некоторых скважин со средними показателями. Расположение разломов относительно скважины может повлиять на EUR, но разломы не являются единственным фактором (Matesic, 2007).

Открытые естественные сдвиговые разрушения предсказываются в окрестностях этой зоны разрывных деформаций. Открытые трещины характеризуются контрастом жесткости по сравнению с окружающими породами, что дает возможность обнаруживать более протяженные зоны дробления на основе данных по S-волнам, тогда как эти зоны нельзя обнаружить с помощью P-волн. Гидро разрыв в пределах этой зоны трещин отличается сложным поведением, сокращается протяженность гидро разрыва пласта. Связность системы естественных трещин является критичной для улучшения производительности скважины и повышения EUR. Ориентация и длина гидро разрыва относительно сети открытых трещин будет основным определяющим параметром выдачи скважин.

## Сообщаемость

Ориентация максимального горизонтального напряжения, который управляет ориентацией гидро разрыва - N 70 W. Большая сообщаемость в этой системе предполагается в направлении восток-запад, поскольку это является направлением гидро разрыва. Однако связность также зависит от литологического строения флювиальных отложений и системы естественных трещин. Предсказание связности на основе ориентации гидро разрыва и использования этих данных для построения сетки бурения скважин не настолько эффективно как в случае, если известна реальная ориентация и латеральная протяженность трещиноватых геологических тел, данные о которых используются для расположения скважин и разработки схемы обработки гидро разрывом.

Кривые падения добычи характеризуются двумя механизмами подачи, которые подразумевают скважины в наиболее перспективной зоне сбросов; естественную трещиноватость, которая доминирует в процессе добычи на раннем этапе, вслед за которой в процессе добычи задействуются пористость песчаников и емкость резервуара. Некоторые скважины могут быть продуктивными в течение десятилетий, в особенности, если поддержка давления осуществляется со стороны углей посредством естественной системы трещин. Как только происходит падение давления в песчаных телах, связанных с интервалом углей Cameo, они ускоряют десорбцию газа из углей, что еще больше подкрепляет газовую отдачу. Обнаружение трещиноватых геологических тел может существенно помочь при разведке и добыче газа в плотных песчаниках.

## Азимутальная анизотропия

Трещины приводят к азимутальной сейсмической анизотропии, которая проявляется в обстановке газа в плотных породах приводя к двоякому преломлению поперечных волн (Martin and Davis, 1987). Каротаж со скрещенными диполями был выполнен в недавно пробуренной скважине и произведенные изменения анизотропии дали диапазон от нескольких процентов до 25% в высоко трещиноватых интервалах (Рисунок 4). Значения анизотропии для трещиноватых интервалов обычно лежат в интервале 3% и 10% при том, что фоновая анизотропия имеет значения до 2%.

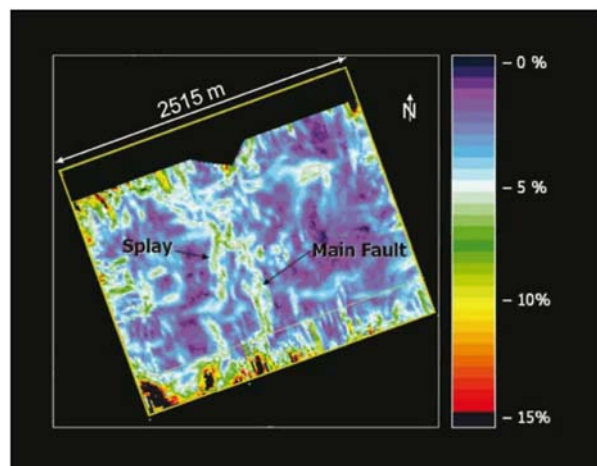


Рисунок 3 Карта подобия по горизонтам, рассчитанная в окне вокруг горизонта кровли углей Cameo по кубу скоростей поперечных волн говорит о сложной, ветвящейся системе трещин в центре области исследований. Область съемки RCP и района работ обозначены желтой линией и ее протяженность 2515 м на 2213 м или порядка 5.5 квадратных км. По LaBarre (2008).



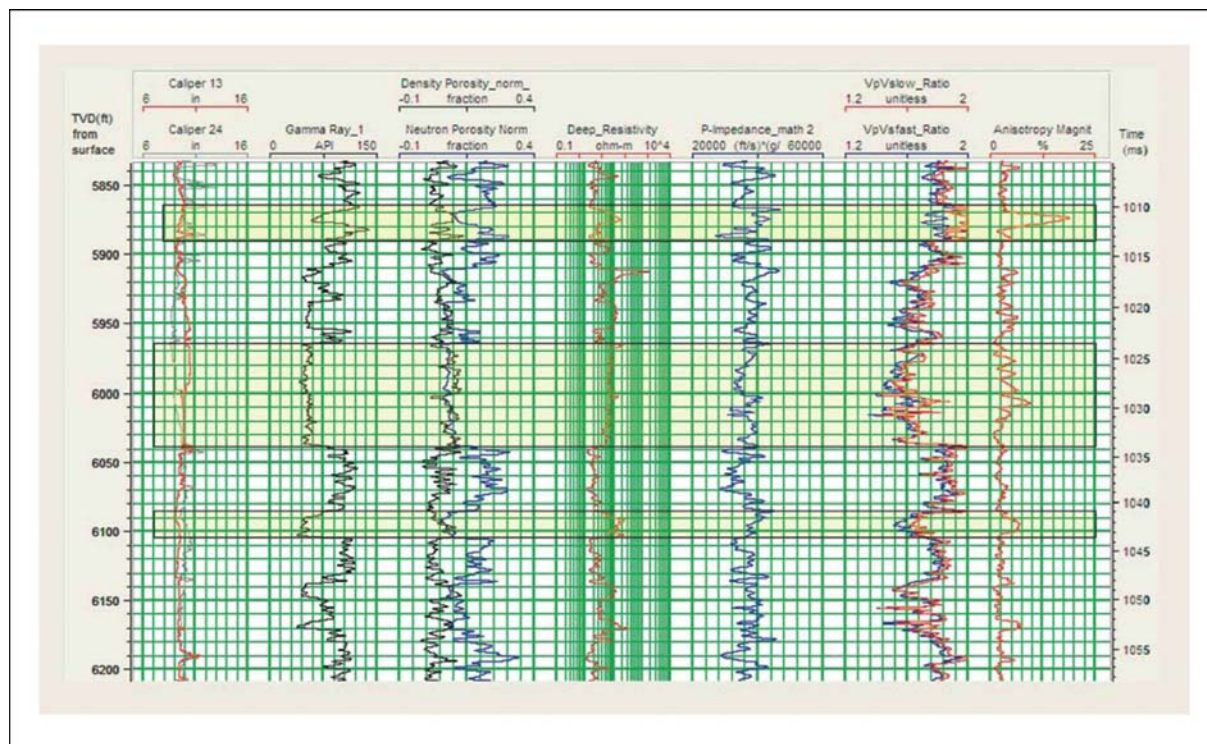


Рисунок 4 Акустический каротаж со скрещенными диполями, на котором видны зоны с высокой анизотропией поперечной волны, выделенные в блоки. Зоны с высокой анизотропией коррелируются с трещиноватыми песчаниками. Рисунок любезно предоставлен Корпорацией Halliburton.

Не все песчаники являются трещиноватыми. Присутствие глин в системе является определяющим фактором. Диагенез глин – важное регулирующее устройство, которое определяет будут или нет открытые трещины в породе.

P-волны - аппарат с низким разрешением для измерения азимутальной анизотропии, относящейся к трещинам, по сравнению с поперечными волнами. На месторождении Rulison, определение азимутальной анизотропии особенно проблемно ввиду сложной природы коллектора. Определение анизотропии P-волны и анализ были неудачными на месторождении Rulison по нескольким причинам, которые включают низкий импеданс-контраст между песчаниками и сланцами, а также неоднородность коллектора и покрывающих пород. Азимутальная анизотропия S-волн измеряется на основе явления двойного преломления поперечных волн, распространяющихся вдоль одной и той же траектории, тогда как азимутальная анизотропия P-волн измеряется вдоль различных траекторий пробега. В результате, на P-волны неоднородность влияет больше, чем на S-волны.

Измерение тонкослоистой анизотропии по многокомпонентным сейсмическим данным обычно достигается путем нахождения производной среднеквадратичной амплитуды (rms) расщепленных поперечных волн в узком окне, при этом для быстрой (S1) и медленной (S2) мод используется один и тот же интервал. Jansen (2005) применил эту методику на месторождении Rulison для определения анизотропии. Результат этого анализа в окне 50 мс в формации Middle Williams Fork отражает зоны с высокой анизотропией в средней части карты, которые совпадают с зоной сдвигового сброса (Рисунок 5).

Зоны с высокой анизотропией соответствуют зонам с высокой плотностью открытых сдвиговых трещин в формации Middle Williams Fork. Скважины с высоким EUR связаны с этими зонами высокой плотности открытых сдвиговых трещин посредством сети естественных трещин.

#### Анализ объемной анизотропии

Определение анизотропии в тонких слоях является проблемой, поскольку трещиноватые песчаники лежат за пределами сейсмического разрешения,

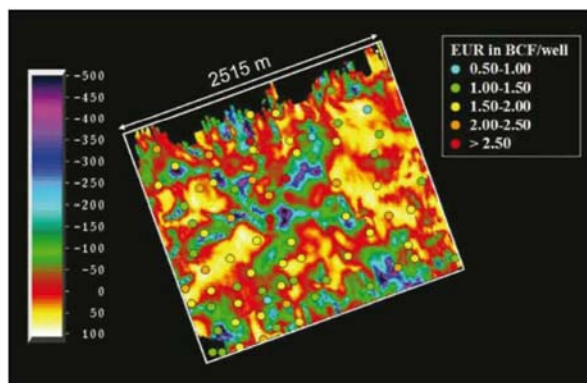
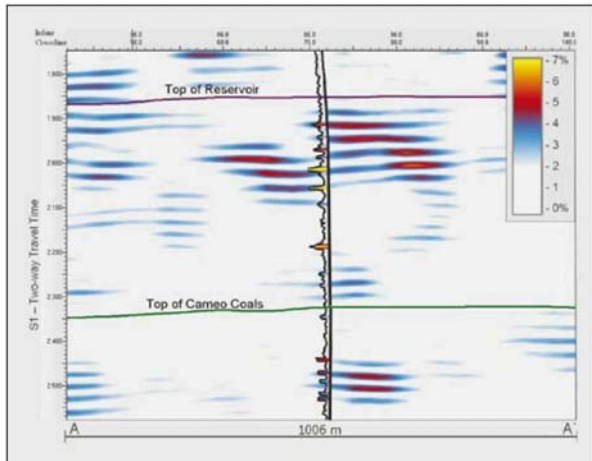


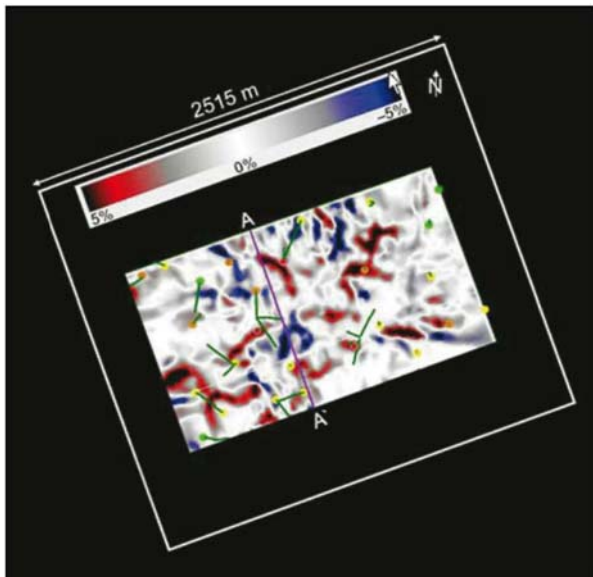
Рисунок 5 Определение азимутальной анизотропии поперечных волн для средней части Williams Fork по разнице RMS амплитуд между быстрой и медленной модами в окне 50 мс. В качестве масштаба - разница амплитуд между быстрой и медленной модами расщепленной поперечной волны, которая линейно пропорциональна анизотропии. Отметим, что скважины с высоким EUR, которые отмечены красным цветом как скважины с самыми высокими значениями, расположены в зонах высокой амплитуды на основе анизотропии поперечных волн. Модифицировано по Jansen (2005).

## Газ в плотных породах

а плохое прослеживание отражений создают проблемы для точности анализа, основанного на этом горизонте. Для лучшей оценки анизотропии в тонком слое, был разработан новый объемный подход, который призван сделать определение анизотропии более устойчивым. Этот подход начинается с куба импеданса и использует алгоритм масштабирования для вычитания временного сдвига между S1 и S2 кубами путем перемещения куба S2 во временную область S1. Этот алгоритм обычно используется для перемещения данных обменных волн во временную область р-волн для регистрации. Временные сдвиги, применяемые к каждой отражающей границе S2, для того



**Рисунок 6** Сейсмический профиль через интервал коллектора, обозначенный на кубе анизотропии импеданса с профильтрованной кривой анизотропии, взятой с ближайшей скважины, проекция которой обозначена на отображении сейсмической анизотропии. Масштаб анизотропии такой же, как для данных каротажа и сейсмических данных. Положение профиля показано на Рисунке 7. По LaBarre (2008).



**Рисунок 7** Глубинный срез через куб разности подобия на середине уровня коллектора Williams Fork демонстрирует аномалию атрибута анизотропии, которая характеризуется различной ориентацией трещин. Значения EUR в скважине отмечены в цвете согласно обозначениям на Рисунке 5. По LaBarre (2008).

чтобы она соответствовала нужной отражающей границе S1, менялось по вертикали и горизонтали, давая оценку анизотропии времени пробега с низким разрешением, которая имеет мало влияния на этот мощный неоднородный коллектор. Однако эти выровненные кубы использовались для построения высокоразрешенного куба анизотропии, путем нахождения приращений импедансов наборов данных S1 и S2.

Высокоразрешенный куб анизотропии поперечной волны был построен путем применения временных сдвигов, нахождения приращений и нормирования к процентной разности импедансов поперечных волн S1 и S2. Рисунок 6 демонстрирует сейсмический профиль через куб с профильтрованным ФНЧ графиком анизотропии по скважине, проекция которой приведена на кубе. Отметим, что вариации значений анизотропии на сейсмическом профиле и каротажной кривой очень похожи и хорошо коррелируются. Корреляция между зонами с высокой анизотропией и другими кривыми со скрещенным диполем на области RCP является хорошей за исключением областей низкой кратности на окраине области исследований. В результате, эта окраинная область была позже обрезана для интерпретации, как показано на Рисунке 7.

Все скважины с высокими значениями EUR пересекают зоны высокой анизотропии. Самая лучшая из продуктивных скважин месторождения, в центре района съемки, прошла через область высокой анизотропии вблизи интервала углей Cameo. Связь трещин с углями может объяснить аномально высокую продуктивность скважины. Привязки по скважине и мониторинговые сейсмические данные подтверждают, что куб анизотропии определяет трещиноватые геологические тела, которые являются продуктивными в этой скважине.

### Подобие

Подобие (алгоритм, основанный на когерентности), был исследован на предмет улучшения обнаружения анизотропии в разрезе. Был рассчитан куб разности подобия путем расчета разности подобия кубов импеданса S1 и S2 после привязки по времени. Значения этого куба представляют собой процентное различие между кубами подобия S1 и S2 с положительной и отрицательной шкалами, которые иллюстрируют какой из ансамбля трасс меняется. Если S2 меняется больше чем S1, это будет показано красным цветом, или положительным изменением; если больше меняется S1, то это будет показано синим цветом, или отрицательным изменением. Таким способом можно вывести преобладающую ориентацию трещин посредством цветовой схемы. S1 относится к движению частиц, ориентированных N43W, S2 - ортогональному направлению. S2 чувствительно к доминантной открытой трещиноватости. S1 чувствительно к второстепенному набору трещин сдвига, ориентированным в северо-восточном направлении, которое преобладает на некоторых участках месторождения. Путем нахождения приращения подобия поляризованных волн на основе использования алгоритма подобия, мы смогли улучшить возможности обнаружения направленных групп открытых трещин в коллекторе.

На Рисунке 7 приведен глубинный срез через куб атрибута подобия на уровне Middle Williams Fork. Скважины с высокими значениями EUR пересекают аномалии атрибута подобия. Используя куб атрибута можно произвести визуализацию анизотропных интервалов разреза, совпадающих с естественно-трещиноватыми геологическими телами в разрезе.

Вооружившись этими кубами, мы верим, что экономический успех разведки и разработки газа в плотных песчаниках на месторождении Rulison может быть улучшен.

#### **Заключения**

На месторождении Rulison, скважины с высоким значением EUR - это те скважины, которые располагаются в месте соединения геологических тел с естественной трещиноватостью и ствола, посредством стимуляции гидроразрывом. Естественные трещины увеличивают проницаемость, которая является наиболее важным параметром коллектора при разработке газа в плотных песках. Определение положения и объединение проницаемых зон естественной трещиноватости со стволом скважины принципиально важно для экономически эффективной добычи из-за низких значений порога экономичности, связанных с разработкой. Высокоразрешенный анализ объемной анизотропии является технологией, которая может улучшить экономический успех при разведке и добыче газа в плотных породах.

#### **Благодарности**

Авторы благодарят компанию Williams RMT, оператора на месторождении Rulison, за разрешение на проведение работы. Мы также благодарим Transform Software за использование их бета-версии программного обеспечения анализа и интерпретации данных. Кроме того, мы

благодарны спонсорам проекта Reservoir Characterization, включая: Компанию по наземной добыче нефти из Абу Даби (ADCO), Anadarko Petroleum Corp., BP, CGGVeritas, Chevron, Dawson Geophysical, Devon, Elmer Energy, Encana, ExxonMobil, Fairfield, Fugro-Jason, Fusion, Geokinetics, HiPoint Reservoir Imaging, ION, iReservoir.com, Kuwait Oil Co., Landmark/ Halliburton, Научный нефтегазовый институт Польши, Oxy, OYO Geospace, Paradigm, Petrobras, Pinnacle Technologies, Repsolypf, RWE Dea, Schlumberger, Shell, Total, Transform Software, Vecta Oil and Gas, Whiting Oil and Gas Corporation, и компанию Williams RMT.

#### **Литература**

Jansen, K. [2005] *Seismic investigation of wrench faulting and fracturing at Rulison Field, Colorado*. Colorado School of Mines MS Thesis.

LaBarre, E. [2008] *Fault and fracture interpretation in a gas в плотных породах sand reservoir from multicomponent seismic*, Rulison Field, Colorado. Colorado School of Mines MS Thesis, in progress.

Martin, M.A. and Davis, T. L. [1987] Shear-wave birefringence: A new tool for evaluating fractured reservoirs. *The Leading Edge*, **10**, 22-28.

Matesic, M. [2007] *Structural and stratigraphic controls on Mesa Verde reservoir performance: Rulison Field, Garfield County, Colorado*. Colorado School of Mines MS Thesis.