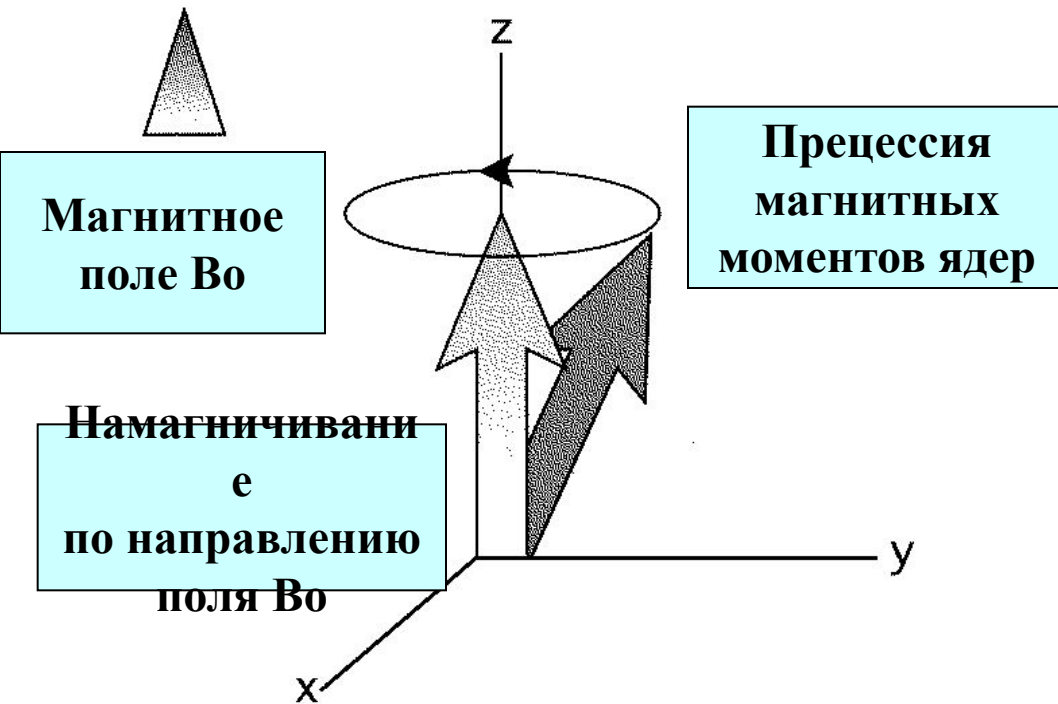


Метод ядерно-магнитного резонанса

Физический принцип ядерно-магнитного резонанса



Взаимодействие протонов с магнитным полем:

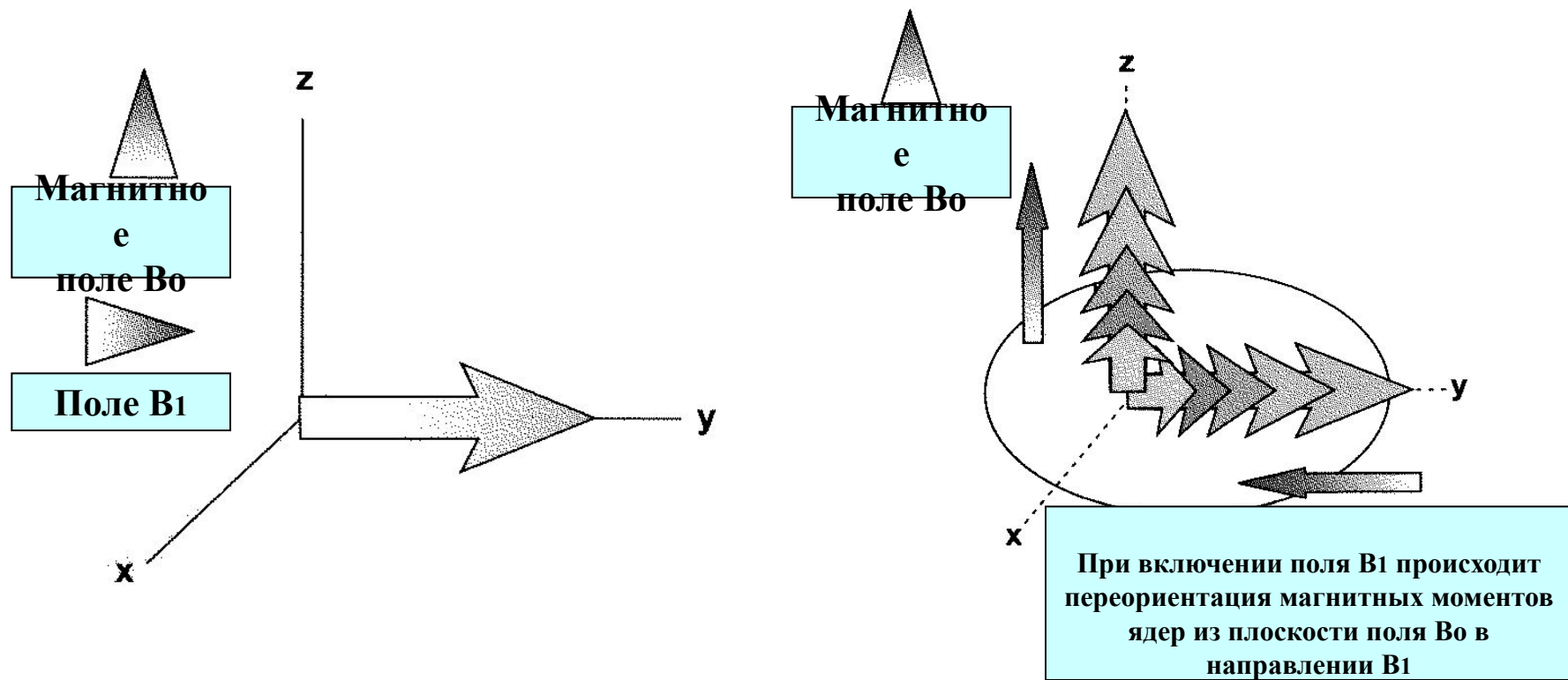
- В земном магнитном поле B_0 ядро атома имеет частоту прецессии (f_0)
- Эта частота соответствует значению:

$$f_0 = \left(\frac{\gamma}{2\pi} \right) B_0$$

Гиромагнитное отношение (^1H) γ $2\pi \cdot 4258 \text{ s}^{-1}\text{G}^{-1}$
Статическое магнитное поле B_0 $\sim 500 \text{ Гаусс}$

Наилучшим образом взаимодействуют с магнитным полем протонсодержащие жидкости – углеводороды, пластовые воды

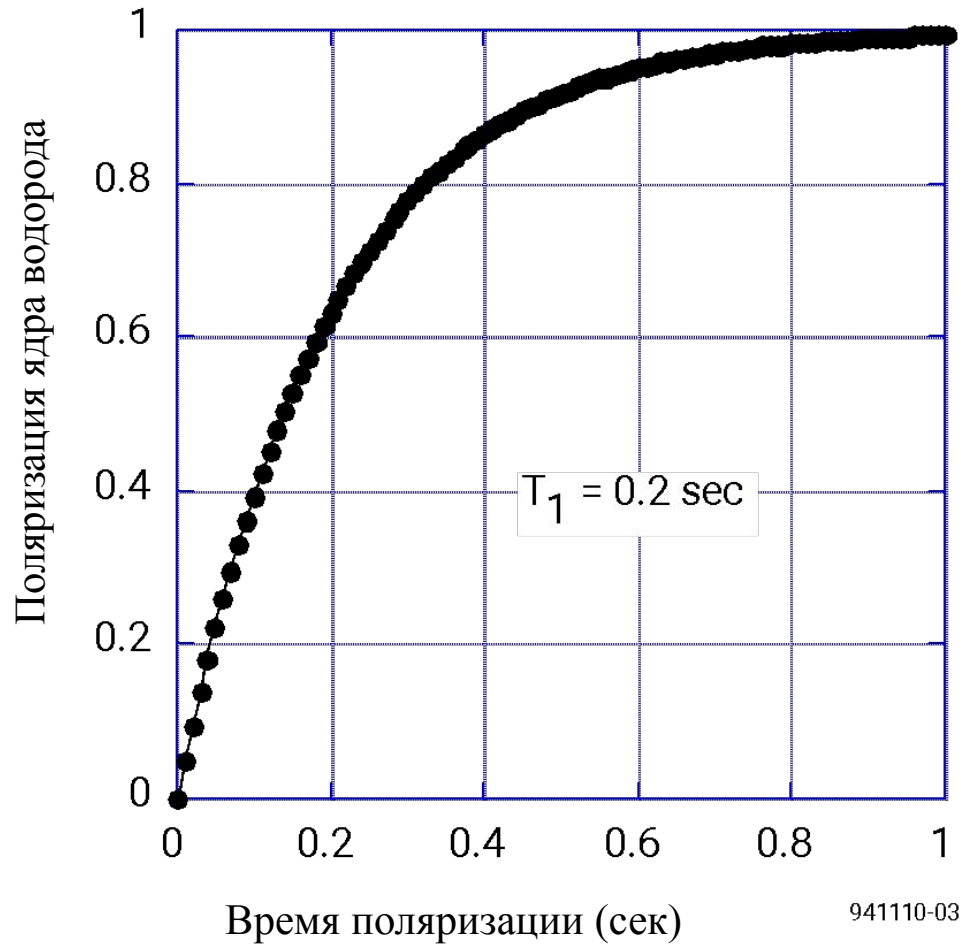
Физический принцип ядерно-магнитного резонанса



Для переориентации протонсодержащих ядер необходимо воздействие внешним магнитным полем B_1 , направленным перпендикулярно к B_0 . При выключении этого поля протоны возвращаются в прежнее положение прецессии. Время, в течение которого происходит процесс установления прецессии ядер – **время продольного замедления (релаксации) T_1**

Поляризация (перемагничивание) ядра водорода

В магнитном поле Земли поляризация ядра водорода очень слабая

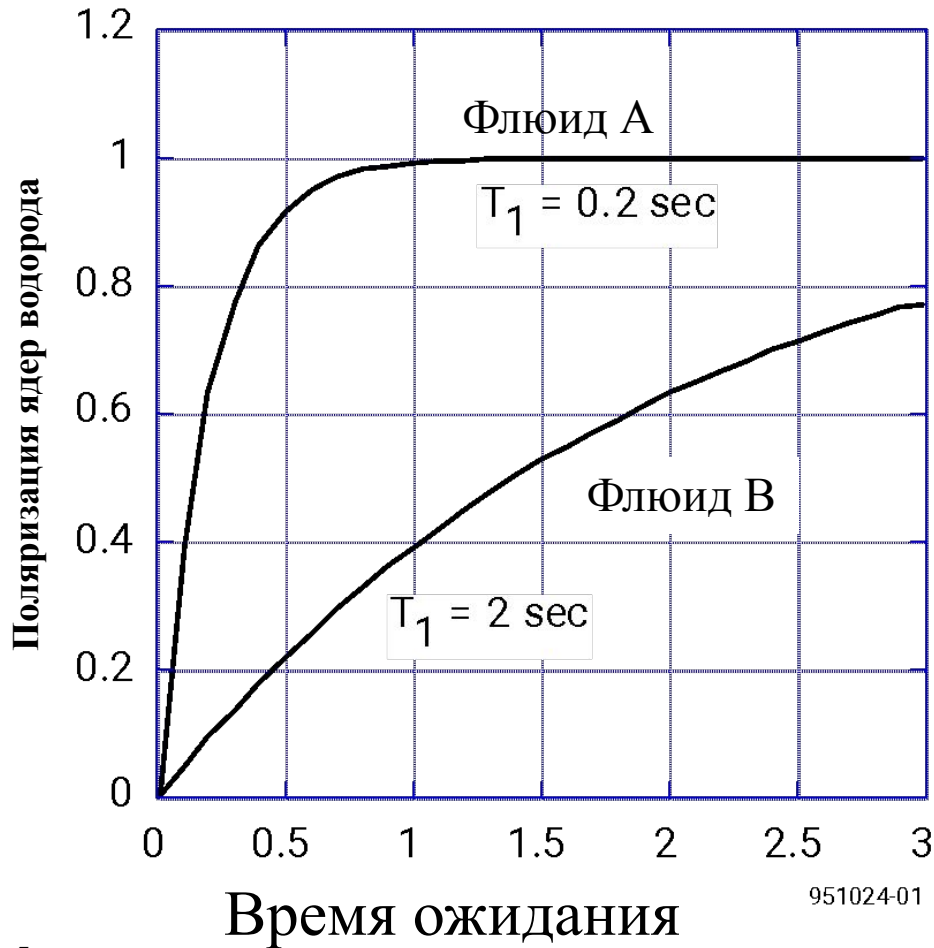


941110-03

Эффект поляризации

Влияние T_1

$$S = \phi[1 - \exp(-WT/T_1)]$$

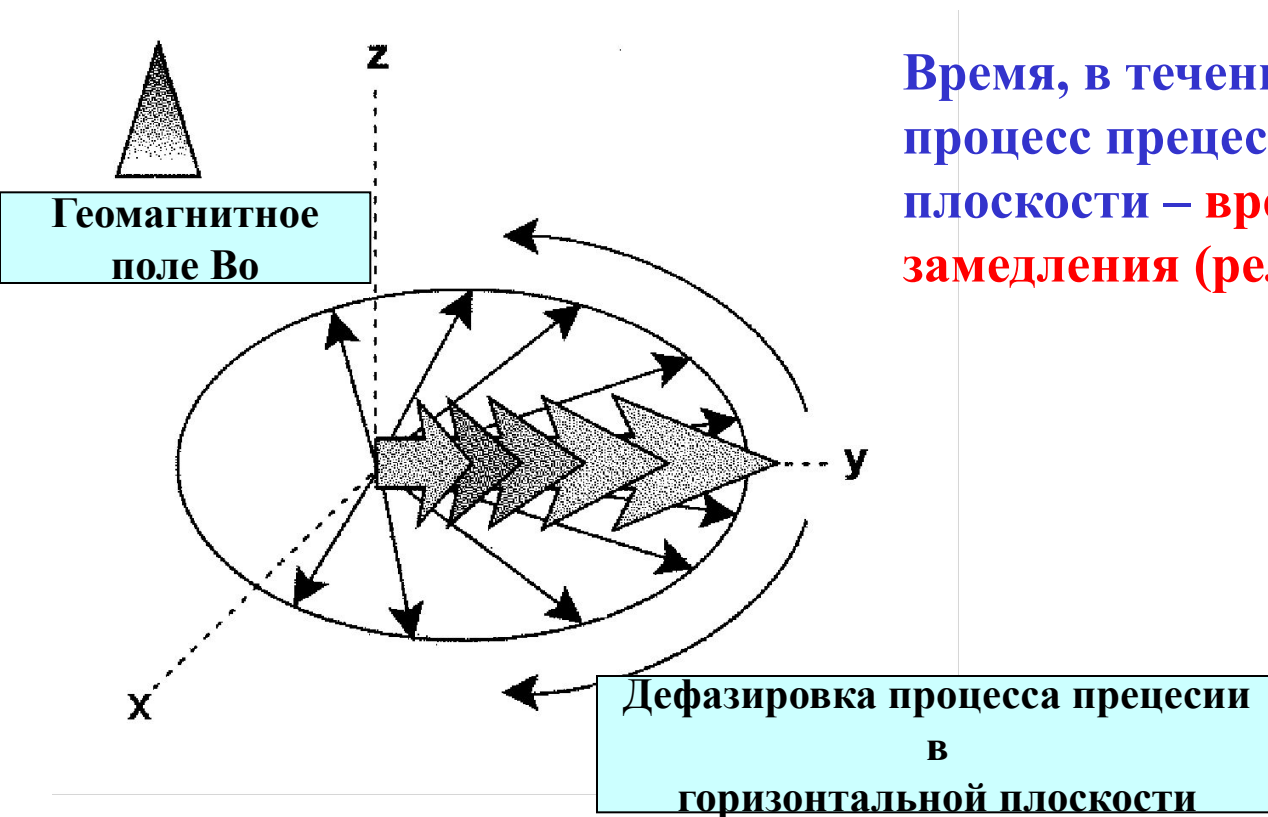


А- углеводороды

В – пластовая вода

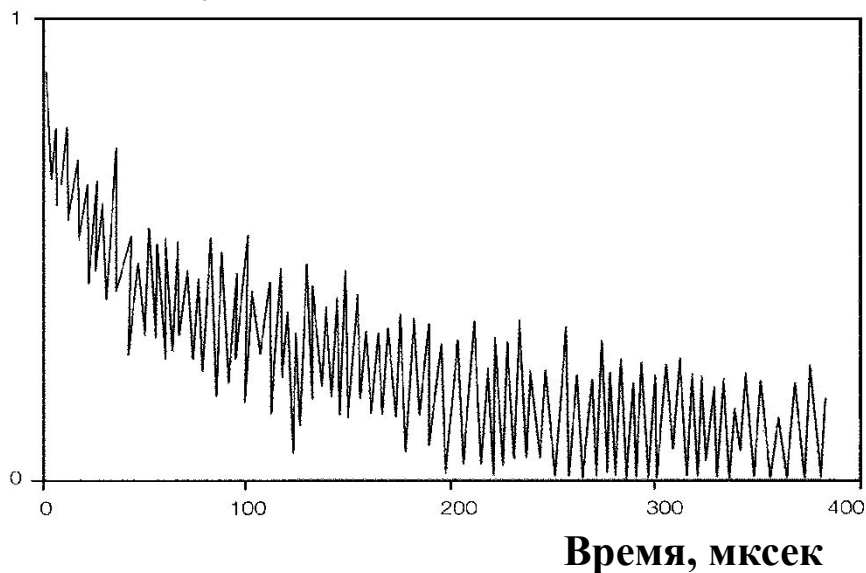
951024-01

Физический принцип ядерно-магнитного резонанса

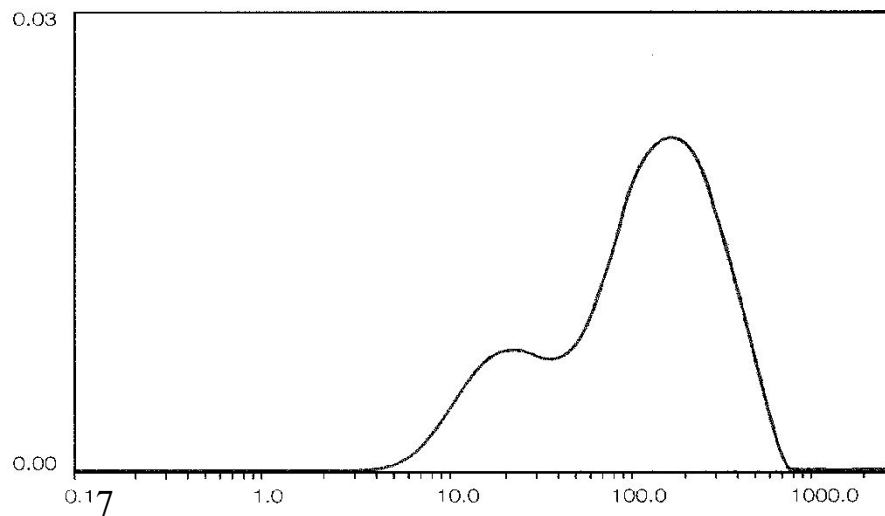
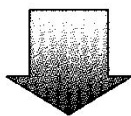


Время, в течение которого прекращается процесс прецессии ядер в горизонтальной плоскости – время поперечного замедления (релаксации) T_2

Амплитуда сигнала



Распределение
амплитуд
сигнала



Амплитуда
зарегистрированного
сигнала и его спектр
по времени
поперечной
релаксации T₂

T₂, мксек

Цикл ЯМР

Нулевая намагниченность



Возбуждение спинов сильным статическим полем в течение времени T_1 в Земном магнитном поле (B_0)



Вектор ядерной намагниченности устанавливается под 90° к оси скважины



Происходит затухание (T_2)



Измерения



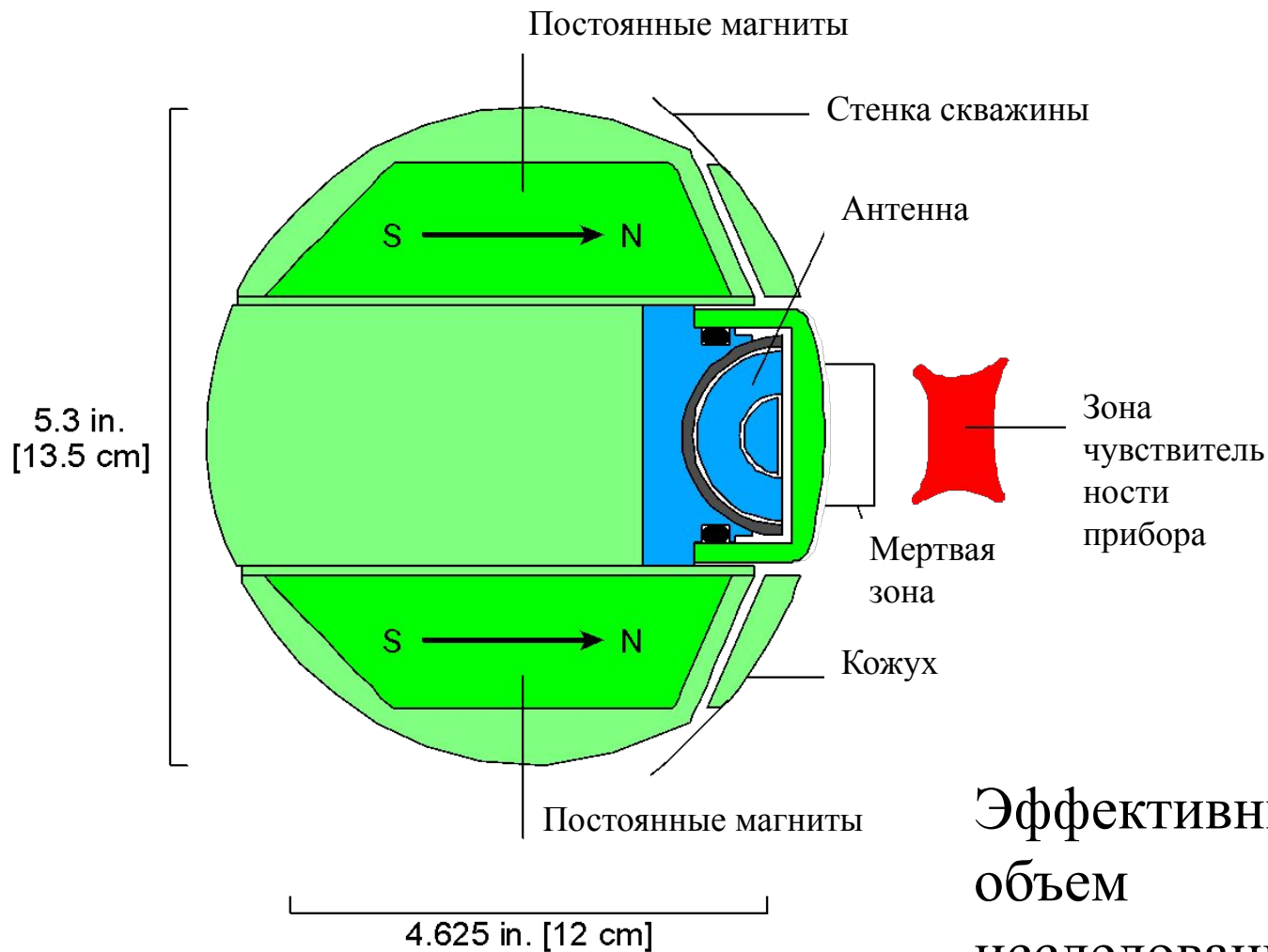
Во время измерений, влияние возбужденного магнитного поля затухает



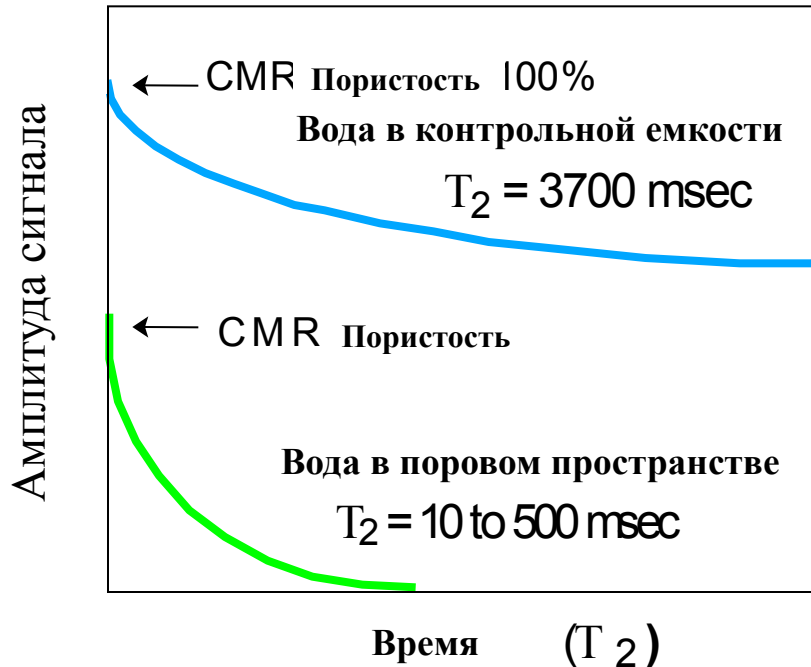
Запись измерений

Нулевая намагниченность

Конструкция зонда ЯМР

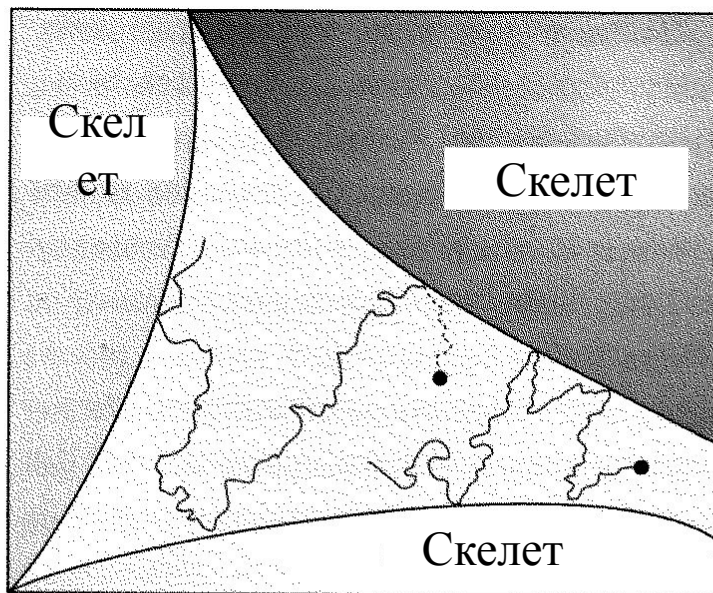


Затухание амплитуд



Сигнал порождается ядрами водорода, которые находятся в порах породы:

- Первичная амплитуда сигнала позволяет получить CMR пористость
- Время затухания сигнала (T_2) позволяет судить о размере пор.

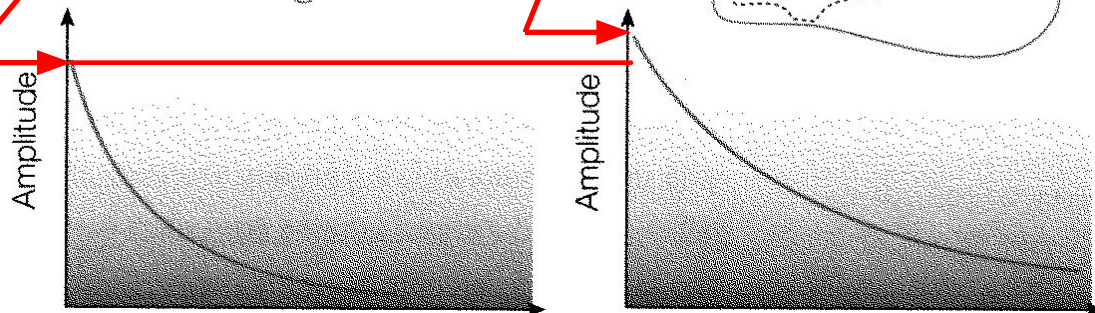
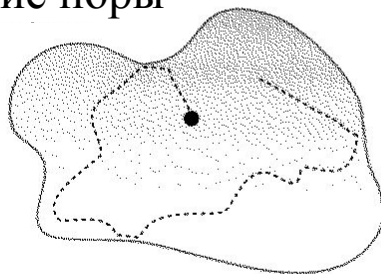


Связь амплитуды
сигнала и
размеров пор в
горных породах

Малые
поры



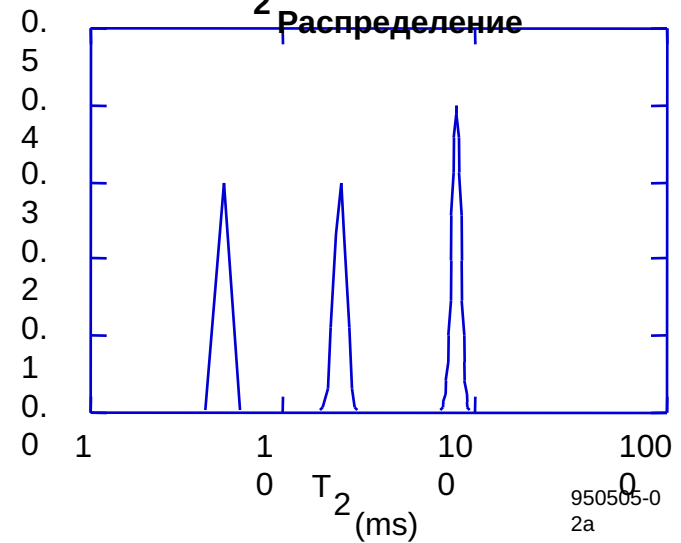
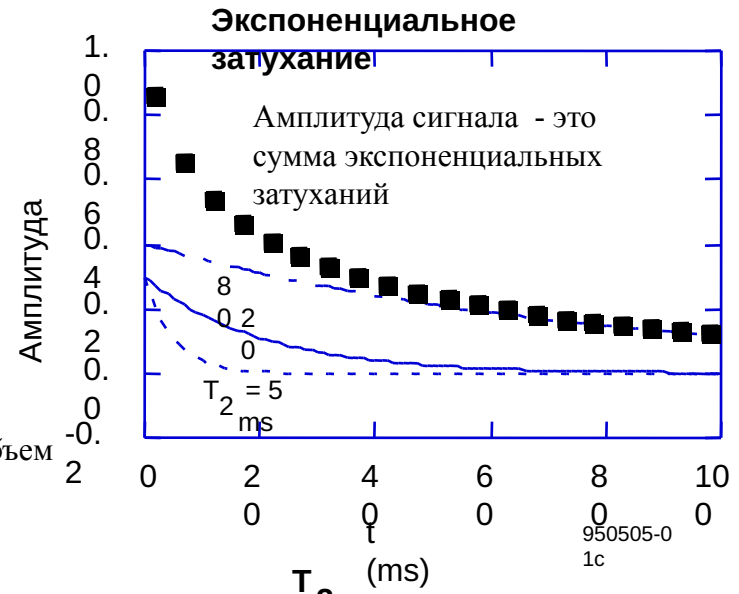
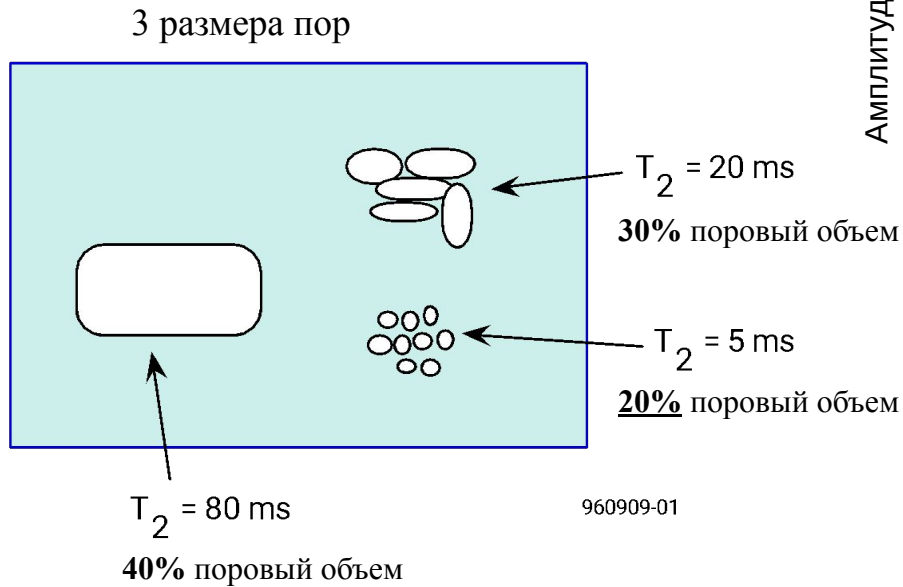
Большие поры



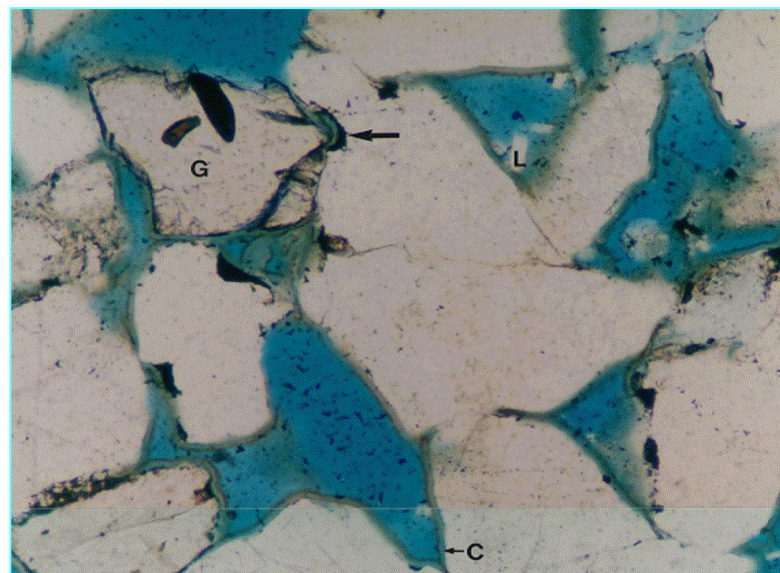
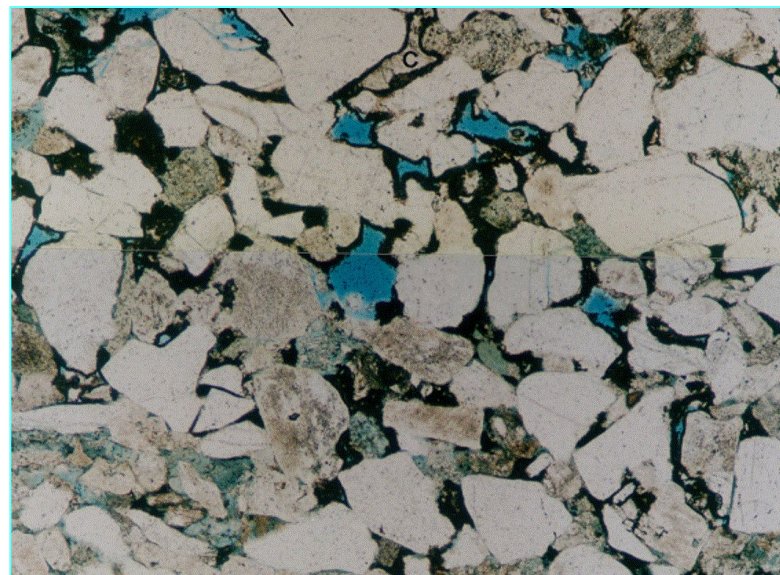
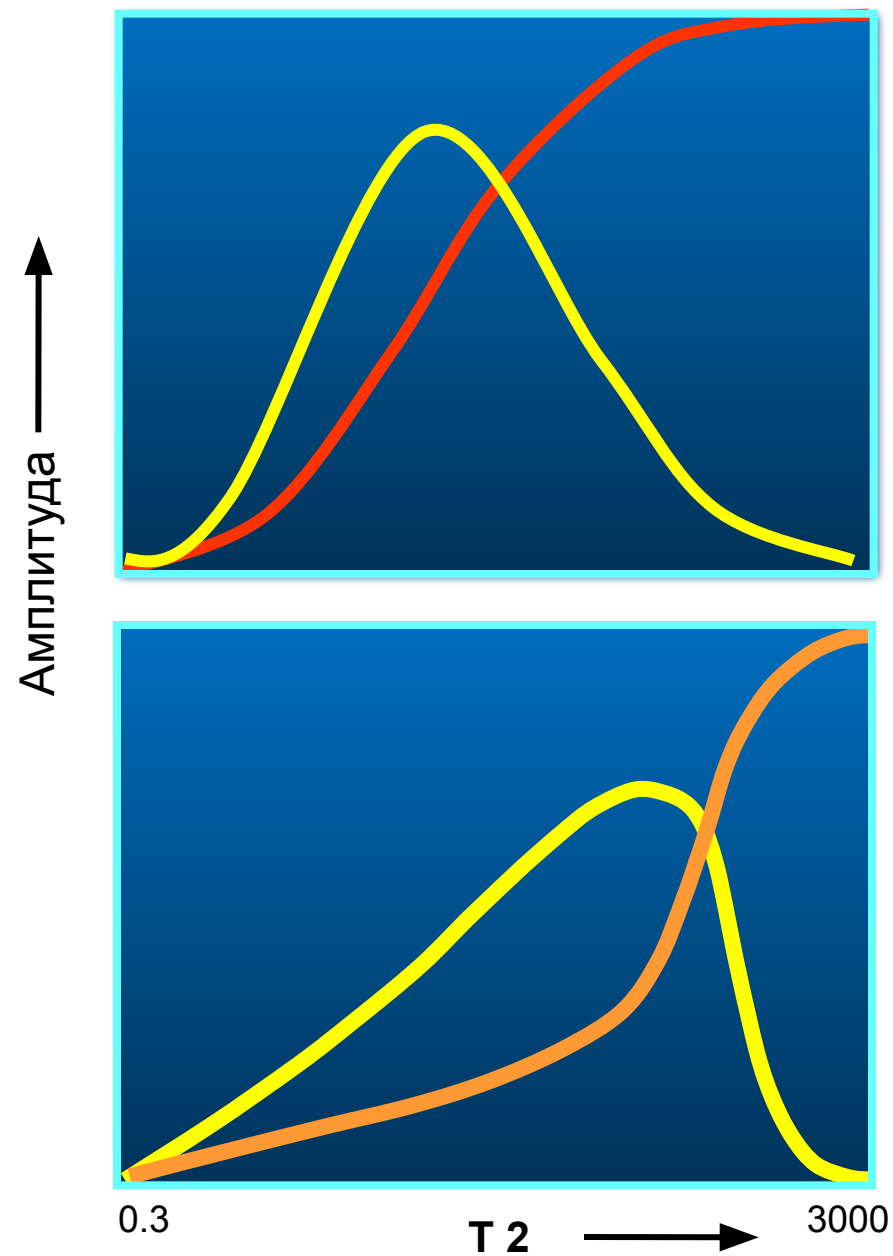
11 Time, msec

Time, msec

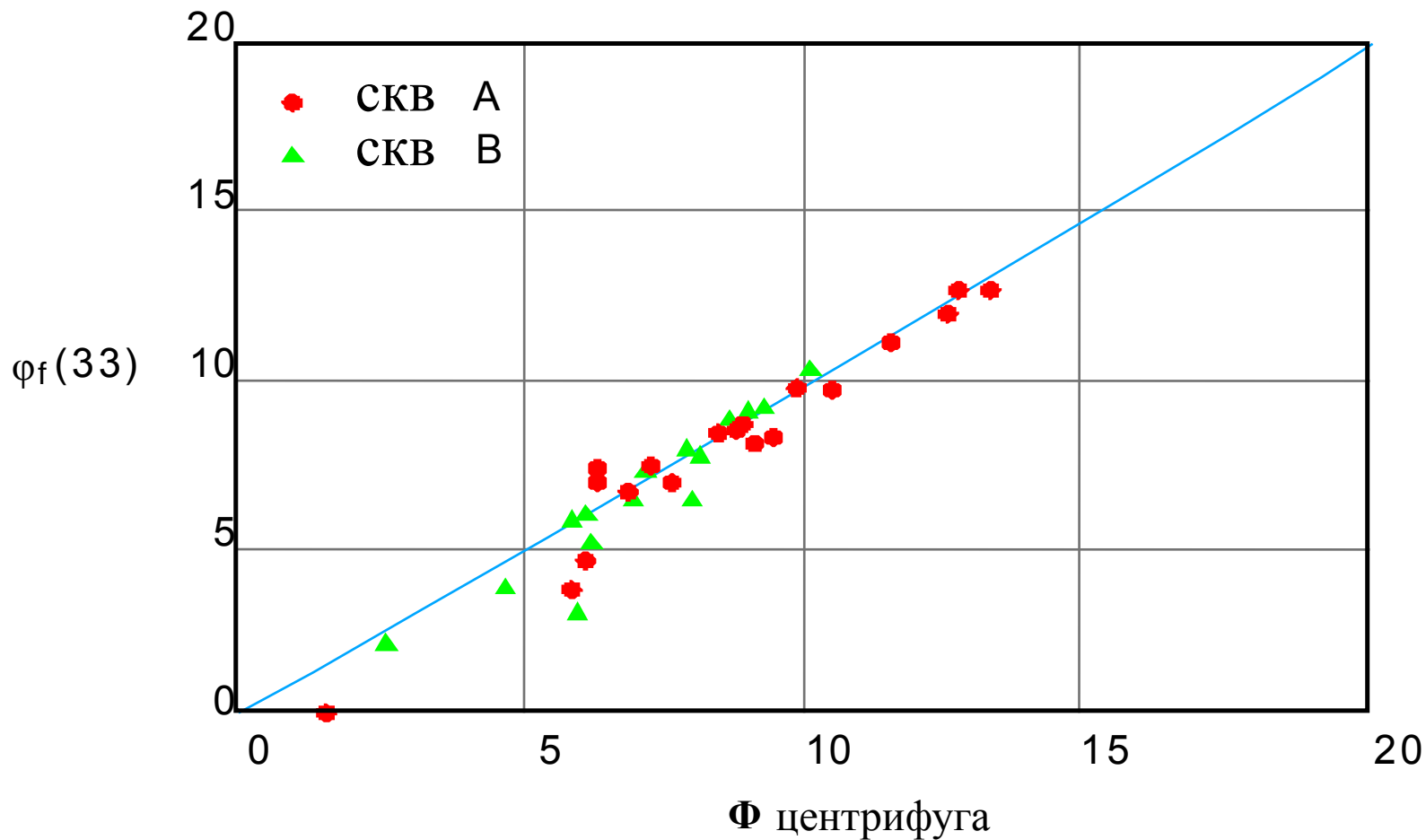
Амплитуда сигнала и пористость



Распределение амплитуд сигналов ЯМР и структура порового пространства

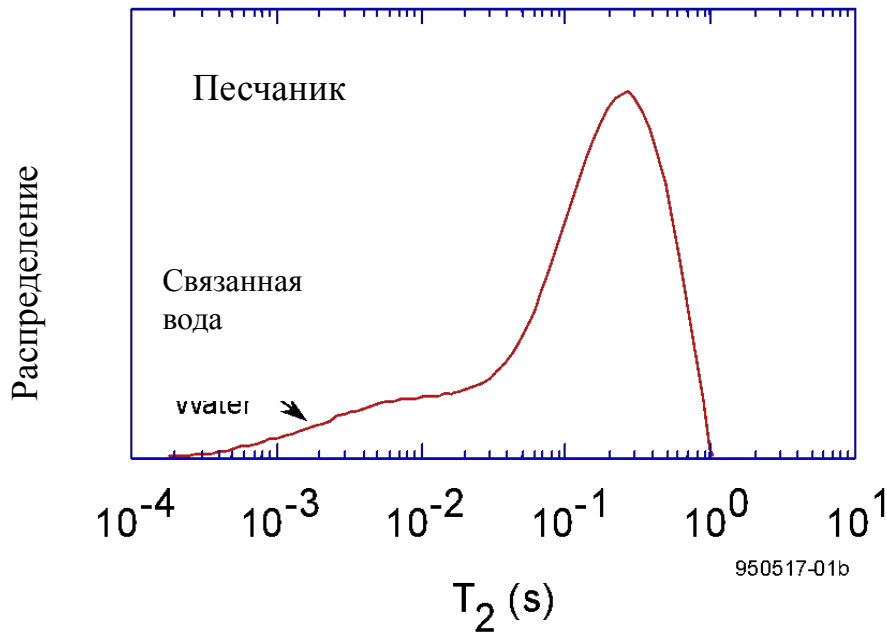


Отношение пористости ЯМР к пористости керна, определенной методом центрифугирования

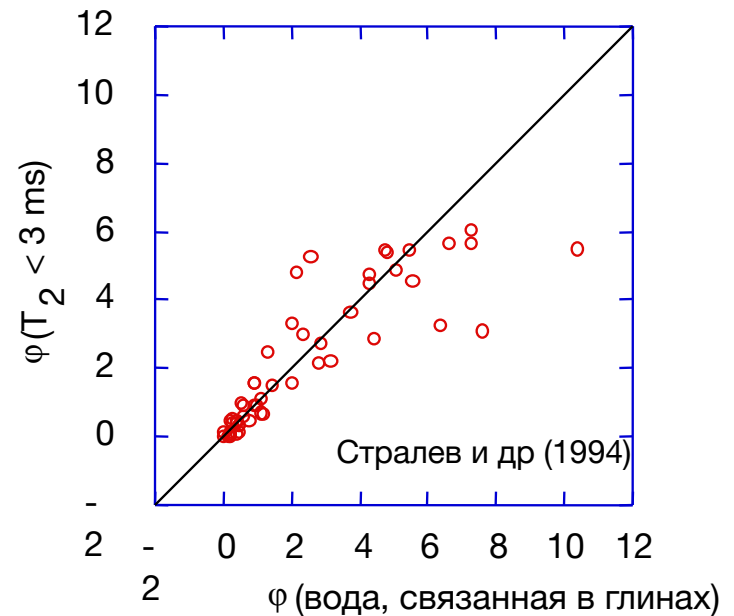


Определение связанной воды методом ЯМР

Влияние связанной воды – для песчаников изображено ниже на распределении T_2



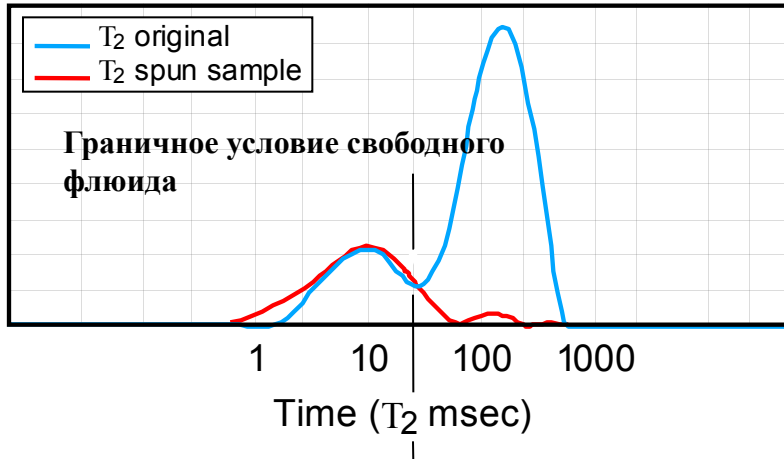
Оценка объема связанной воды с помощью ЯМР



Объемы связанной и свободной воды

Диаметр пор (микрон)

0.01 0.1 1 10



Общая пористость



- Для песчаников было определено 33 msec ограничительное условие (φ_{ff})
 - Проницаемость песчаника
- $$k = C(\varphi_{CMR})^4 (T_{2,log})^2$$

Определение проницаемости по ЯМР

- Метод 1: Формула Козени - Кенъона
(SDR Perm.)

$$K_{SDR} = a \cdot \phi^b \cdot (T_{2LM})^c$$

a = эмпир. конст., ~ 4 для песчаников

b = показатель пористости, ~ 4

c = показатель T_2 ~ 2

T_{2LM} = логарифмическое среднее T_2

- Method 2: Формула Тимура - Коатса
(Timur Perm.)

$$K_{Timur} = a' \cdot 10^4 \cdot \phi^{b'} \cdot \left(\frac{FFV}{BFV} \right)^{c'}$$

$$\phi = FFV + BFV$$

a' = эмпир. конст., ~ 4 для песчаников

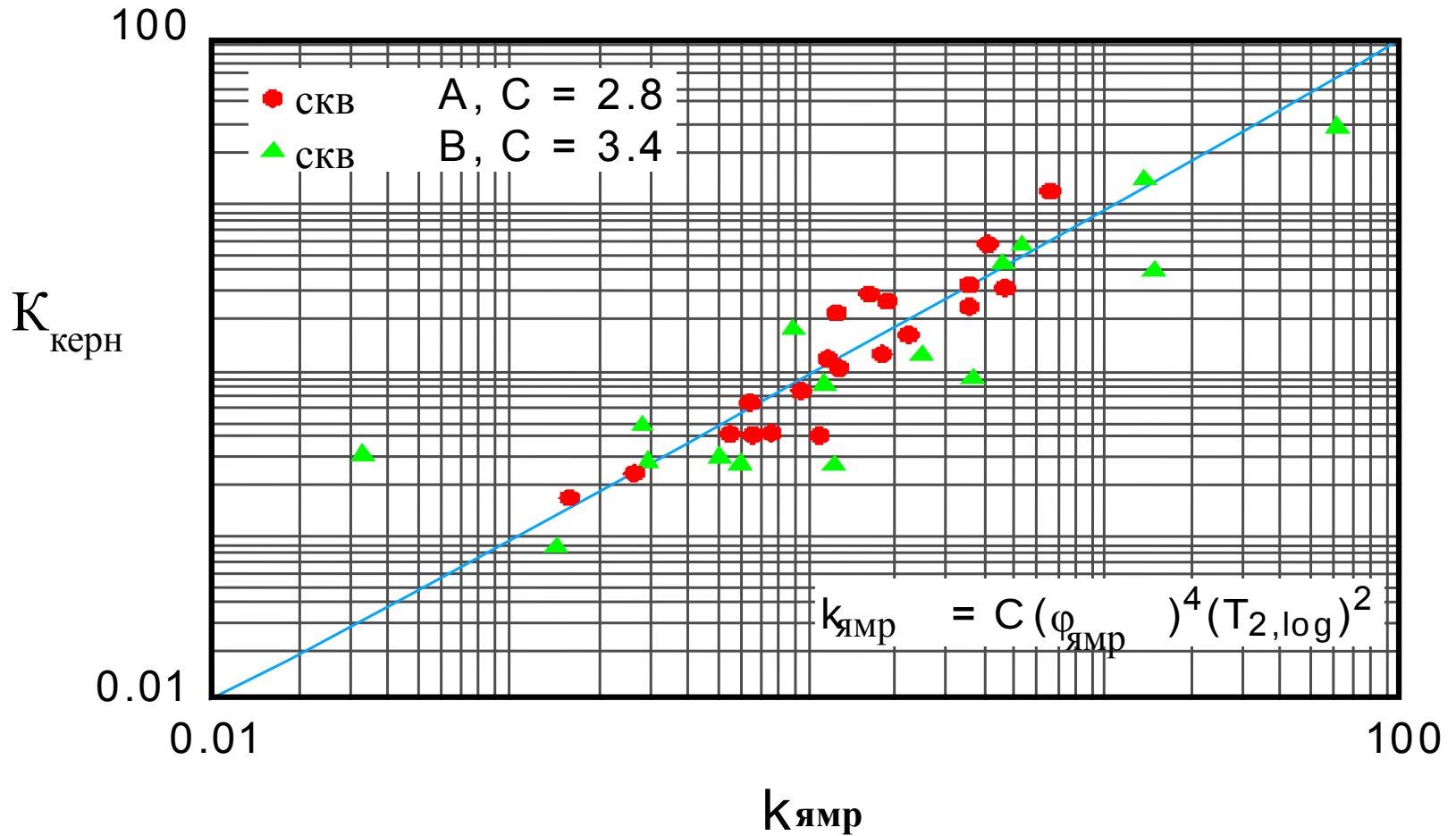
b' = показатель пористости, ~ 4

c' = показатель отношений, ~ 2

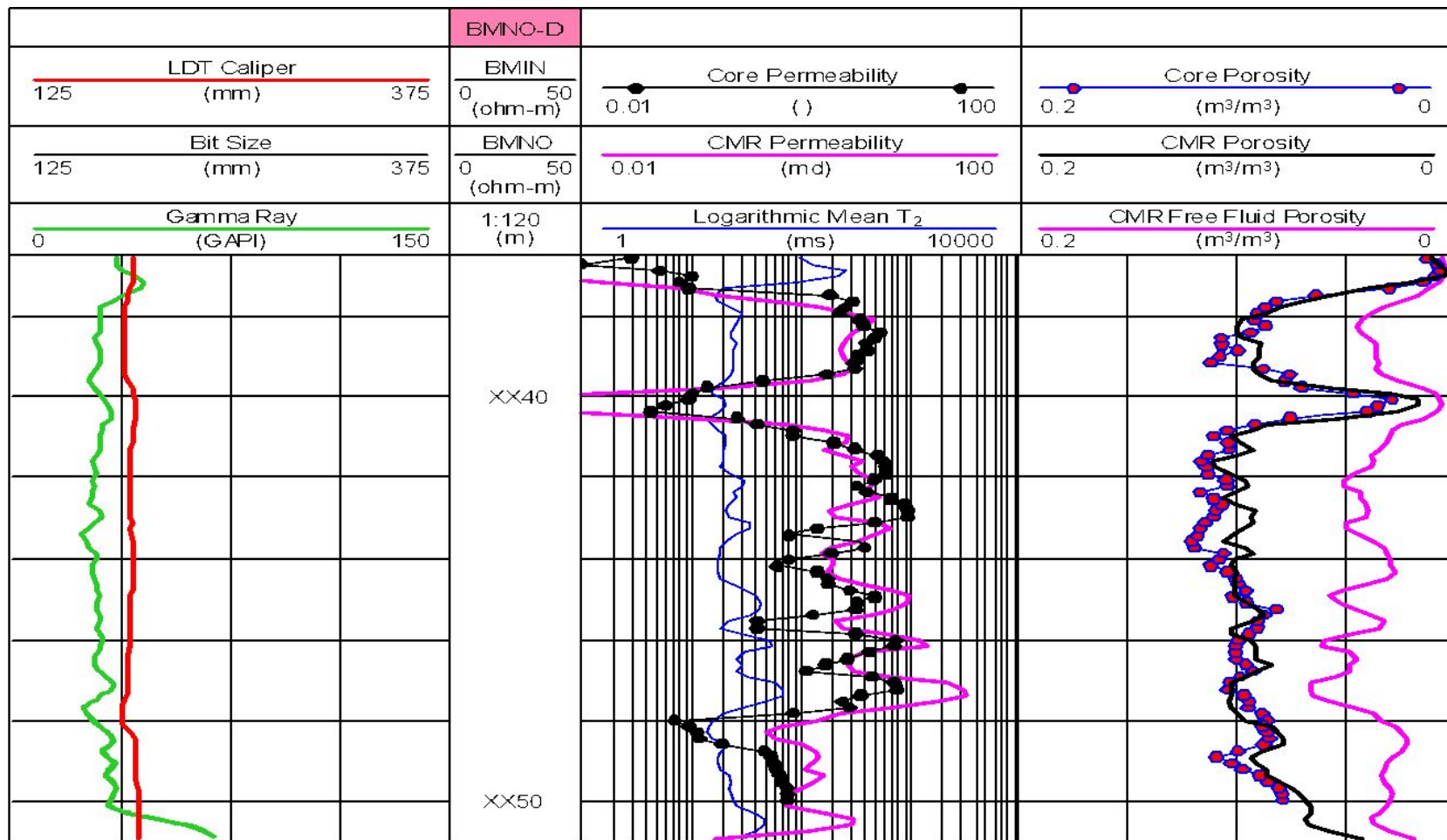
FFV = объем свободной жидкости

BFV = объем связанной жидкости

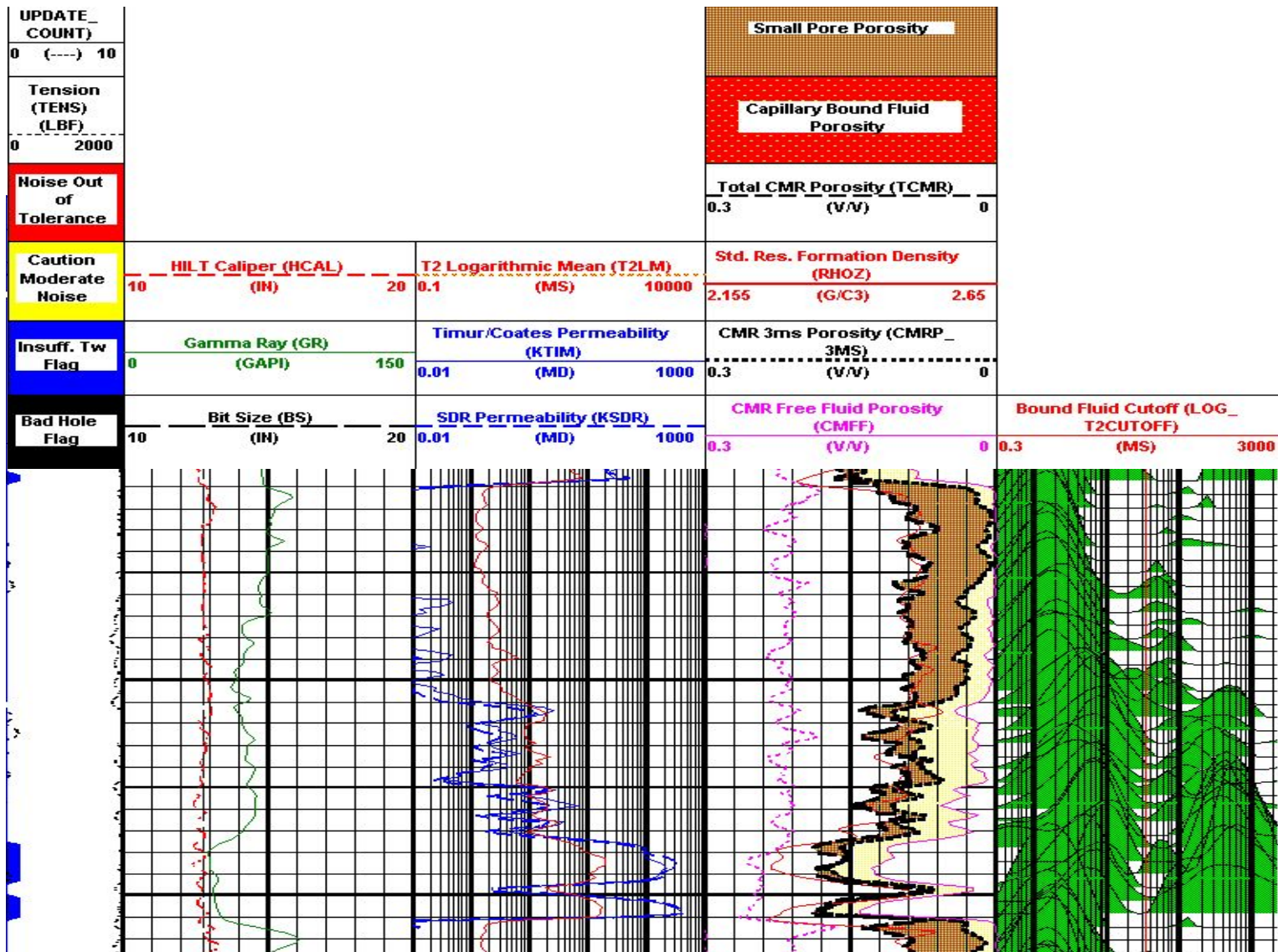
Проницаемость по ЯМР – проницаемость по керну



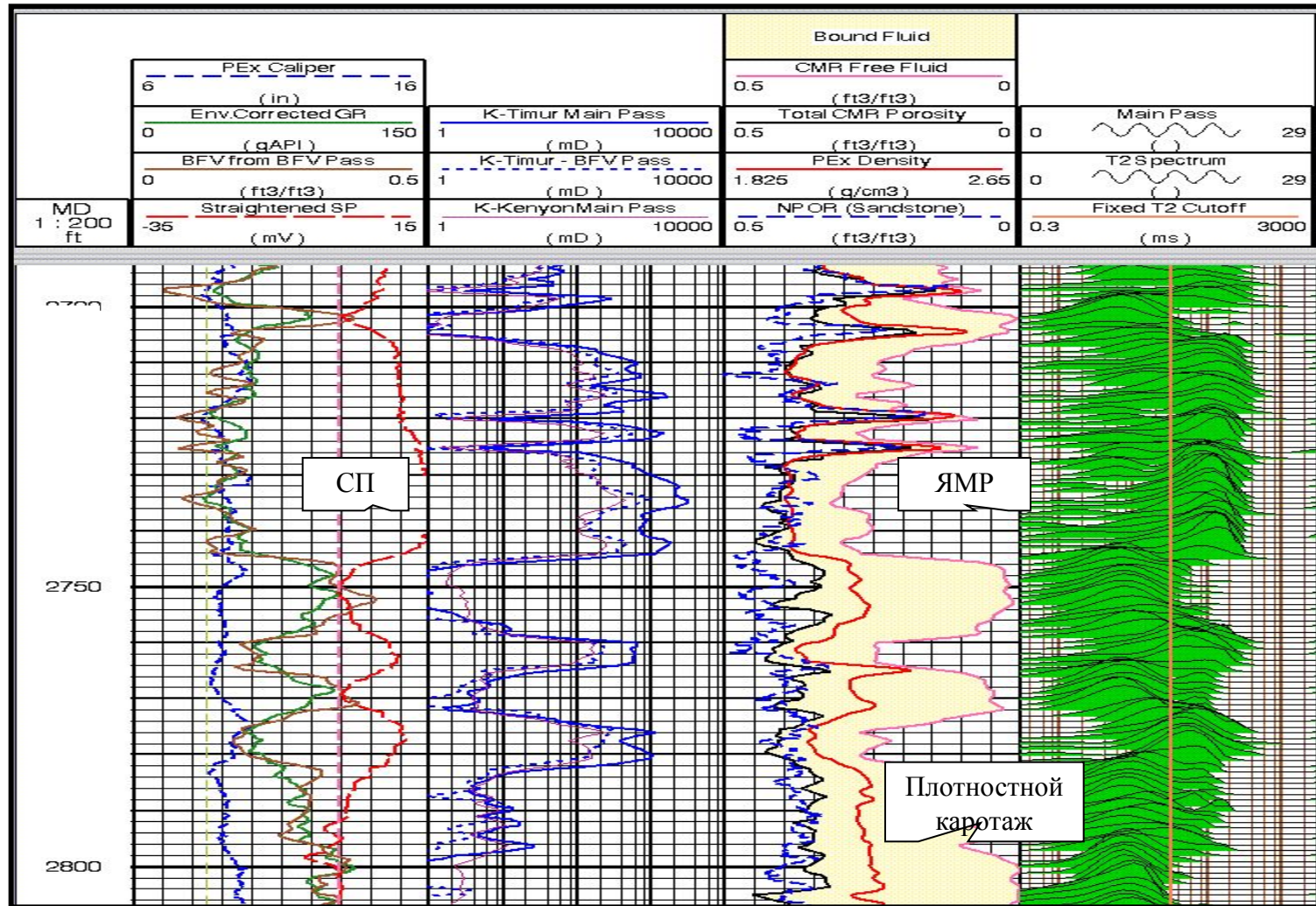
Сопоставление пористости и проницаемости полученных по ЯМР с керном



Изображение форм волн ЯМР

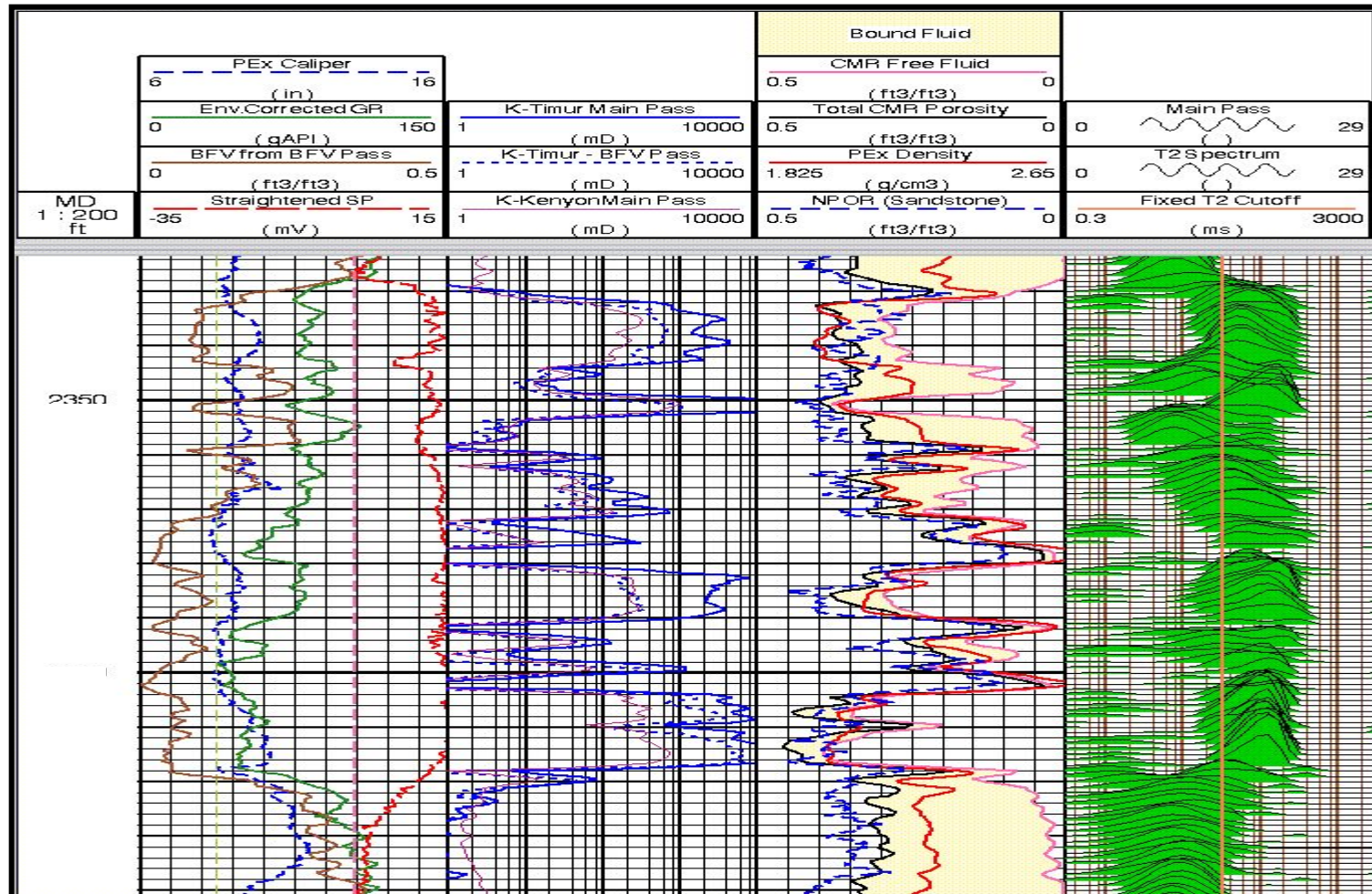


Индикация песчаников по ЯМР



Хорошее соответствие между ГК и объемом связанной жидкости (BFV), также видны аномалии СП

Индикация песчаников по ЯМР

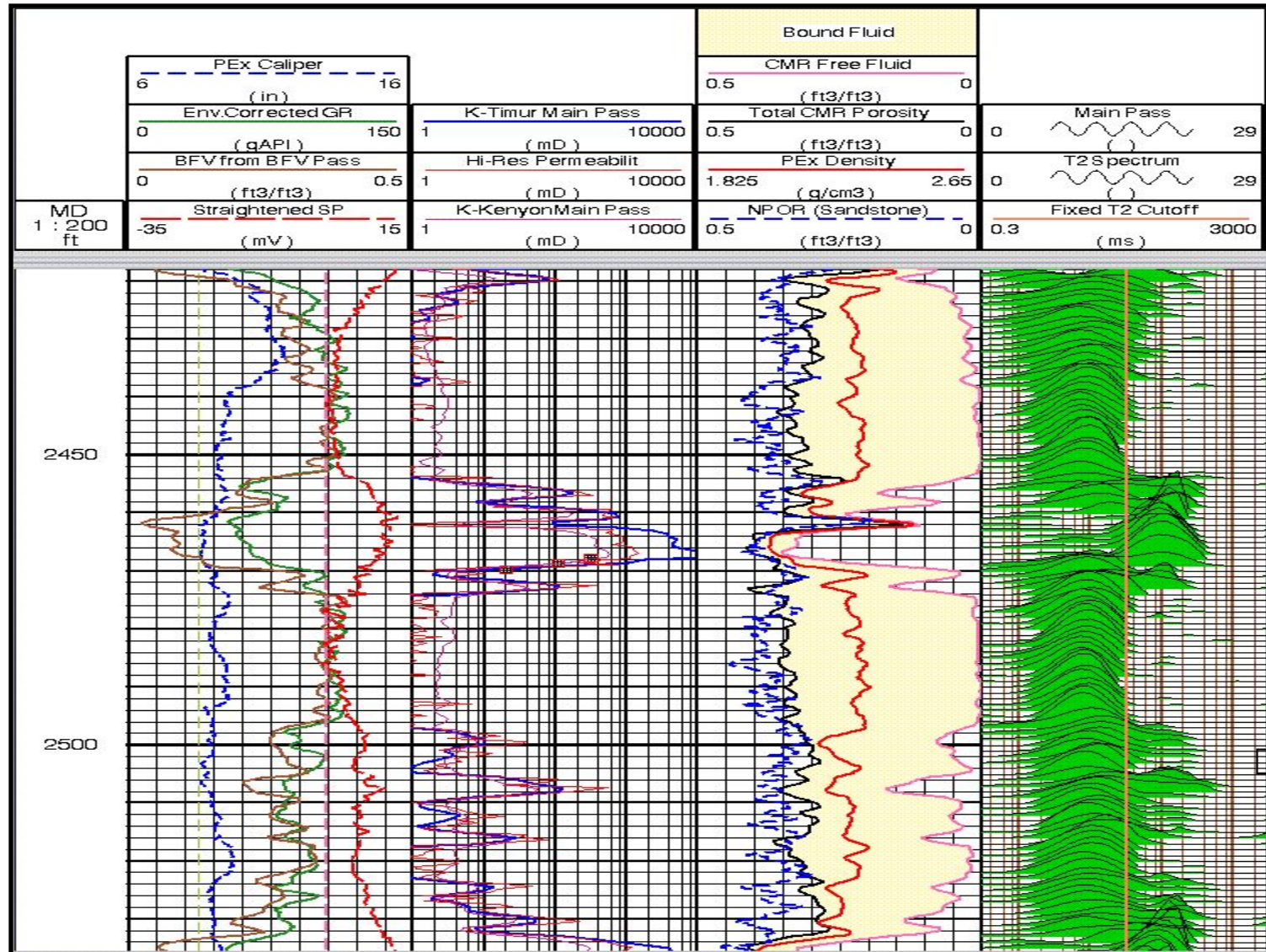


По данным ГК песчаники не выделяются, данные ЯМР согласуются с результатами СП

Выделение тонких песчаных пластов

- ❖ Прибор ЯМР имеет диаметр 6 дюймов
- ❖ В условиях скважины может быть достигнута разрешающая способность по вертикали – 8 дюймов (6 дюймов прибор+ временная константа)
- ❖ Стандартные приборы каротажа - плотностной, нейтронный имеют разрешающую способность по вертикали порядка 18 дюймов, в глубину – 3 диаметра прибора.
- ❖ В тонких переслаивающихся песчаниках (<6 дюймов) по данным ЯМР сигналы от свободной и связанной воды не разделяются, пока пласт не достигнет мощности 18 дюймов.
- ❖ Две фракции в песчанике выделяются как бимодальное распределение данных ЯМР.

Выделение тонких песчаных пластов



Тонкие
слои
песчаников

Применение ЯМР:

- **Наблюдение T2 является способом изучения явления ЯМР.**
- **Пористость определенная методом ЯМР в лабораторных условиях хорошо совпадает с пористостью, определенной по керну гидростатическим методом**
- **Разделение продуктивной части пласта от непродуктивной основано на выделении порогового времени, которое зависит от минералогии**
- **ЯМР может использоваться для оценки проницаемости флюидов в песчанике. Результаты для карбонатных пород не настолько хороши, из-за влияния пустот в породе.**