

Введение в геофизику месторождений углеводородов

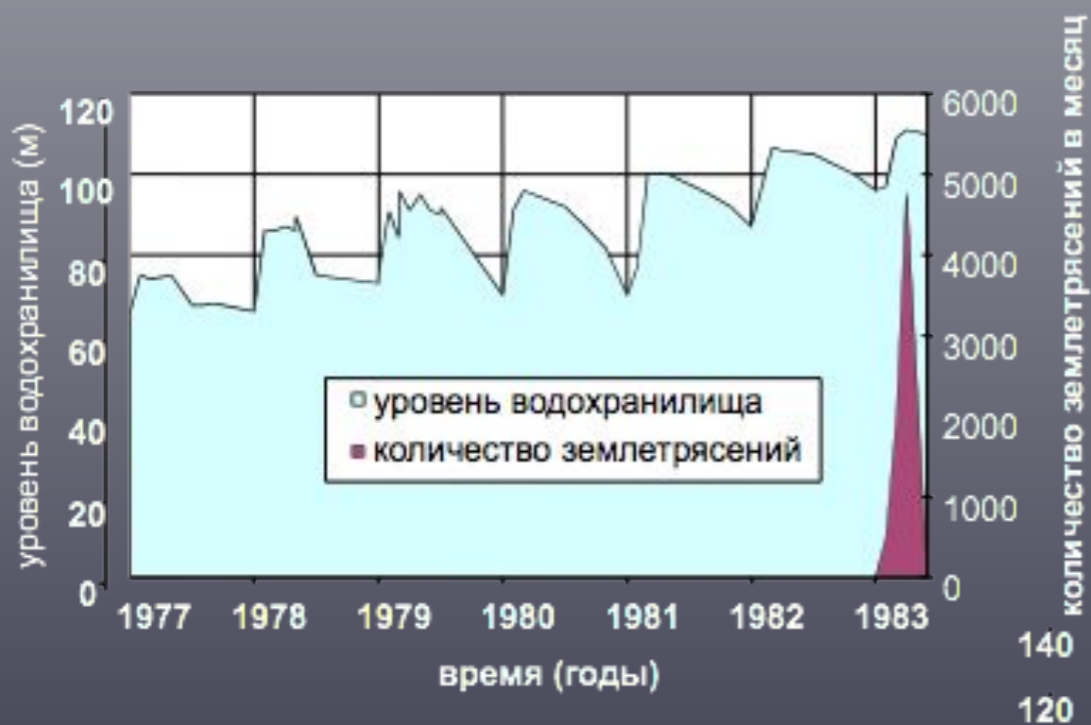
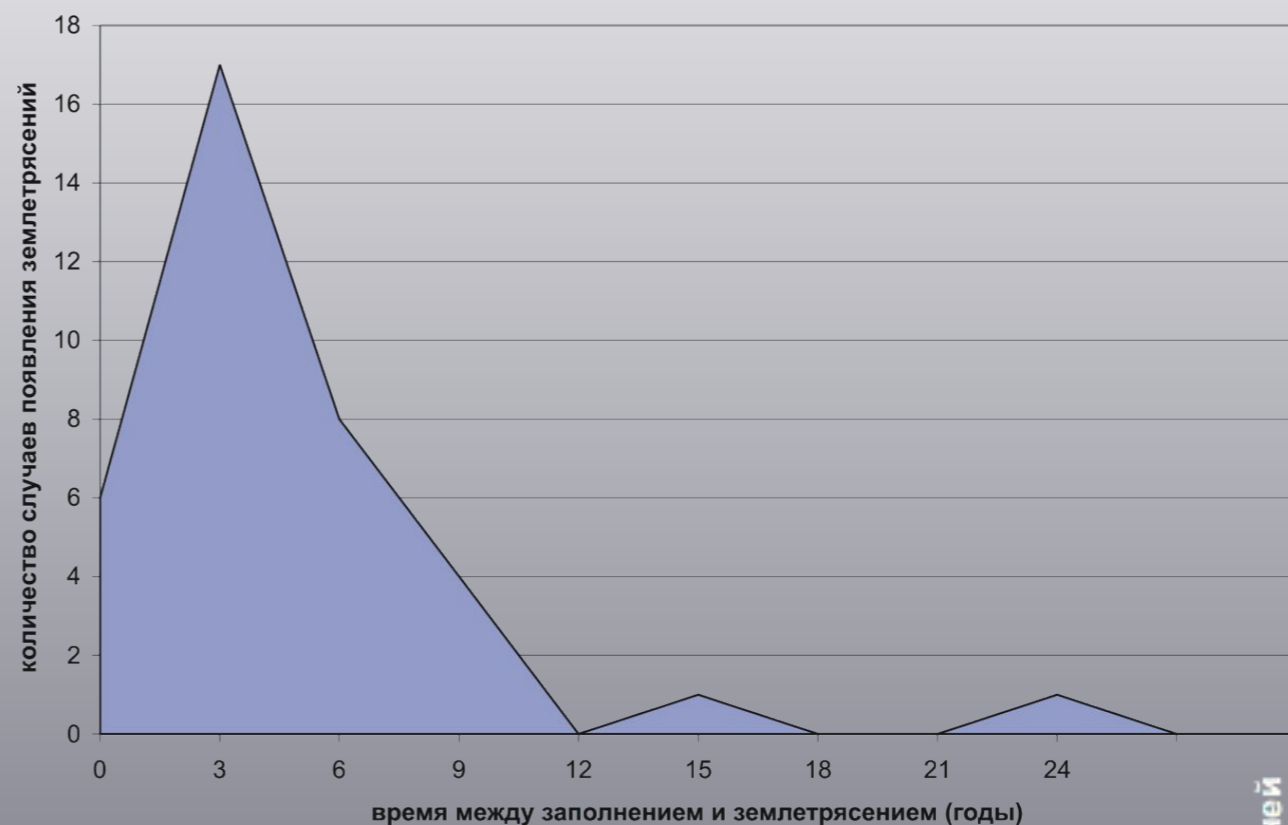
Лекция 9

Содержание

- Техногенные сейсмические явления:
 - водохранилища
 - месторождения углеводородов
 - геотермальные электростанции
 - гидроразрыв пласта
- Микросейсмичность при ГРП
- Эволюция сейсмичности при изменении порового давления
- Заключение

Плотинная сейсмичность

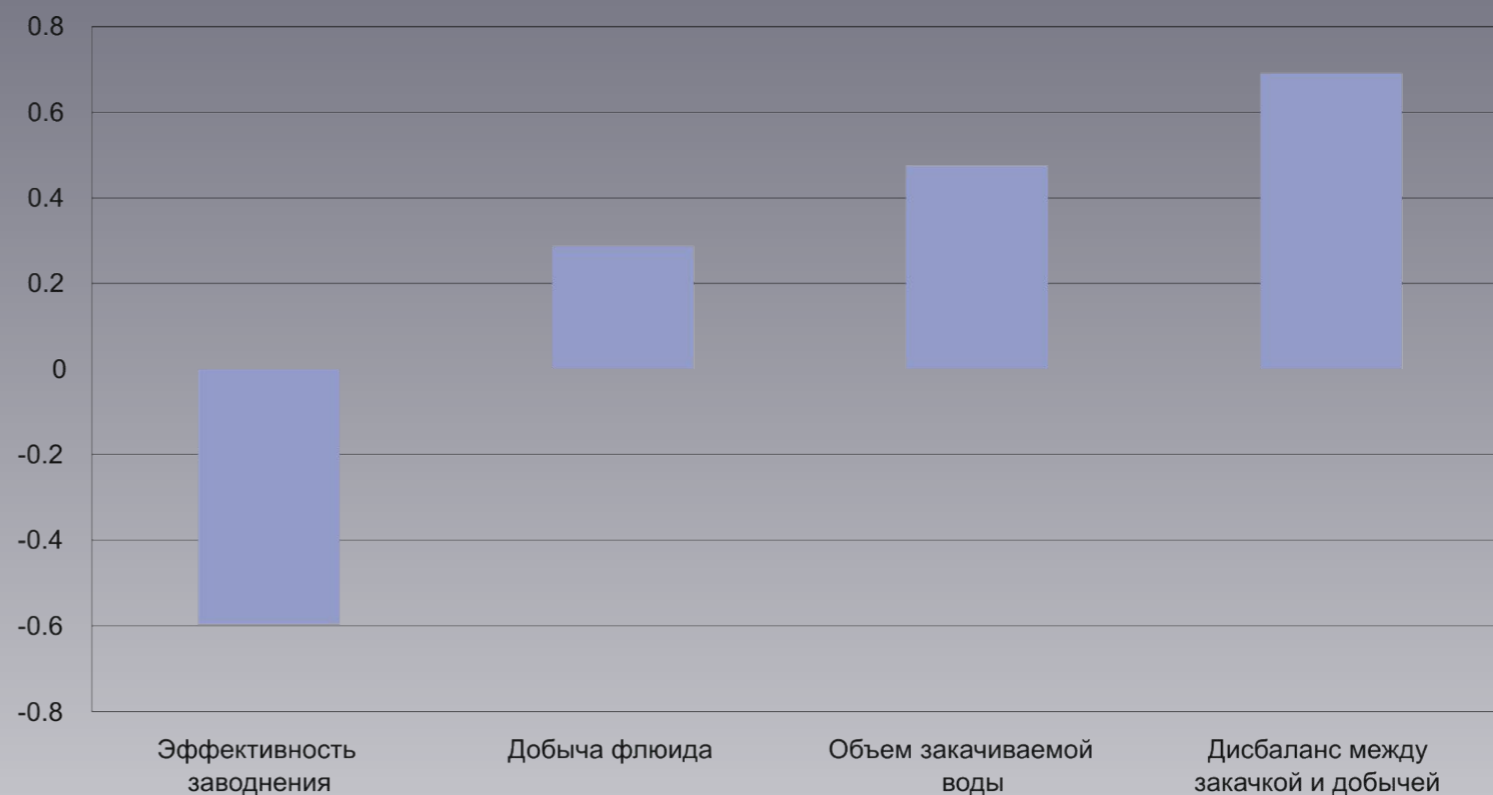
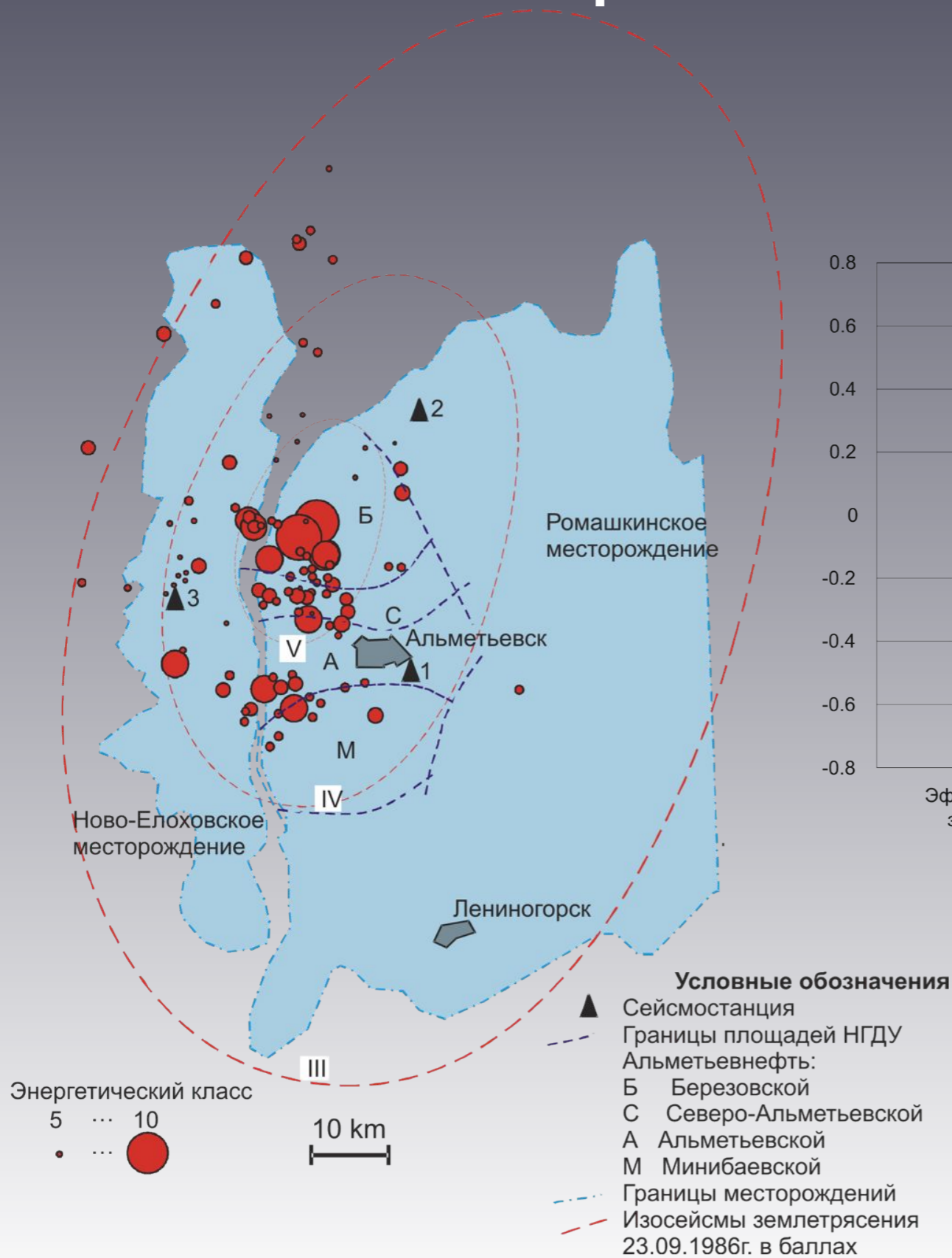
- Временная задержка - показатель «флюидного» механизма инициирования землетрясений.



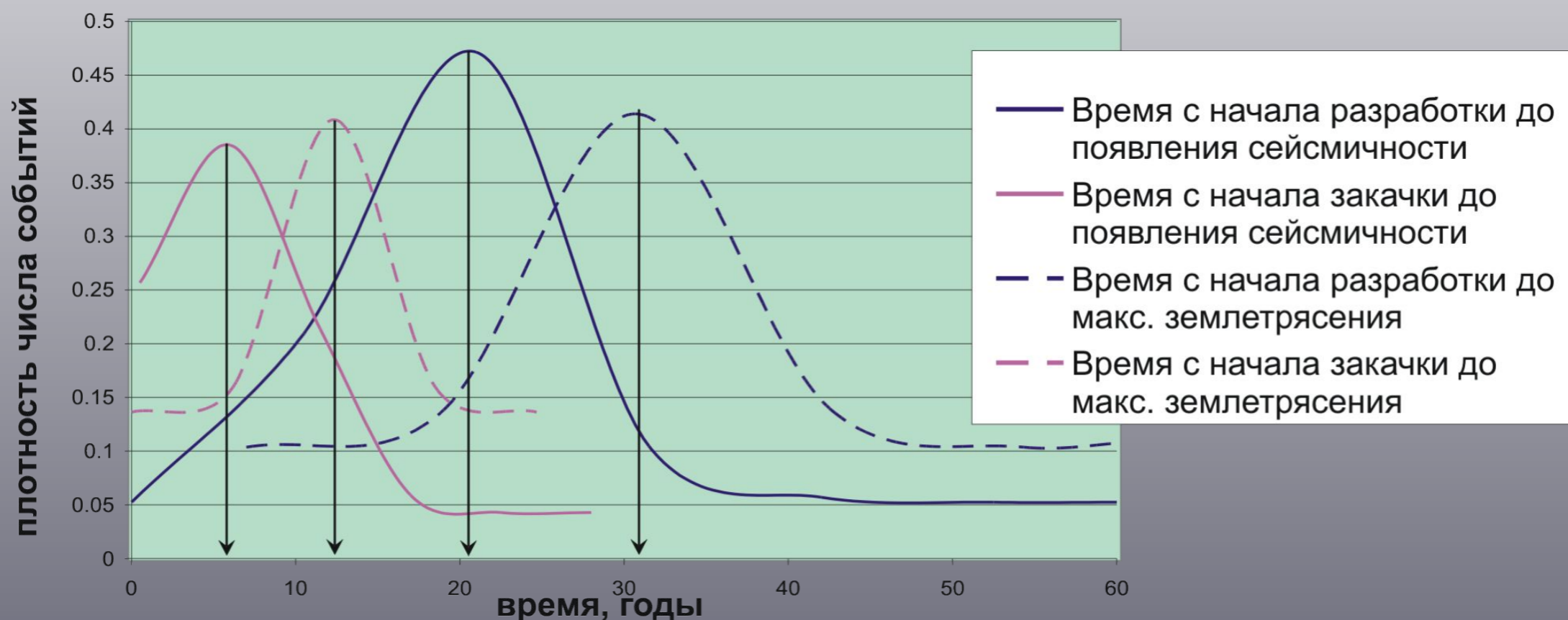
Закачка опасных отходов



Разработка месторождений нефти

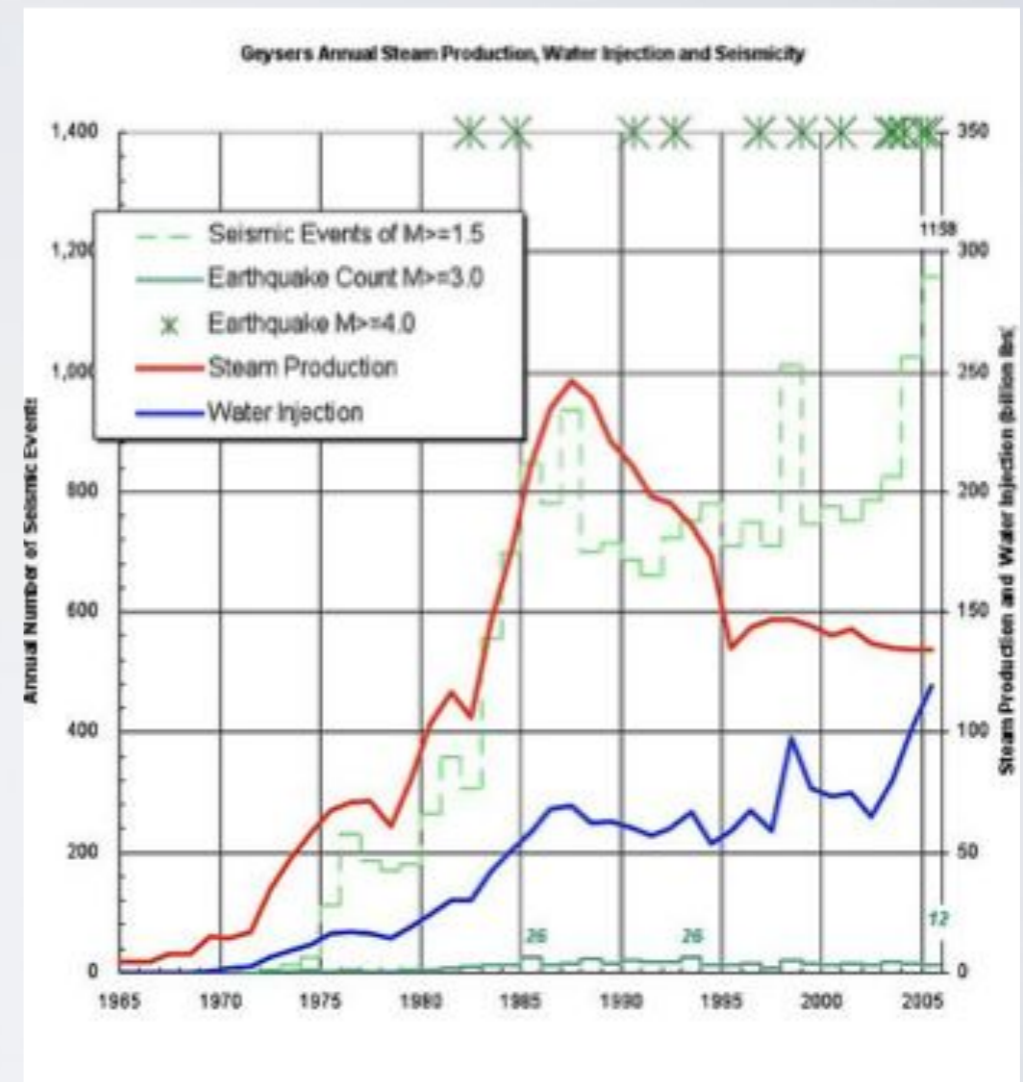


Временная задержка техногенной сейсмичности при разработке месторождений углеводородов

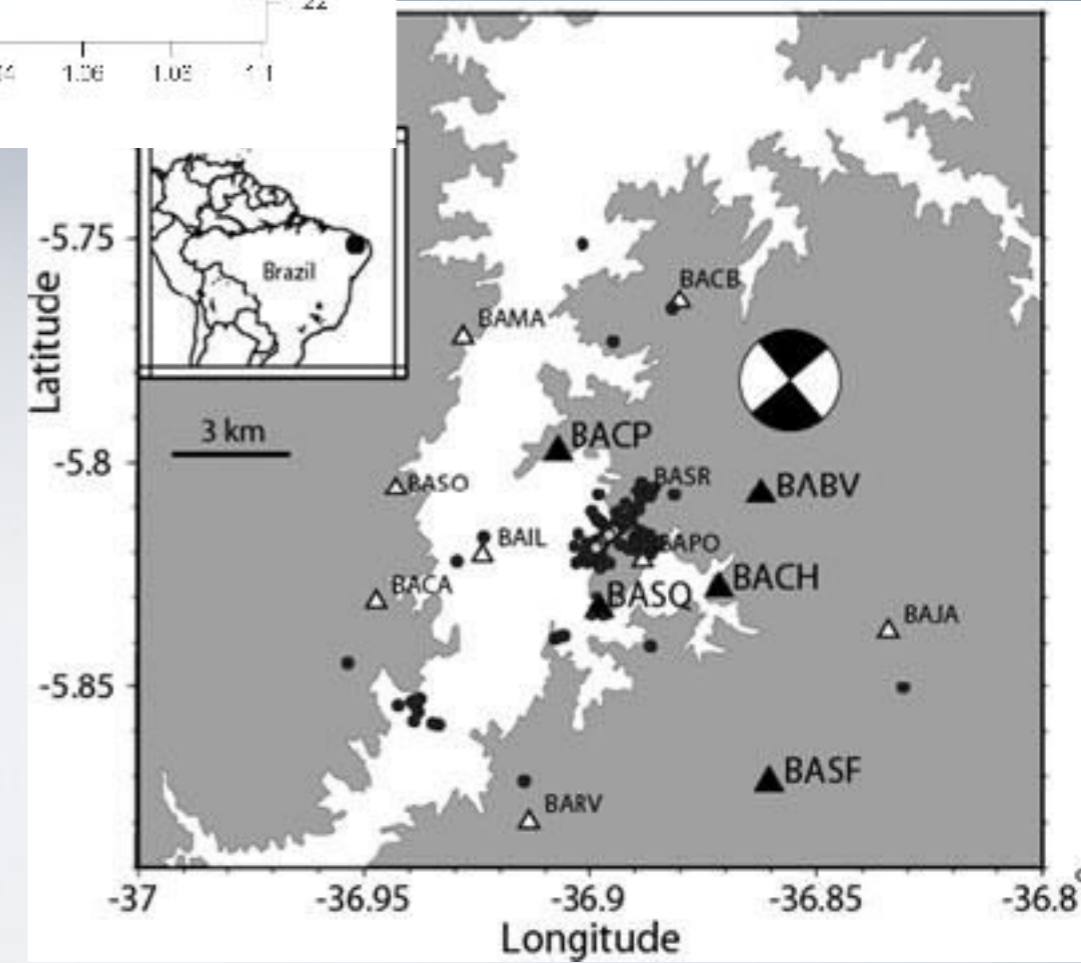
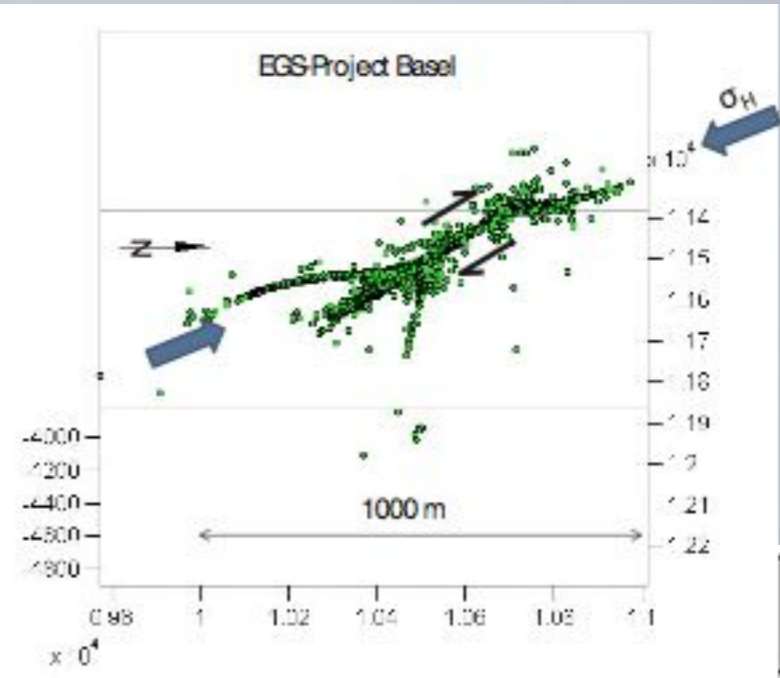
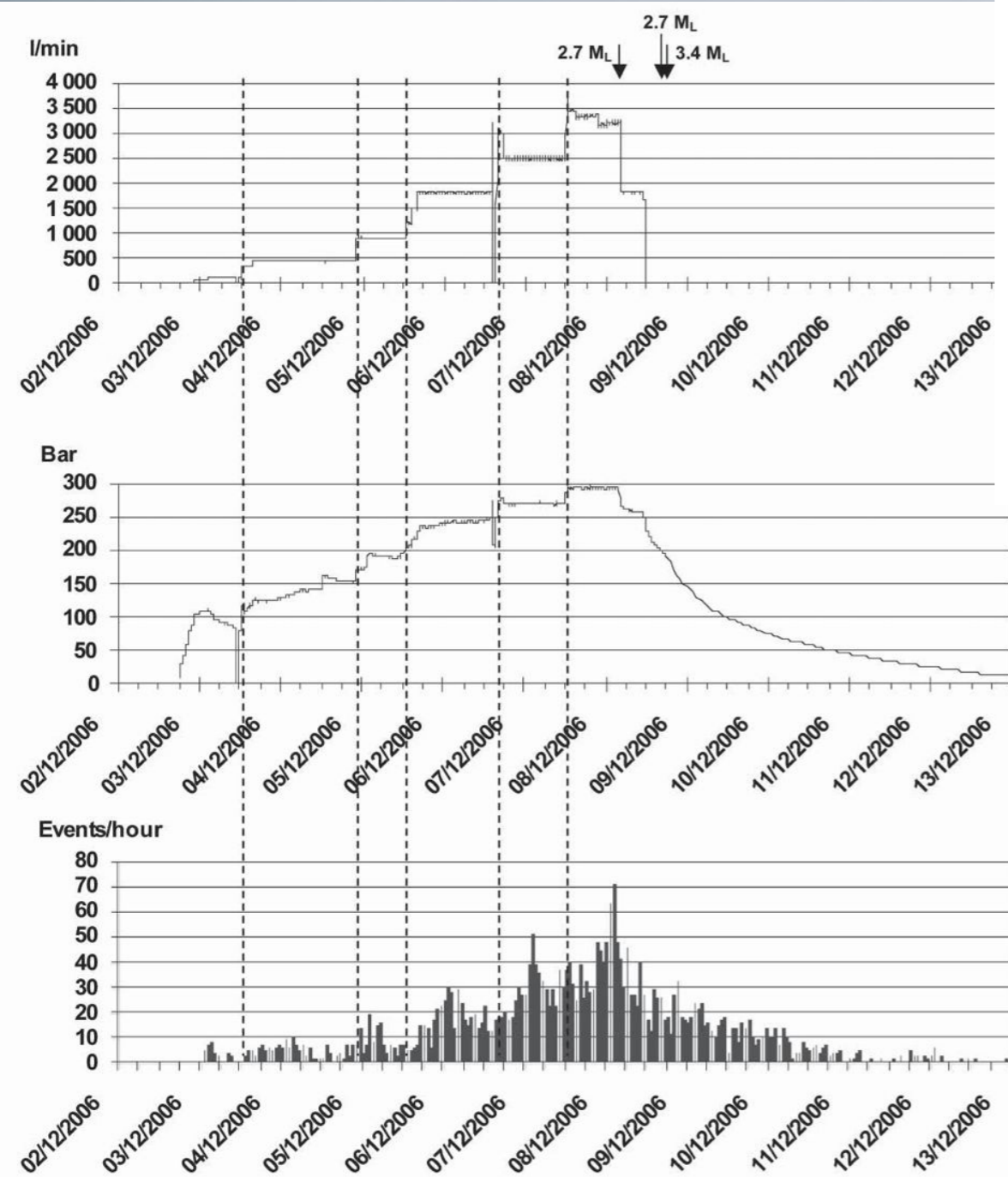
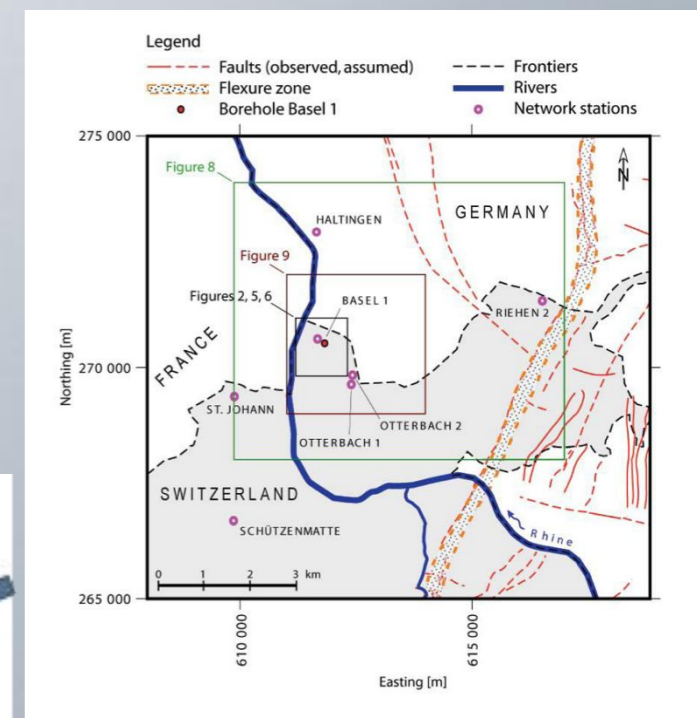


Геотермальные Электростанции

- Гейзеры расположены к северу от Сан-Франциско, Калифорния, и представляют собой комплекс из 22 геотермальных электростанций, использующих пар из более чем 350 источников.
- Район характеризуется высокой сейсмической активностью.
- Рост объемов закачки для поддержания объемов пара сопровождается увеличением сейсмичности



Базельский проект

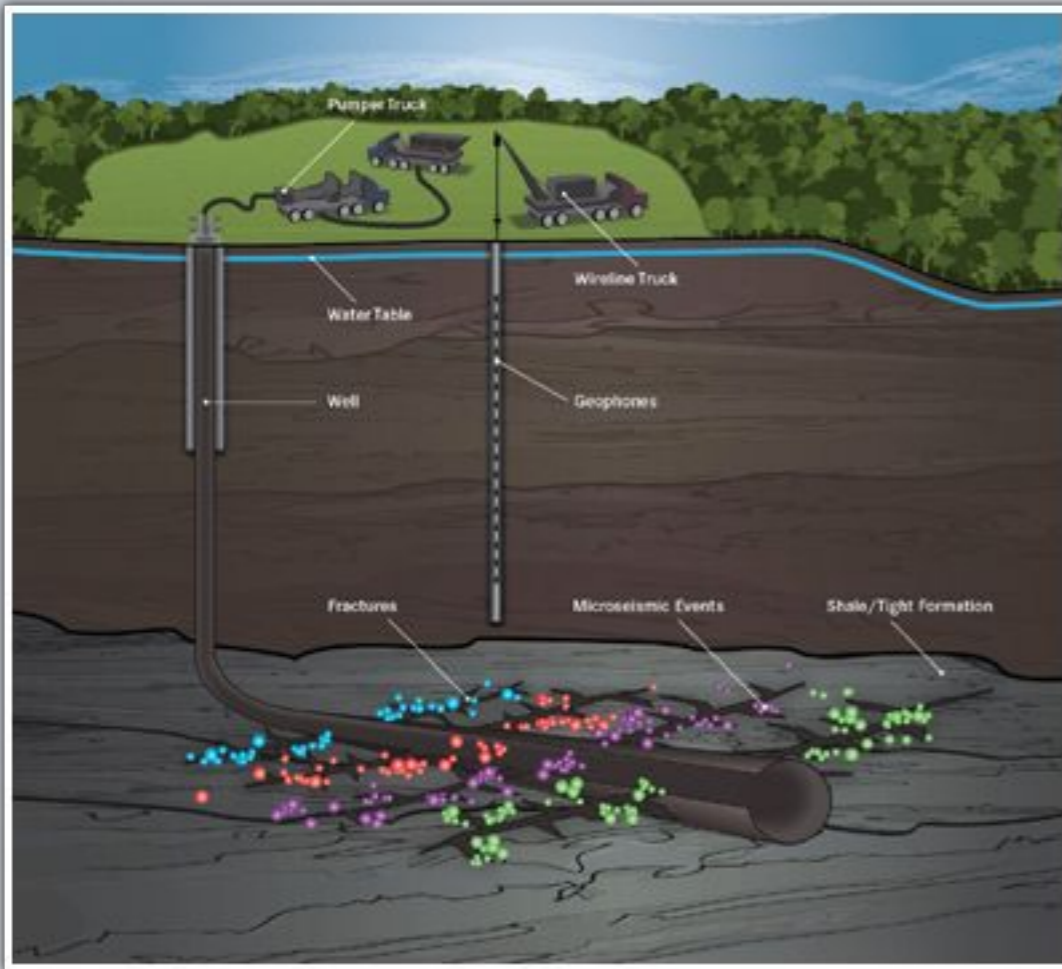


Усиление сейсмической активности при закачке воды в глубокие скважины на геотермальных электростанциях привело к остановке проекта в Базеле, Швейцария, в который были инвестированы миллионы евро, угрожает остановке аналогичных проектов (стоимостью до 100 миллионов евро) на юге Германии и других регионах Европы.

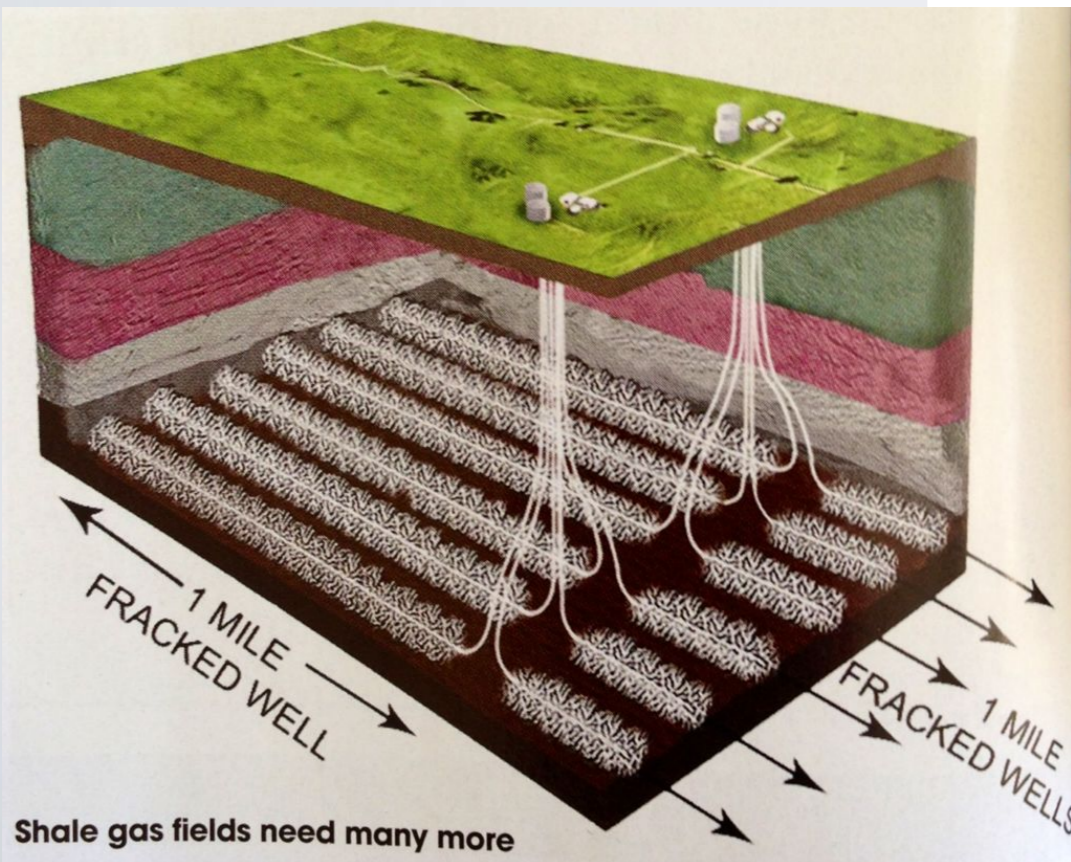
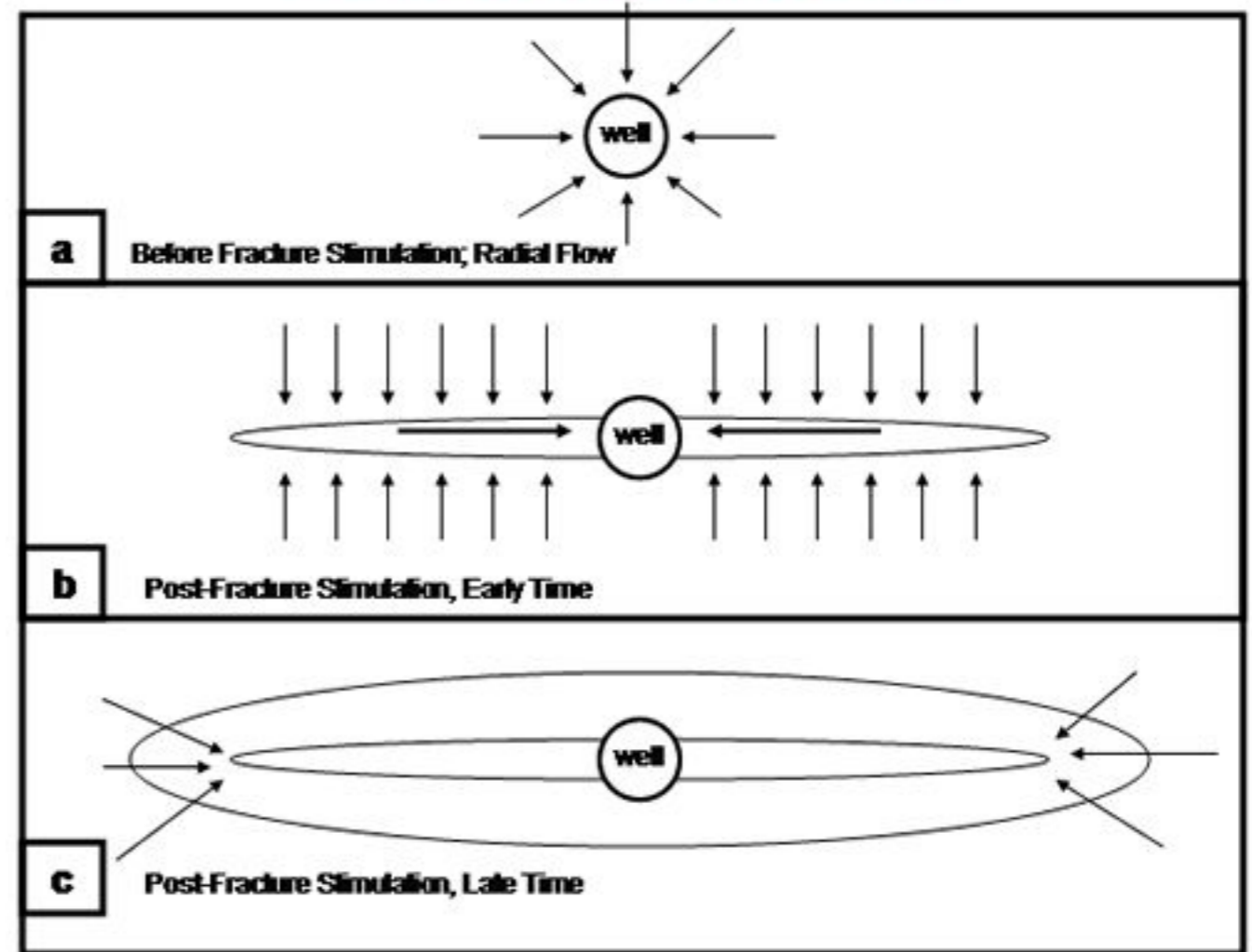
Гидроразрыв пласта

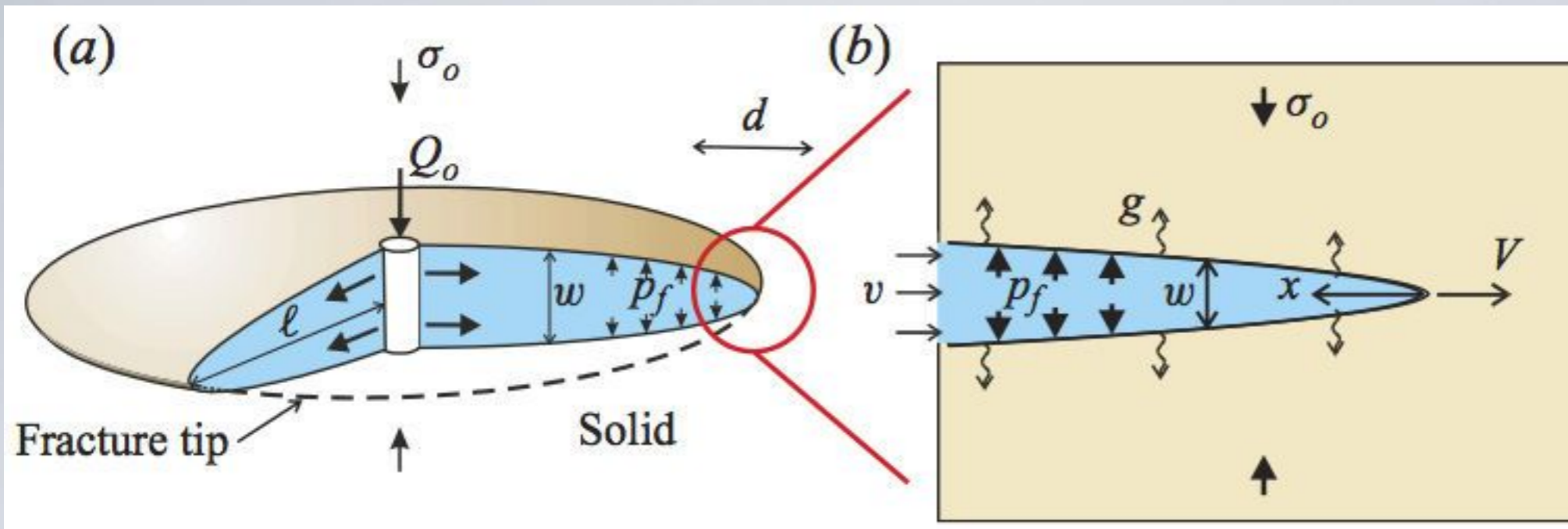


Зачем грп?



Why does fracturing work?





Fractures and Fracturing:
Hydraulic Fracturing in Jointed Rock
Charles Fairhurst

Первая теория ГРП предложена в России в 50-х годах прошлого столетия С.А. Христиановичем и Ю.П. Желтовым. В основе модели лежит гипотеза о том, что передний край трещины свободно движется и в верхнем, и в нижнем слое пласта. Результирующим вертикальным сечением трещины является прямоугольник. В 1957 г. были сформулированы классические представления [Hubbert M.K. & Willis D.G., 1957] о том, что трещины «приблизительно перпендикулярны осям наименьшего напряжения».

- Уравнение ширины трещины ГРП Перкинса-Керна

$$w_0(x) = w_{w,0} \left(1 - \frac{x}{x_f} \right)^{1/4}$$

$$w_{w,0} = 3,57 \left(\frac{\mu q_i x_f}{E'} \right)^{1/4}$$

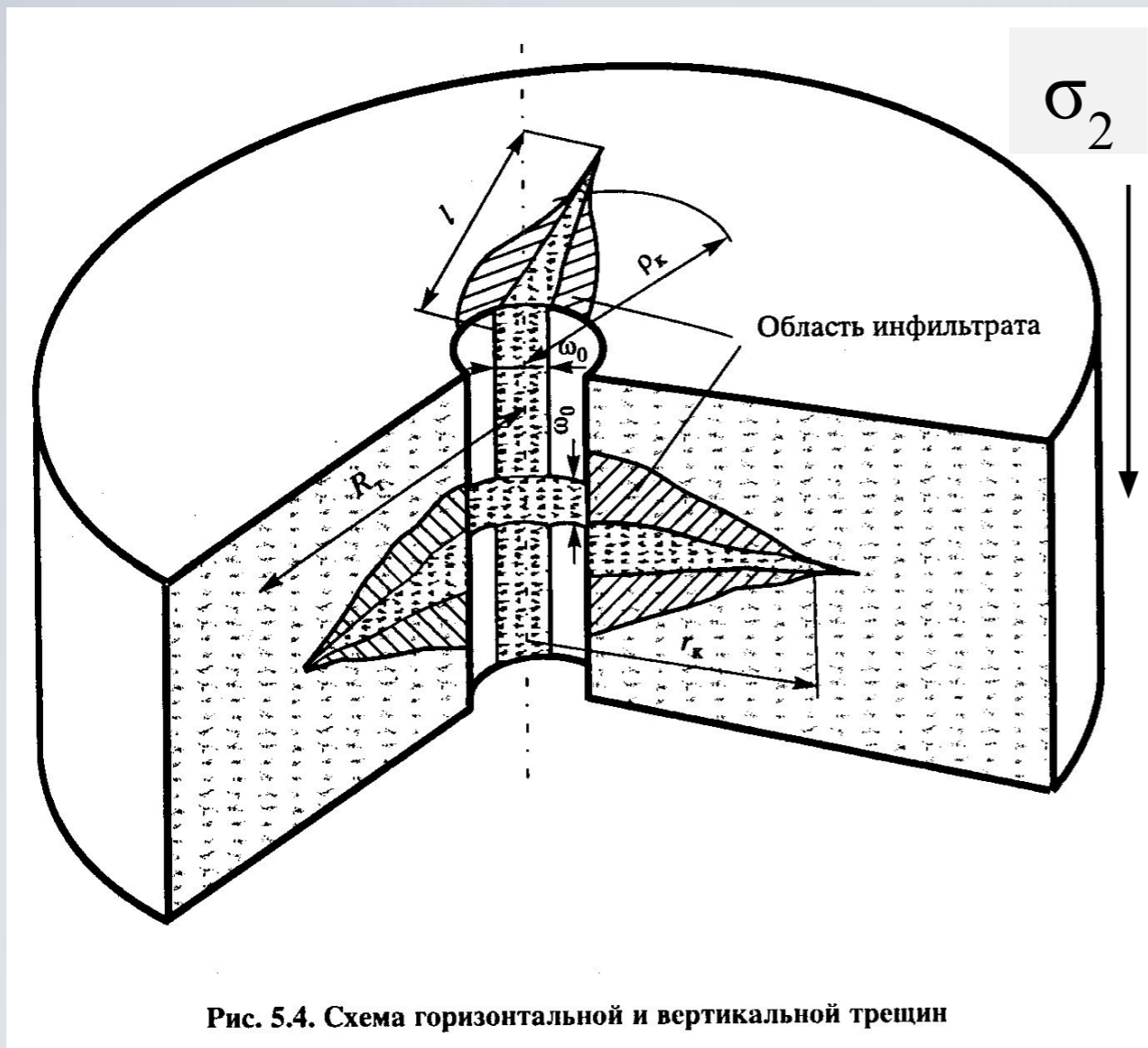
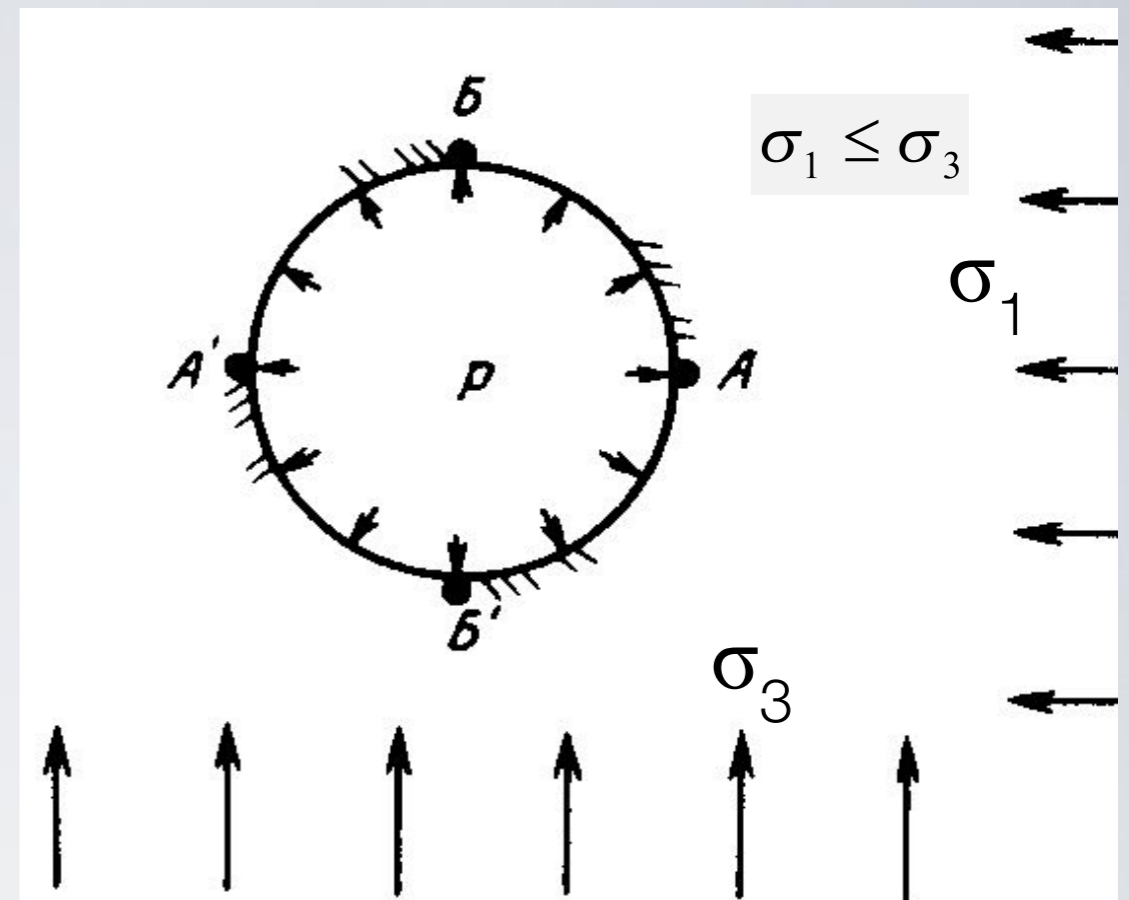


Рис. 5.4. Схема горизонтальной и вертикальной трещин



Условие образования вертикальной трещины

$$\sigma_{\theta} - p = 3 \cdot \sigma_1 - \sigma_3 - p = T, (*)$$

T – прочность породы на растяжение

Условие образования

горизонтальной трещины

$$\sigma_2 - p = T,$$

Горизонтальная трещина образуется в случае:

$$\sigma_2 \leq 3\sigma_1 - \sigma_3$$

Технология проведения ГРП

1. **Подготовка скважины** — исследование на приток или приемистость, что позволяет получить данные для оценки давления разрыва, объема жидкости разрыва и других характеристик.
2. **Промывка скважины** — скважина промывается промывочной жидкостью с добавкой в нее определенных химических реагентов.
3. **Закачка жидкости разрыва.** Жидкость разрыва — тот рабочий агент, закачкой которого создается необходимое для разрыва горной породы давление для образования новых и раскрытия существовавших в ПЗС трещин. Объемная скорость закачки жидкости разрыва должна удовлетворять в каждый момент времени условию, когда скорость закачки опережает скорость поглощения жидкости пластом.
В случае низкопроницаемых пластов используются жидкости невысокой вязкости при ограниченной скорости их закачки.
Если породы достаточно хорошо проницаемы, то необходимо использовать жидкости разрыва повышенной вязкости.
Момент образования трещины в монолитном коллекторе характеризуется изломом на зависимости «объемный расход жидкости закачки — давление закачки» и значительным снижением давления закачки.
Раскрытие уже существовавших в ПЗС трещин характеризуется плавным изменением зависимости «расход — давление», но снижения давления закачки не отмечается.

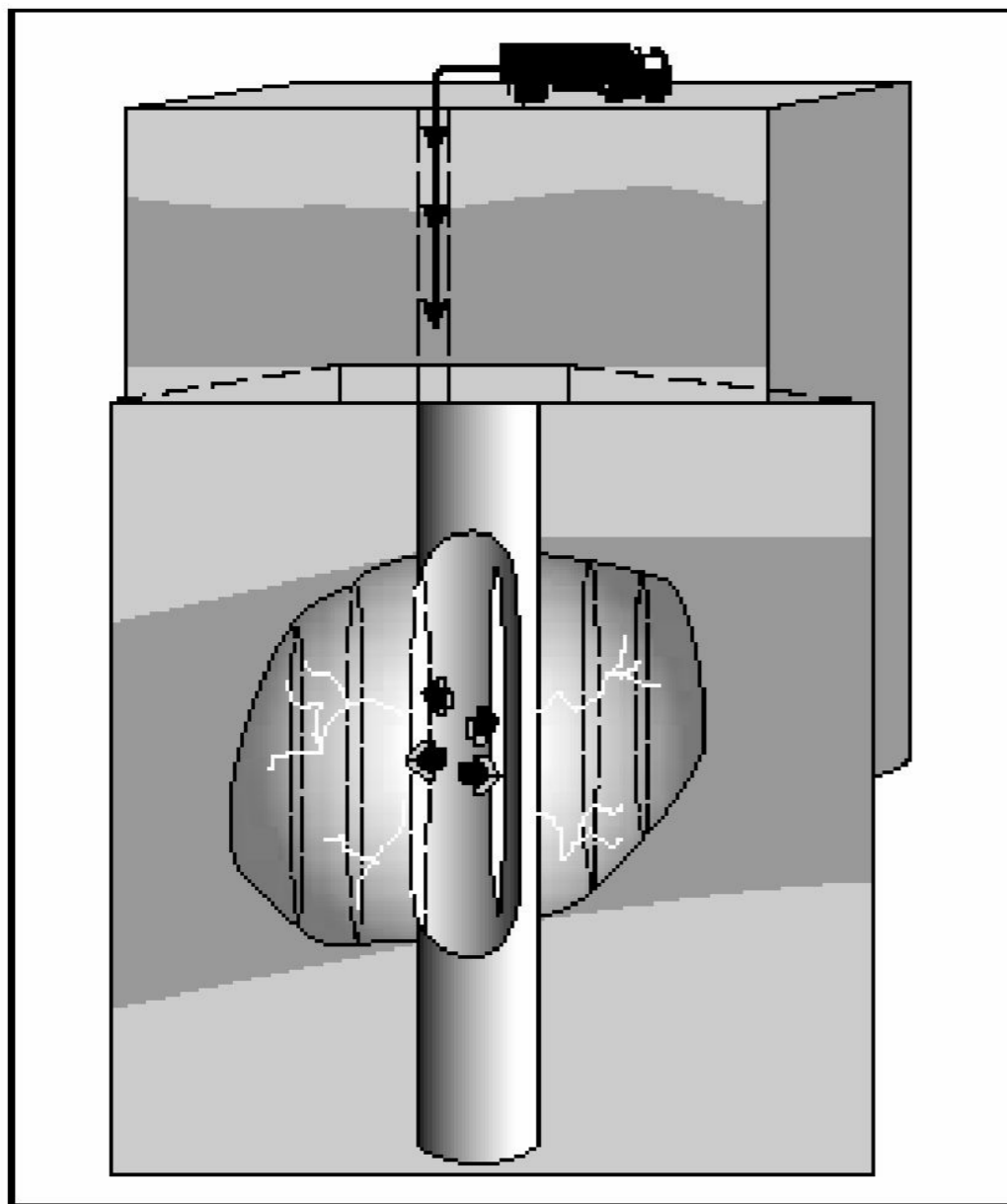


Figure 5-1. Internal pressure breaking a vertical wellbore.

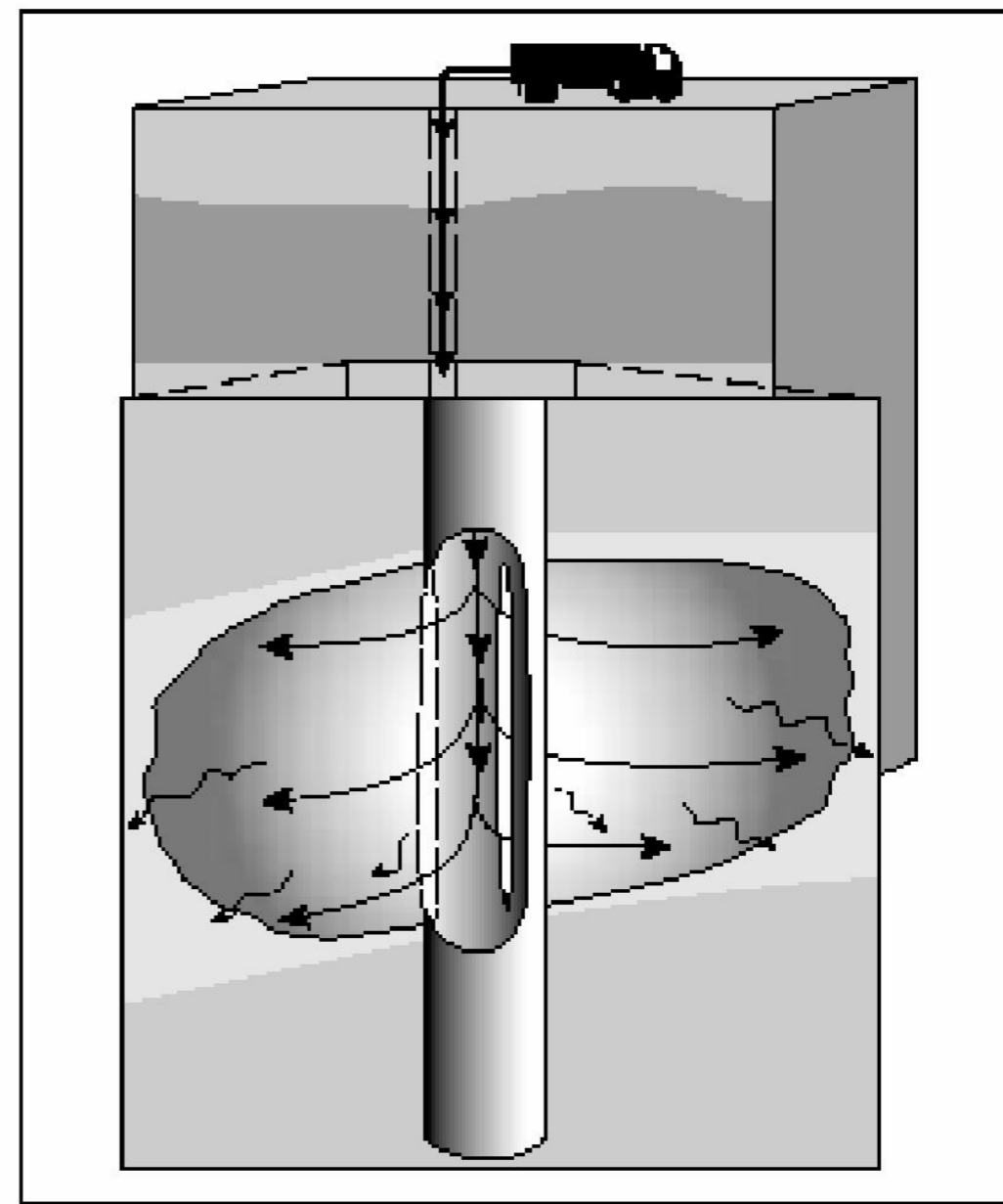


Figure 5-2. Cross-sectional view of a propagating fracture.

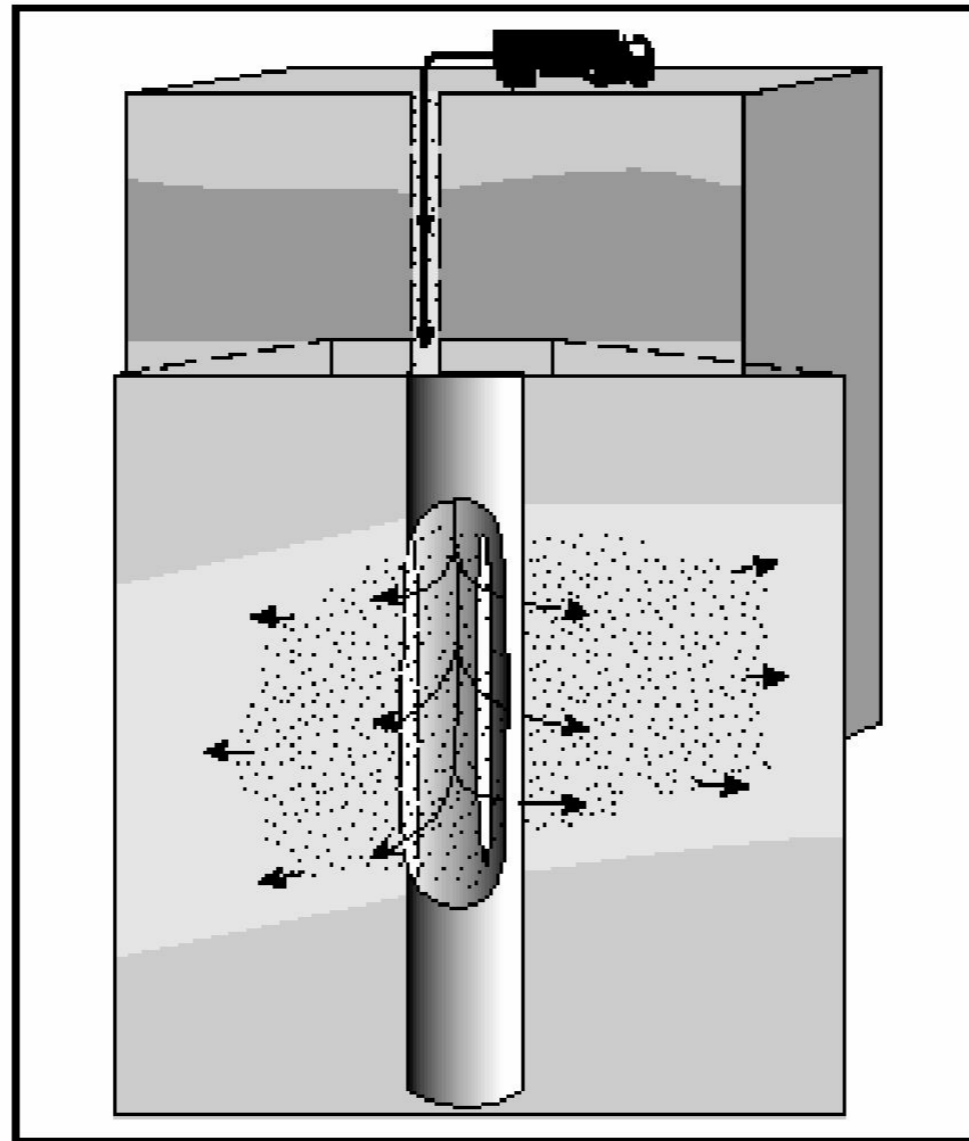


Figure 5-3. Introducing proppant into the fracture.

4. Закачка жидкости-носителя проппанта. Песок или другой материал (проппант), закачиваемый в трещину, служит наполнителем трещины, являясь, по существу, каркасом внутри нее и предотвращает смыкание трещины после снятия (снижения) давления. Высокая вязкость
5. Закачка продавочной жидкости. Основной целью этой жидкости является продавка проппанта до забоя и внедрение его в трещины. Низкая вязкость.

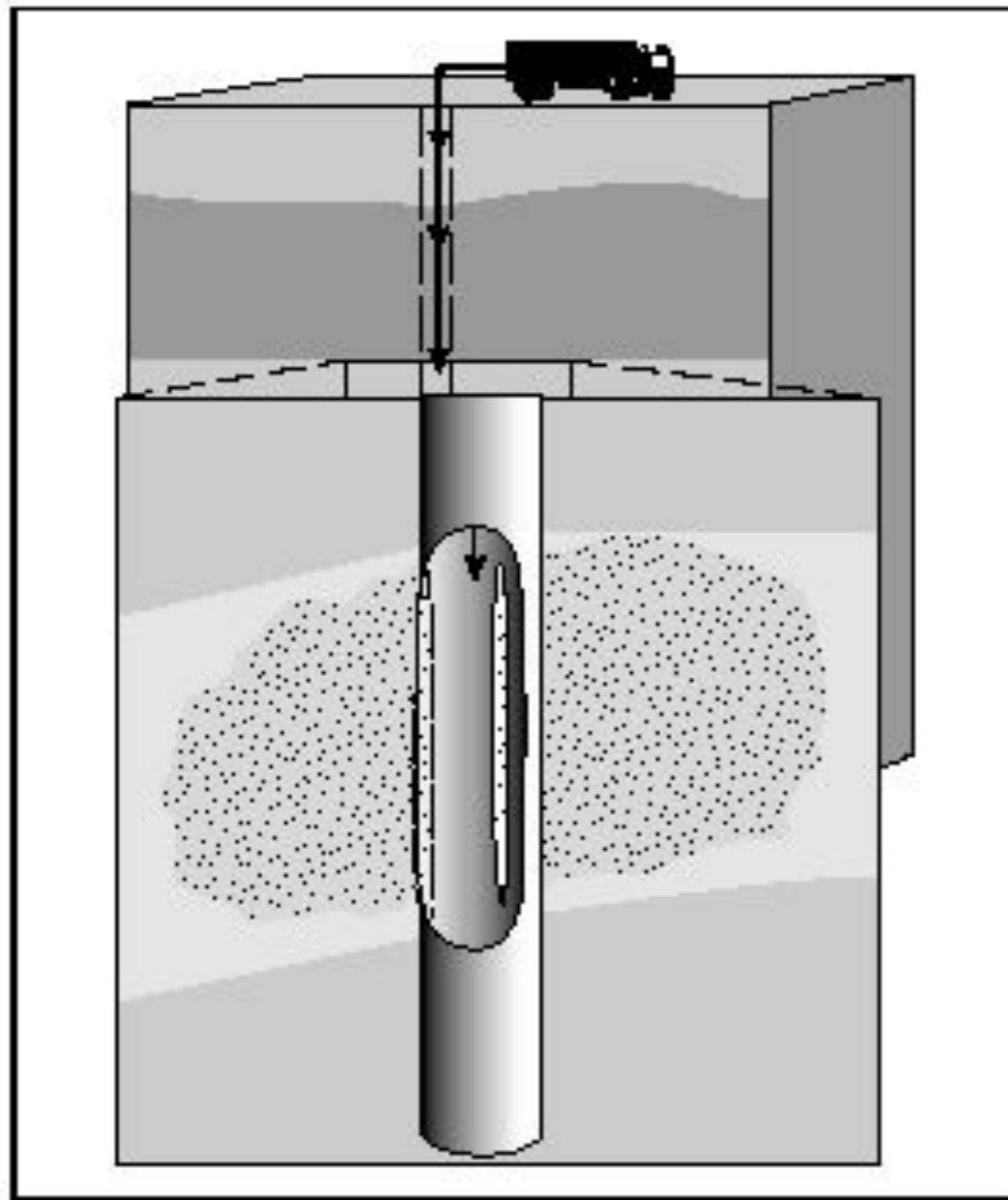


Figure 5-4. Flushing the wellbore to leave a propped fracture.

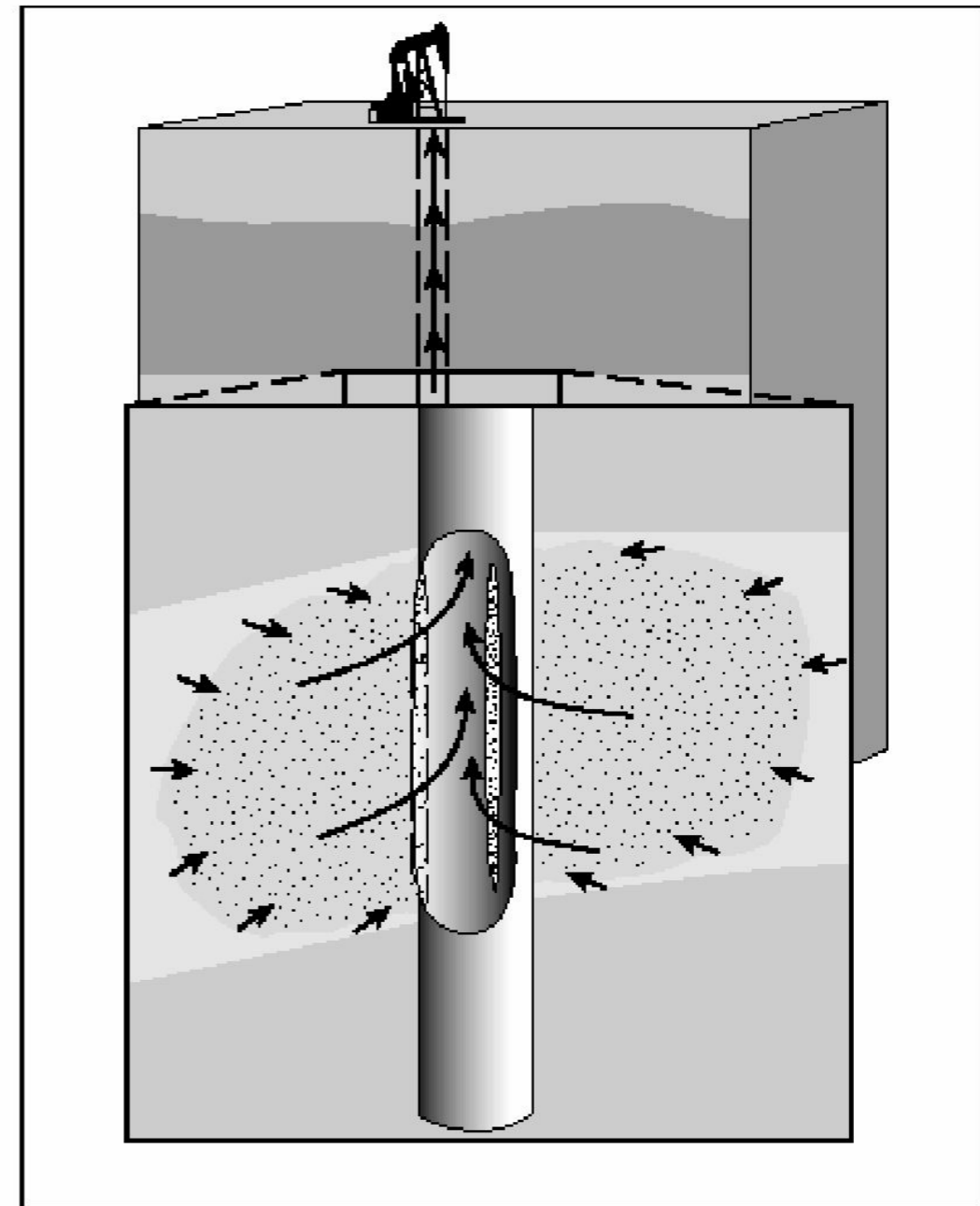
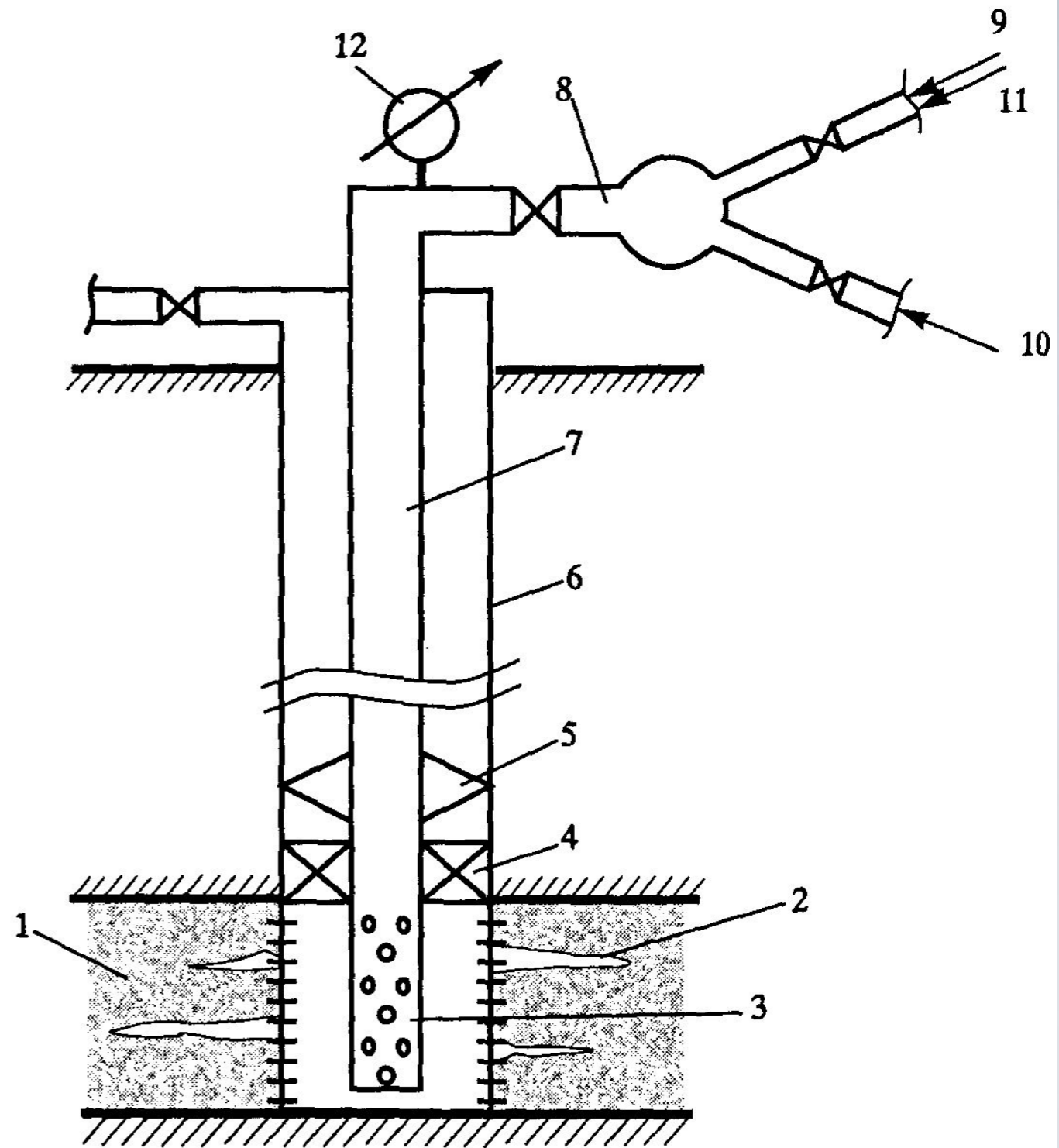
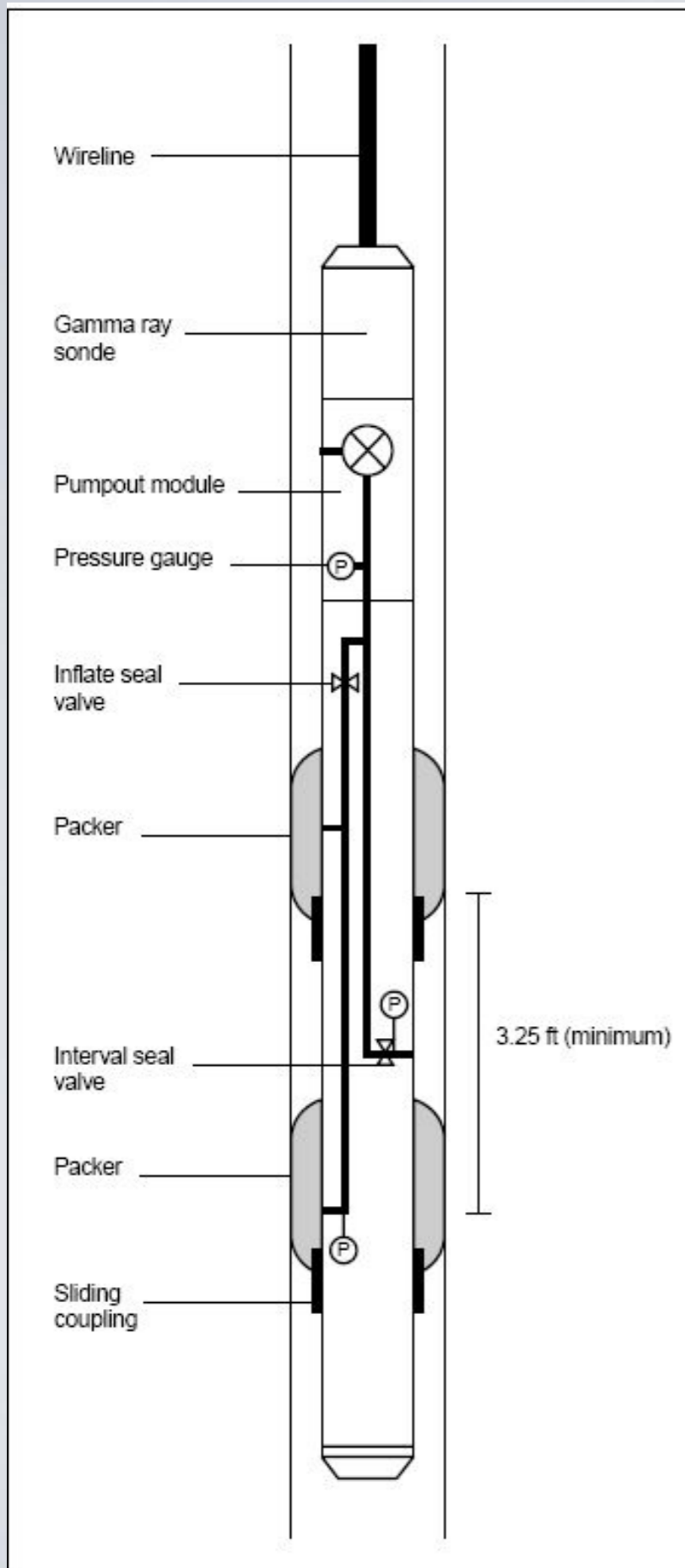


Figure 5-5. Increased flow area resulting from a fracture.

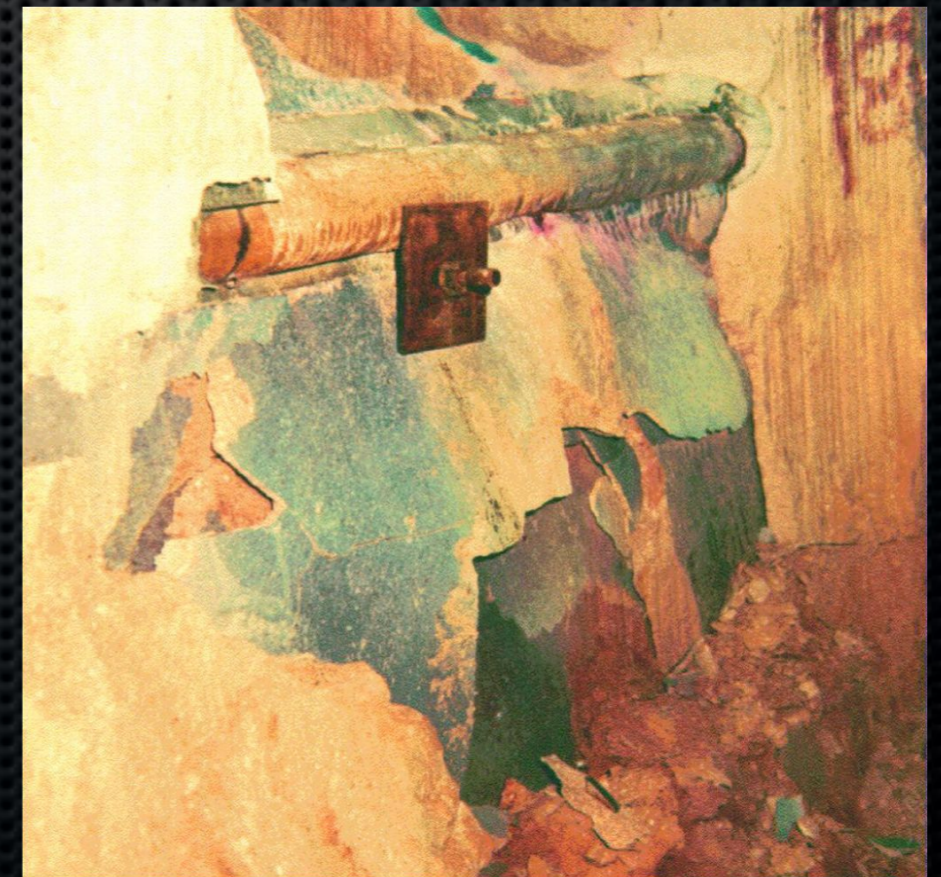
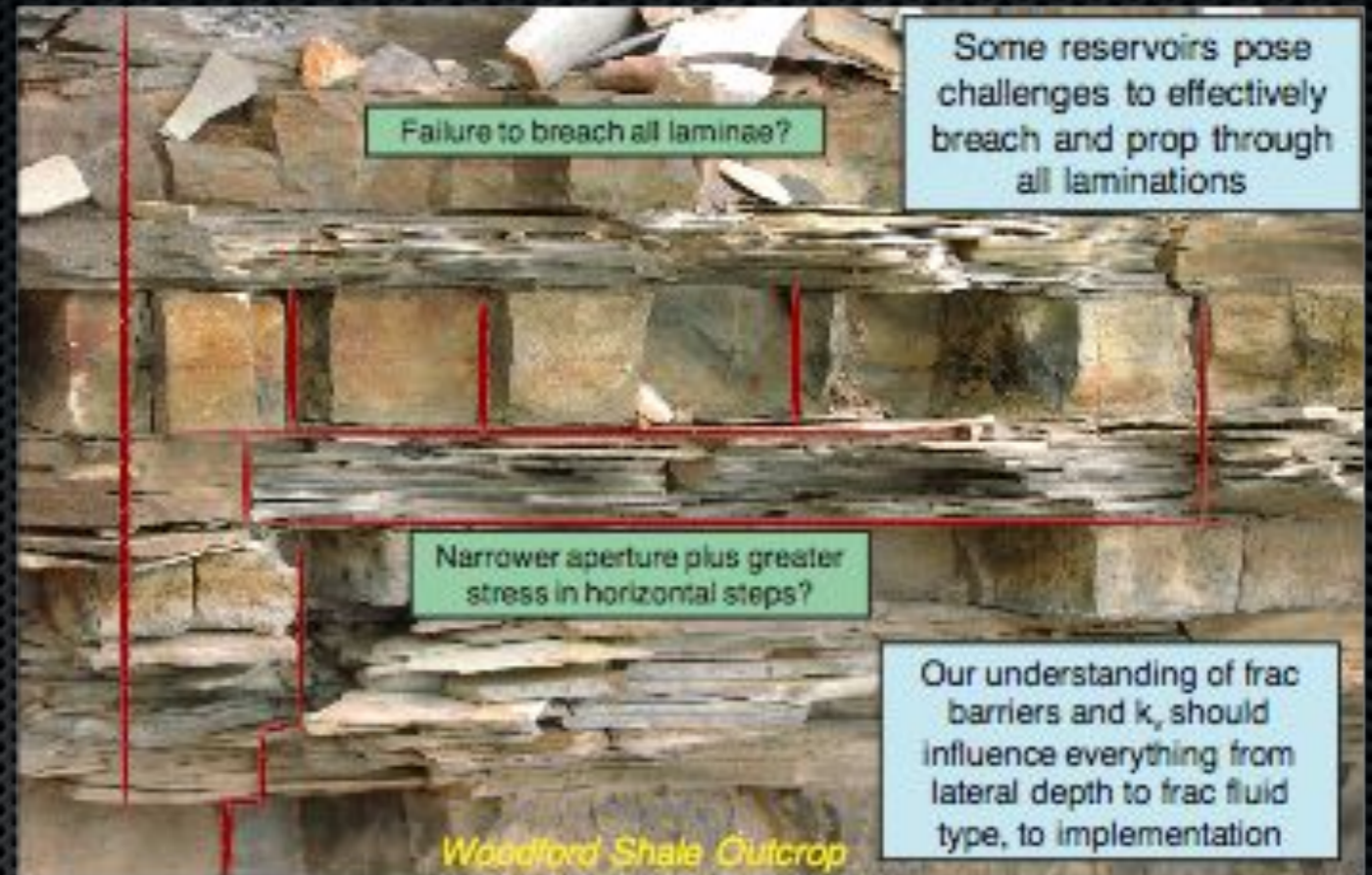
6. Выдержка скважины. Промывка.
7. Вызов притока, освоение скважины.



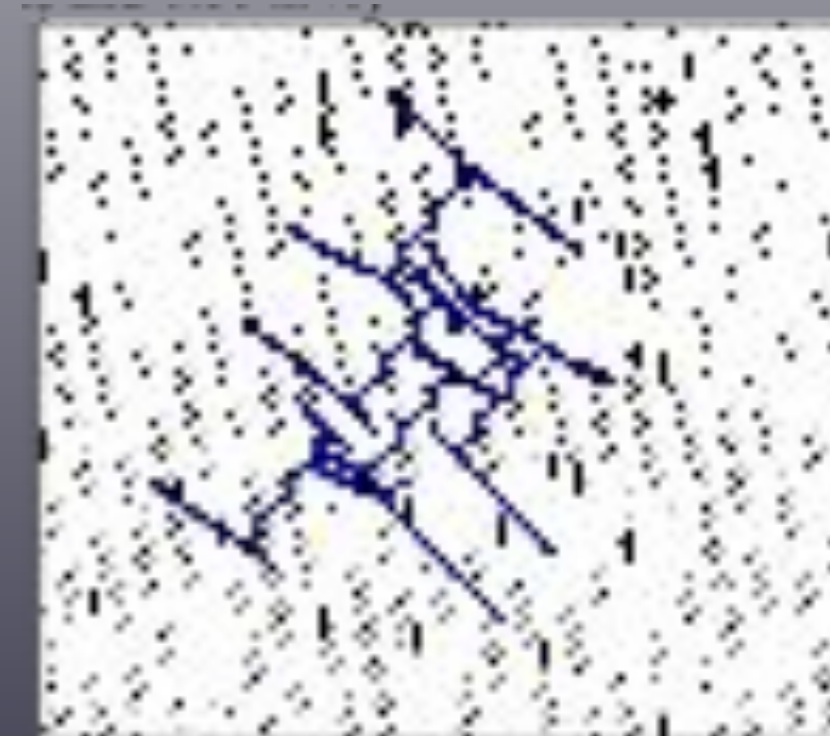
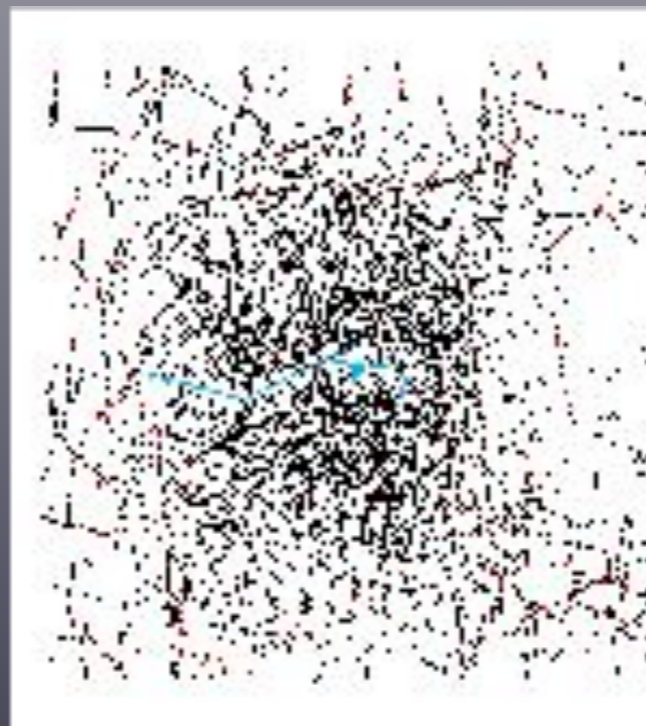
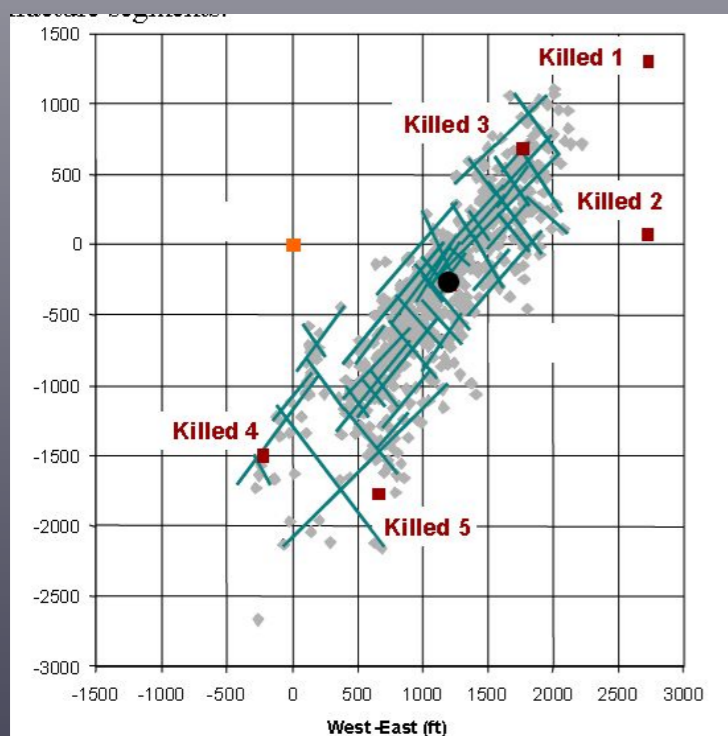
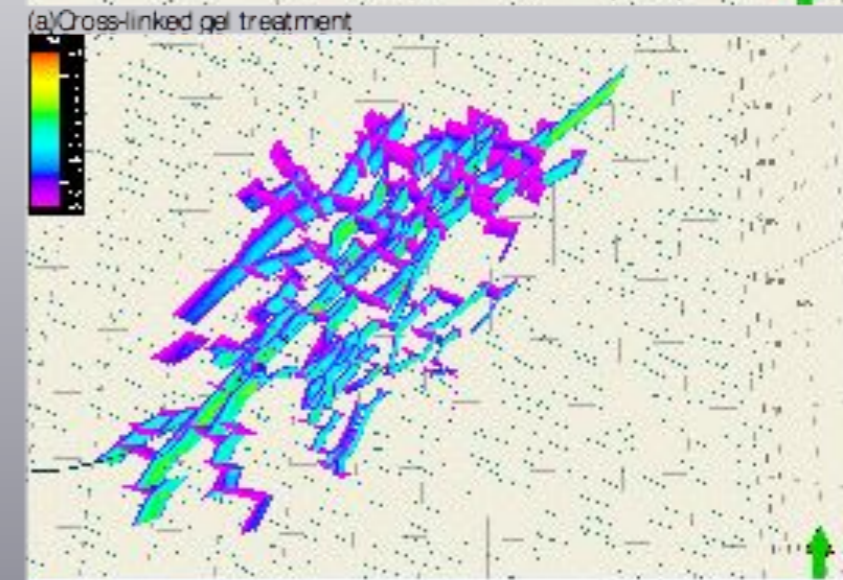
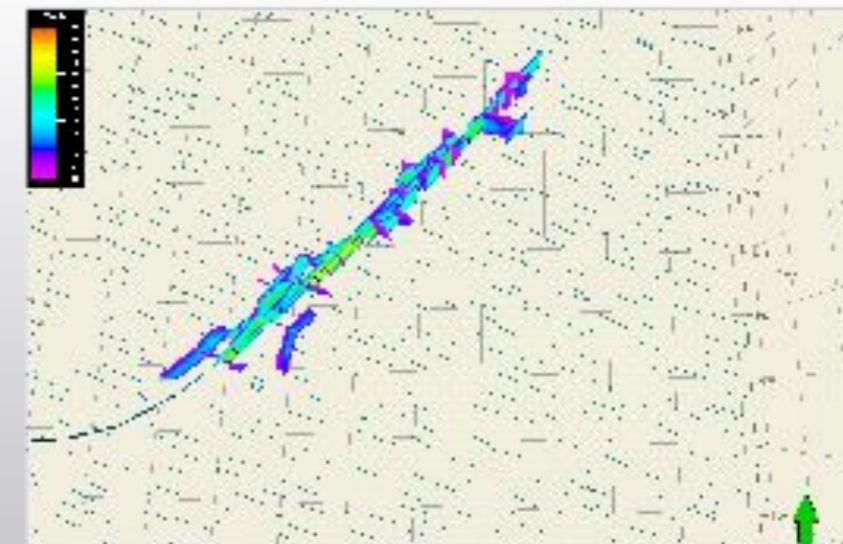
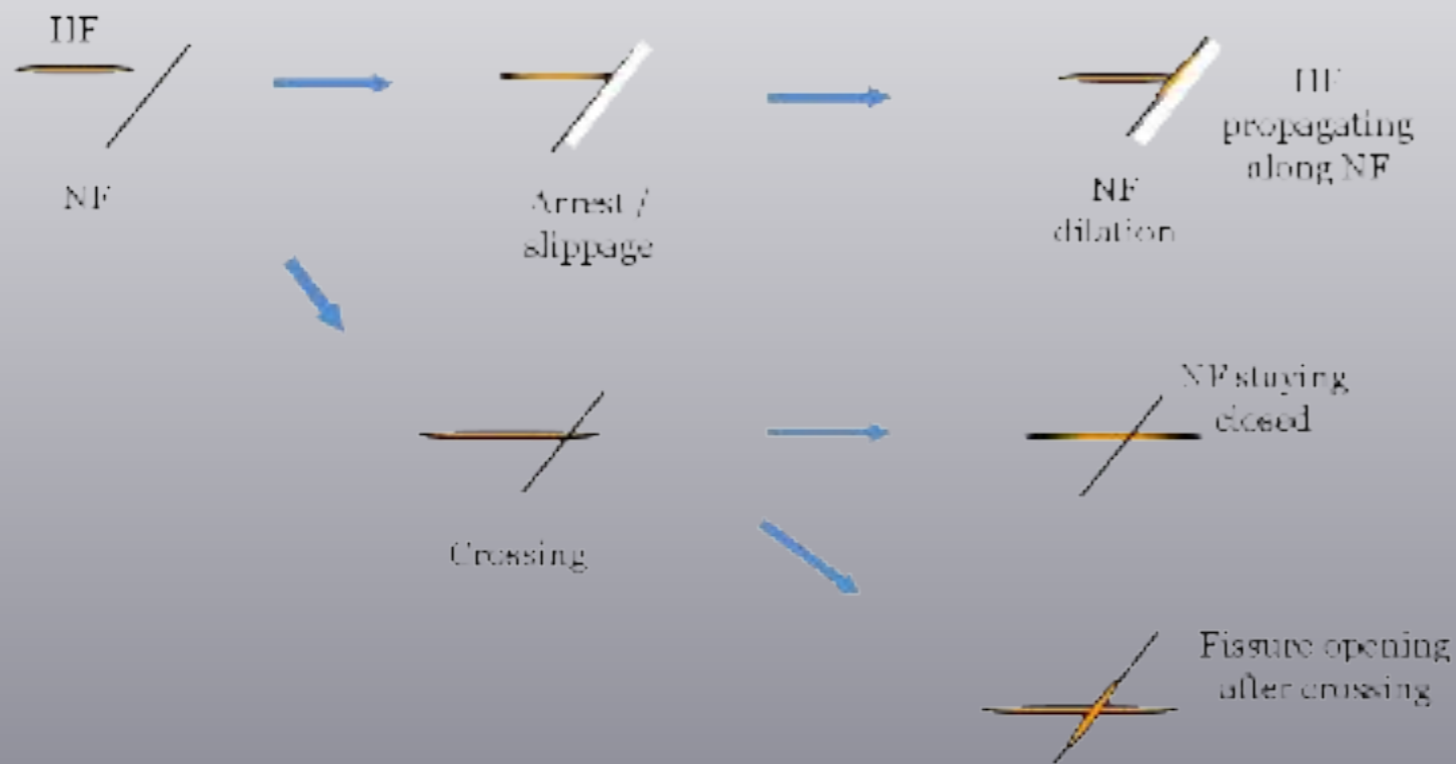
Принципиальная схема оборудования скважины для проведения ГРП:

1 — продуктивный пласт; 2 — трещина; 3 — хвостовик; 4 — пакер; 5 — якорь; 6 — обсадная колонна; 7 — колонна НКТ; 8 — устьевое оборудование; 9 — жидкость разрыва; 10 — жидкость-песконоситель; 11 — жидкость продавки; 12 — манометр

- Реальные трещины ГРП часто далеки от простых моделей



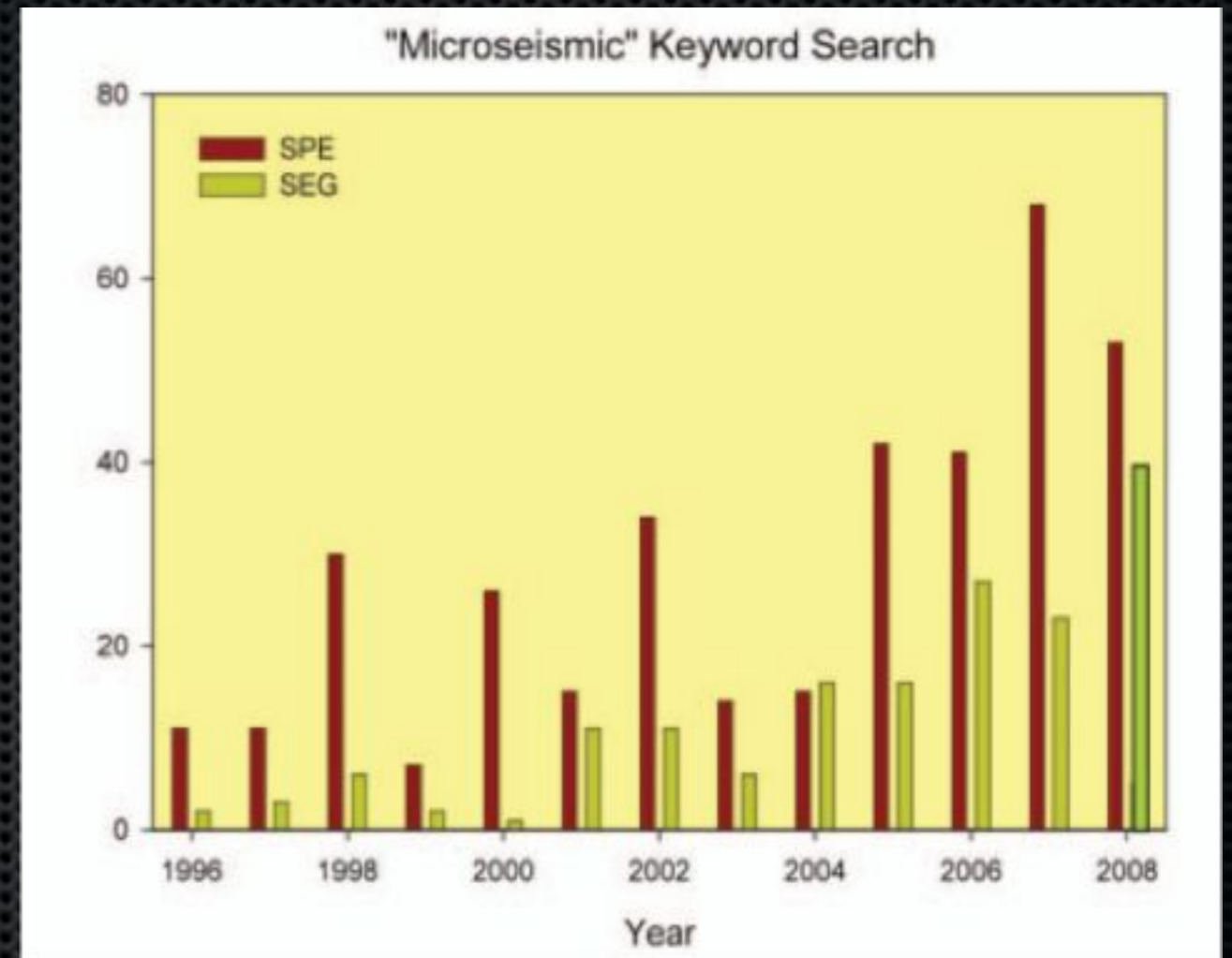
Взаимодействие трещин ГРП с естественными трещинами



Пассивный микросейсмический мониторинг на месторождениях углеводородов

1970-е – первые опыты ведения микросейсмического (МС) мониторинга на месторождениях УВ
1980-90-е годы – ряд проектов по МС мониторингу, в основном в США, крупнейший – Cotton Valley Consortium Project в 1997, начало коммерческих проектов

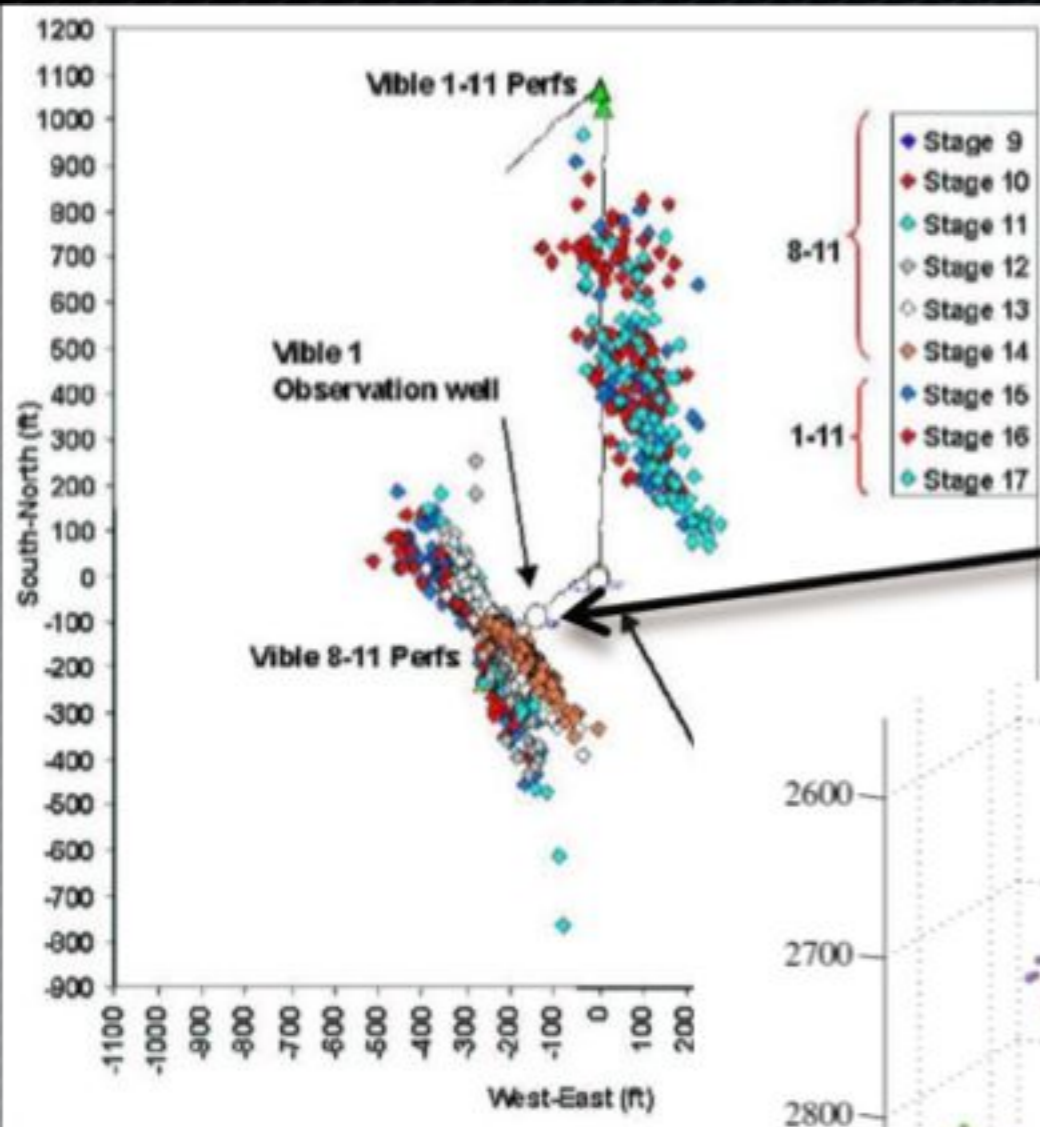
2000 – е годы – бурный рост проектов по МС мониторингу, в основном в США, около половины – на Barnett Shale, тысячи ГРП с применением МС мониторинга



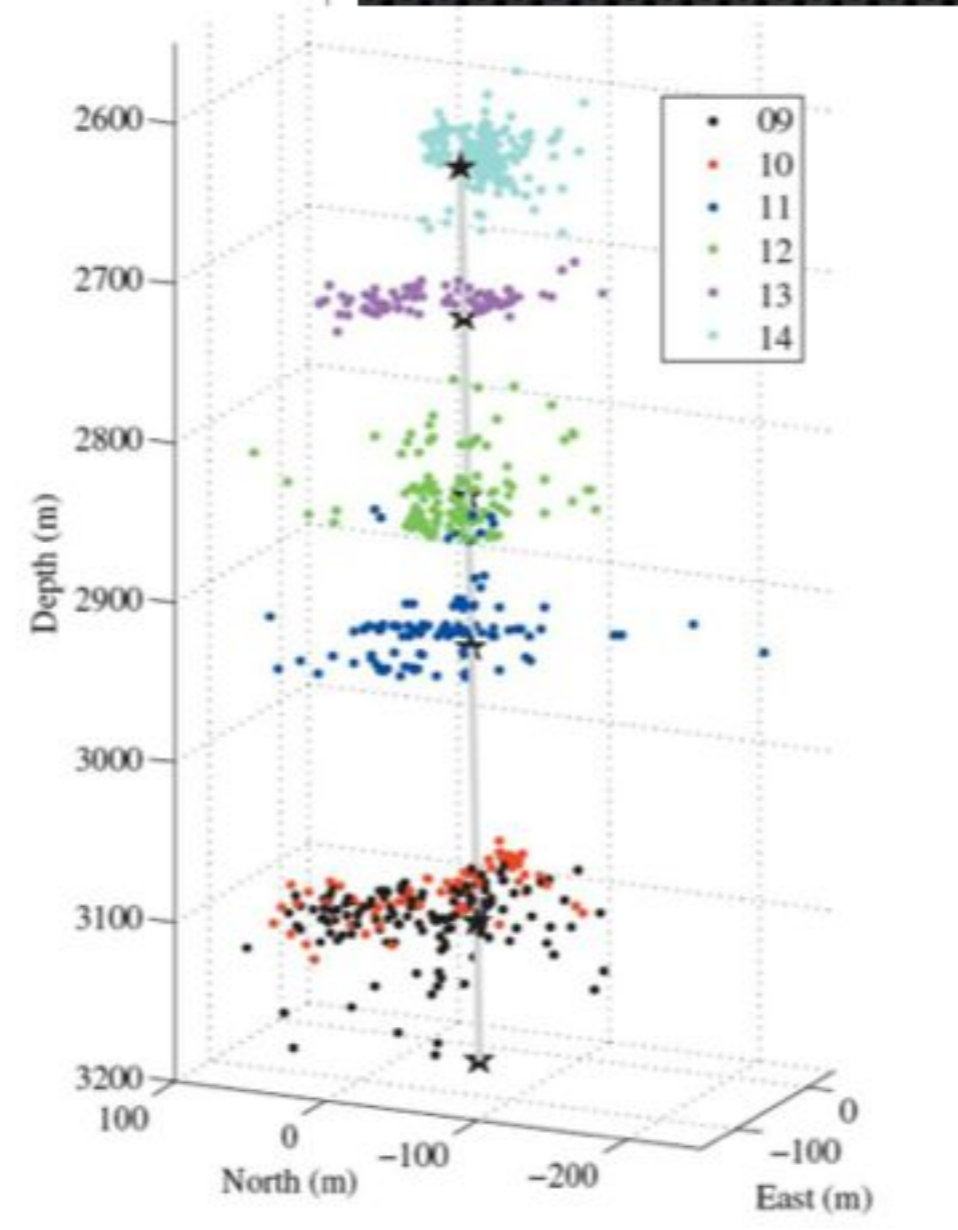
Гистограмма изменения результатов запросов по ключевому слову «микросейсмичность» в библиотеках SPE и SEG

Связь

микросейсмичности с трещинами ГРП



Геофоны
расположены
в скважине



Пример регистрации микросейсмических событий при проведении серии гидроразрывов пласта на разных глубинах в двух скважинах:
а) проекция гипоцентров микросейсмических событий на поверхность земли;
б) трехмерное изображение гипоцентров микросейсмических разрывов вблизи скважины 8-11

(из статьи V.Grechka, P.Mazumdar, S.Shapiro Predicting permeability and gas production of hydraulically fractured tight sands from microseismic data. GEOPHYSICS, V75, N1. 2010)

Активируемые разломы выявляются микросейсмическим мониторингом

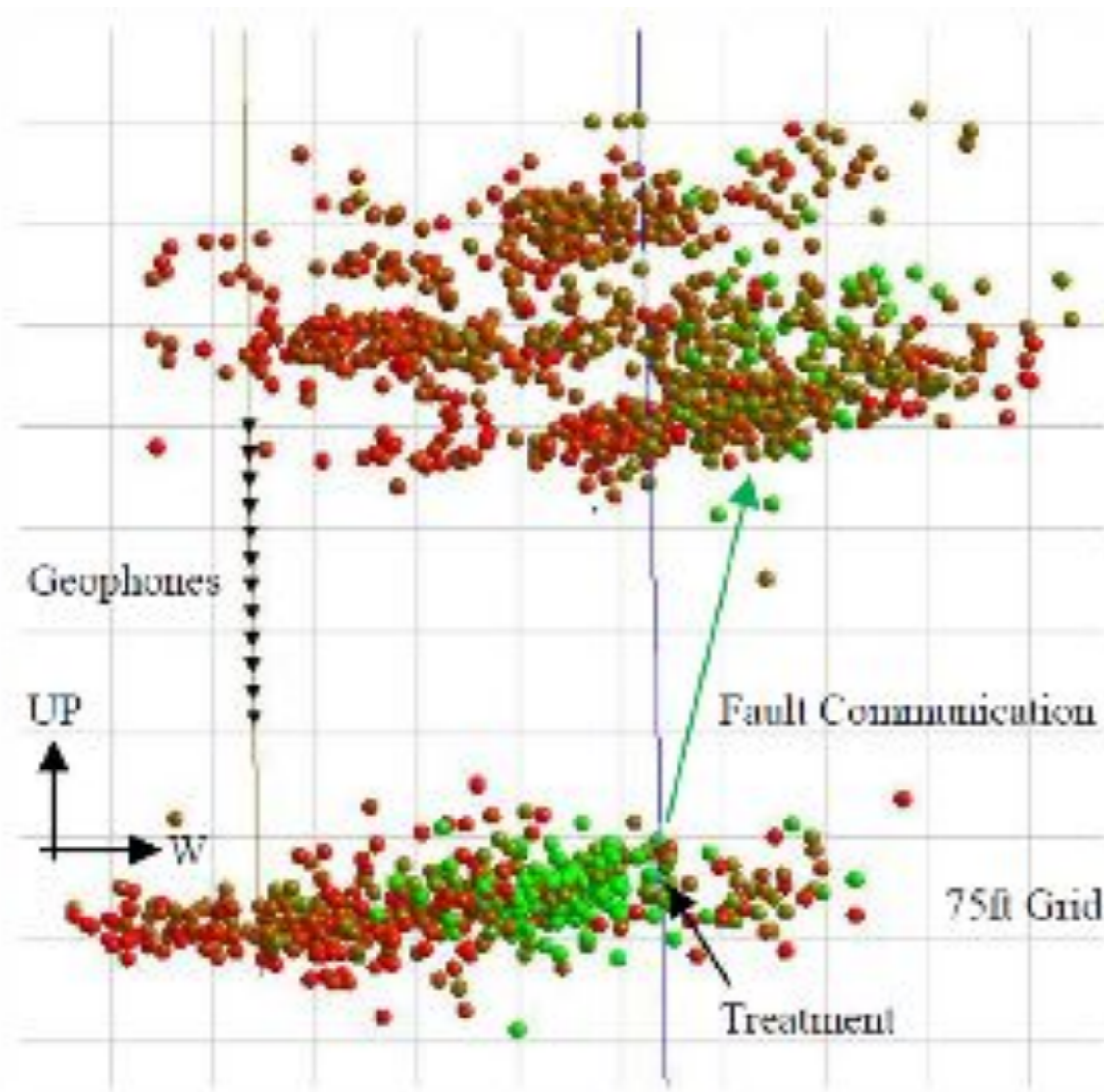
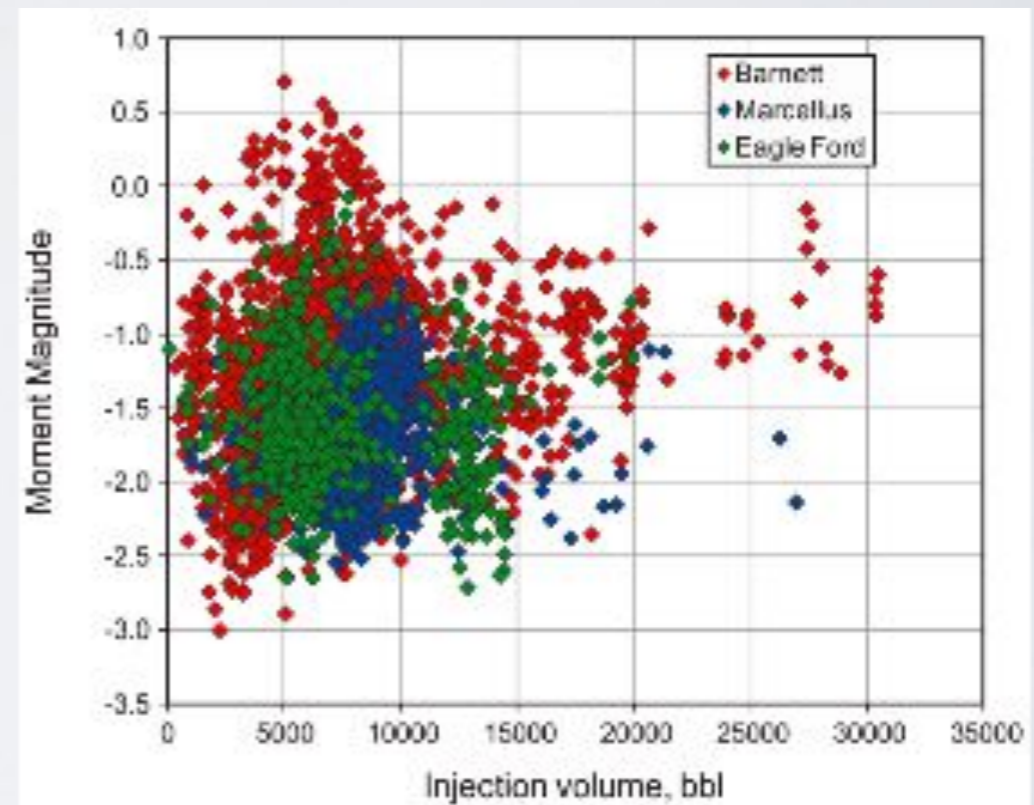
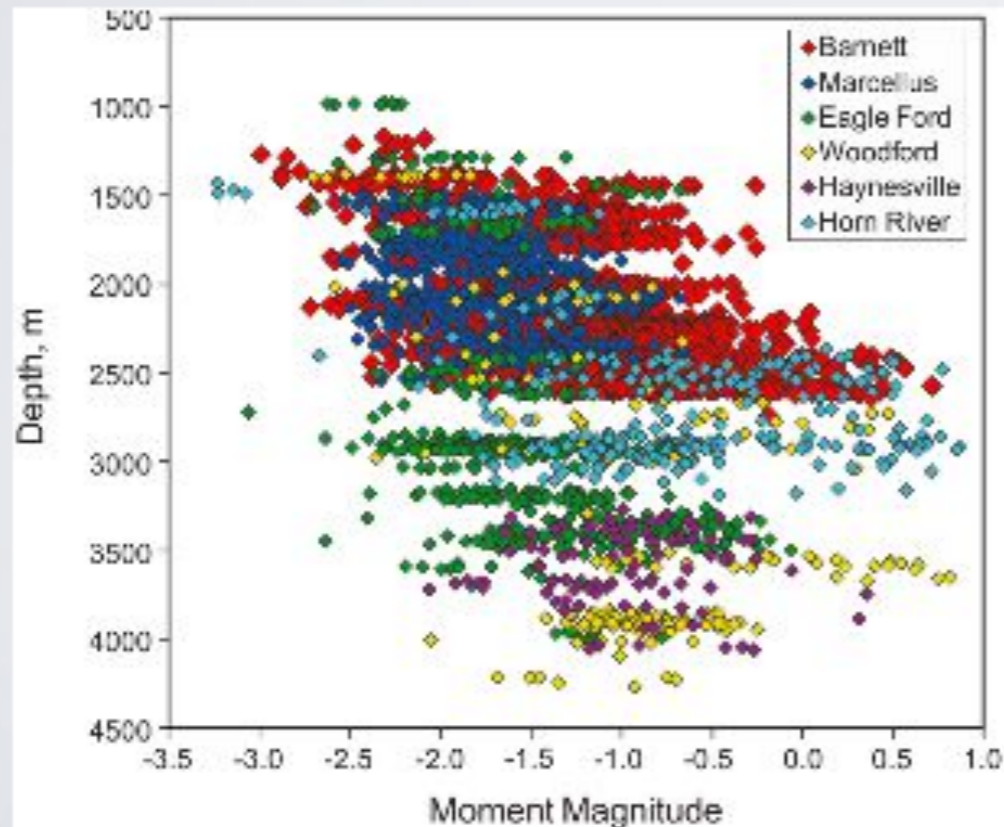
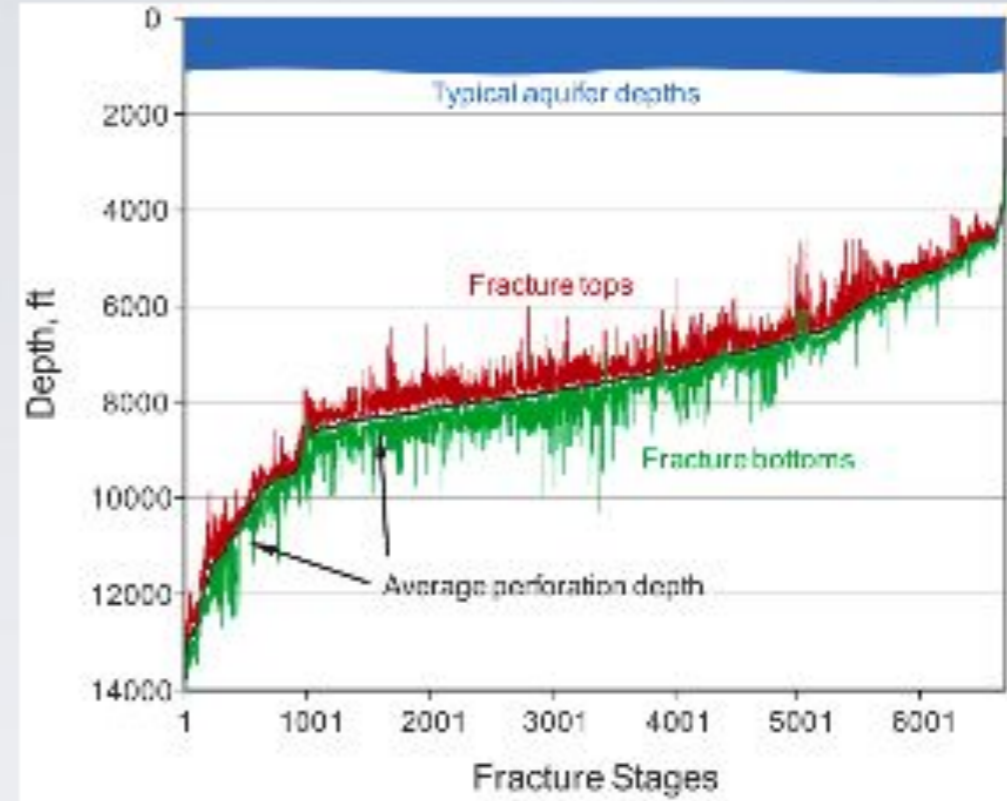
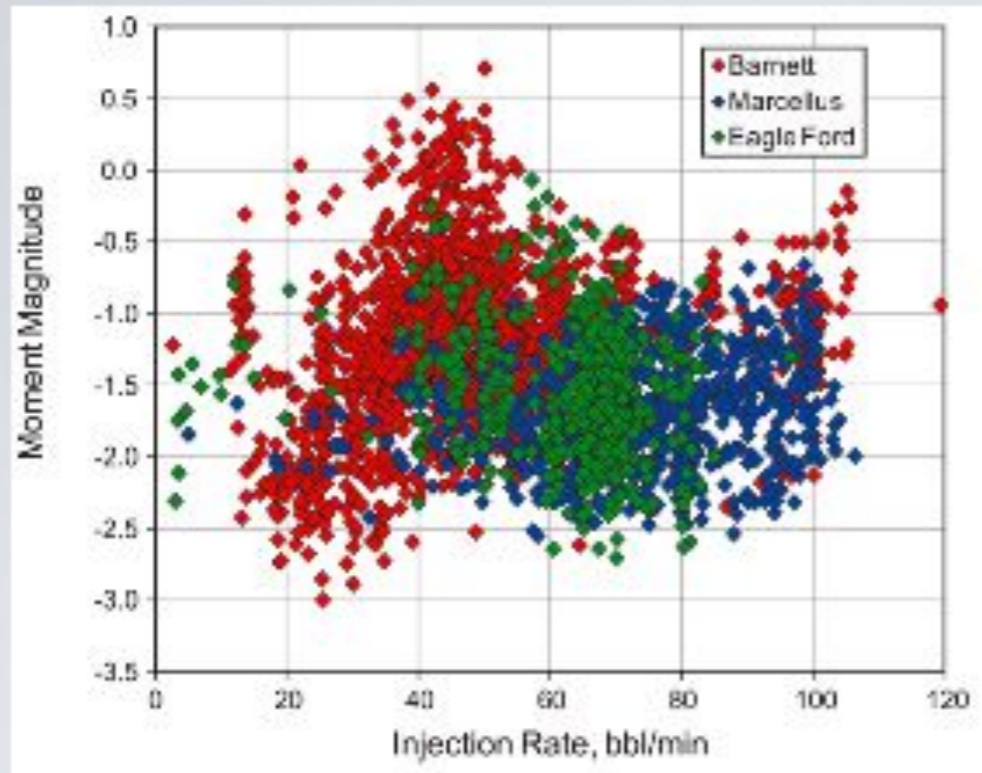


Figure 5. Hydraulic fracturing of a tight-gas sand. 1408 events are recorded over 5 hours. Events are colour shaded by time: green (earliest) to red (latest). Events occur in two formations with very few detected events in between. Yet the event history reveals that brittle failure occurs first in the right-most part of the bottom formation, and then suddenly jumps to the top formation indicating the presence of a possible aseismic fault. After Pettitt et al. (2009).

магнитуда индуцированных событий и параметры закачки



Описание эволюции сейсмичности при изменении порового давления

Уравнение пороупругости:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(D\nabla p)$$

Одномерное уравнение пороупругости:

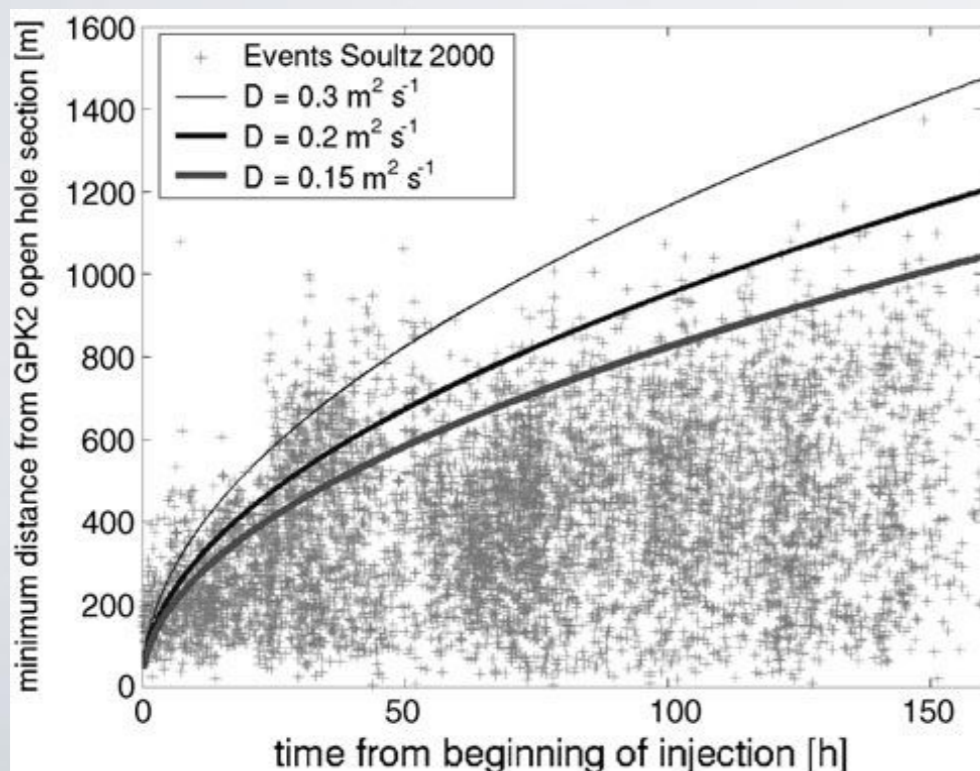
$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Решение для МС облака (Shapiro et.al):

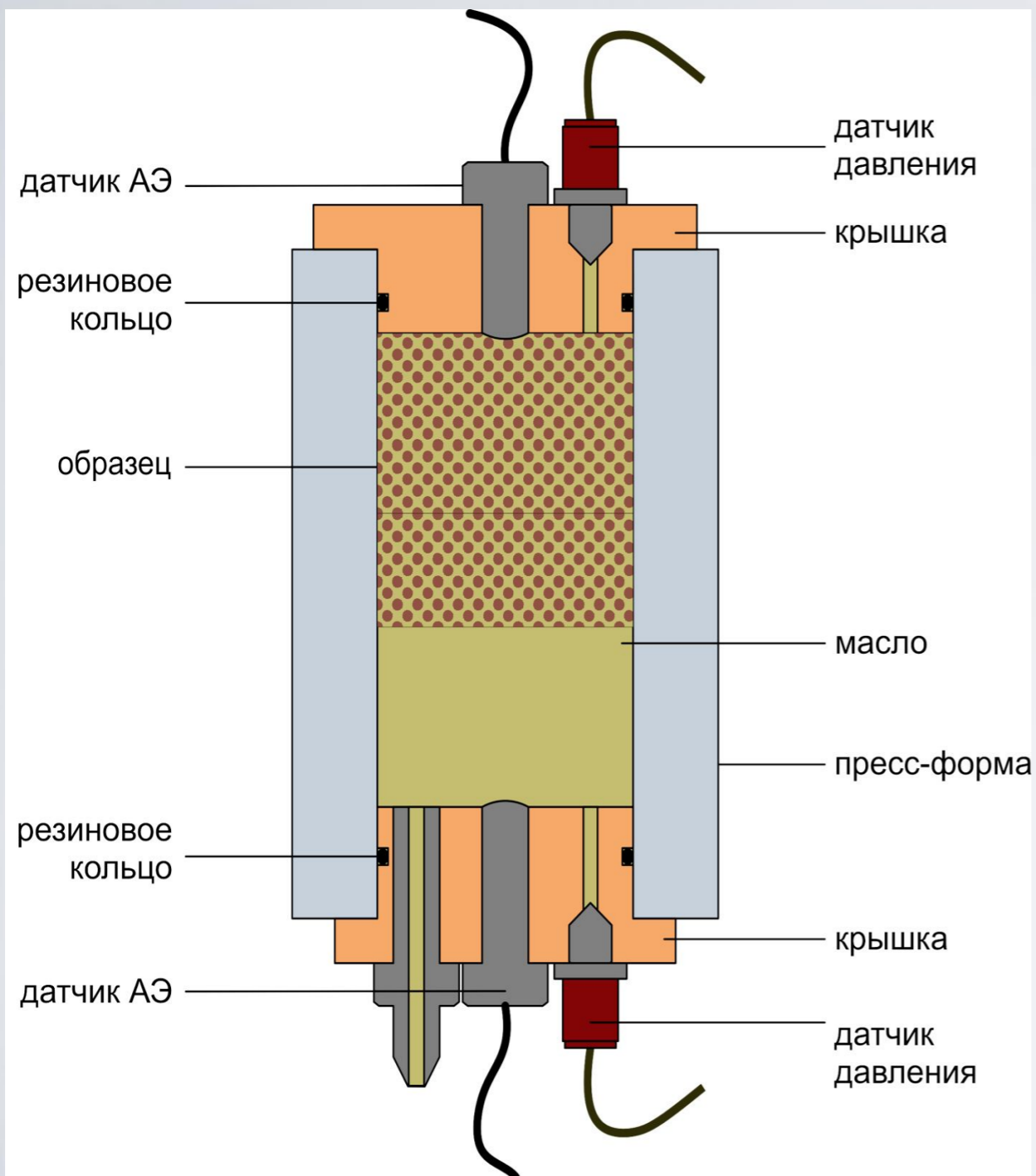
$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \nabla^2 p$$

$$r = \sqrt{4\pi Dt}$$

$$D = \frac{k}{\mu_0 \beta m_0}$$

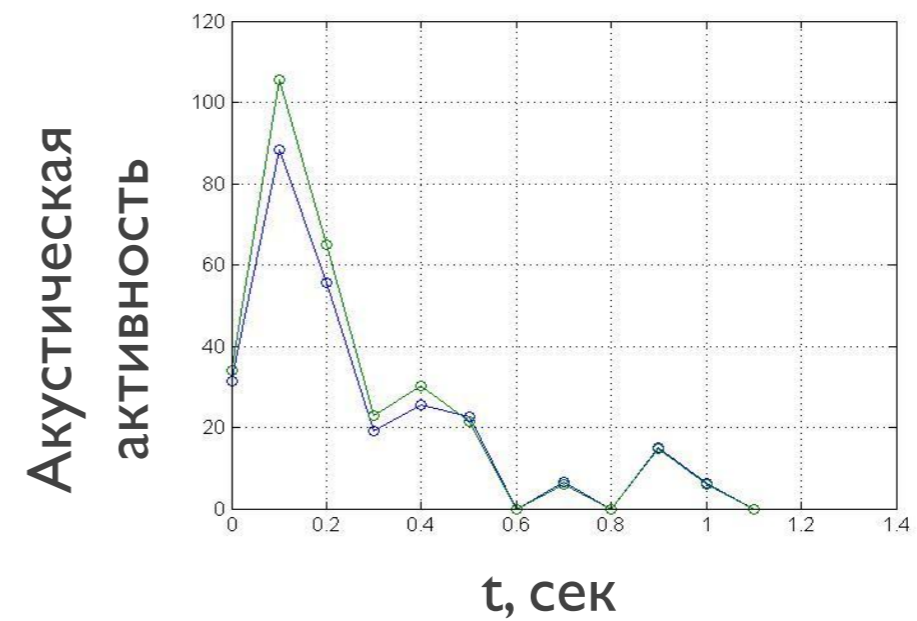
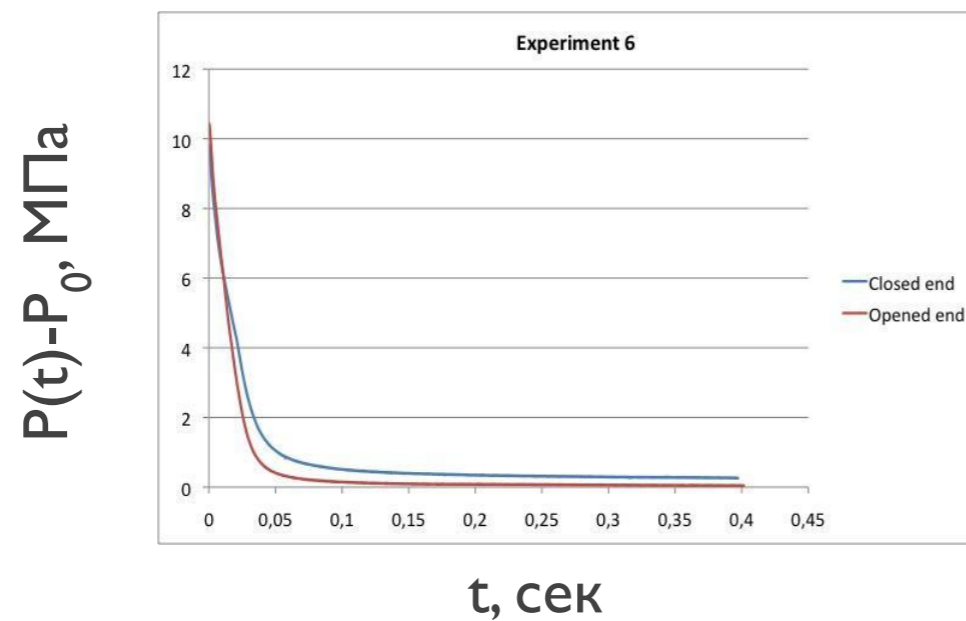
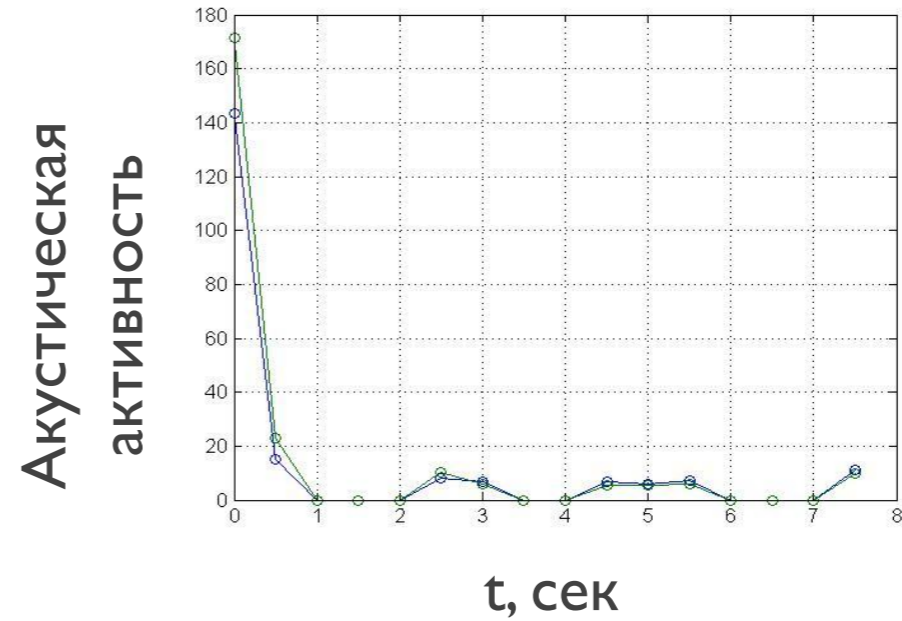
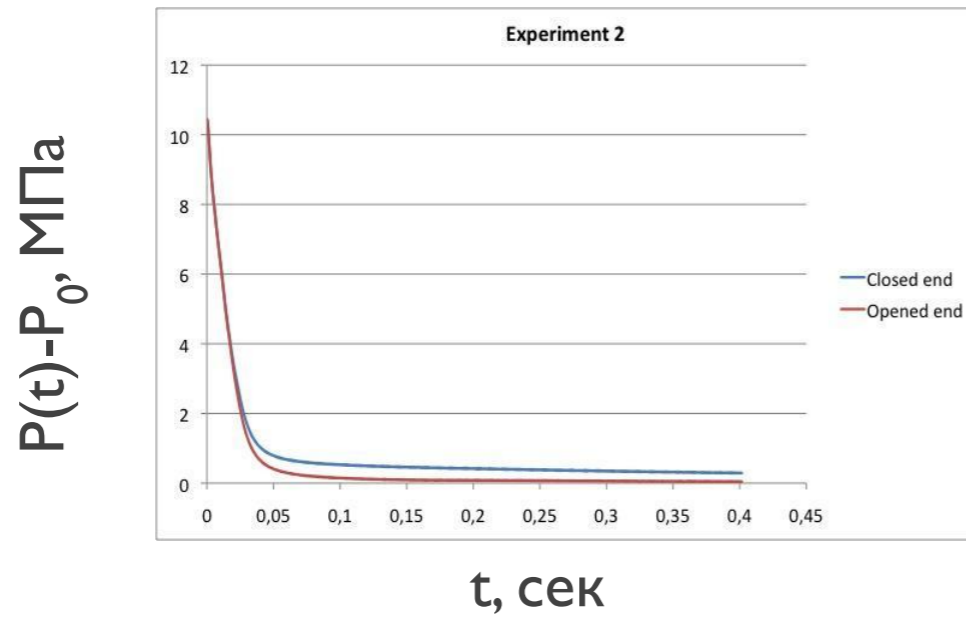


Эксперимент



- длительность регистрации АЭ до 10 секунд, 2.5 МГц.
- Длительность регистрации давления 10 и больше, 50 кгц.
- Начальное давление 9.5 – 10 МПа
- Образец: смесь из песка (характерный размер 0,3 мм) с силикатным клеем ($m=1г$) в пропорции 100 : 1; высота 83 мм, диаметр 60 мм
- Пористость: 35%
- Прочность на одноосное сжатие 2,5 МПа

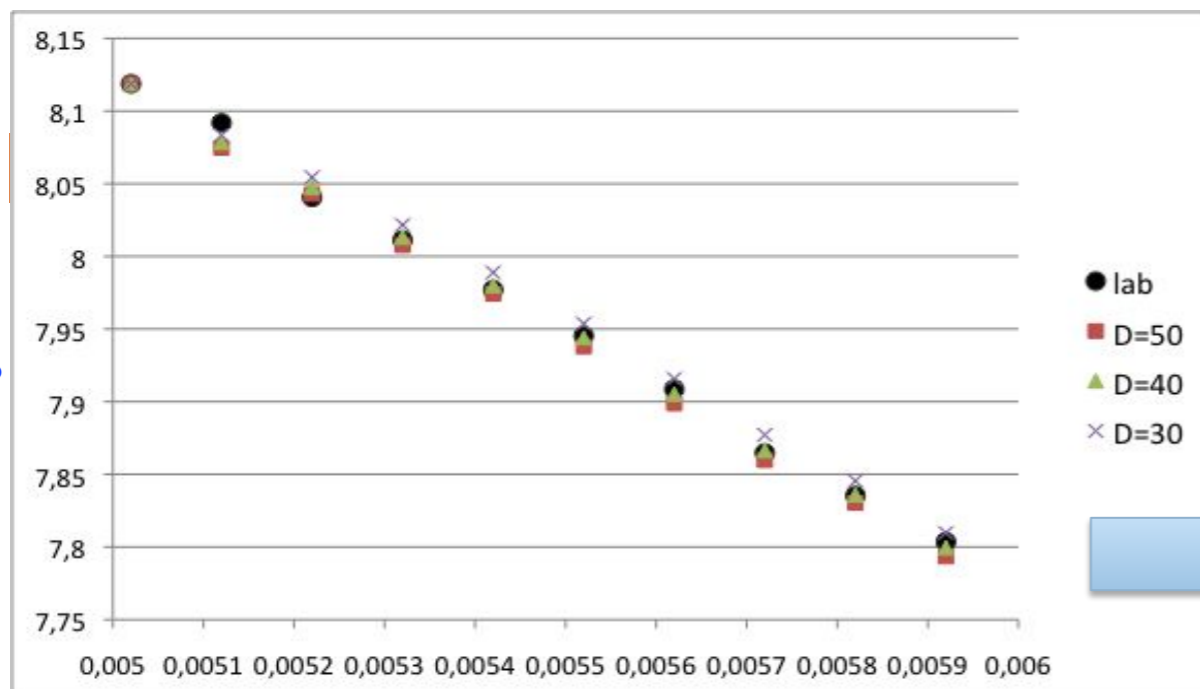
Результаты эксперимента



Оценка коэффициента диффузии

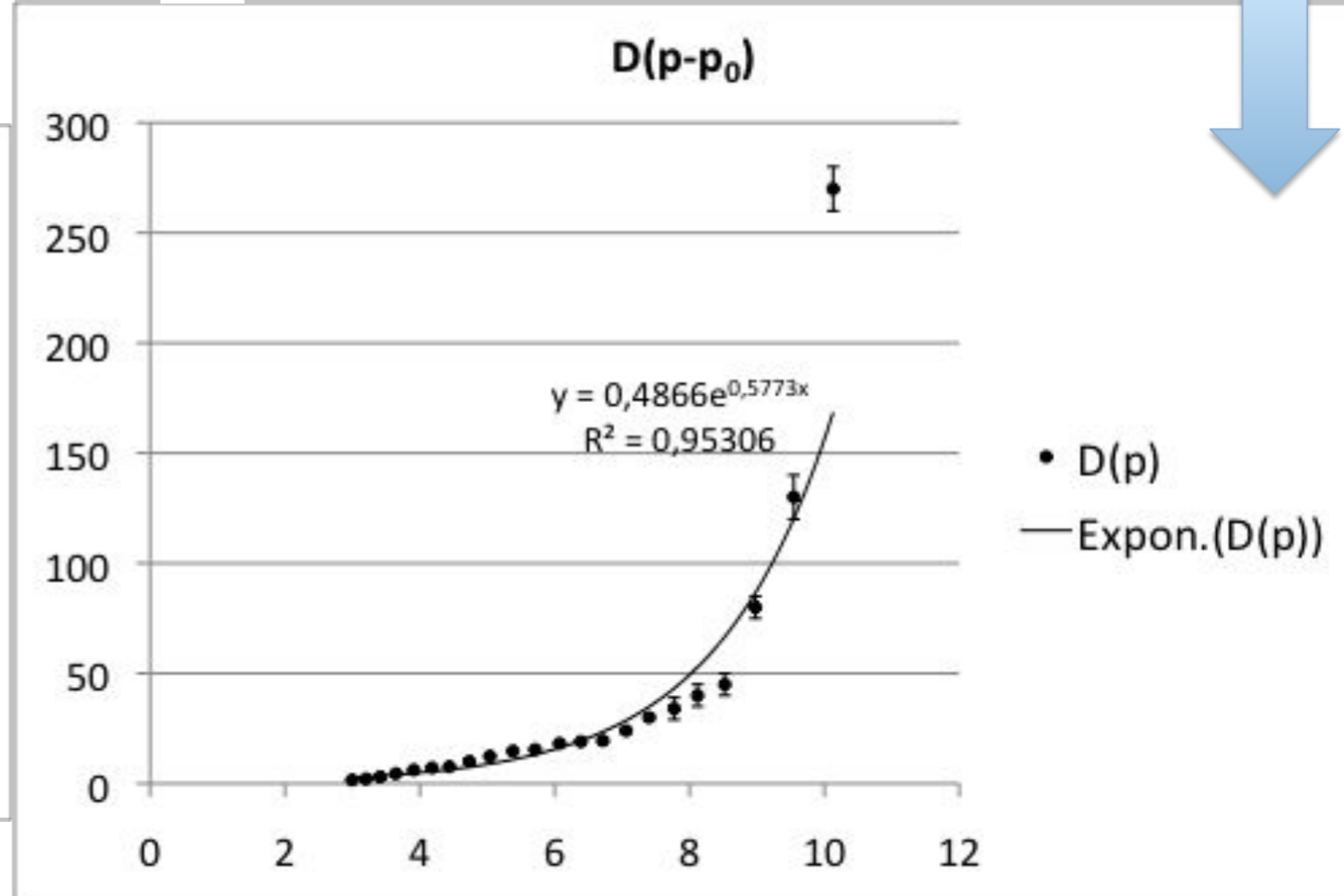
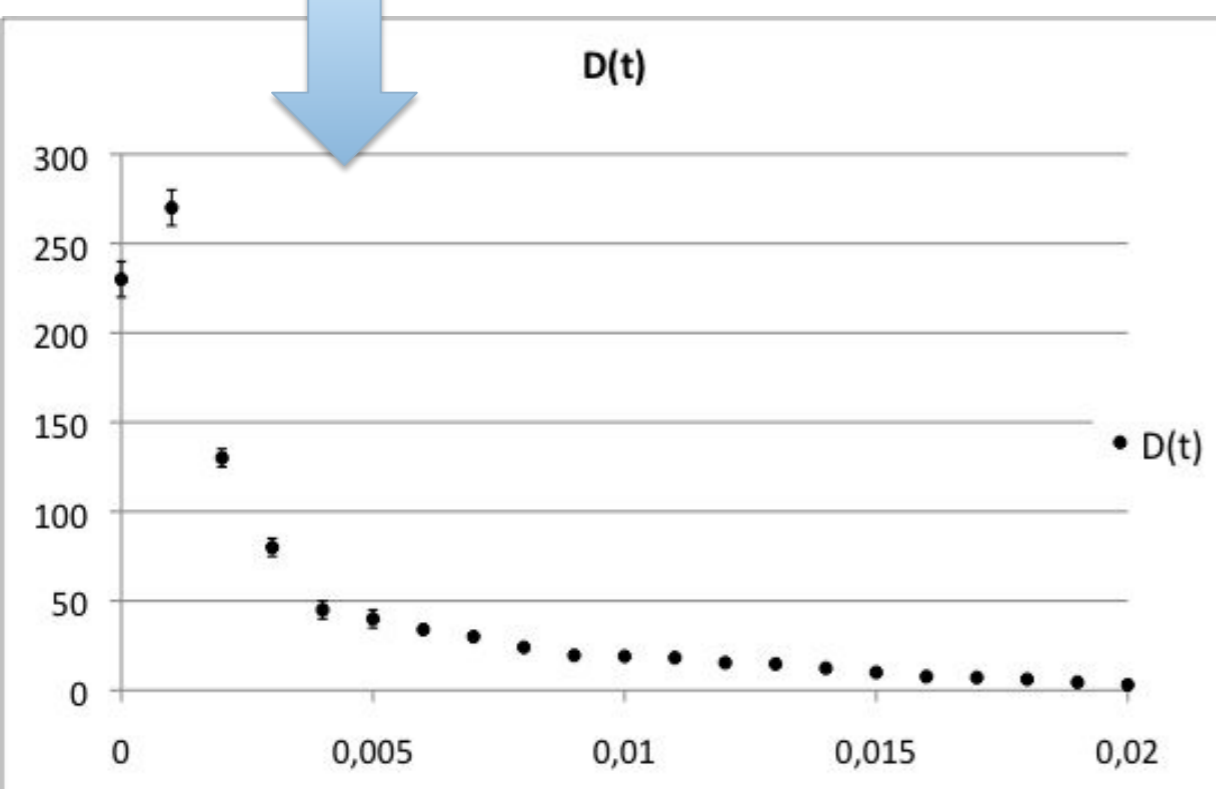
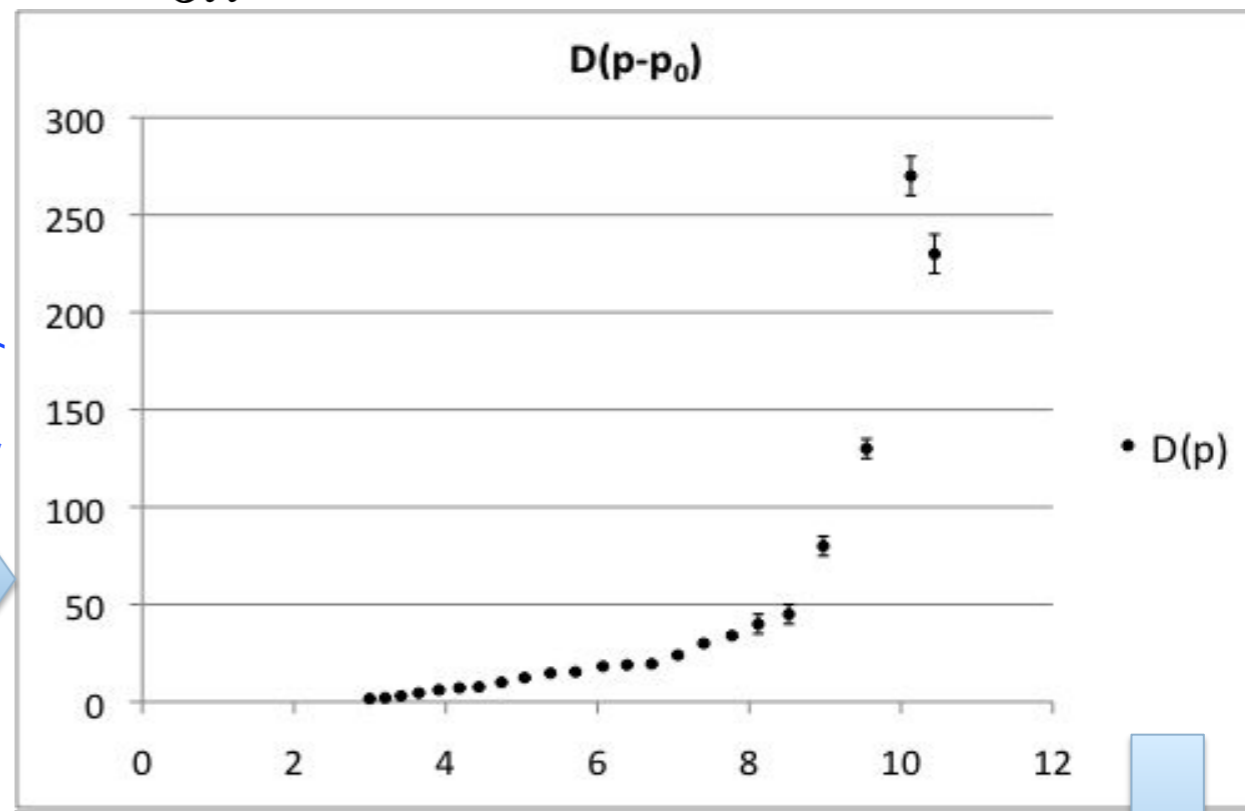
$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad + \quad \text{метод наименьших квадратов}$$

P(t)-P₀, МПа



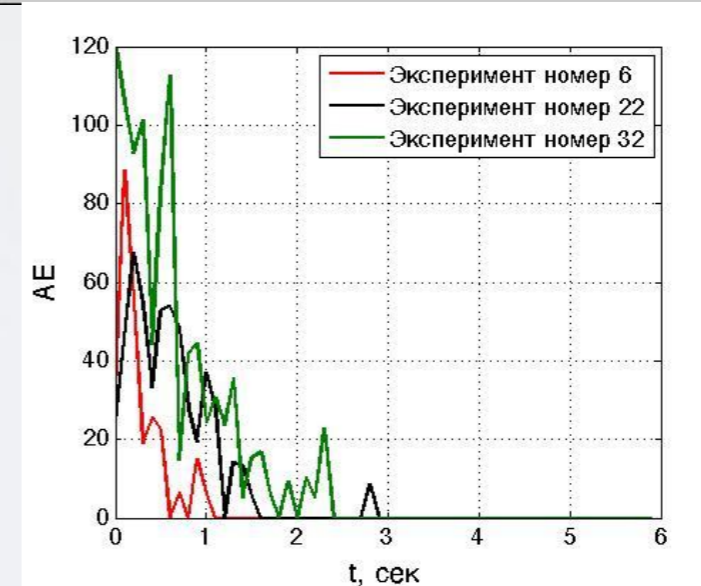
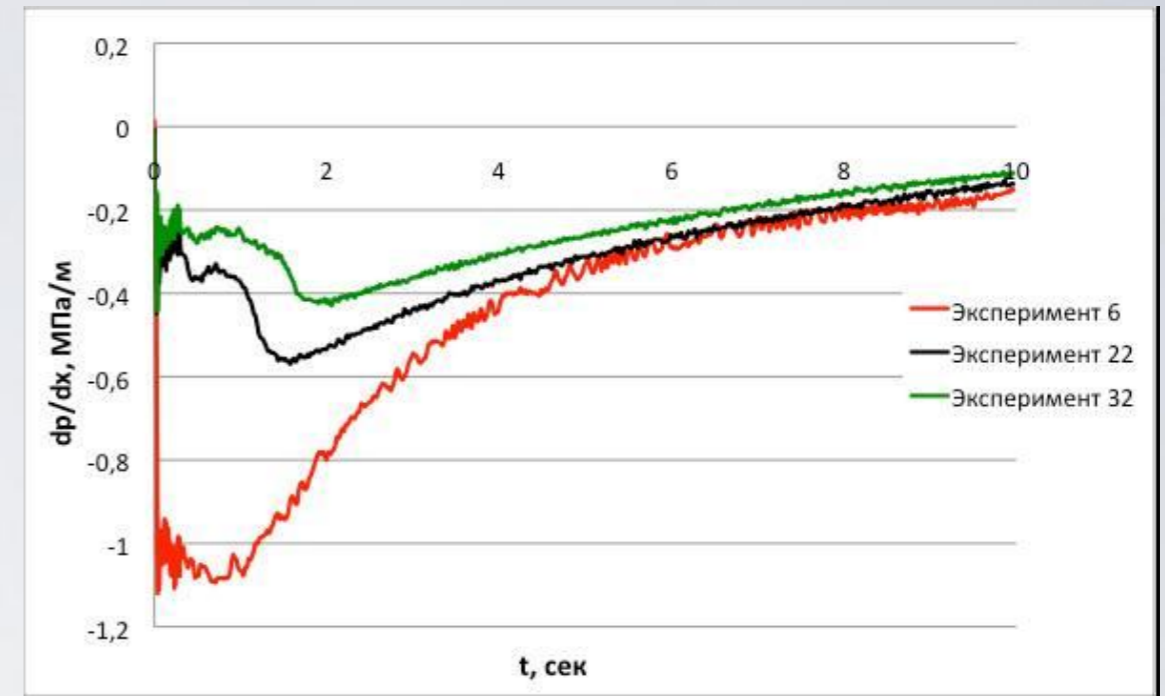
t, сек

D, м²/сек



Изменения порового давления и акустическая эмиссия.

- МС событие возникает когда градиент порового давления достигает критического значения
- Это значение распределено случайно и может быть описано распределением Вейбулла
- Распределение Вейбулла, которое часто используется для описания распределения размеров неоднородностей в образце:



$$N((dp/dx)^*) = N^* b a^{-b} \left(\left(-\frac{dp}{dx} \right)^* \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{(-dp/dx)^*}{a} \right)^b}$$

$$N(t) = \frac{N^* c}{t} \left(\frac{t}{t_0} \right)^c e^{-\left(\frac{t}{t_0} \right)^c}$$

- Сейсмичность, связанная с воздействием на флюидные системы, уже стала препятствием для реализации ряда проектов
- Прогноз реакции реального породного блочного трещиноватого массива на техногенное воздействие нельзя получить при помощи простых моделей.
- На настоящий момент наиболее информативным средством изучения процессов при воздействии на флюидные системы является микросейсмический мониторинг
- Интерпретация данных мониторинга должна опираться на геомеханические модели движений пористой флюидонасыщенной трещиноватой среды

ЭКЗАМЕН