

Микро-сейсмический мониторинг позволяет улучшать методику гидроразрыва. Micro-seismic monitoring provides new insights into hydraulic fracture propagation

Calvin Kessler и Dan Quinn из компании Halliburton* описывают как в компании для уточнения в процессе моделирования трещиноватости используется микросейсмическое картирование, что позволяет оптимизировать извлечение запасов из резервуаров.

Жизнеспособность многих низкопроницаемых резервуаров часто зависит от гидроразрыва зон трещиноватости и программ повторной интенсификации. Понимание влияния трещиноватости и связанных с ней процессов принципиально важны для создания успешной программы стимуляции и оптимизации работы резервуара. Микро-сейсмическое картирование таких необычных объектов, как малопроницаемые сланцы и резервуары метана угольных пластов, дают уникальное представление о распространении трещиноватости, что повышает точность моделирования трещин, помогает определиться с оптимальными методами и способствует оптимальному повышению отдачи резервуара.

Важность микро-сейсмического анализа для успешной работы на разных необычных объектах проявляется в том, что растет количество экспертных работ и развивается сама технология. Недавние новшества используют соответствующие возможности каротажных методов и скважинных сейсмических исследований. Усовершенствования предоставляют новые возможности для понимания поведения трещиноватости, что дает соответственное увеличение продуктивности. Последние нововведения в отрасли, такие как предлагаемый компанией Halliburton микро-сейсмический мониторинг трещиноватости, опираются на упомянутые улучшения, чтобы выявлять детали распространения гидравлических трещин по мере их появления.

Моделирование по данным микро-сейсмики

Понимание распространения трещин, обеспечиваемое методом микро-сейсмики, основывается на информации, полученной при микро-землетрясениях – относительные смещения или деформации растяжения, которые происходят вдоль естественных нарушений и выделяют регистрируемую сейсмическую энергию. Хотя большинство микро-землетрясений происходит естественным путем из-за тектонических процессов, искусственные, порожденные человеком микро-землетрясения или микросейсмические явления, происходят из-за изменений в напряжении и поровом давлении, связанных с возбуждением (при интенсификации притока), добычей и закачиванием флюидов. Микро-сейсмический метод очень эффективен при разработке малопроницаемых пластов, что становится повседневной практикой в отрасли. Использование метода повышает эффективность гидравлической интенсификации притока, необходимой для подобных сложных резервуаров, когда требуется максимально повысить потенциал добычи. Метод доказал свою особенную пользу для операторов при повсеместном наращивании усилий по добыче продукта из глинистых сланцев.

Подобные месторождения в США, России и Бразилии составляют более чем две трети мировых запасов, в то время как оставшаяся часть рассредоточена в Канаде, Австралии, Швеции, Эстонии, Иордании, Израиле, Сирии, Марокко, Турции, Таиланде, Франции, Германии и Китае. В штате Техас, США в сейчас добывается наибольшее количество углеводородов из глинистых сланцев, в то же время такие отложения в штатах Вайоминг, Луизиана, Арканзас и Пенсильвания, привлекают высокий интерес и вызывают повышенную активность.

Первоначально месторождения в глинистых сланцах благодаря низкой проницаемости играли минимальную, несущественную роль в добыче газа, поскольку разработка была очень сложной. Однако с повышением цен на нефть и газ, значительный прогресс в понимании и точно настраиваемые проекты технологий гидроразрыва, эти первоначально сомнительные ресурсы стали целевыми для современной добывающей отрасли. Микро-сейсмический мониторинг эффектов трещиноватости играет ведущую роль в понимании отрасли того, как должны разрабатываться подобные резервуары.

Преимущества метода

Запатентованный метод обнаружения и мониторинга, разработанный в Halliburton, сочетает опыт и знания в каротажных технологиях и скважинные сейсмические методы с наукой и микро-сейсмах. Это пример преимуществ, которые можно получить при микро-сейсмическом мониторинге. Среди основных преимуществ – мониторинг, который позволяет получать геометрию трещиноватости в реальном времени, в процессе закачки.

В комплекс работ включено высокоточное картирование по отражениям микро-сейсмов в координатах X, Y, Z и времени. Эти данные используются для обновления трехмерной модели резервуара, что повышает качество прогноза моделей притоков в резервуаре и экономический анализ.

Используя эту технологию, специалисты могут получать данные, необходимые как для моделирования давления предварительной стимуляции и построения скоростного разреза для сейсмического моделирования в скважине, так и для построения или проверки геомеханических моделей.

Система, основанная на известной технологии скважинных сейсмических датчиков, создана для использования в открытых и обсаженных скважинах и использует стандартный семижильный кабель. Надежность работы, даже в неблагоприятных условиях в скважине, обеспечивается комплектом из 3 датчиков, рассчитанных на давления 25 000 psi (фунтов на кв.дюйм) и температуры выше 350° F (~177° C). Имеются датчики для использования в скважинах разного диаметра – от 3,5 до 22 дюймов.

* www.halliburton.com.

Эта технология является частью комплекса технологий для комплексного изучения и разработки и обеспечивает в реальном времени работу в среде с поддержкой групповой работы с моделью, измерений и оптимизации запасов. Модель повышает интеграцию нефтегазовых специалистов, объединяя их в открытых multidisciplinary рабочих потоках. Данные в этих потоках автоматически являются общедоступными и в итоге получают надежные результаты, позволяющие снизить риски.

Источники микро-сейсм

Мониторинг трещиноватости с использованием микро-сейсмических технологий был разработан более 40 лет назад в дополнение к мониторингу смещений по разломам. Ранее в методике использовался акустический трехкомпонентный датчик или геофон, в той же скважине, которая использовалась для гидроразрыва. Мониторинг проводился только после закачки, поскольку промышленный шум, связанный с протеканием флюидов мимо геофонов, заглушал микро-сейсмический сигнал в процессе воздействия. Это ограничивало результат, поскольку отражения, регистрируемые после закачки, обычно располагаются в дальних зонах и обычно связаны не с распространением трещин, а с их закрытием.

Усовершенствования сейсмических скважинных датчиков в последнее десятилетие способствовали возврату к микро-сейсмическим методам, которые теперь применяют двухскважинную методику мониторинга. При работе на кусте, одна контрольная скважина может использоваться для множественных операций стимуляции, и теперь возможно регистрировать и обрабатывать микро-сейсмические данные в реальном времени. Применяя описанный метод наряду с традиционной технологией построения моделей трещиноватости по каротажу, сейсмике и данным геомеханики, можно ощутимо повысить эффективность гидроразрыва.

Использование метода совместно с данными дипольного акустического метода и петрофизики позволяет специалистам делать предварительное моделирование, которое определяет оптимальное удаление скважины для мониторинга воздействия, устанавливает глубинный интервал для размещения группы геофонов в контрольной скважине, и помогает построить многослойную скоростную модель.

Совершенствование метода

Мониторинг микро-сейсм позволяет анализировать распространение гидравлической трещиноватости для оценок в реальном времени процесса гидроразрыва непосредственно в ходе процесса. Применение этой технологии включает картирование увеличения трещин в процессе воздействия гидроразрыва, картирование разломов, и 4D сейсмо-мониторинг фронтов газа и воды в резервуаре. Для развития метода трехмерного моделирования трещиноватости и оптимизации воздействия необходимо, чтобы были известны положение и размеры трещин – их азимут, протяженность и глубина.

Распространение трещин порождает продольные (первичные или P) и поперечные (вторичные или S) волны, связанные с разрывами растяжения или сдвига в породах. Микро-сейсм регистрируются группой геофонов, расположенных в контрольной скважине. Эти чувствительные, пространственные, подвешиваемые датчики могут регистрировать и с высокой точностью локализовать отражения в реальном времени, по мере распространения в породе трещин, вызванных воздействием.

Поскольку микро-сейсм очень малы, для измерения возникающих сейсмических волн требуются очень чувствительные регистрирующие устройства. P-волны как правило быстрые, малоамплитудные, продольные со смещением частиц в направлении, параллельном распространению волны. Они помогают определять азимут от группы приемников к отражению. S-волны медленнее, с умеренной амплитудой, со смещением перпендикулярно распространению волны. Многопластовые скоростные модели P и S скоростей могут осложняться эффектами от отклонения ствола скважины, наклонных пластов, однородности-неоднородности породы и анизотропии. Эти данные необходимо точно позиционировать и аккуратно картировать микро-сейсм в сложных геологических условиях.

Каждое отмеченное микро-сейсмическое отражение передается во вторую компьютерную систему для определения положения отражения во времени и координатах XYZ. Это положение отражения определяется с учетом скважины воздействия и снабжается временной меткой для совмещения с данными в реальном времени. Фоновый шум и микро-сейсмические отражения постоянно регистрируются группой скважинных сейсмических датчиков и пересылаются на обработку и анализ как во время, так и после воздействия гидроразрывом. Регистрация микро-сейсмических данных в течение часа и более после закачки (зависит от пород и параметров воздействия) будет давать информацию, связанную с закрытием трещин. Пока данные регистрируются, выделенные отражения обрабатываются на втором компьютере, что позволяет их точно локализовать и оптимизировать параметры обработки. Также наличие второго компьютера обеспечивает систему мониторинга трещиноватости на месте, благодаря функции повторного анализа всех зарегистрированных данных с использованием оптимизированных параметров обработки, в том числе уточнений в скоростной модели. Или же система анализирует только выбранные результаты регистрации по временным сегментам.

Оптимизация разработки месторождения

Трехмерное картирование трещиноватости в реальном времени подтверждает успех многозонального разрыва и обеспечивает более глубокое понимание с точки зрения геофизики, геологии и динамики распространения флюидов для развития моделирования резервуаров. Лучше представляя резервуар, специалисты имеют более ясную картину и используют ее для оптимизации расположения скважин и расстояния между ними. Метод позволяет специалистам создавать программы бурения, которые оптимизируют разработку месторождения, поскольку он улучшает понимание схем дренирования и выявление недренированных участков.

Поскольку современный метод позволяет оператору следить за микро-сейсмическими явлениями в процессе гидроразрыва и картировать распространение трещиноватости по мере ее развития, мы знаем где точно производится воздействие и каковы его результаты. Азимут трещиноватости, простирание и длина определяются точно, показывая детали, которые подтверждают успешность воздействия, позволяя его оптимизировать и помогая уточнять модели резервуара. Наблюдая за распространением скважин в реальном времени, можно раскрыть причины многих реакций на изменение давления, наблюдаемых во время и после закачки.

Скважинные технологии

Имея полную информацию, специалист яснее понимает, что происходит в скважине. Он может проследить разные этапы стимуляции и пользоваться трехмерным изображением для получения точной картины резервуара и схем трещинного дренирования. Эта информация критична для оптимизации бурения по уплотненной сетке, она позволяет размещать будущие скважины таким образом, чтобы оптимизировать разработку месторождения, увеличить последовательность работающих трещин и минимизировать неопределенность в программах гидроразрыва.

Случаи успешного применения

Симметричное и несимметричное распространение трещин

Картирование выявило несимметричное распространение трещин в скважине в США, это показало нестимулированные участки резервуара. Данные позволили получить принципиально важное представление о поведении трещиноватости и обеспечили специалистов качественное представление для улучшения работы скважины и результатов воздействия. Микро-сейсмический мониторинг проводился при двухэтапном воздействии гидроразрывом на резервуар, сложенный плотными песчаниками юрского возраста в регионе ArkLaTex (юго-восток штата Арканзас, северо-запад Луизианы и северо-восток Техаса).

Снимок экрана программы на Рисунке 1 показывает положение скважины-монитора в 1400 футах северо-восточнее воздействия. На первой стадии воздействия на нижнюю зону, микро-сейсмические явления в желтом эллипсе показывают «двукрылое» распространение трещиноватости с восточно-западным азимутом и симметрией относительно ствола скважины воздействия, с размерами «полукрыла» около 900 футов. На изображении вкрест первому светло-синяя заштрихованная область показывает целевую зону стимуляции первого этапа. Микро-сейсмические явления показывают, что воздействие было точным и производилось непосредственной в целевой зоне с минимальным распространением трещиноватости вниз относительно палео-склона и падения пласта.

Такое же воздействие гидроразрывом было произведено на более мелком пласте песчаника. В конструкции применили прерыватель для установления интервала между воздействиями и следующий интервал был перфорирован с использованием того же оборудования, что и на первом этапе.

Картина распространения трещиноватости на втором этапе показана на Рисунке 2. В плане видна несимметричная «однокрылая» трещиноватость восточно-северо-восточного азимута (N 60° E). Синяя заштрихованная область на вертикальном изображении отмечает рост внезональной трещиноватости по вертикали (также минимальный на втором этапе).

Такая «однокрылая» трещиноватость указывает на вероятный недренированный участок в песчанике к востоку-юго-востоку от скважины воздействия. Группа геофонов не перемещалась между этапами и причиной «однокрылости» трещиноватости не являются ни расстояние прослушивания, ни чувствительность аппаратуры.

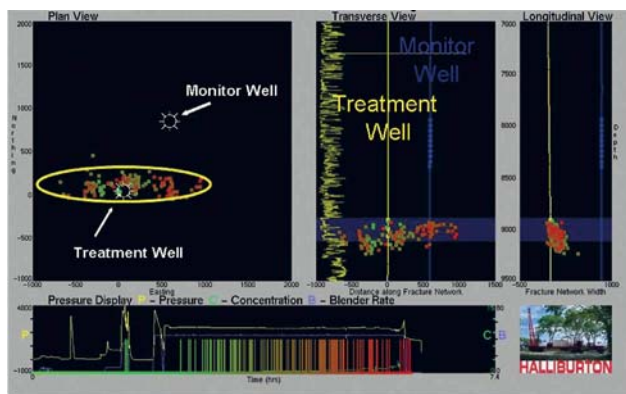


Рисунок 1 Первый этап работ по мониторингу в юрских песчаниках в регионе ArkLaTex, США показывает почти симметричное двухстороннее распространение трещиноватости с восточно-западным азимутом.

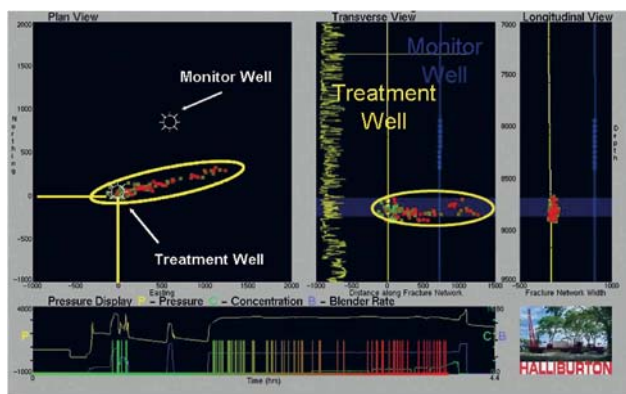


Рисунок 2 Второй этап работ по мониторингу в юрских песчаниках в регионе ArkLaTex, США показывает одностороннее распространение трещиноватости в восточно-северо-восточном направлении (N 60° E).

Лучшее понимание резервуара

Микро-сейсмический мониторинг пары скважин с многозональным воздействием проводился с целью эффективного размещения скважин для оптимизации разработки месторождения. Определение внезональной высоты трещин между последовательными этапами позволило установить трещиноватость или плоскости нарушений в резервуаре. На месторождении были пробурены две скважины, они вскрыли переслаивающиеся последовательности песчаников и сланцев. Песчаники по происхождению линзовидные и трудно прослеживаются от скважины к скважине. Просто описать геологическую картину можно как стопку песчаных тел в виде эллипсоидов с произвольными осями симметрии относительно ствола скважины.

Построение карт интенсификации притоков (Рисунок 3, в плане) показывает несимметричные «крылья» трещиноватости. Геометрия трещиноватости в этих стратиграфических отложениях отражает латеральную протяженность песчаных линз от ствола вдоль простирания азимута трещиноватости. Высота трещин коррелируется с мощностью песчаных прослоев. Волновой акустический анализ анизотропии показал естественные трещины, возникшие в результате бурения, в то время как электромагнитный метод использовался для определения песчаников в резервуаре с пониженным давлением. В отложениях с постоянным коэффициентом Пуассона области с пониженным давлением будут испытывать

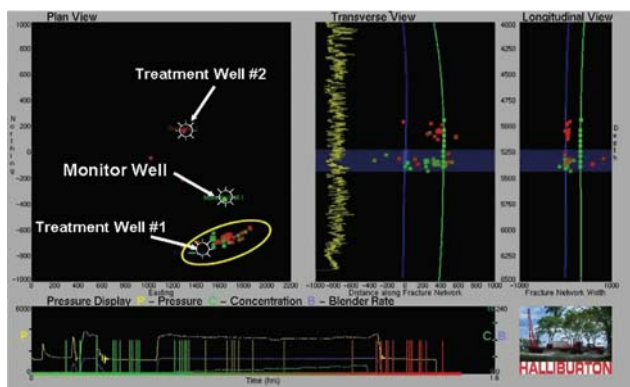


Рисунок 3 Геометрия трещиноватости отражает ось стратиграфических песчаников по отношению к стволу скважины.

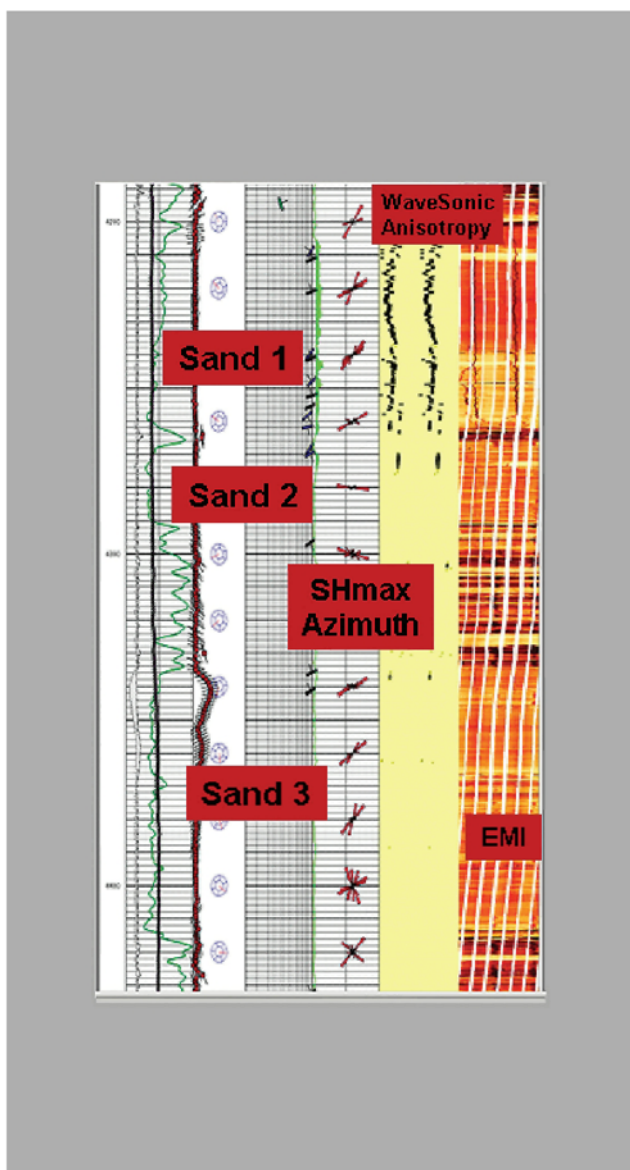


Рисунок 4 Трещины, вызванные бурением в песчанике 1, выделенные инструментом анализа анизотропии.

меньшее воздействие, чем области с естественным пластовым давлением, и гидроразрыв будет работать в направлении областей с пониженным давлением.

Как показано на Рисунке 4 в песчанике 1 присутствует трещиноватость, возникшая во время бурения («естественная»), в песчаниках 2 и 3 ее нет. Эффективной стимуляция будет в том случае, если каждый песчаник будет подвергаться воздействию на своем этапе. Если подвергать гидроразрыву все три одновременно, нарушен будет только песчаник 1, так как он обладает меньшим максимальным горизонтальным сопротивлением удару, чем зоны 2 и 3.

На рисунке 3 показана карта микро-сейсмического мониторинга для воздействия на песчаник 2. Синяя заштрихованная область на вертикальном разрезе показывает границу пород песчаника 2. Присутствует небольшое проникновение трещиноватости из песчаника 2 вверх в песчаник 1, видно как микро-сейсмические явления на вертикальном разрезе. При объединении изображений нескольких этапов стимуляции получается трехмерная картина резервуара и схема дренирования трещиноватости, используемые для планирования размещения скважин.

Несимметричное распространение трещиноватости

При составлении программы уплотняющего бурения на газ с выгодой были использованы данные микро-сеймики, которые указали нестимулированные области для размещения скважин и обеспечили данными вне зон, что позволило уточнить проект гидроразрыва. Мониторинг многоэтапной гидравлической интенсификации притоков выполнялся в горизонтальной скважине, пробуренной в плотных отложениях основного газопродуктивного юрского горизонта района ArkLaTex.

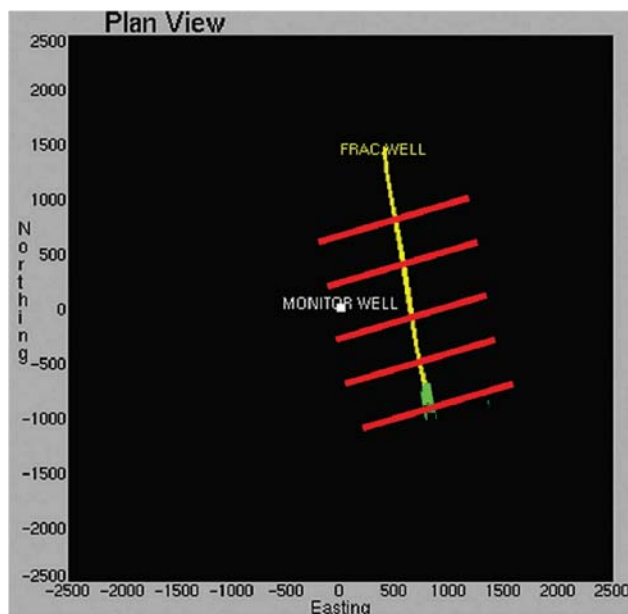


Рисунок 5 Предлагаемое воздействие в 5 этапов для пробуренной уплотняющей горизонтальной скважины.

Скважинные технологии

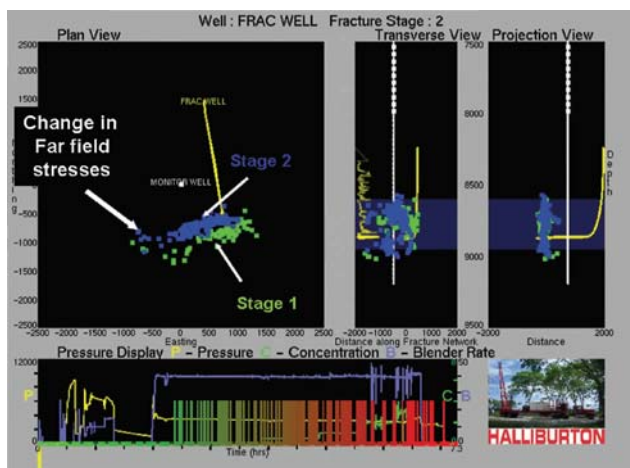


Рисунок 6 Картирование этапов 1 и 2.

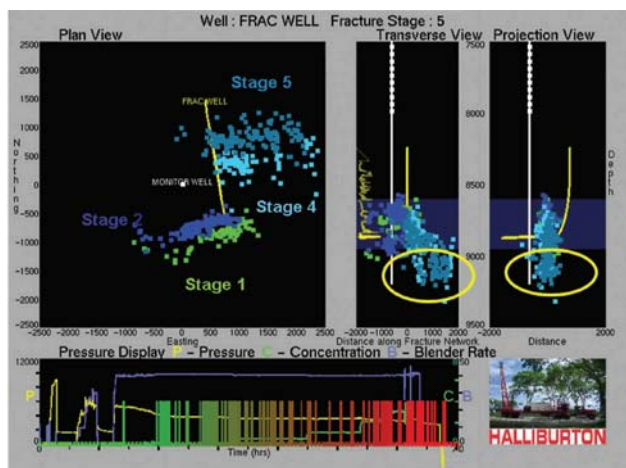


Рисунок 7 Картирование этапов 1, 2, 3, 4 и 5.

Низкопроницаемые песчанниковые отложения в этом регионе имеют очень большую протяженность по латерали и, по результатам геохимического анализа, характеризуются почти постоянным коэффициентом Пуассона. До проведения уплотняющего бурения не были известны ни ориентация существующей гидравлической системы трещиноватости, ни соответствующие схемы дренирования. Близкое к реальному времени микро-сейсмическое картирование и картина распространения трещиноватости в крупномасштабных резервуарах могут отображать распространение трещиноватости в направлении ранее выработанных областей путем наблюдения за трещиноватостью с несимметричной геометрией. Оперативное обнаружение и своевременное прекращение воздействия на уже выработанные области сохраняет ресурсы оператора и обеспечивает данными для трехмерного моделирования резервуара.

Схематическое картирование на этапе 1 (зеленый) показывает близкое к симметричному «двукрылое» распространение трещин с азимутом около N 80° E (Рисунок 6) у подошвы воздействующей скважины. Этап 2 (синий) демонстрирует почти «однокрылую» трещиноватость с азимутом, близким к азимуту этапа 1. На концах трещин в этапах 1 и 2 отмечается изменения азимута к северо-западу. Эти изменения отражают изменения напряжения в отдаленных участках из-за изменения порового давления. На поперечном изображении отмечается минимальное внезональное увеличение для этапов 1 и 2.

Картирование этапов 4 и 5 показывает «однокрылое» распространение трещиноватости в направлении, близком к восточному от контрольной скважины (Рисунок 7). Область желтого эллипса на поперечном изображении и в проекции Рисунок 7 отражают распространение трещиноватости вниз в песчаник с пониженными давлениями, вероятно находящийся ниже траектории горизонтальной скважины.

Микро-сейсмическое картирование распространения трещин и соответствующая схема дренирования вблизи горизонтальной скважины позволили определить две области для вероятного расположения уплотняющих скважин (Рисунок 8). Красные круги в верхней левой и нижней правой части плана отмечают области, не связанные с распространением трещиноватости и дренированием.

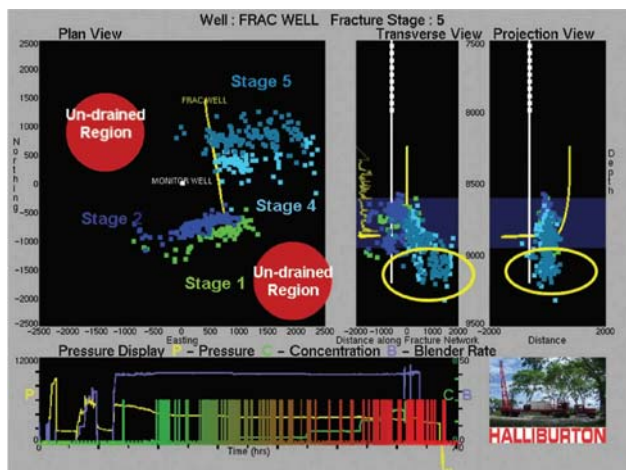


Рисунок 8 Обнаружение недренированных областей и возможное положение уплотняющих скважин.

Заключение

Достижения метода микро-сейсмического картирования обеспечивают все возрастающий ряд преимуществ для увеличения добычи из нетрадиционных резервуаров. Достоверные, надежные данные помогают специалистам тонко настраивать модели и наращивать отбор флюидов. Картирование трещиноватости в реальном времени позволяет вносить оперативные изменения непосредственно в ходе работ, что повышает эффективность воздействий для интенсификации притока.

Описанная здесь система ExactFracSystem компании Halliburton расширяет преимущества картирования трещиноватости и является частью целостной модели технического обслуживания Digital Asset. Модель представляет собой реальное объединение специалистов, процессов и технологий, что повышает возможности ресурсов и позволяет видеть картину целиком, принимать обоснованные решения и работать более эффективно. В результате разведочные и добывающие компании способны достигать большей точности за меньшее время, что позволит им бурить и стимулировать скважины более эффективно с меньшими потерями времени.