

Distinguished Lecturer Program

Первичное финансирование предоставлено

**Фондом ОИН на основе взносов членов организации
и вклада организации
«Offshore Europe»**

Общество выражает благодарность тем компаниям, которые
позволили своим профессионалам выступить в качестве
лекторов

Дополнительная поддержка оказана АИГИ



Общество инженеров- нефтяников
«Программа заслуженных лекторов»
www.spe.org/dl

Анализ наших допущений-

Подрывают ли чрезмерные упрощения
нашу возможность проектирования
обработки призабойной зоны путём ГРП?

Майк Винсент
mike@fracwell.com



Общество инженеров-
нефтяников
«Программа заслуженных
лекторов»
www.spe.org/dl

Разделы, опубликованные в
ОИН 119143 & 128612

Схема

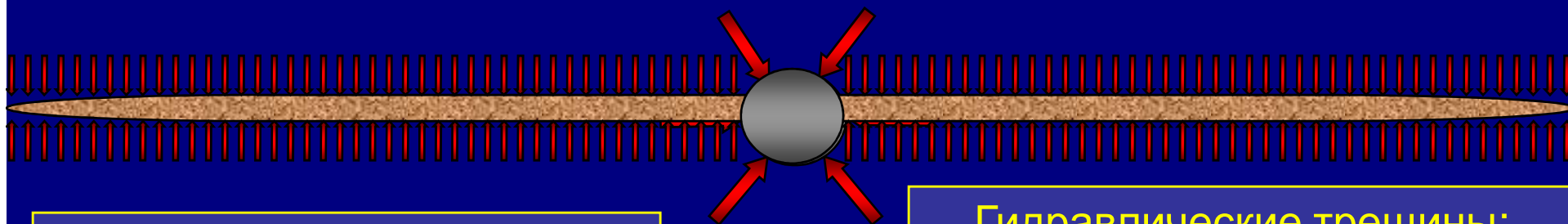
- Удобные допущения
 - Упрощение проектов гидроразрыва
- Модели и стратегии, вытекающие из таких допущений
- Фактические наблюдения
 - Режимы сложных потоков
 - Сложная геометрия трещин
- Промысловые результаты
 - 200 промысловых исследований, в рамках которых были проекты гидроразрыва
- Конкретные задачи – гидроразрывы применительно к горизонтальным скважинам
- Пути совершенствования

Удобные допущения

- Трещина
 - Простая (с двумя крылами), планарная, вертикальная, сплошная в гидрологическом смысле, высоко-проводимая
- Коллектор
 - Однородные коллекторы (или с упрощённым напластованием)
- Движение флюидов
 - Простые движения флюидов
- Гелиевая очистка
 - Очистка при помощи густого геля, все виды проппанта, ширины?
- Продолжение перечисления допущений см. ниже

Как происходит возбуждение при помощи гидроразрыва?

Вид сверху



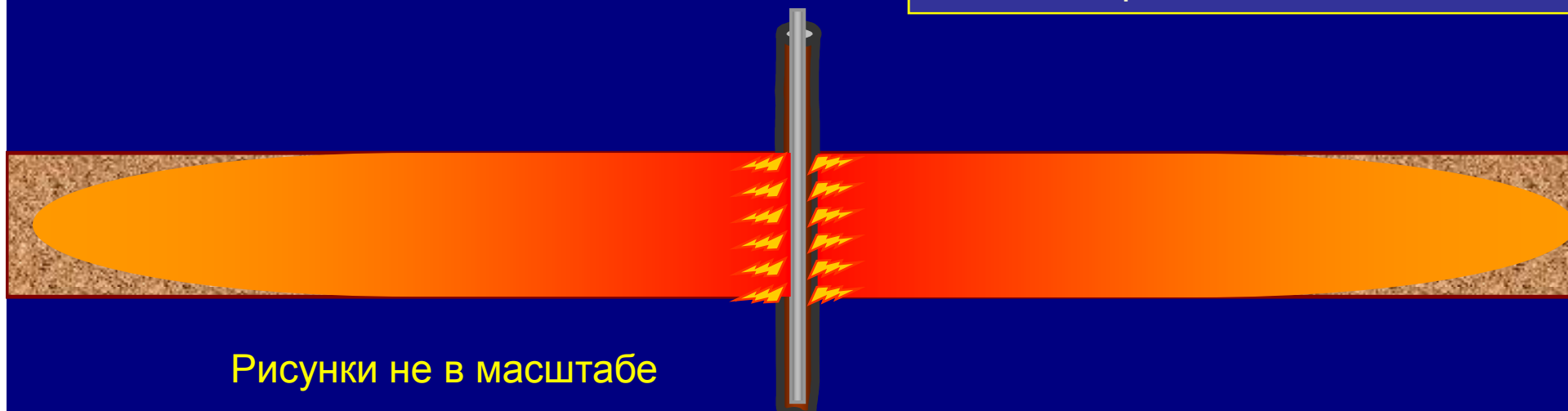
Невозбуждённые скважины:

Для достаточного потока УВ
требуется высокая
проницаемость коллектора

Гидравлические трещины:

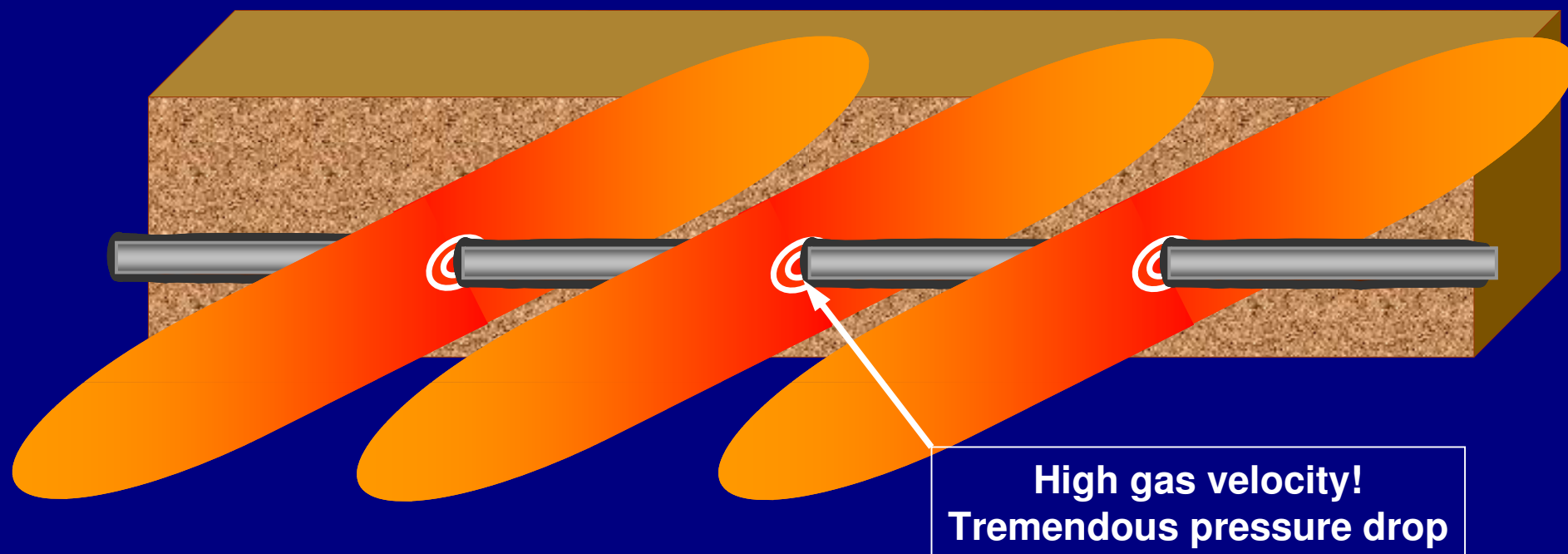
Аккумулируют УВ на огромной
площади; при этом достигаются
экономически обоснованные
дебиты из пластов низкой
проницаемости

Вид сбоку



Рисунки не в масштабе

Улучшение сообщения в пласте – создание многих поперечных трещин

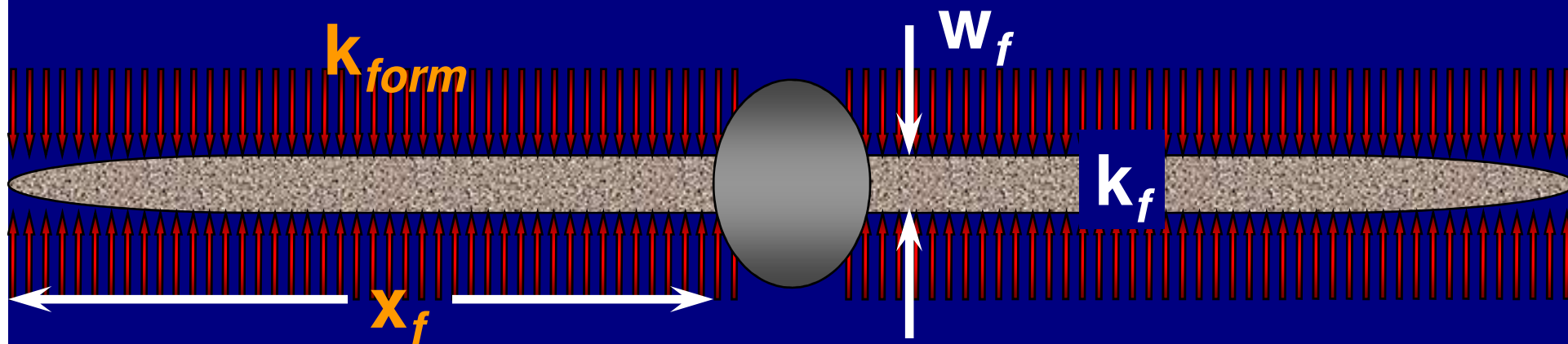


*Некоторые операторы проводят мероприятие в 28 этапов
с 3 пучками перфораций на каждом этапе.
Начать создание 80 поперечных трещин?!*

Цели создания простой планарной трещины

- Необходимая связь ствола скважины с продуктивной зоной (длина трещины)
- Необходимая пропускная способность (проводимость)

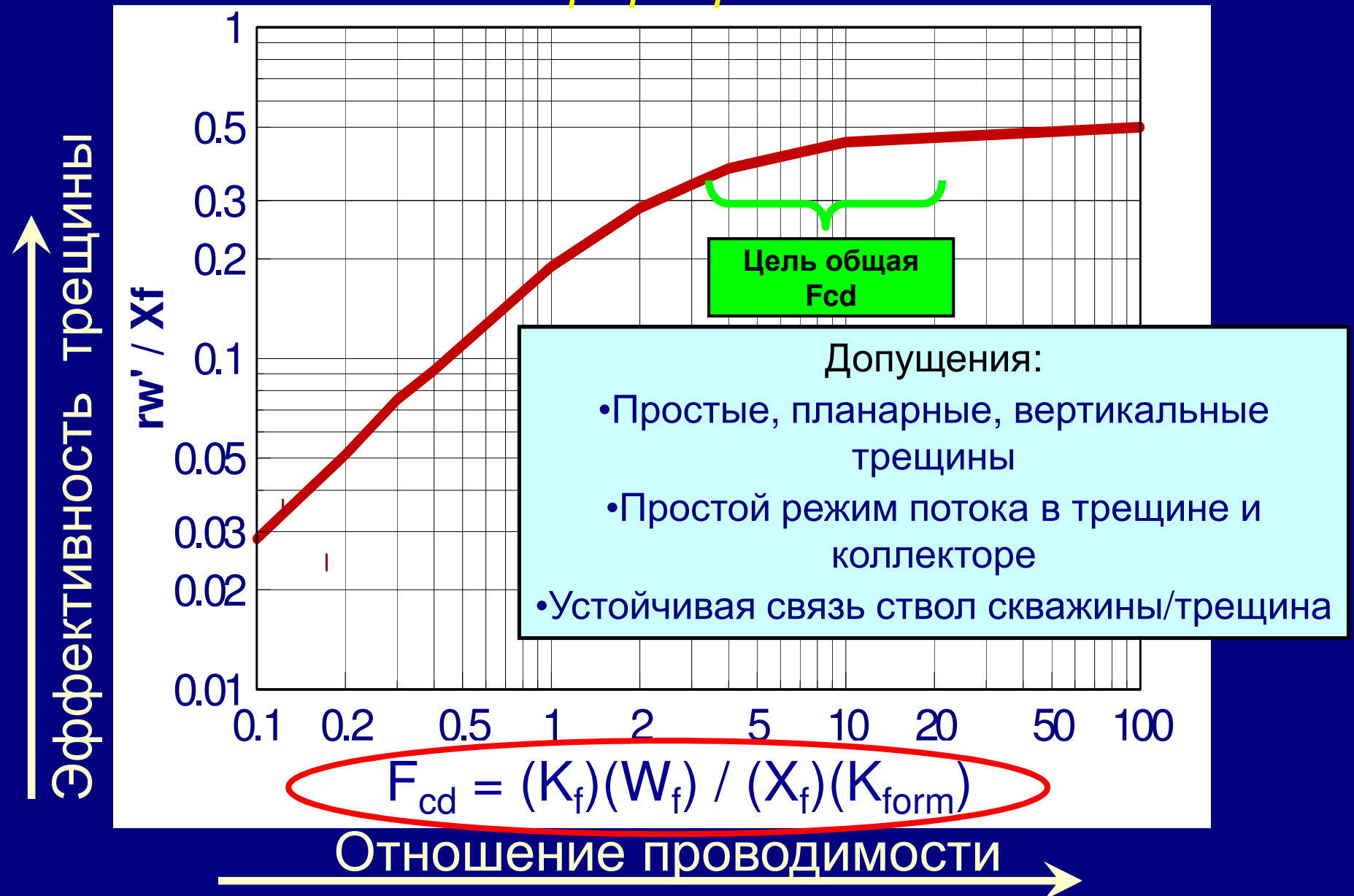
Простой подход к оптимизации длины и проводимости



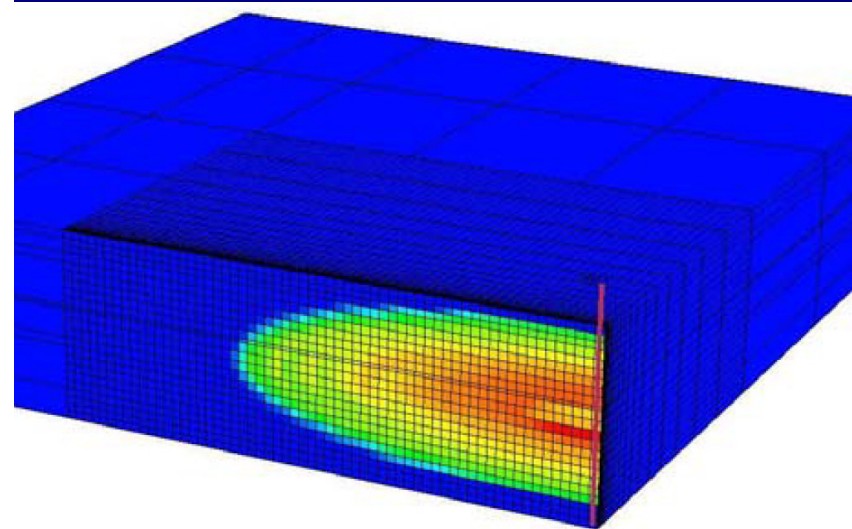
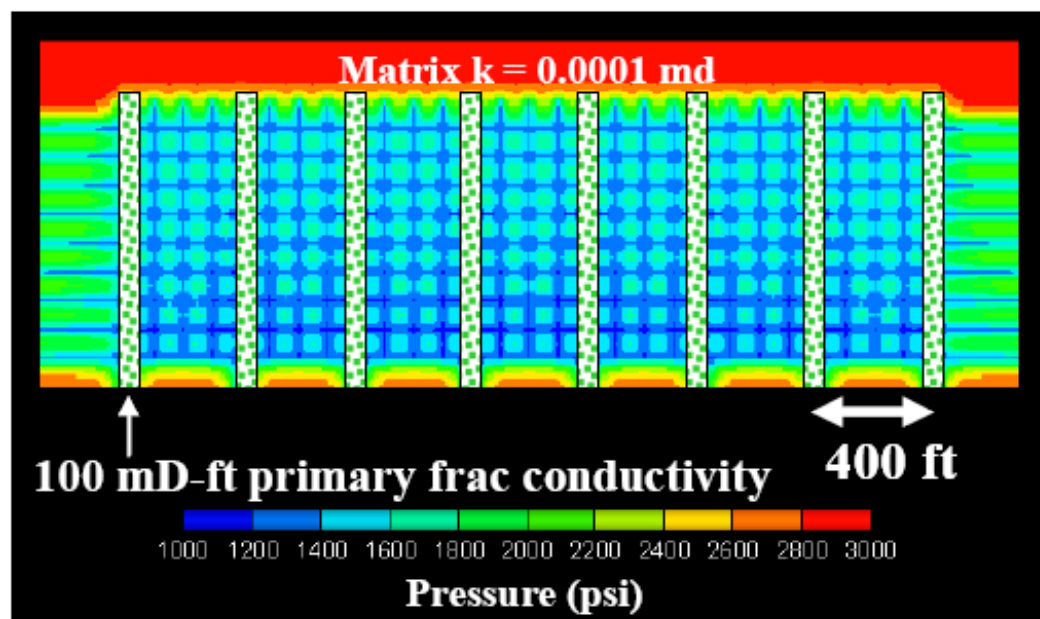
$$F_{CD} = \frac{k_f * w_f}{k_{form} * x_f}$$

**Безразмерная проводимость трещины (F_{CD})
соотношение пропускной способности трещины
и пласта**

Аналитическое решение оптимизации упрощённого гидроразрыва



Численное моделирование с координатной сеткой



Даже в сложных трёхмерных моделях зачастую закладываются планарные трещины с гидравлической сплошностью

Интуитивное (но ошибочное) “доказательство” того, что трещины обладают бесконечной проводимостью



Если мой пласт
выглядит так...

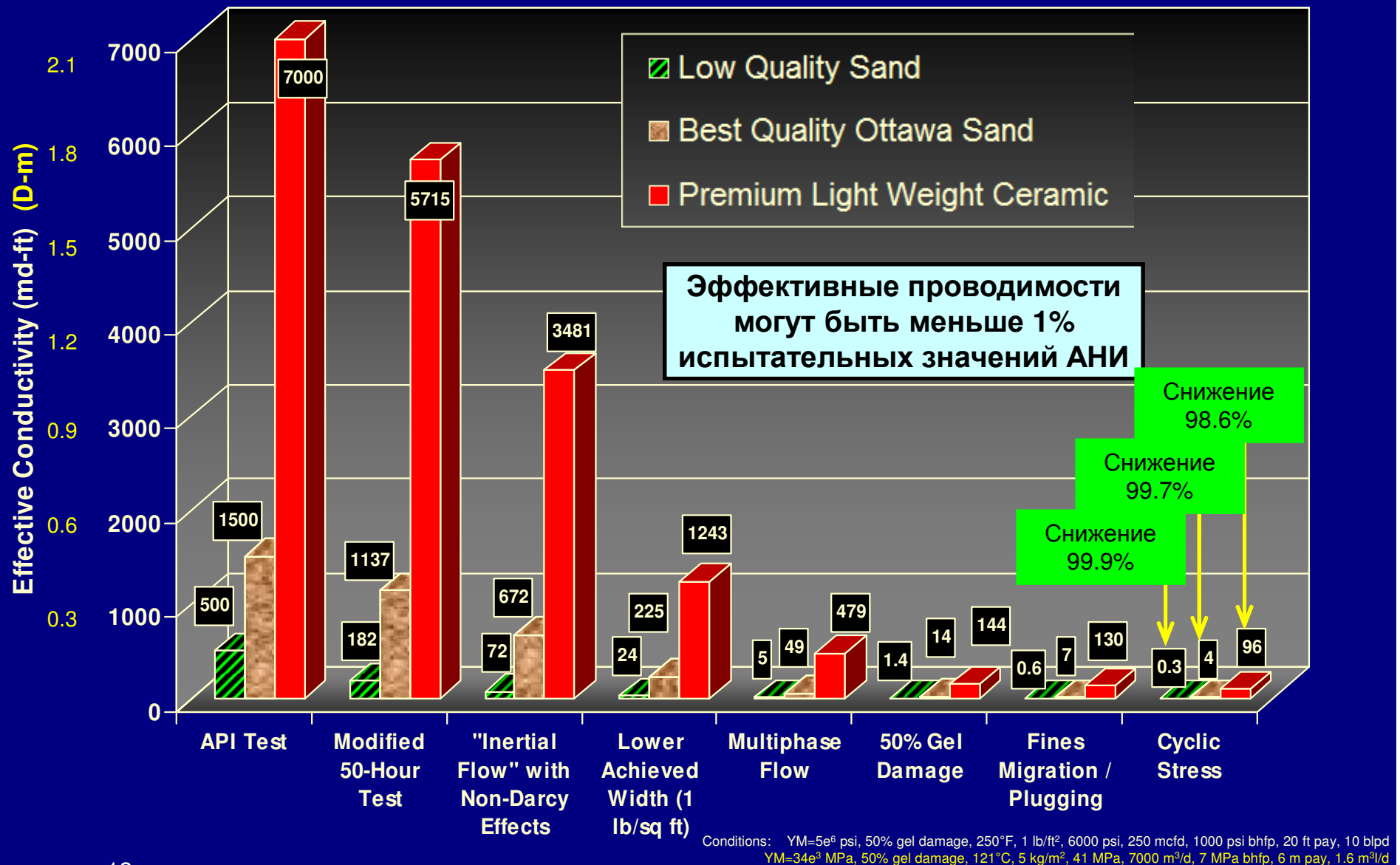
Разве это не говорит о
бесконечной
проводимости?

Общие допущения

- Аналитические решения, числовые модели и интуиция
- Предполагаем
 - Упрощённый поток,
 - Упрощённая геометрия,
 - Отличное сообщение между стволом скважины и трещиной,
 - Гидравлическая сплошность по трещине

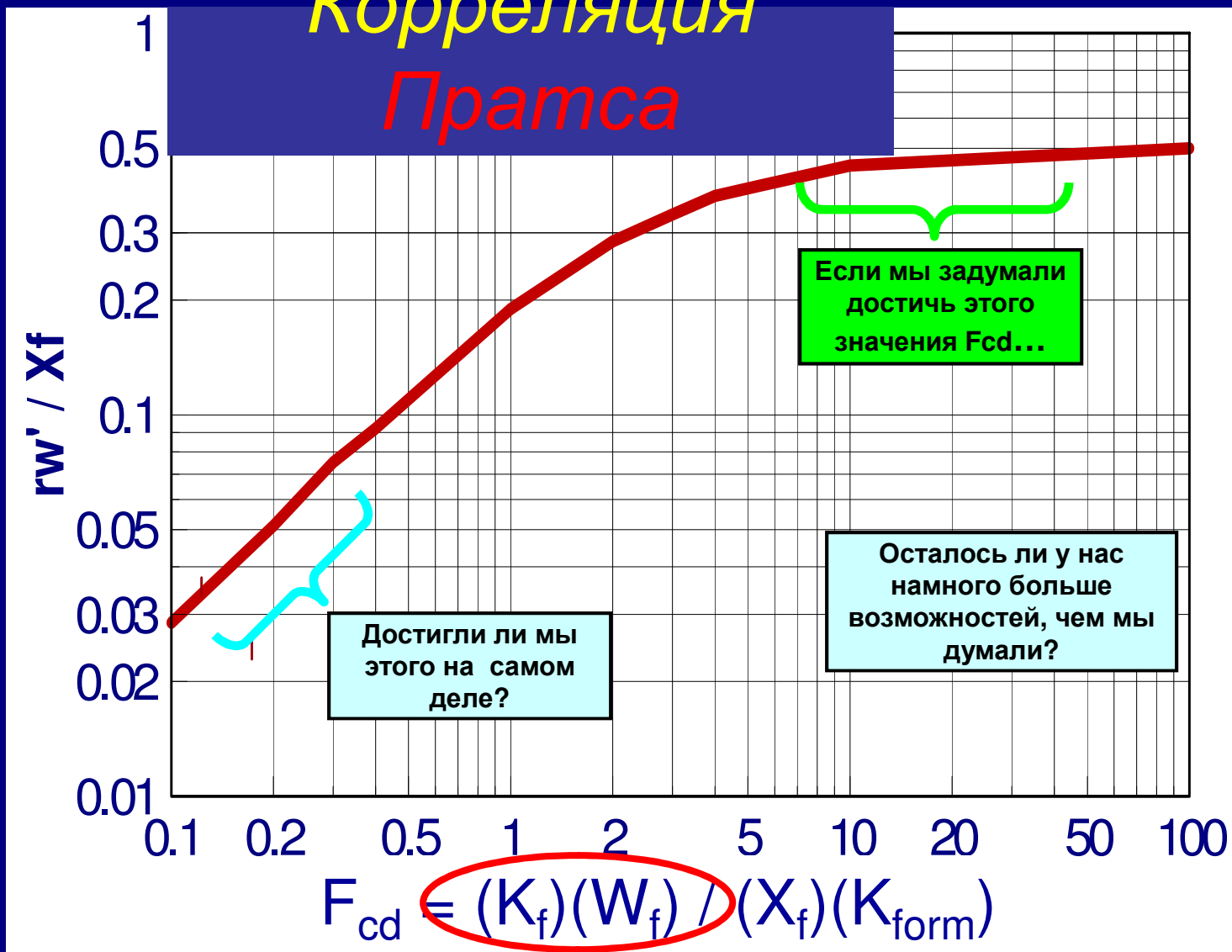
Реалистические снижения проводимости

20/40 пропантов при 6000 фунт/дюйм²



Корреляция Пратса

Эффективность трещины



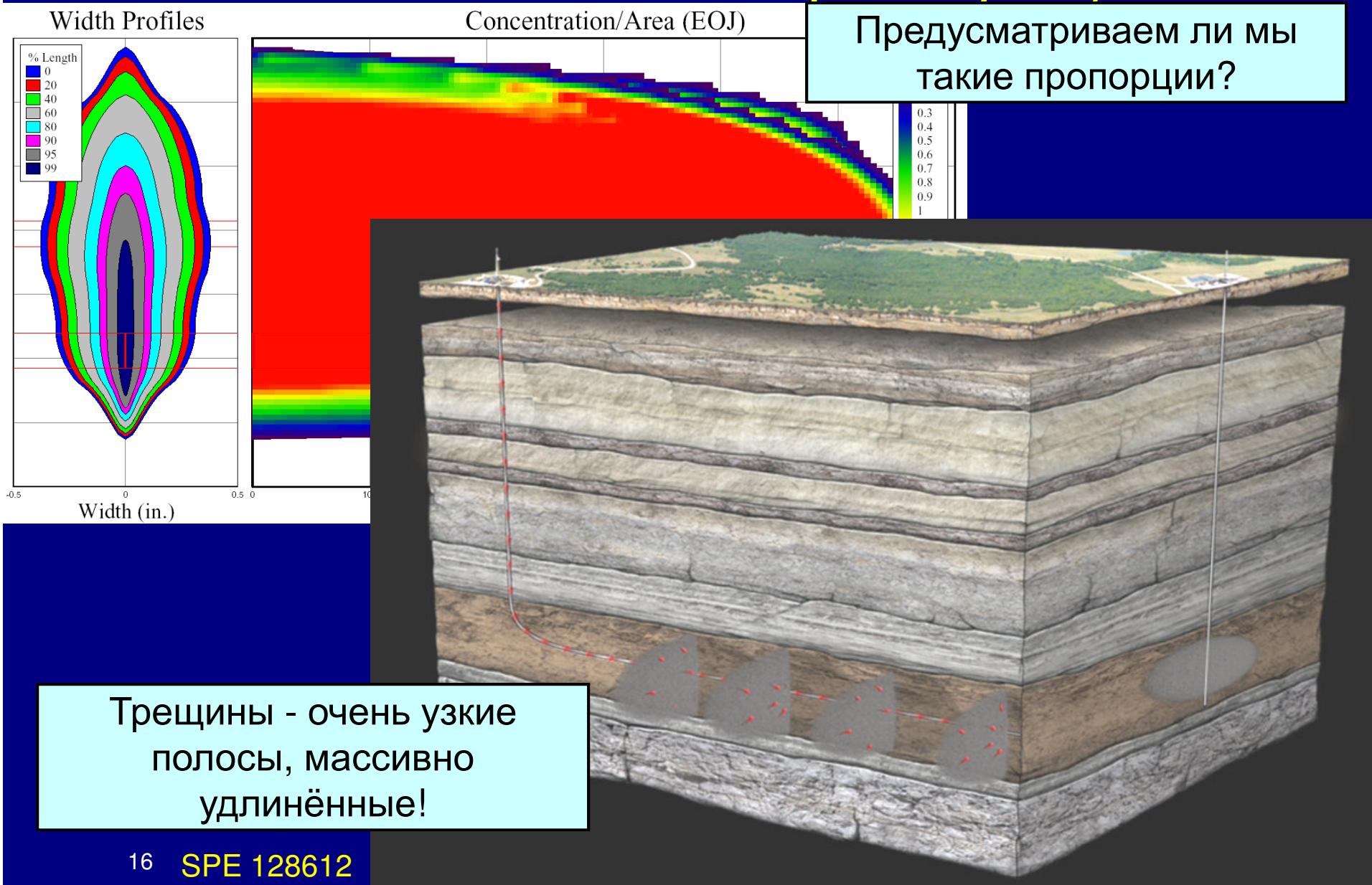
Проводимость трещины

Снижение в 100 раз?!

- Даже в простых, сплошных, планарных трещинах
 - Даже, если мы обеспечим полностью равномерное распределение пропанта с использованием жидкостей разрыва лабораторного сорта, совершенные реагенты для разрушения эмульсии, ограничим испытания 50 часами и т.д.
- Падения давления обычно от 50 до 1000 раз выше, чем утверждается в объявленных данных
- Проблема №1

В расклиненных трещинах режимы потока достаточно сложные – излишние упрощения могут ввести нас в заблуждение.

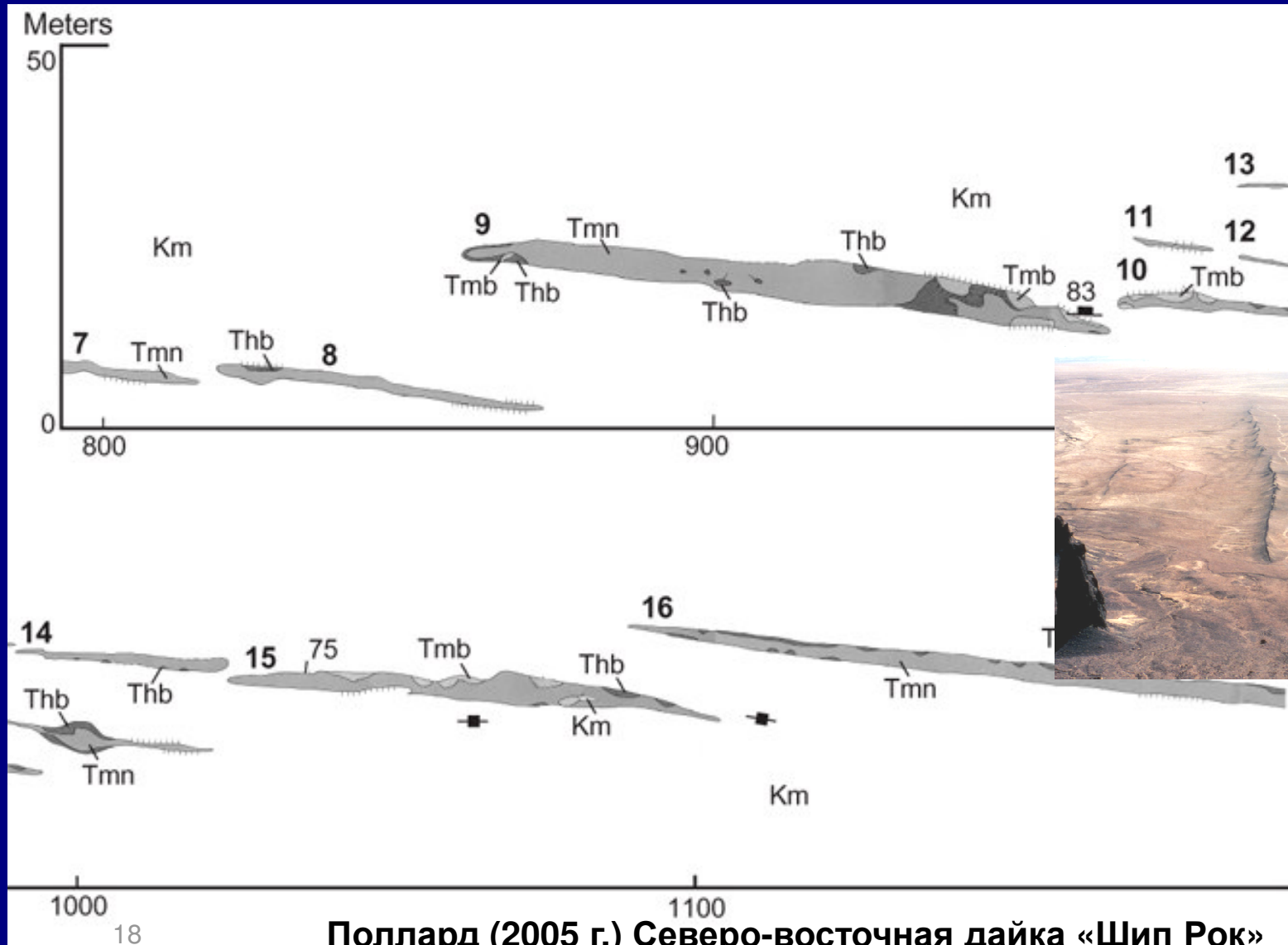
Правомерно ли наше допущение относительно геометрии трещины?



Относительно простая, чрезвычайно широкая трещина

Простирается на 9500 футов
на поверхности, средняя
ширина превышает 7 футов!

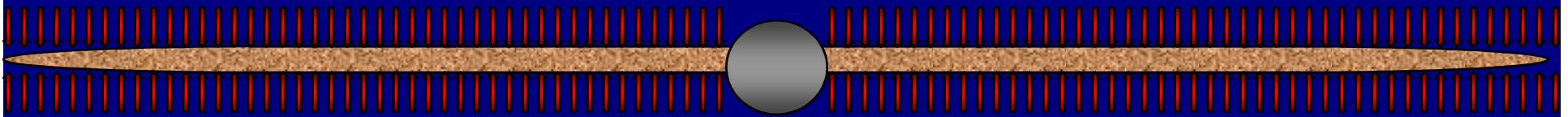
Обнажения фактически состоят из >30 дискретных кулисообразных сегментов, разделённых неповреждённой вмещающей породой



Поллард (2005 г.) Северо-восточная дайка «Шип Рок»

Гидравлические трещины – это простые плоскости?

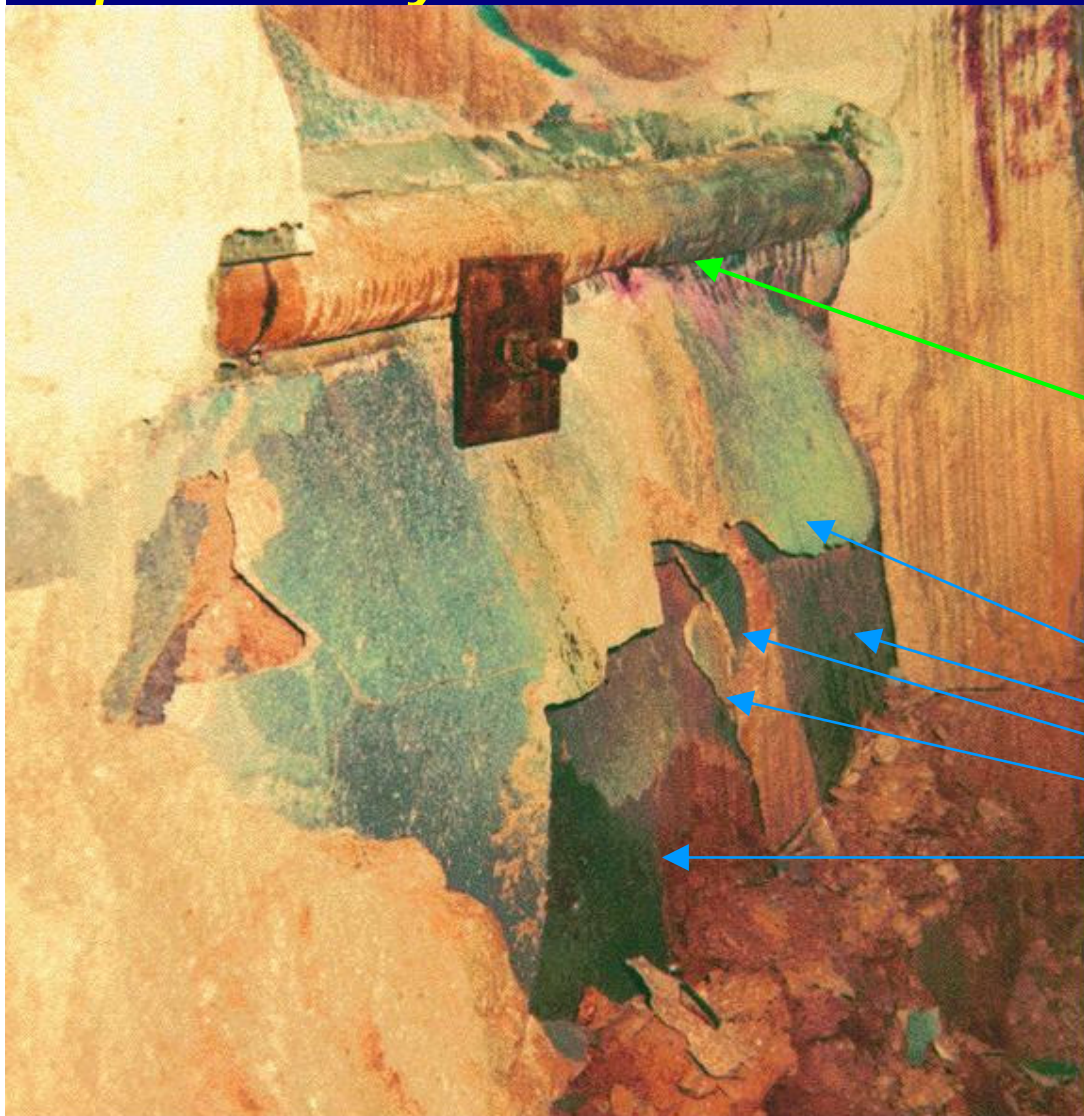
Вид сверху



- Исследования по методу «Майнбэк» (получение данных о созданных трещинах путём их глубинного анализа – Tr.)
 - 22 эксперимента «майнбэк» в 6 штатах; десятки в Австралии
 - Поразительная сложность, остаток геля, прерывистый проппант
 - Менее очевидная проводимость по сравнению с модельным прогнозом

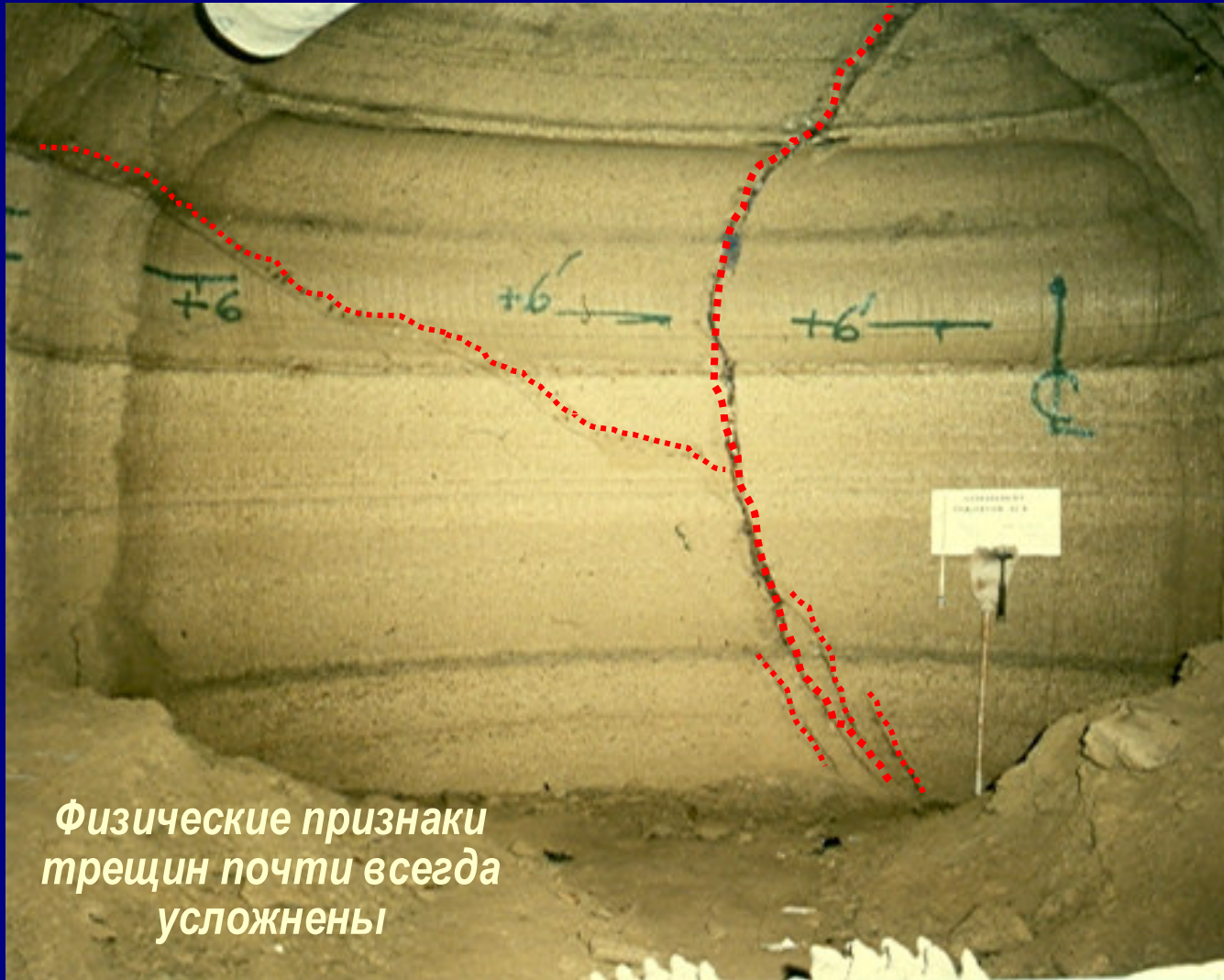
Источники: Bureau of Mines Rpt 9083, Diamond and Oyler, SPE 22395, Diamond CBM Symposium 11/87, Lambert OGJ 10/9/89, SPE 15258. Dozens in Australia (Jeffrey 124919, 28079, 119351, 63031)

*Даже в компетентной породе, выбранной по
предсказуемым механическим свойствам ...*

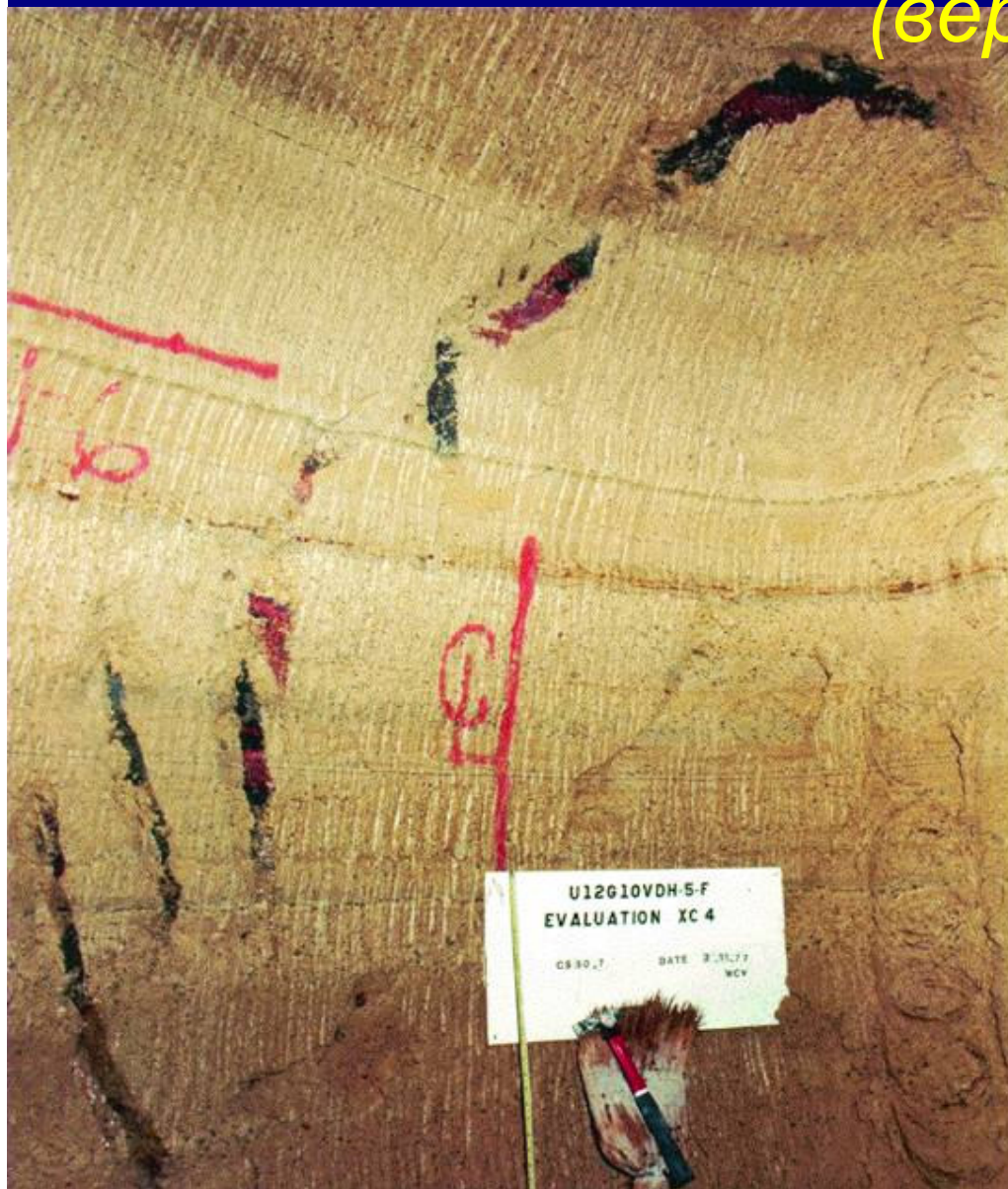


- 6 перфораций в нижней стороне отверстия (плюс 6 в кровле)
- 5 отдельных трещин, в результате перфораций внизу.

Наблюдения за сложностью трещин



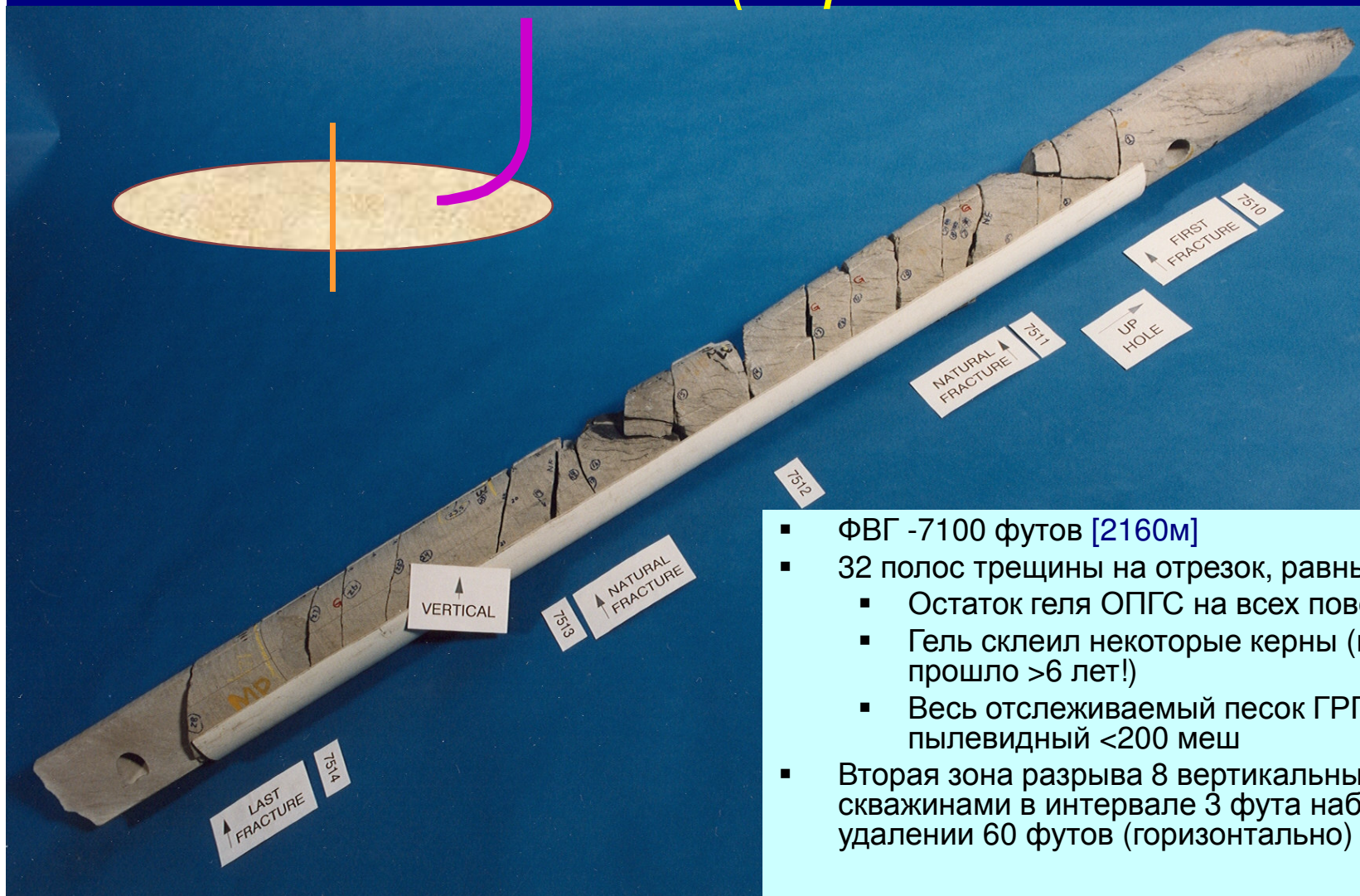
Многополосность в расклиненной трещине (вертикальная скважина)



Физические
признаки
трещины
почти всегда
усложнены



Многополосность в расклиненной трещине (вертикальная скважина)



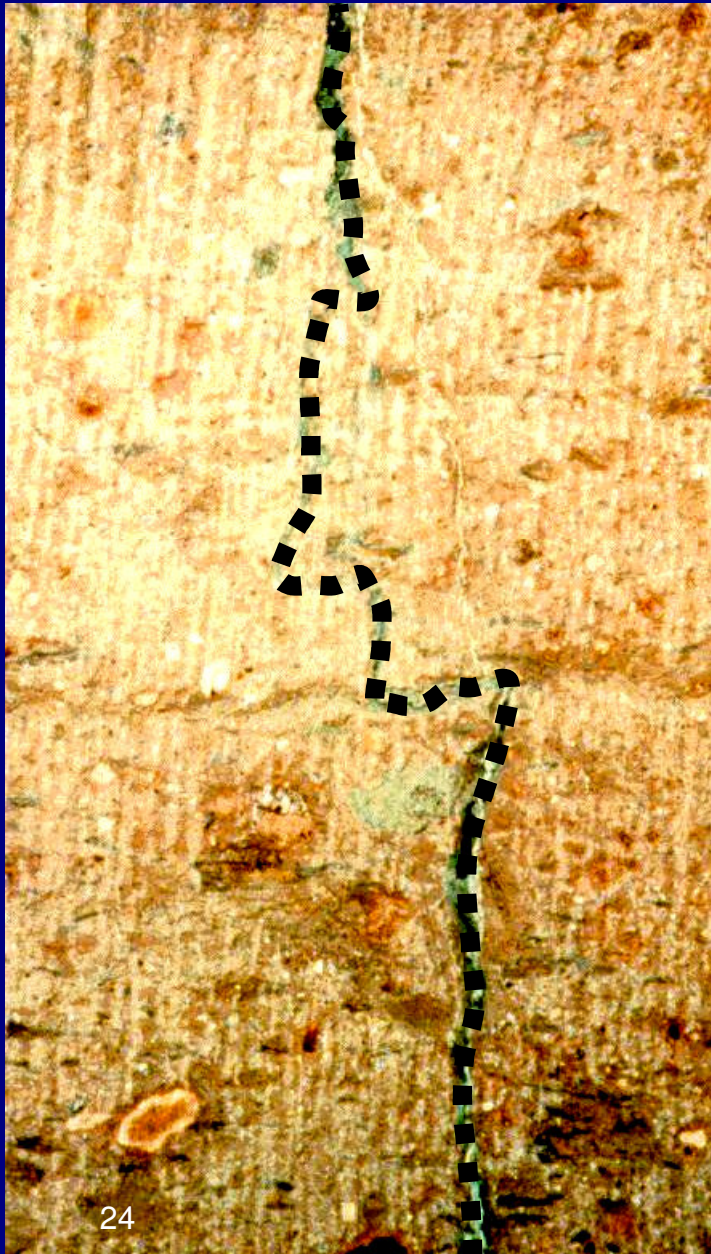
- ФВГ -7100 футов [2160м]
- 32 полос трещины на отрезок, равный 4 футам
 - Остаток геля ОПГС на всех поверхностях
 - Гель склеил некоторые керны (после разрыва прошло >6 лет!)
 - Весь отслеживаемый песок ГРП (20/40 ППС) пылевидный <200 меш
- Вторая зона разрыва 8 вертикальными скважинами в интервале 3 фута наблюдалась на удалении 60 футов (горизонтально)

Испытания «Месаверде» MWX,
ОИН 22876

Вертикальное усложнение из-за стыков

*Физические
признаки трещины
почти всегда
усложнены*

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ УЧАСТОК
«НЕВАДА»; ГРП,
ЭКСПЕРИМЕНТЫ
«МАЙНБЭК»



Обнажение сланца «Вудфорд»

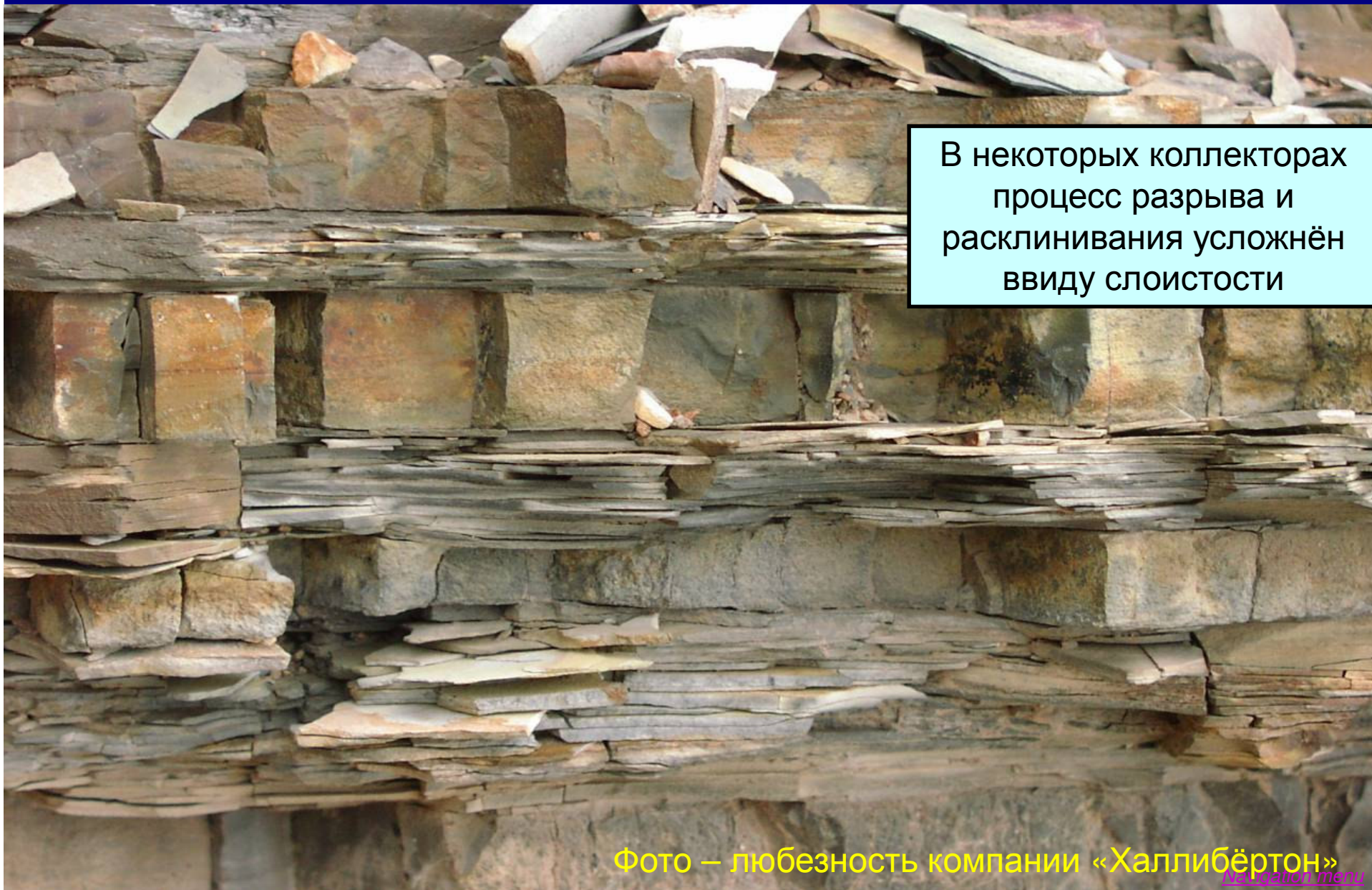
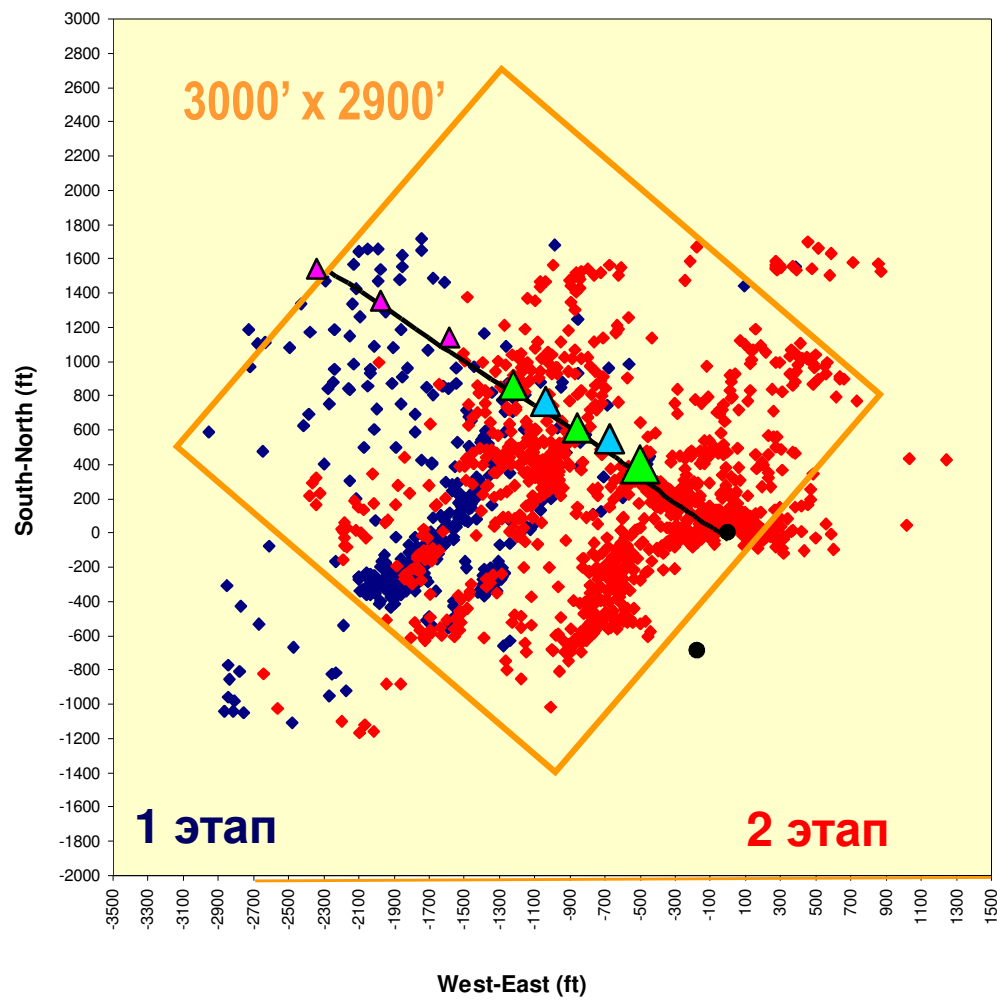


Фото — любезность компании «Халлибёртон»

[Главное меню](#)

Трещины могут быть огромными



▲ = Пучки перф. 1 этапа

▲ начальные пучки перф. 2 этапа

▲ Обновлённые пучки перф. 2 этапа

- Квадрат покрывает площадь 9 млн. фут² [~200 акров земли]
- Вероятно
 - 10 до 100 млн. фут² площади поверхности трещины! [сообщение с коллектором]

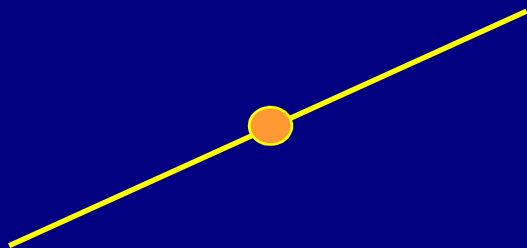
Усложнение?

- Проблема № 2

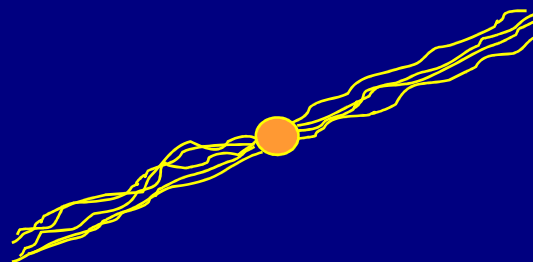
По любому варианту нашего исследования фактическая геометрия трещины получается сложнее, чем геометрия, заложенная в моделях.

Амплитуда усложнений трещины

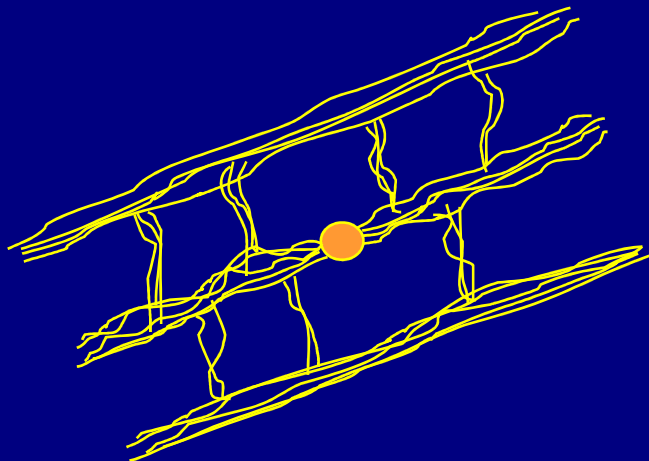
Простая трещина



Сложная трещина



Очень сложная сеть трещин



За:

Сложные трещины
улучшают сообщение с
коллектором
(благоприятно в сланцах
с очень низкой
проницаемостью?)

Против:

Сложные трещины
усложняют маршрут
потока, и обеспечивают
меньшую кумулятивную
проводимость, чем
простые широкие
трещины [ОИН 115769]

Трещины, пересекающие соседние скважины

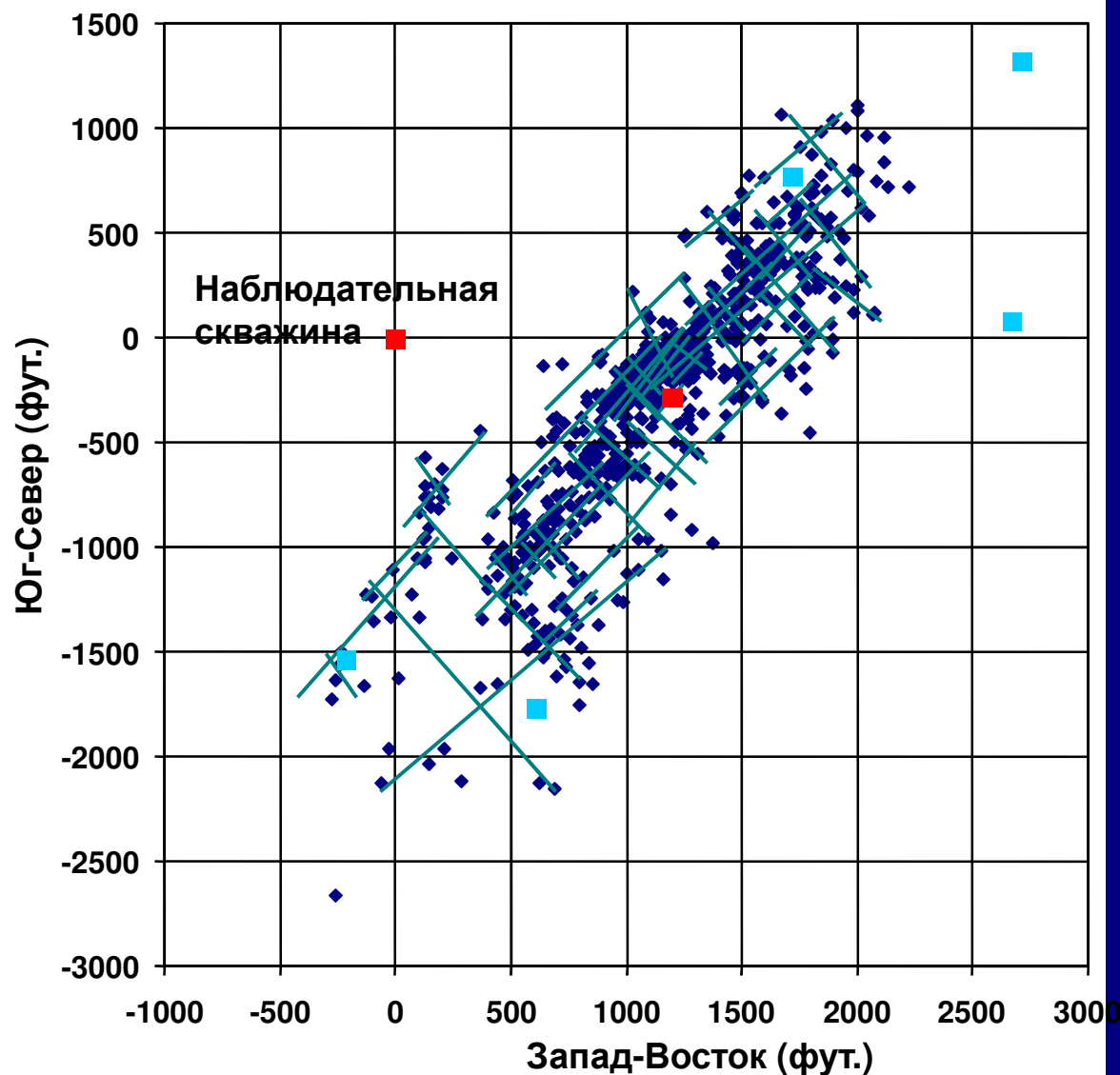
Проход разрыва в соседние скважины

Микросейсмическое картирование
Выход раствора на поверхность
Повышенная обводнённость
Надёжный радиоактивный индикатор (каротаж)
Шум в соседней наблюдательной скважине

Наблюдается в

Плотном песчанике («Пайсанс», «Йона», «Коттон Вэлли», «Коделл»)
Высокопроницаемый песчаник («Прудо»)
Сланец («Барнет»)
Доломит («Миддл Баккен»)
Мел («Дэн»)

Часто EUR, «импульсные испытания», «испытания на интерференцию» не показывают устойчивой гидравлической проводимости!



Проблема № 3

- Трещины могут обеспечить несовершенную гидравлическую непрерывность
 - Вертикальную
 - Поперечную

Допущения

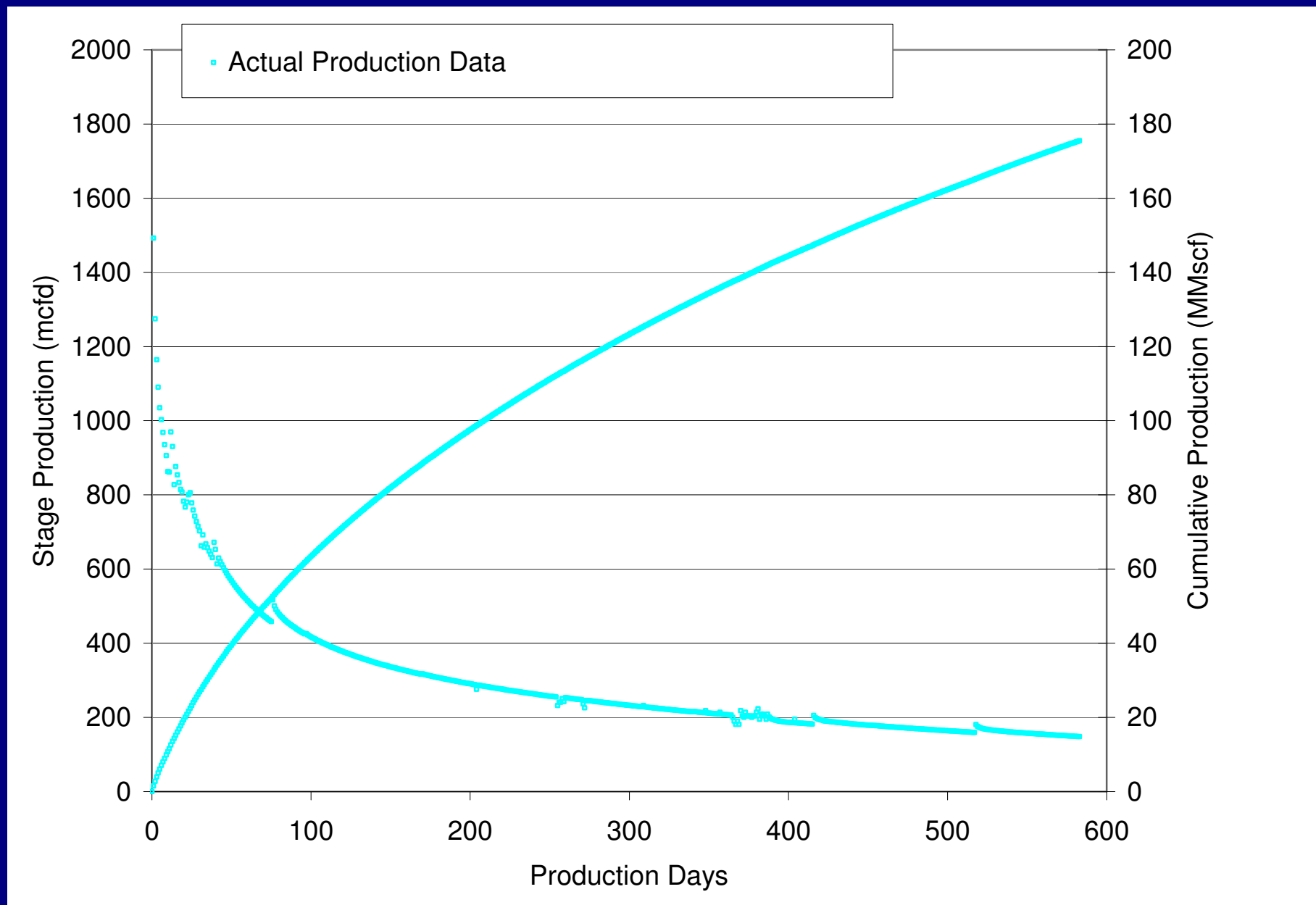
- Усложнённость потока, геометрия трещины и т.д.
 - Всё это затрудняет достижение необходимой проводимости
- Прочие упущения:
 - Сосредоточение напряжения на неровно распределённом проппанте
 - Гелиевая чистка более тщательная в трещинах высокой проводимости
 - Широкие трещины меньше повреждаются:
 - Фильтратом, циклическим напряжением, закупориванием мелкими частицами
 - Трещины высокой пористости меньше повреждаются:
 - Фильтратом, закупориванием мелкими частицами
 - С течением времени все виды проппанта теряют свои свойства – но с разной скоростью
 - Не все виды проппанта термически стабильны

Гипотеза: проводимость может быть более важна, чем подсказывают наши модели и общепринятые взгляды

Практическое свидетельство неэффективных разрывов

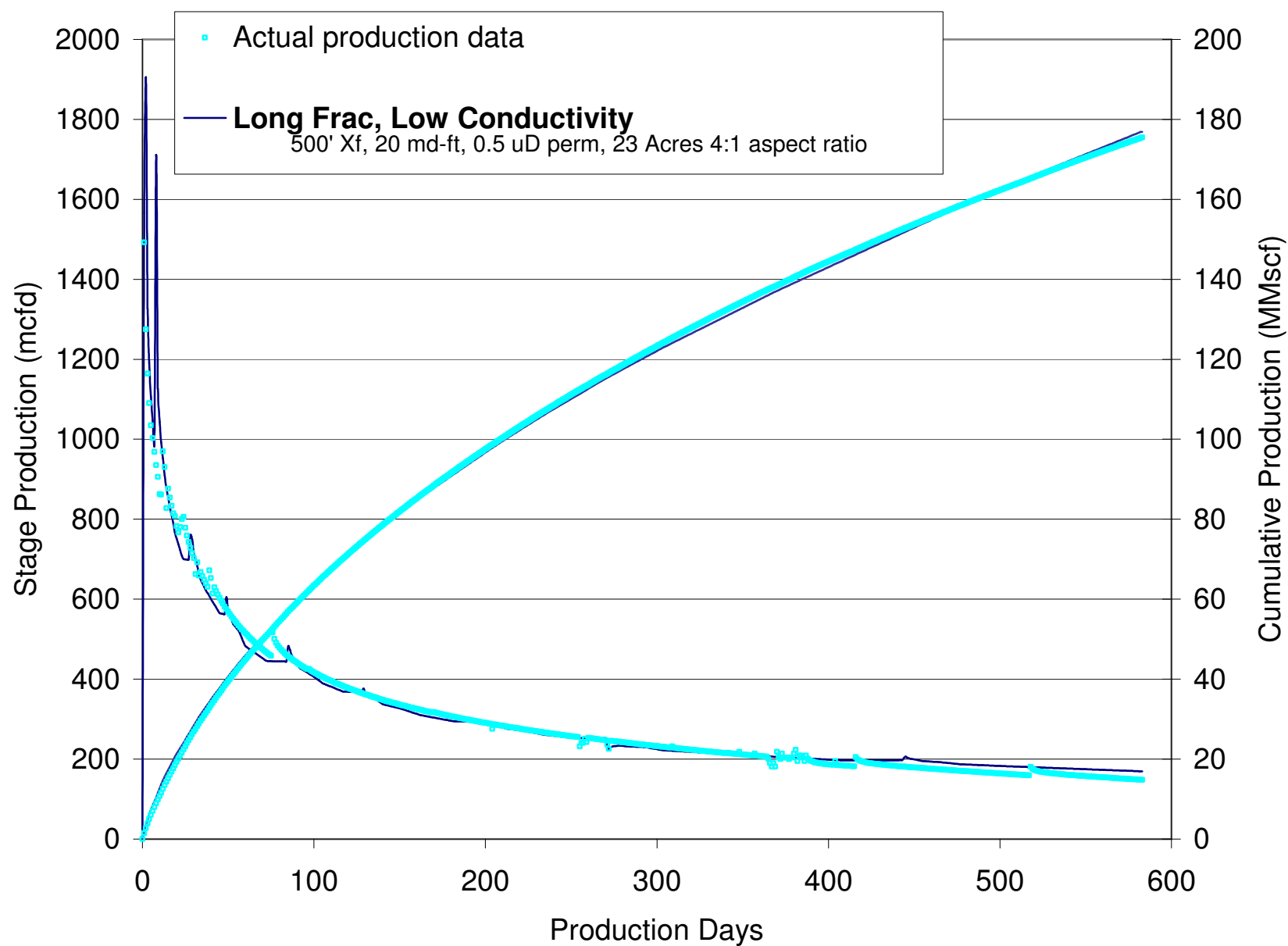
- Отсутствие улучшений в скважинах, соединённых трещиной
- Резкое падение продуктивности
 - Поразительно ограниченные зоны дренирования часто не соответствуют изображённому распространению трещины
- Уплотнительное бурение
 - Зачастую успешное при очень плотной сетке
- Испытание скважин
 - Неудовлетворительные длины трещин и/или низкая кажущаяся проводимость
- Промысловые испытания
 - Результаты повторного гидроразрыва
 - Там, где операторы экспериментировали с повышением проводимости трещины

Разве усложнения не очевидны по промысловым данным?

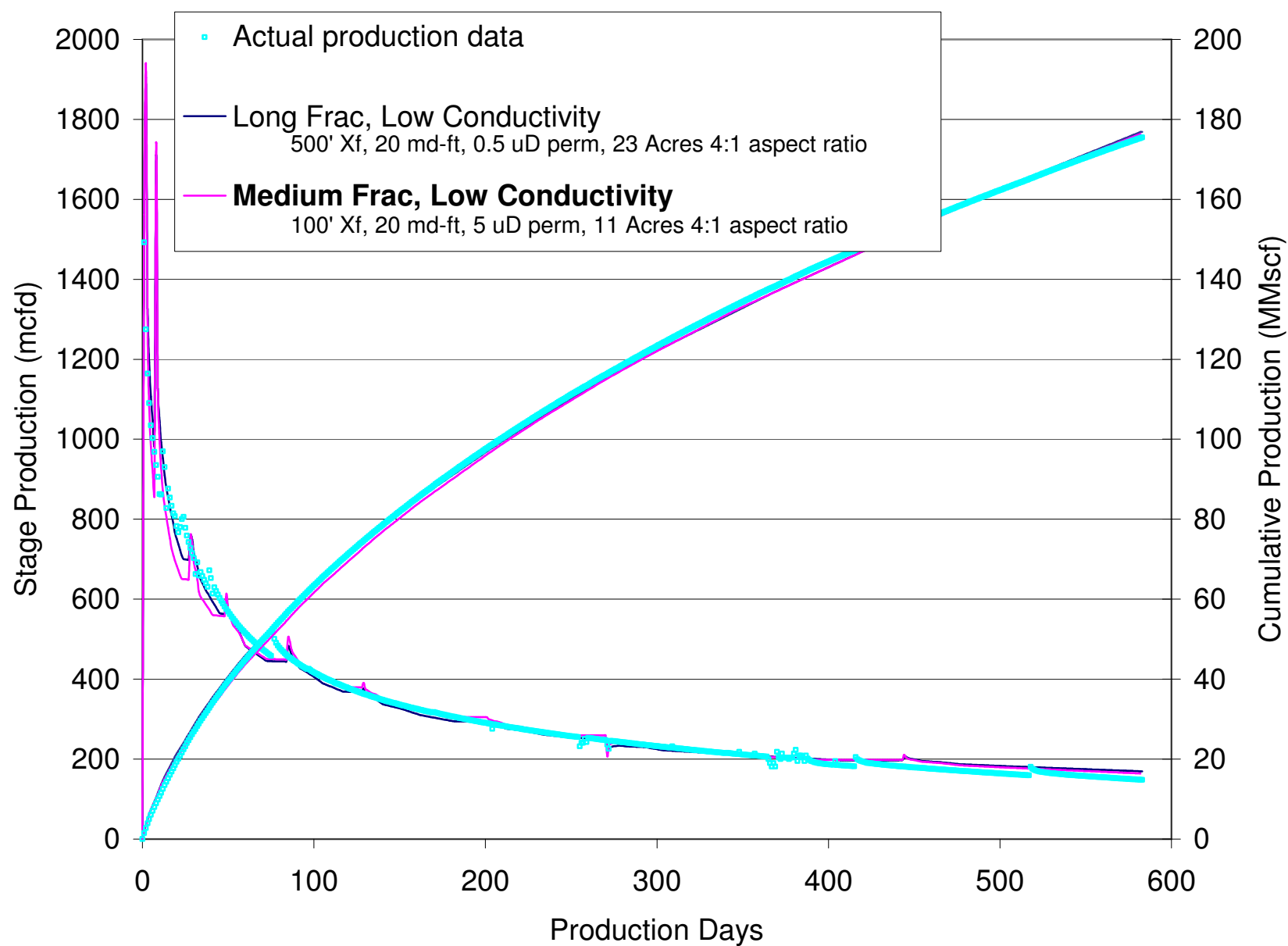


ОИН 106151 Рис. 13 – Добыча может быть сопоставлена с различными параметрами трещин и коллекторов

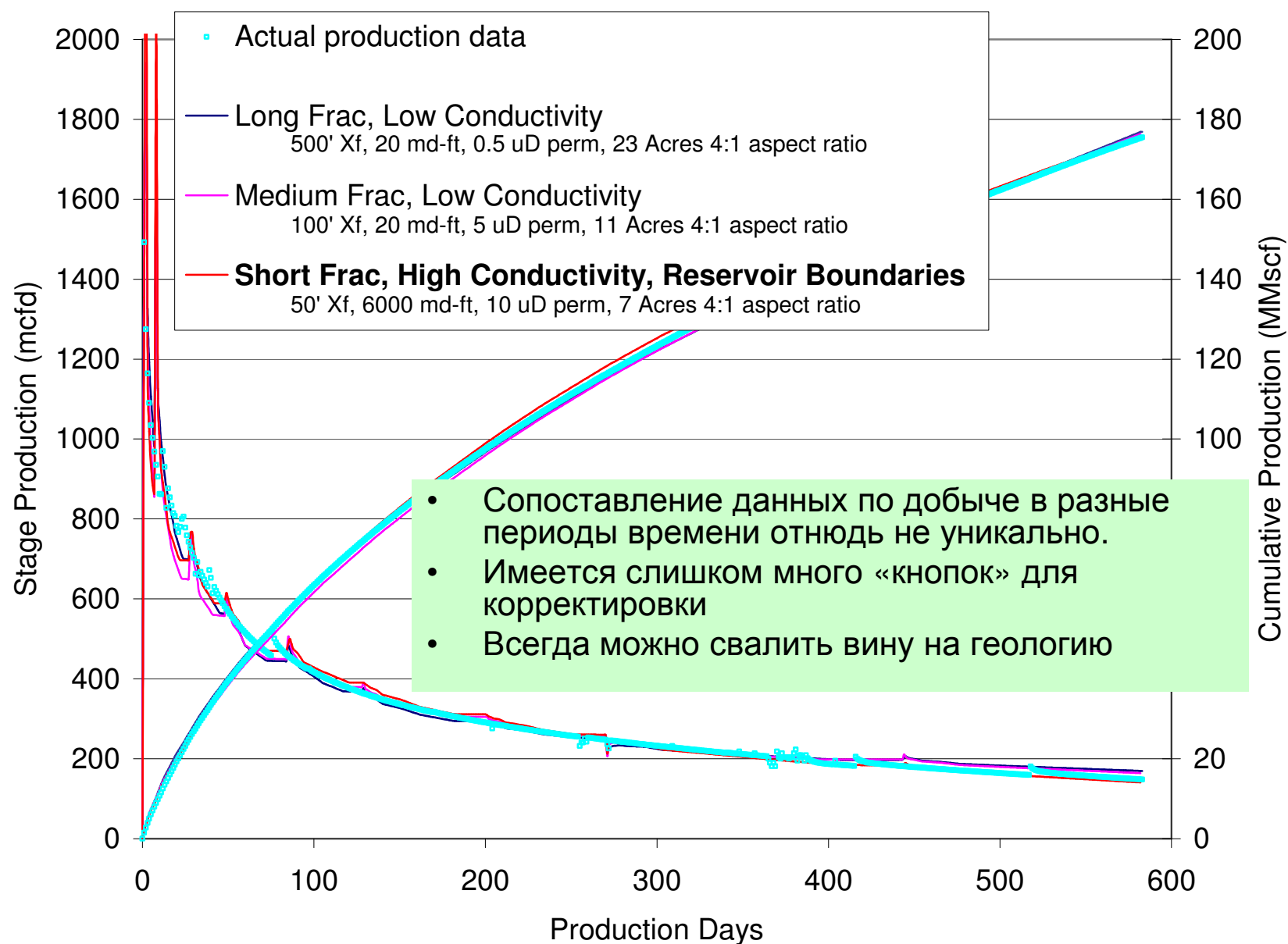
Разве усложнения не очевидны по промышленным данным?



Разве усложнения не очевидны по промысловым данным?



Разве усложнения не очевидны по промысловым данным?



Устранение неопределённости

- Если требуется сопоставить эффективность двух различных конструкций разрыва, мы лишаемся многих степеней свободы
 - Зафиксировать все «кнопки коллектора»!
 - Попробуйте объяснить результаты добычи вследствие первичного разрыва И вторичного разрыва [~100 опубликованных испытаний]
 - Требуйте одновременного сопоставления двух различных конструкций разрыва в одном и том же коллекторе! [200+ испытаний]

Промысловые исследования с документированием последствий для добычи при повышении проводимости трещины

Было выявлено >200 опубликованных работ, проведённых >150 компаниями



Нефтяные скважины, газовые скважины, тощий и жирный конденсат
Карбонат, песчаник, сланец, уголь

Дебиты скважин

1 – 25000 бн/сут.

0,25-100 млн. норм. фут3/сут.

Глубины скважин

100 - 20000 фут.

Благоприятное воздействие на добычу

- В >200 опубликованных исследованиях и сотнях неопубликованных исследований по выбору проппанта,
- Операторы часто пишут о превышении ожидаемых результатов при использовании:
 - Более высоких концентраций проппанта
 - Более агрессивных рампов, меньших набивок
 - Фильтров
 - Проппанта большего диаметра
 - Более устойчивого проппанта
 - Более качественного проппанта
 - Проппанта более однородной формы и размера
- Проводимость трещины представляется более важной, чем предсказывают наши модели и интуиция!

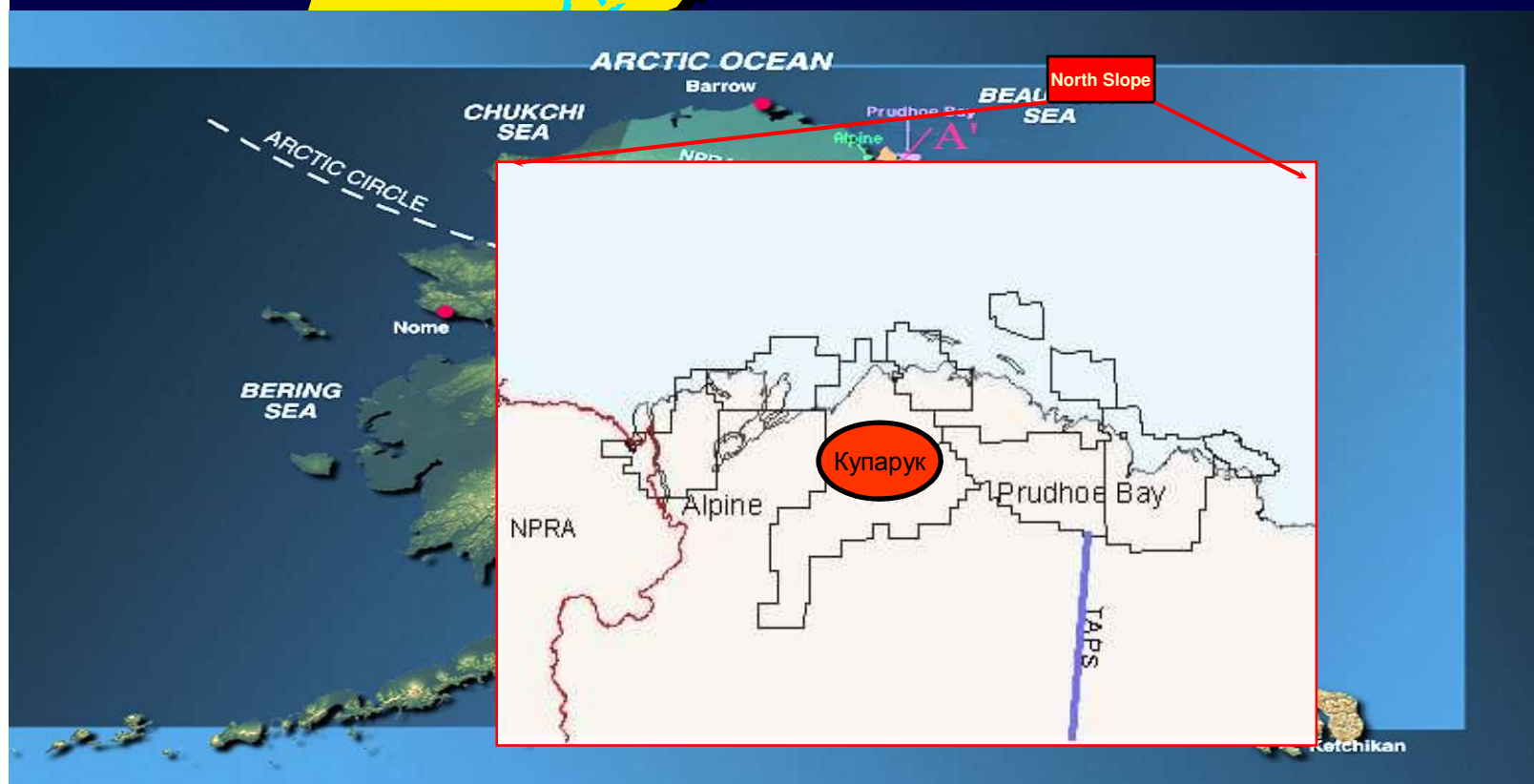
Статистически веский пример

- Газовые скважины, 0,002 мД
- 446 разрывов в тщательно проведённых испытаниях
 - Базис F_{cd} с > 400 средних концентраций песка; $F_{cd} > 2000$ с керамикой
 - Использование опубликованных данных проводимости и упрощённых моделей и проводимости трещин не должно иметь значения
 - Однако, промысловые результаты доказывают с определённостью 99.9% что выбор проппанта, действительно имеет значение
 - 70%-повышение продуктивности with с лучшей керамикой!

ОИН 106151

- Слоистая модель предсказала результат $< 5\%$

*Конкретный пример
Нефтяные скважины со
скромным дебитом
ОИН 15507, 20707 и 24857
М-ние «Купарук Ривер», Аляска*



Месторождение «Купарук Ривер»

ОИН 15507, 20707 и 24857

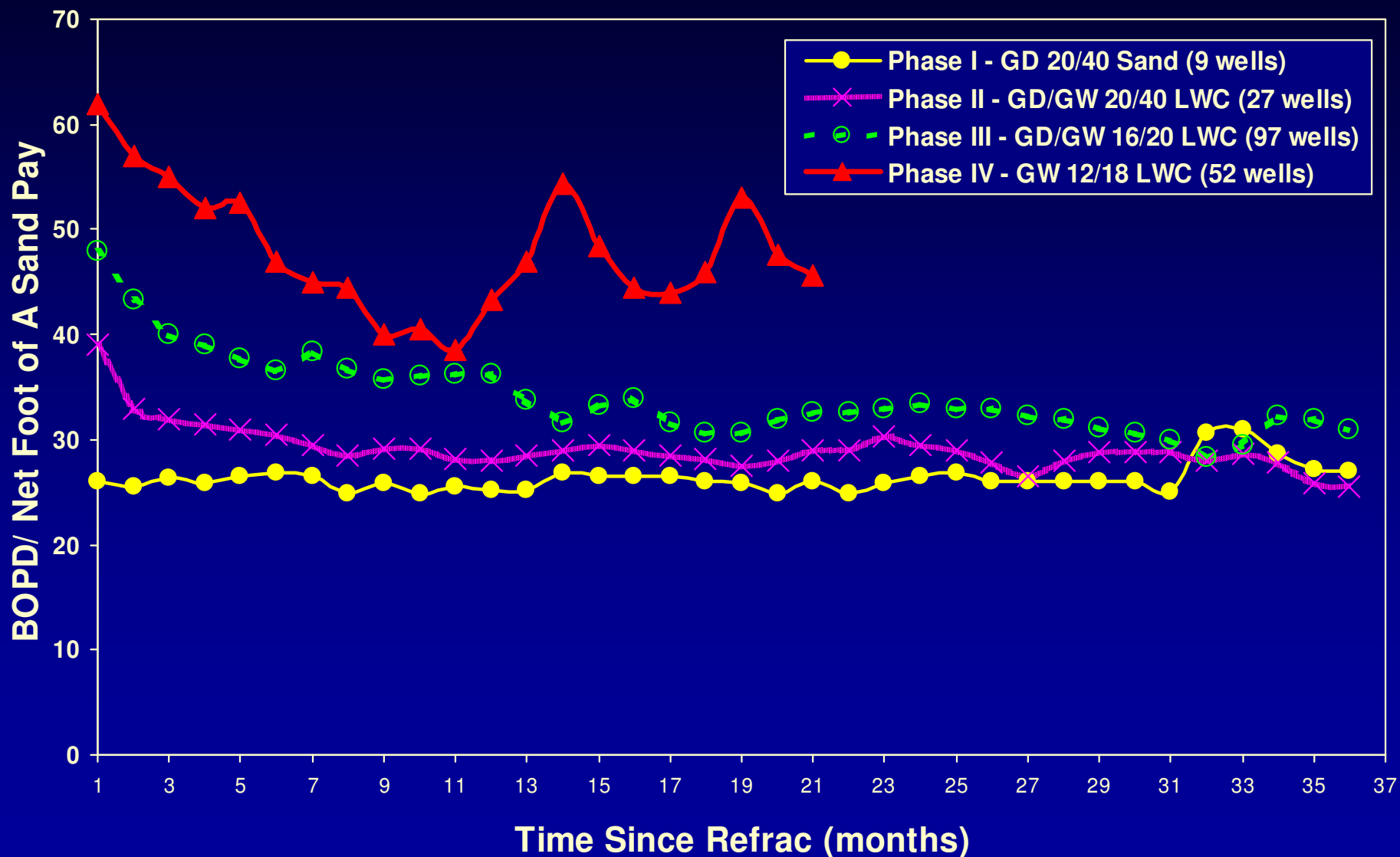
- 20 - 100 мД
- ФВГ:~6000 фут.
- Нагрузка на проппант: 3400 фунт/дюйм²
- Продуктивная толща:~30 фут.
- Наклонные / круто наклонные скважины, пробуренные с куста

Всегда считалось, что скважины в таких коллекторах не должны обрабатываться при помощи гидроразрыва.

Уникальные качество и количество данных. Свыше 880 разрывов, и свыше 200 повторных разрывов с многократным применением метода испытания с переменным давлением.

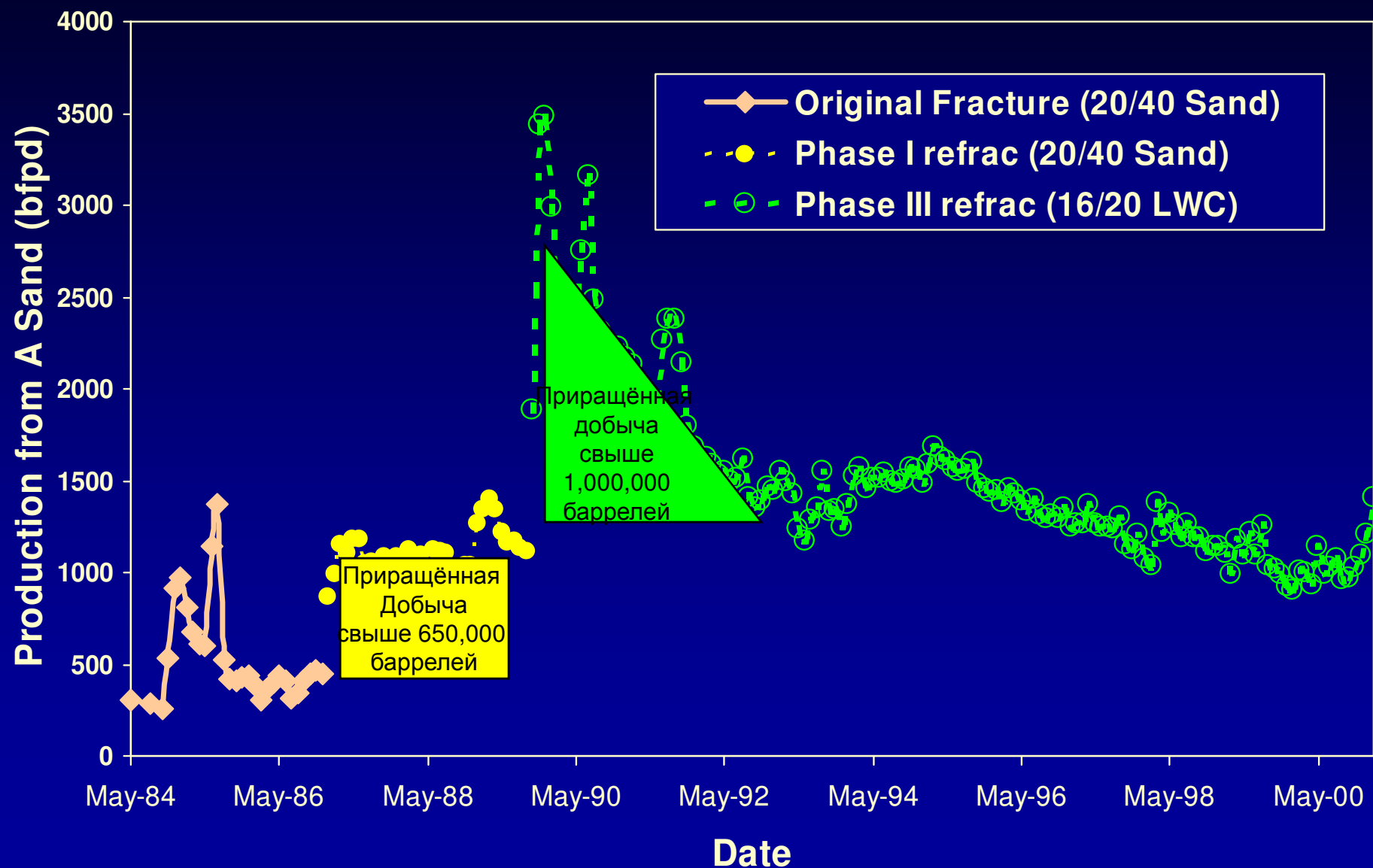
Местрождение «Купарук Ривер»

ОИН 24857, Поспишил и др, ARCO



Скважина «Купарук 2F-08»

ОИН 24857 с обновлёнными данными



Некоторые «местные» примеры (стр. 1 из 2)

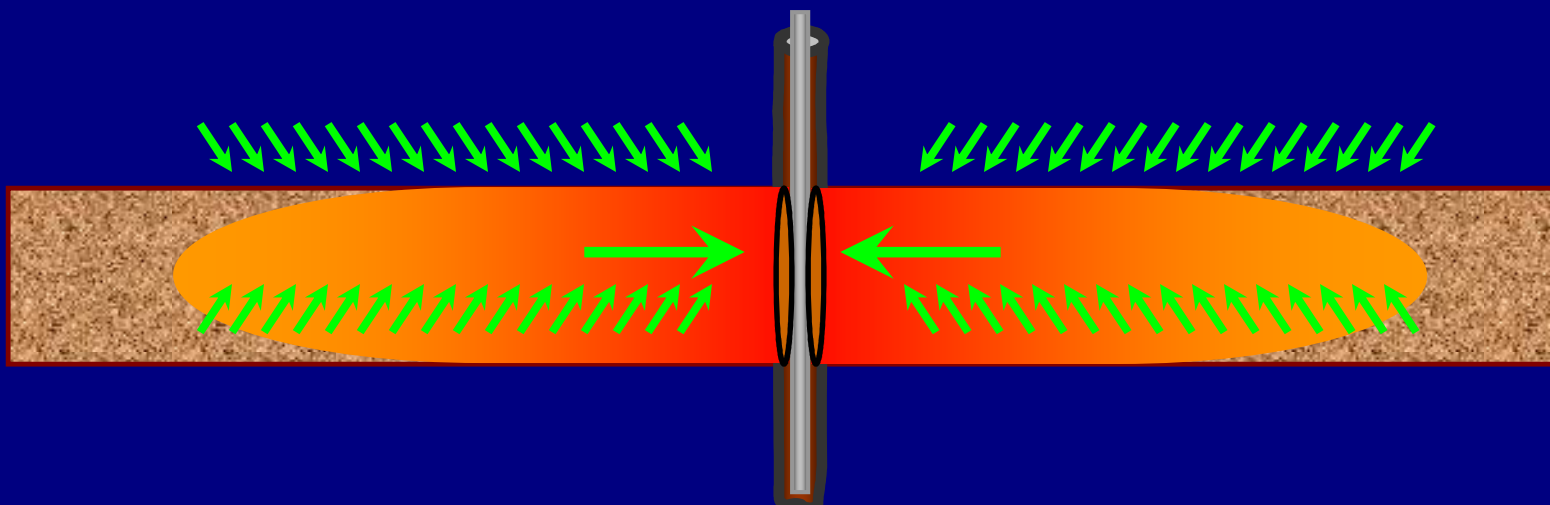
- ОИН 39954, Кондратофф: Нефтяное м-ние «Калчинское». Рост добычи -- от 3 до 7 раз, более высокая проводимость и реализация
- ОИН 84916, Нор-Азлан: М-ние «Вингаяхинское». Повторный разрыв с керамикой 16/30; значительное чистое повышение давления (широкая трещина). Добыча нефти выросла с 60 до 150 тон/сутки.
- ОИН 90357, Экономидис: «Приобское». Переход с проппанта малого диаметра к 16/30 и 12/20. «Потрясающий рост» дебита по нефти.
- ОИН 94727, Бутула: М-не «Ямбургское». Широкие, проводимые трещины с более крупным проппантом обеспечили 4-кратный рост.
- ОИН 91760, Руеда: Сибирский турбидит. Двойное повышение объёма проппанта на метр продуктивной толщи обеспечило повышение добычи на 82%.
- ОИН 98259, Гулиелмо: «Приобское». Использование проппанта 12/18 и 8/14 позволило повысить добычу в 7 раз.

Некоторые «местные» примеры (стр. 2 из 2)

- **ОИН 75146, Шаоул:** Казахстан, м-ние «Арман», глубина 3500 футов. Керамика до 18 ф./гал.; повышение добычи от 2 до 5 раз, повышение запасов
- **ATW, 2006, Бройчук:** Западная Сибирь. М-ния «Романовское» и «Сугмутское». Активные концентрации проппанта - 8/14 керамика, позволила повысить добычу в 3,3 раза
- **ТЕК, 2005, Маньер:** Западная Сибирь. М-ние «Ямбургское». Высокопроводимые трещины позволили повысить добычу в 2,75 раз
- **ОИН 101821, Дедурин:** Несколько российских м-ний («Приобское», «Оренбургское», «Ямбургское», «Сугмутское», «Романовское», «Калчинское», «Вингаяхинское»). Значительное повышение добычи, повышенная проводимость трещин.
- **ОИН 94643, Демаркос:** Западная Сибирь, м-ние «Сугмутское». Повышение объёма проппанта и повышение качества проппанта позволяет повысить дебиты на 50%.
- **ОИН 103987, Руиз:** «Приобское». Использование проппанта более высокой проводимости способствует повышению коэффициентов продуктивности.

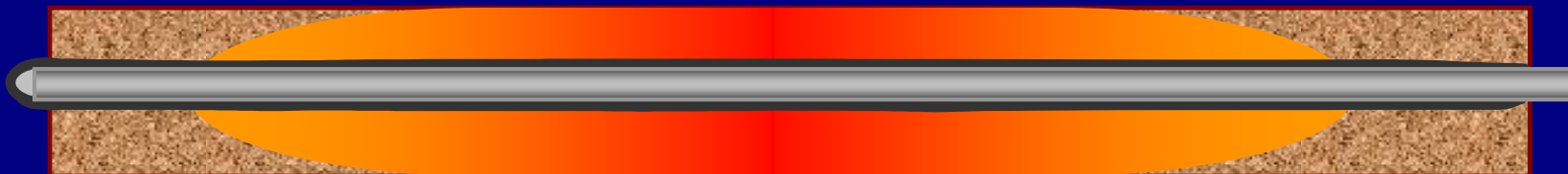
А как насчёт горизонтальных скважин?

Пересечение ствола скважины и трещины



Вертикальные скважины: как правило, выигрывают от повышенной проводимости

200 промысловых исследований - ОИН 119143



Горизонтальная скважина с продольной трещиной:

Нецементированная или с полностью перфорированным хвостовиком

Хорошая связь, флюиду нужно пройти только $\frac{1}{2}$ продуктивной толщи в трещине.

Обычные требования к проводимости проппанта -- годится практически всё

Пересечение ствола скважины и трещины

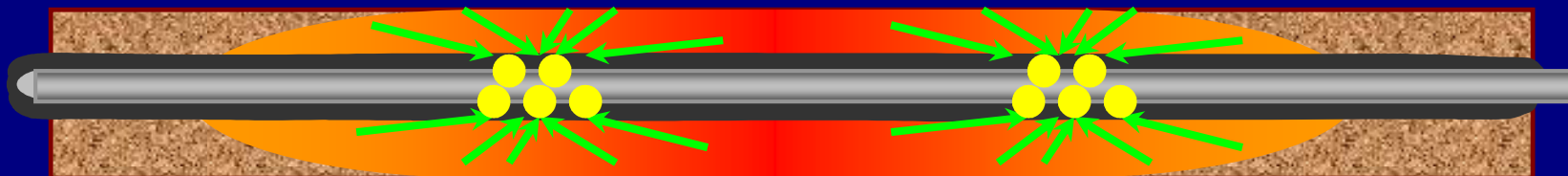
Цементированный хвостовик

Горизонтальная скважина

Цементированный хвостовик с ограниченными перфорациями

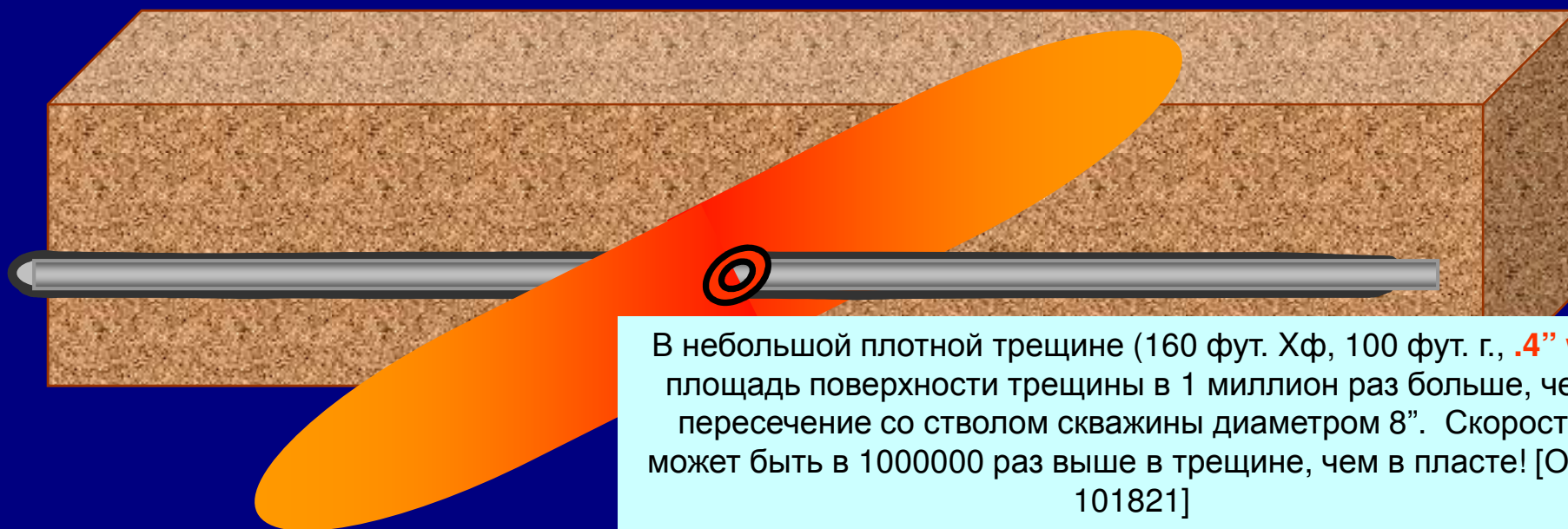
Флюид проходит более короткие расстояния внутри трещины, но наблюдается значительное стечение флюида вокруг перфораций.

Требования к проводимости проппанта является фактором
Для этого метода заканчивания «Лусо» выбрала **RCS** (ОИН 90697)



Пересечение ствола скважины и трещины

А что если трещина НЕ продольная?



В небольшой плотной трещине (160 фут. Хф, 100 фут. г., **.4" w**), площадь поверхности трещины в 1 миллион раз больше, чем пересечение со стволом скважины диаметром 8". Скорость может быть в 1000000 раз выше в трещине, чем в пласте! [ОИН 101821]

Горизонтальная скважина с поперечно пересекающей трещиной:
(Прямоугольная, перпендикулярная, поперечная, не полностью сориентированная)

Нефть/газ должны проходить сотни/тысячи футов в трещине и скапливаться вокруг небольшого ствола скважины – высокая скорость в пределах трещины!

Ужасная связь; Очень большая скорость флюида и **характеристики проппанта** призабойной зоне – **ключ** к решению вопроса!

Скорость в поперечной трещине

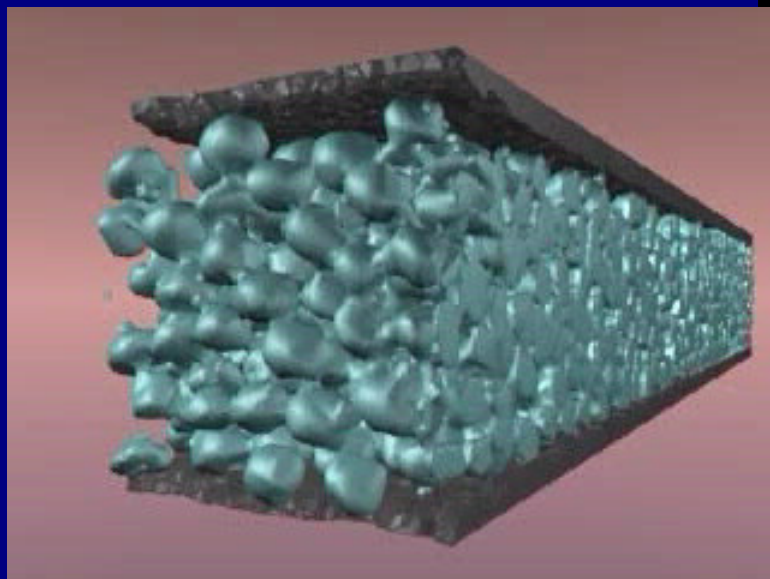
Это только 6-8 зёрен/сек..

Многие скважины нуждаются в потоке газа в 100-10000х раз более быстром!
И это чистый высоко-сферический проппант; нулевое разрушение; нулевое закупоривание мелкими частицами; одна фаза и т.д.

Следующая анимация показывает поток, проходящий сквозь конкретную пачку проппанта. Этот «ландшафт» был создан при помощи рентгенорадиометрического каротажа ВБ на конкретном образце 16/20 при напряжении 4000 фунт./дюйм².

Приблизительная скорость,
испытание АНИ/ИСО

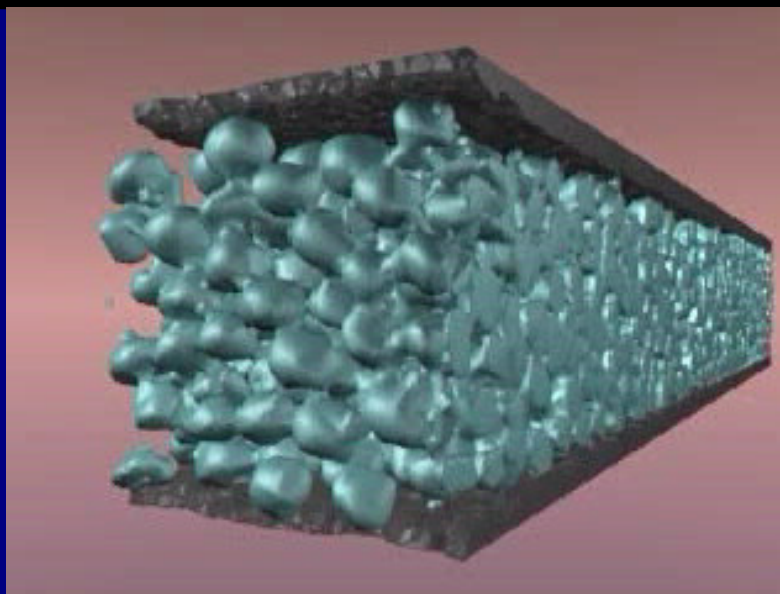
2 ml/min through a 16/20 pack



Приблизительная скорость,

20 ст. фут.3/мин (0.5м³/сут при ЗГДД 15 фунт./дюйм² (1 атм)
Или 600 ст. фут.3/мин сухого газа при ЗГДД 500 фунт./дюйм²

или 6 тыс. фут3/сут при ЗГДД 5000 фунт./дюйм²



Условия: 2фунт/фут² [10 кг/м²] 16/20 КВБ при напряжении в 1 поперечной трещине в 4000 фунт./дюйм²

Больше ступеней?

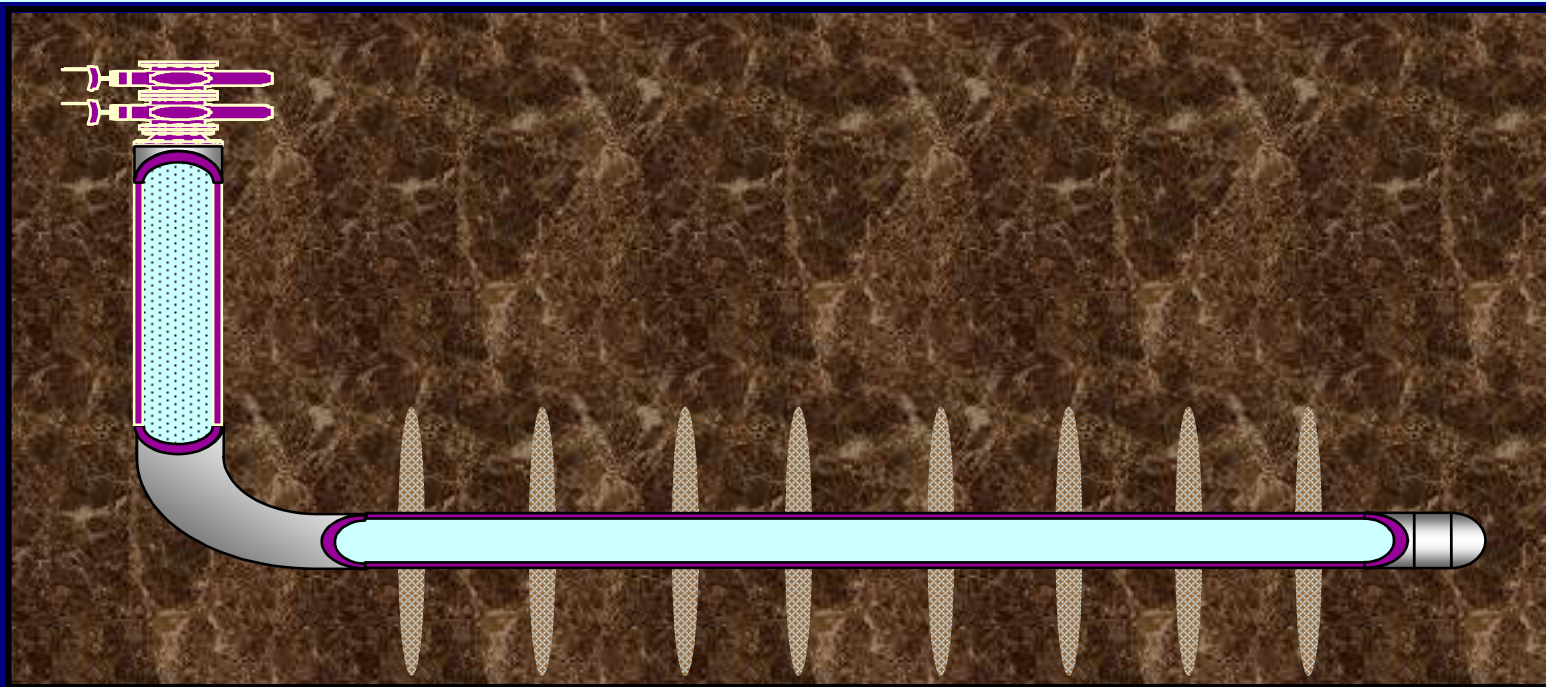
В некоторых коллекторах, операторы производят закачку в 28 ступеней, 3 пучка перфораций.

84 точек входа!

Вопрос: Мы уверены, что «охватываем больший объём породы» большим количеством ступеней или мы просто перераспределяем наши ресурсы, направляя их ближе к стволу скважины с большим числом точек входа?

Если увеличить пересечение в 84 раза, можно понизить скорость в 84 раза и сократить потери давления в 84^2 или >7000 раз!

Однако, операторы по понятным причинам не склонны проявлять активность на этих ступенях на забое!



Выводы (1 из 3)

- Мир сложен. Нам нужно сделать упрощающие допущения:
 - Математически удобно описывать скважины как **простые, вертикальные объекты с равномерным распределением проппанта и сплошностью**
 - Часто предполагается, что опубликованные данные о **“справочной проводимости”** должны дать приемлемые расчётные показатели пропускной способности
 - **Упрощенная характеристика коллектора** (минимальная слоистость, предсказуемые границы дренирования) упрощает работу по моделированию
 - Уместно допустить наличие **одинакового режима потока** в коллекторе и в трещине
- **Такие допущения очевидно несостоятельны (или по меньшей мере несовершенны)**

Выводы (2 из 3)

- Потери давления в трещинах с равномерным распределением пропанта в ~100 раз выше, чем предсказывалось по упрощённой модели
- Коллекторы содержат неоднородности (границы, напластования, анизотропия, линзообразные тела и т.д.) которые повышают необходимость в поперечно и вертикально сплошных трещинах
- Геометрия трещин часто усложнена
- Не все трещины показывают устойчивую гидравлическую последовательность
- Любое усиление сложности трещины повышает необходимость проектирования более проводящих трещин
- Мы не делаем компенсируемых ошибок!! Во всех наших допущениях мы заблуждаемся в одном направлении!!

Выводы (3 из 3)

- 200 промысловых исследований
 - Колоссальные возможности повысить продуктивный потенциал скважин, возбуждённых гидроразрывом
 - Упрощенные модели не способствуют раскрытию этого потенциала
- *Намного легче удвоить продуктивность скважины, чем сократить затраты на её строительство ещё на 50%!*

Рекомендации

- Выявить несовершенную технику
 - Улучшить её, там где это сделать несложно
 - Компенсировать её недостатки
- Сложность разрыва
 - Лучшее сообщение с породой (хорошо!)
 - Испытывает нашу способность обеспечить трещину необходимой проводимости (плохо)
- Проводимость
 - Вам нужно больше, чем вы думаете!
- Будьте готовы к изучению промысловых данных
 - Особенно, если результаты опровергают вашу интуицию!
- Всегда найдется лучший проект разрыва!
 - Не ограничивайте себя своими методами, техникой и воображением!

Distinguished Lecturer Program

Ваши отзывы для нас очень важны

Введите ваш раздел в Оценочный конкурс **DL**,
заполните оценочную форму для настоящей
презентации или войдите на сайт:



http://www.spe.org/events/dl/dl_evaluation_contest.php

Общество инженеров-
нефтяников, Программа
заслуженных лекторов
www.spe.org/dl