

Роль и значение классической петрофизической интерпретации и современного моделирования физических свойств горных пород (Rock Physics) в прогнозе свойств коллекторов при помощи методов сейсмических инверсий

Федотов С.

Копылов М.

Некрасова Т.





Стохастические

AI

Детерминистические

Геостатистическая AVO/AVA инверсия

Al, Si, ρ , Vp, Vs

Синхронная AVO/AVA

По кубам разных углов/удалений

Основные положения

I. Петрофизическая интерпретация скважинных данных

✓ Керновая информация
(физические, упругие,
электрические свойства,
...)

✓ ГИС (GR, NK, LLD, MSFL,
SP, CALI, RHOB, DT...)

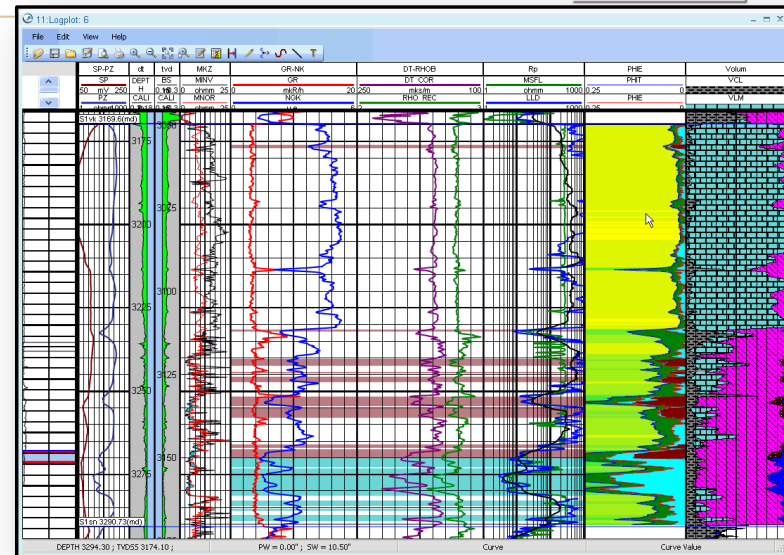
✓ ...

Коэффициент глинистости

Коэффициент пористости

Коэффициент насыщения

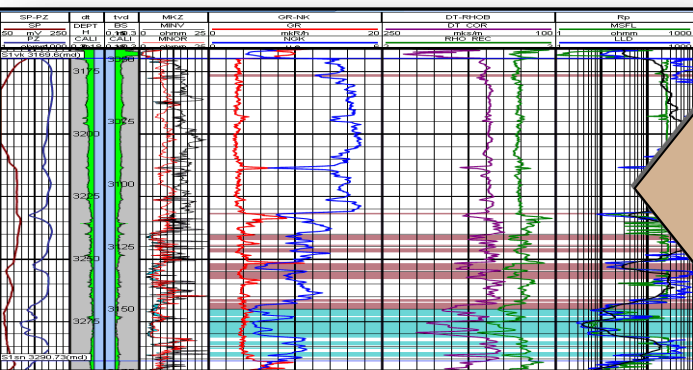
...



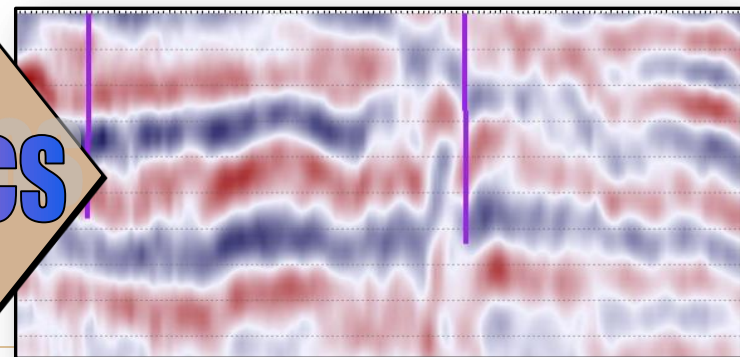
✓ Инверсия по суммарному кубу: AI
(RHOB, DT)

✓ Инверсия по кубам разных удалений
(RHOB, DT, DTS)

II. Анализ упругих свойств (Rock Physics)

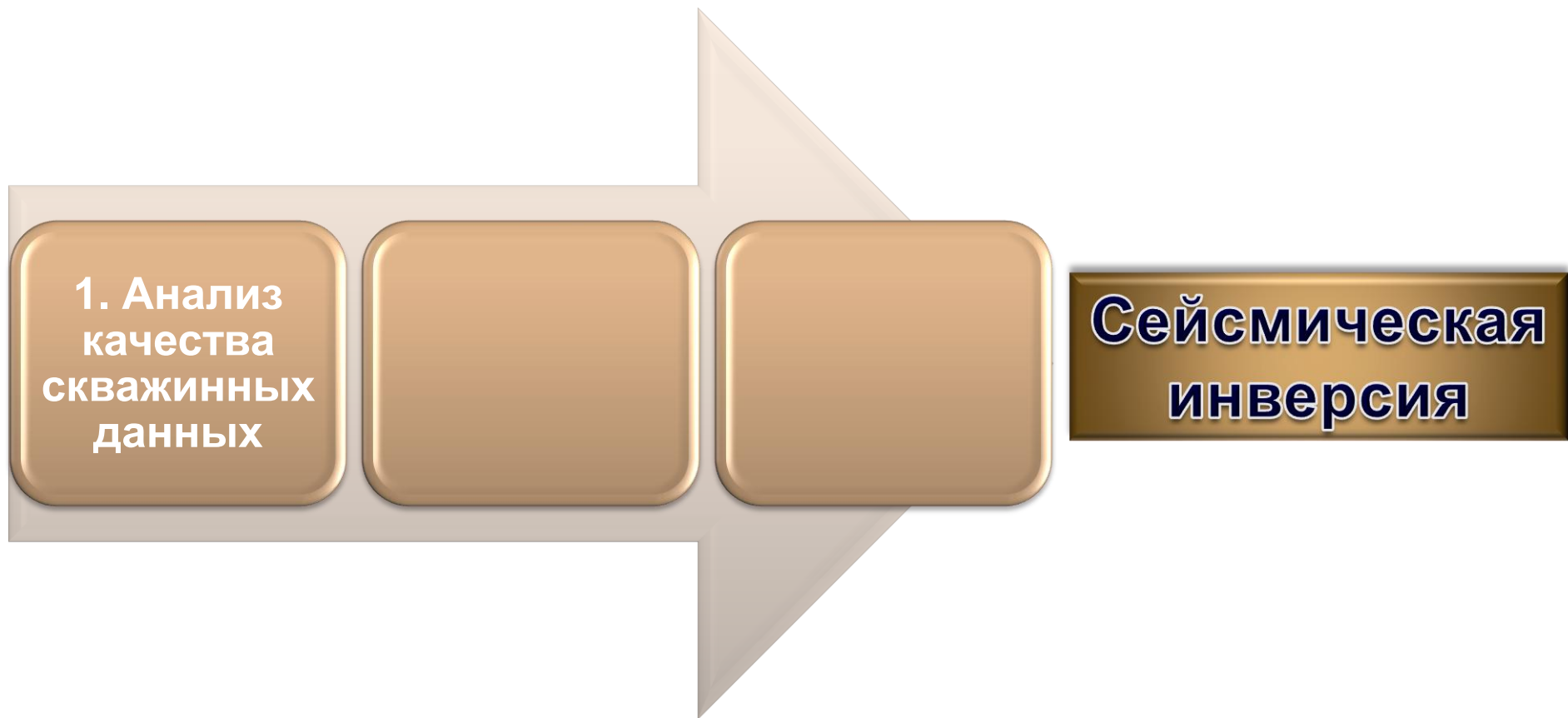


Rock Physics





Этапы интерпретации скважинных данных



Цель:

Выполнить нормирование сейсмических амплитуд, увязку сейсмических и скважинных данных и построение низкочастотной модели

Задачи:

Оценить качество скважинных данных для дальнейших сейсмических преобразований

Скважинные данные:

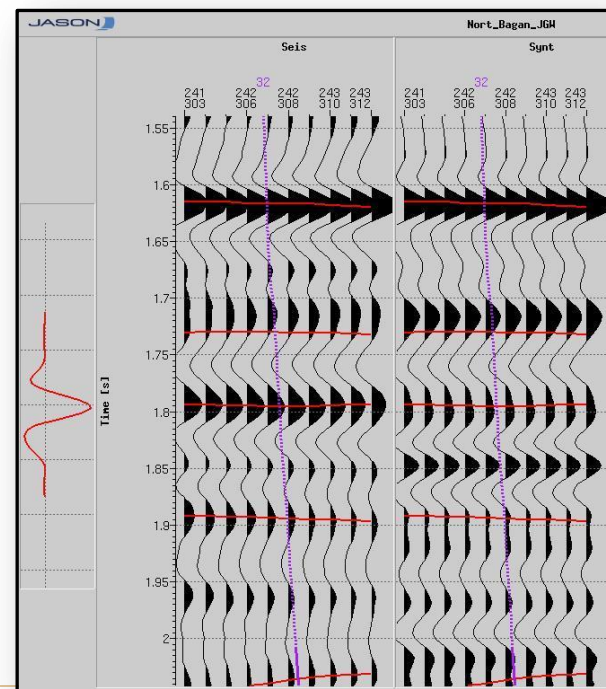
Акустический импеданс,
Сдвиговый импеданс

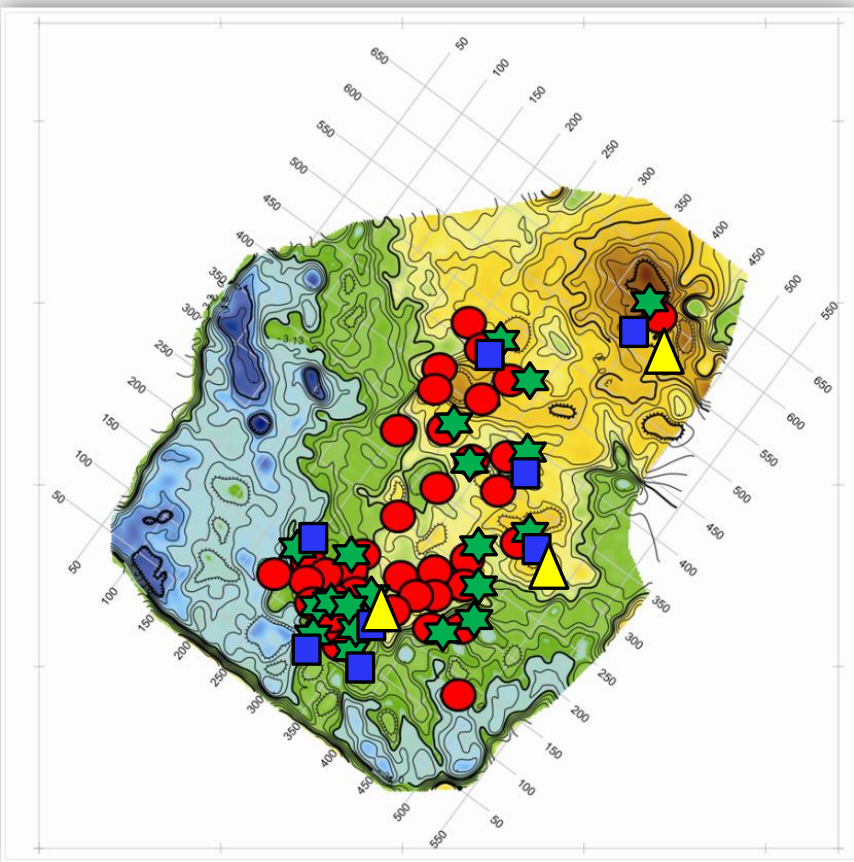
$$AI = \rho_{HOB}/DT$$

$$SI = \rho_{HOB}/DT_s$$

Волновое поле

Наблюдаемое Синтетическое





I. Петрофизическая интерпретация скважинных данных

● 39 скважин

II. Анализ упругих свойств (Rock Physics)

★ DT – 20 скважин

■ RHOB – 8 скважин

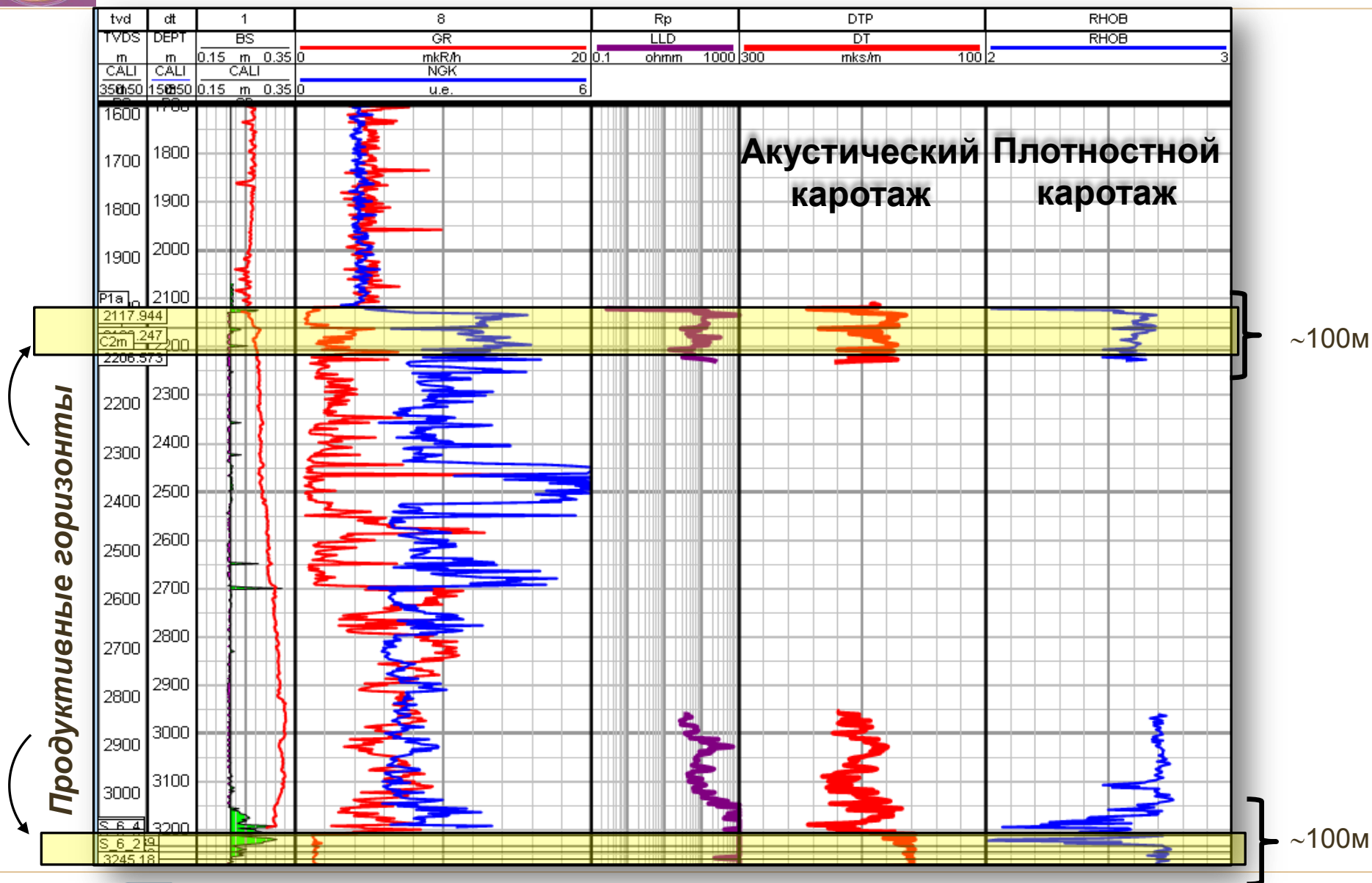
▲ DTS – 3 скважины

Вывод:

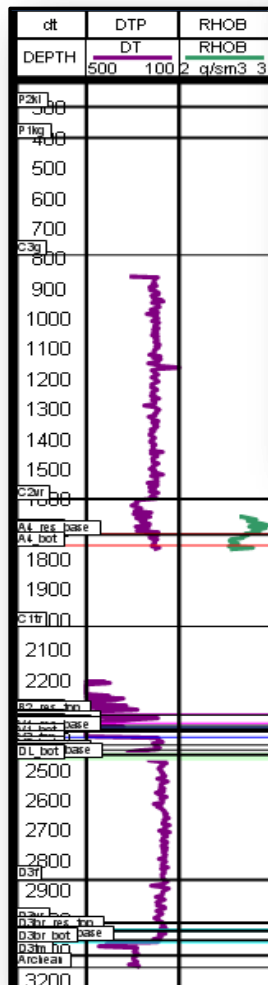
Инверсия по суммарному кубу – использование 8 скважин

Инверсия по кубам разных удалений – использование 3 скважин

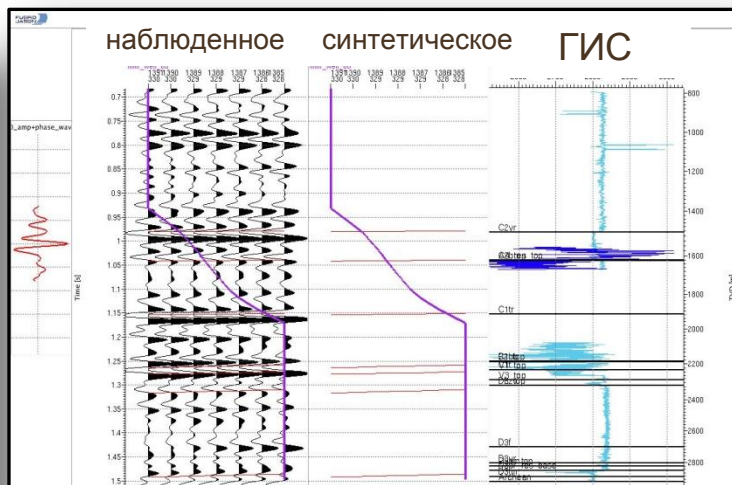
Оценка качества ГИС



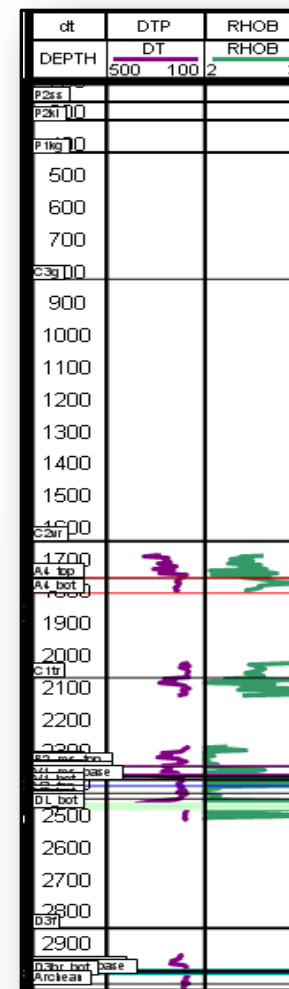
Well X



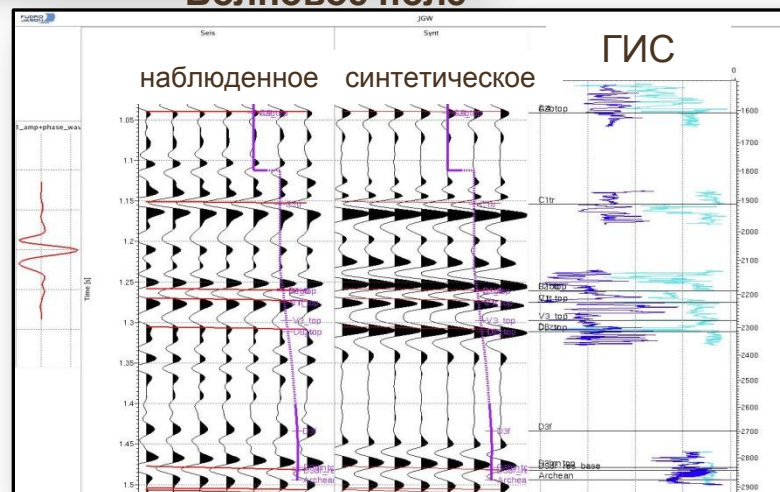
Волновое поле

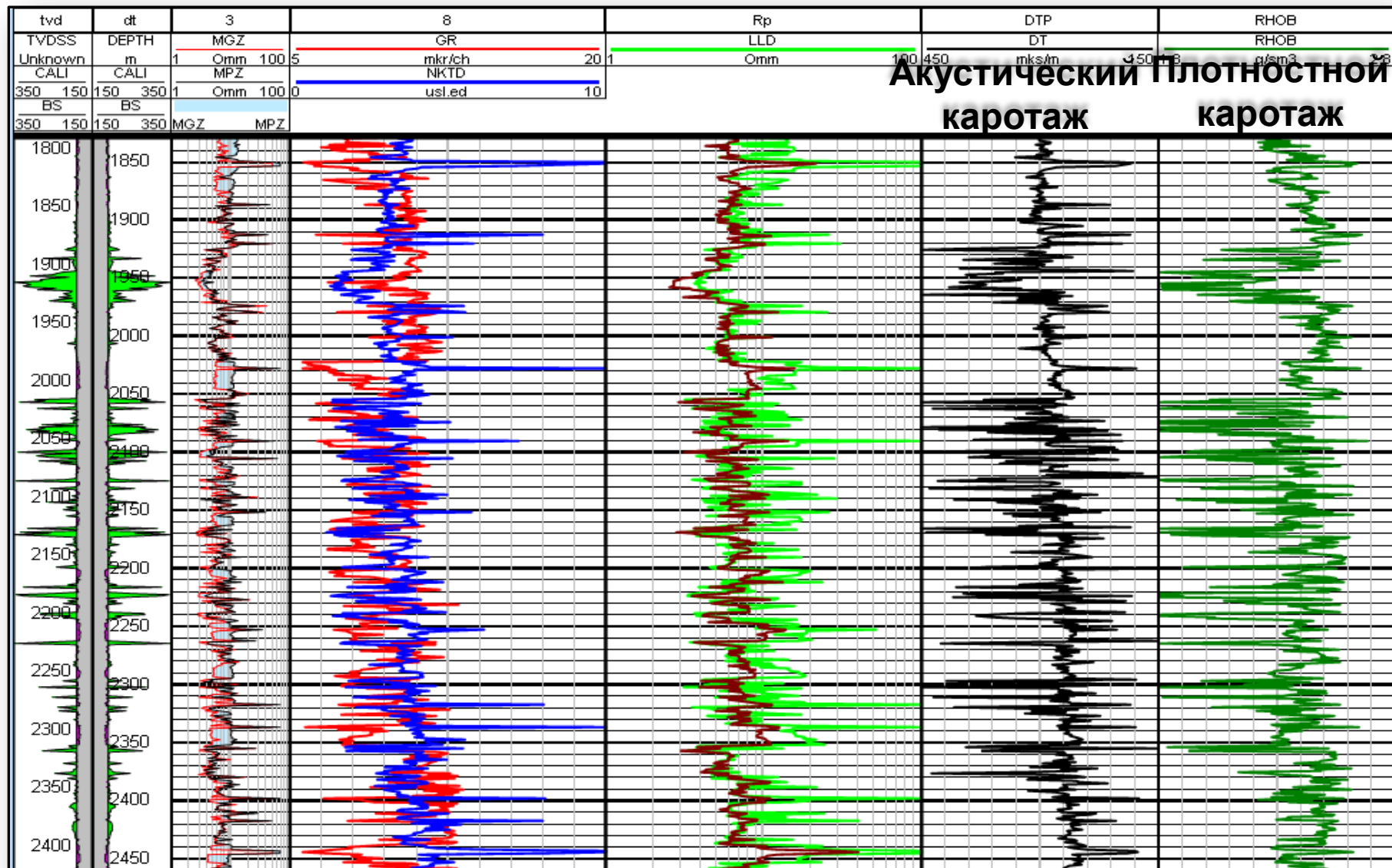


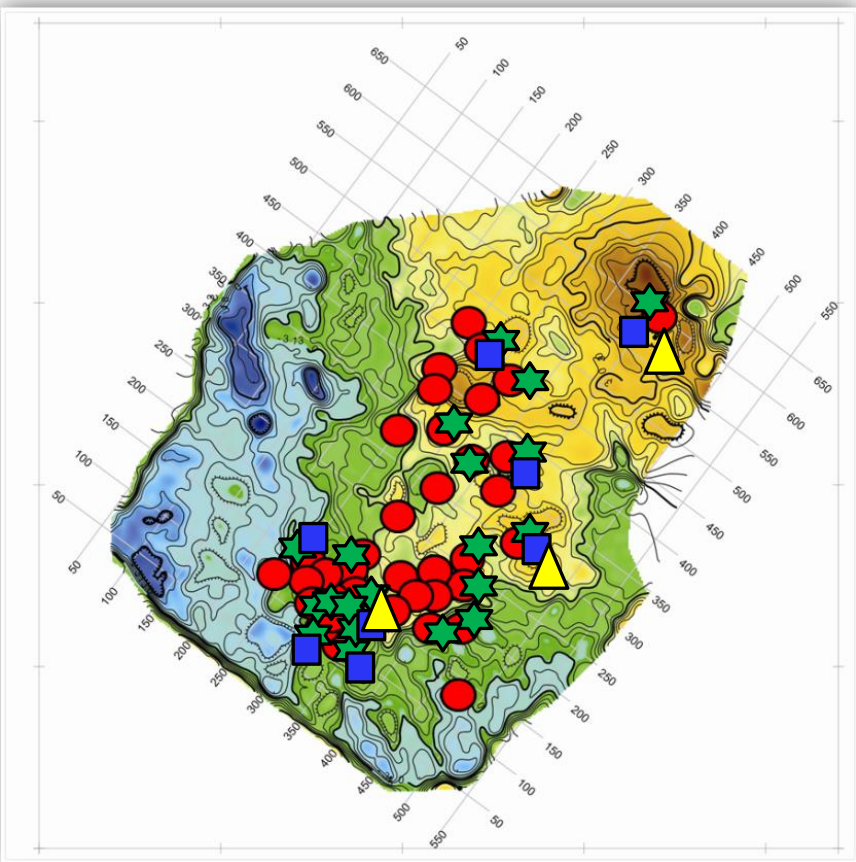
Well Y



Волновое поле







I. Петрофизическая интерпретация скважинных данных

● 39 скважин

II. Анализ упругих свойств (Rock Physics)

★ DT – 20 скважин

■ RHOV – 8 скважин

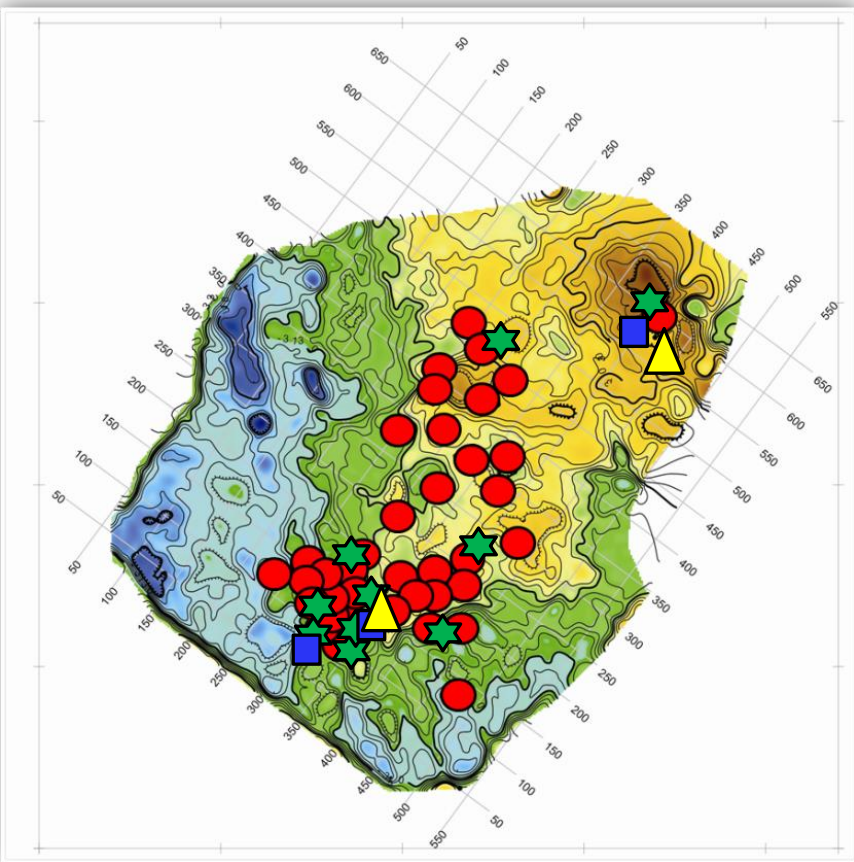
▲ DTS – 3 скважины

Вывод:

Инверсия по суммарному кубу – использование 8 скважин

Инверсия по кубам разных удалений – использование 3 скважин

Исходные скважинные данные



I. Петрофизическая интерпретация скважинных данных

● 39 скважин

II. Анализ упругих свойств (Rock Physics)

★ DT – 10 скважин

■ RHOV – 3 скважин

▲ DTS – 2 скважины

Вывод:

Инверсия по суммарному кубу – использование 3 скважин

Инверсия по кубам разных удалений – использование 2 скважин

ПЕРВАЯ ПРИЧИНА необходимости выполнения моделирования *RockPhysics* :

Применение различных подходов Rock Physics необходимо для:

- коррекции показаний в интервалах размывов ствола скважины
- восстановления показаний в методах, используемых в различных сейсмических преобразованиях

➤ Нормализация показаний каротажа

➤ Коррекция / синтезирование показаний DT

➤ Коррекция / синтезирование показаний RHOV

➤ Коррекция / синтезирование показаний DTs

Эмпирический подход RockPhysics

Коррекция / синтезирование показаний DT (Вилли, Раймер, Хан, Тосайя)

- $DT = f(PHI), DT = f(PHI, VCL)$
- $DT = \frac{a}{(Depth \cdot Rt)^b}$ уравнение Фауста
- $DT = -90 \cdot \ln_{10}(NK - k) + m$ уравнение Заляева

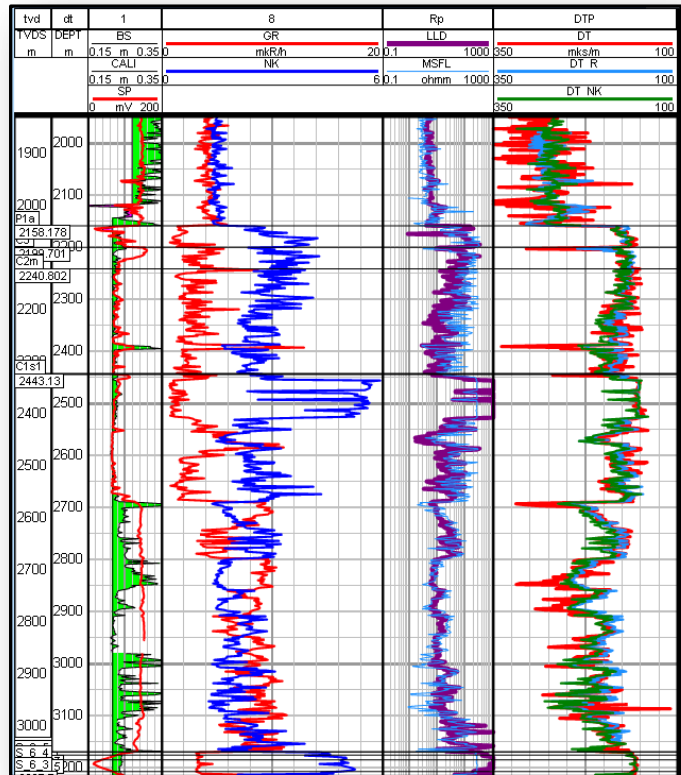
Коррекция / синтезирование показаний RHOV (Гарднера-Кастанья)

- $RHOV = f(DT), RHOV = f(DT, VCL)$

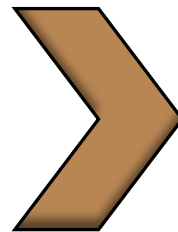
Коррекция / синтезирование показаний DTs (Гринберг-Кастанья, Хан, Тосайя)

- $DTs = f(DT), DTs = f(DT, VCL)$

Опорная скважина №1

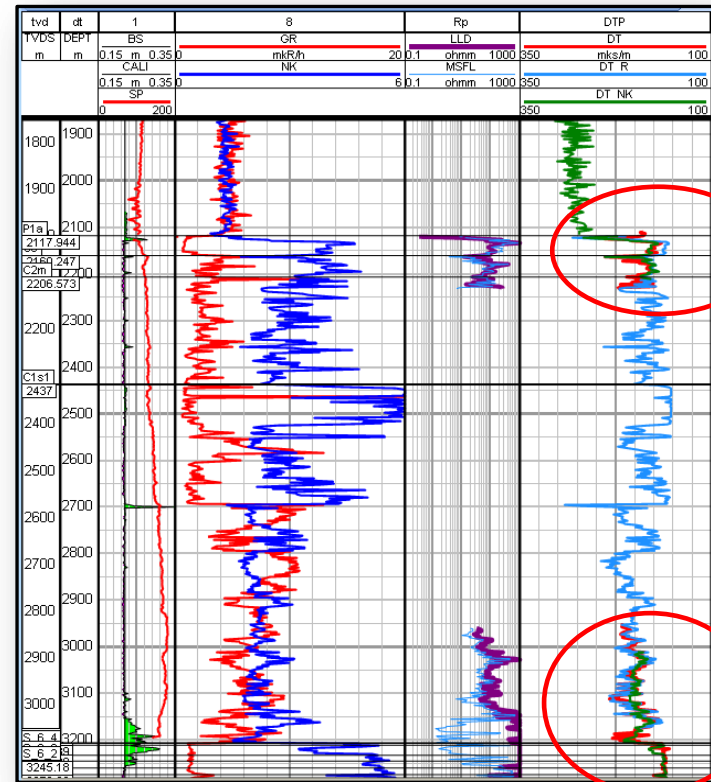


DT



Скважина №14

DT



Уравнение Фауста

$$\Delta T_p = \frac{a}{(Depth \cdot Rt)^b}$$

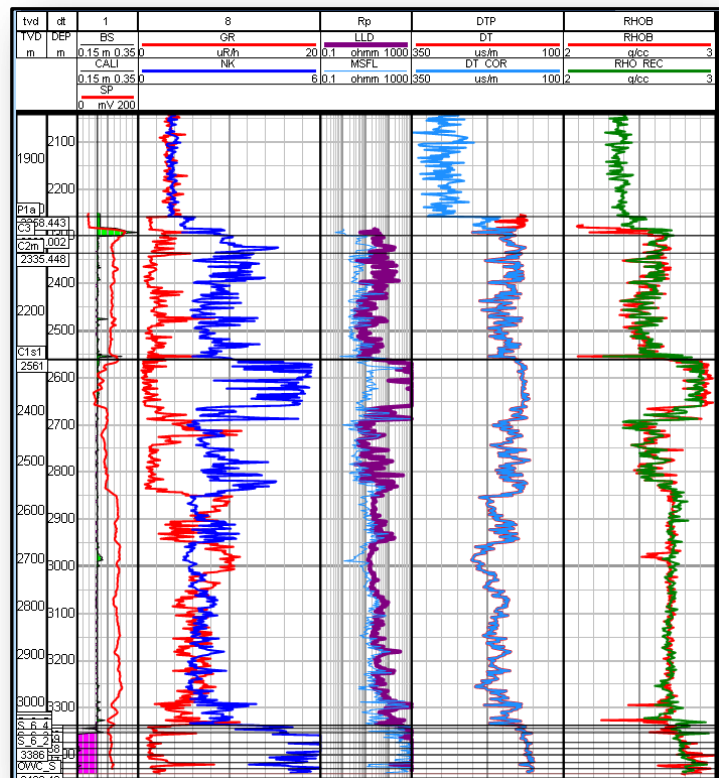
a, b – нормировочные коэффициенты ($a = 600 \div 1000$, $b = 0.1 \div 0.3$);
 $Depth$ – глубина, м;
 Rt – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Методика Залаяева

$$\Delta T_p = -90 \cdot \ln_{10}(NK - k) + m$$

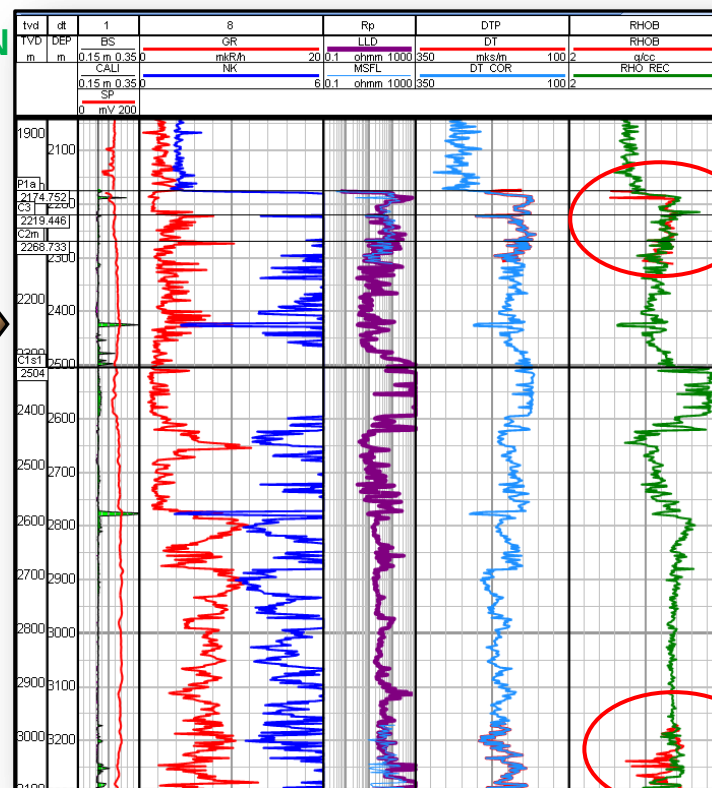
k, m – нормировочные коэффициенты ($k = 1.1 \div 4$, $m = 180 \div 300$);
 NK – показания нейтронного каротажа

Опорная скважина



RHOV

RHOV_SYN



RHOV

RHOV_SYN

$$\rho_{\text{рас}} = \rho' + V_{\text{sh}} \cdot M'$$

$$\rho' = a V_p^2 + b V_p + c$$

V_{sh} – двойной разностный параметр ГК

M' – пересчетный коэффициент для глинистых пород

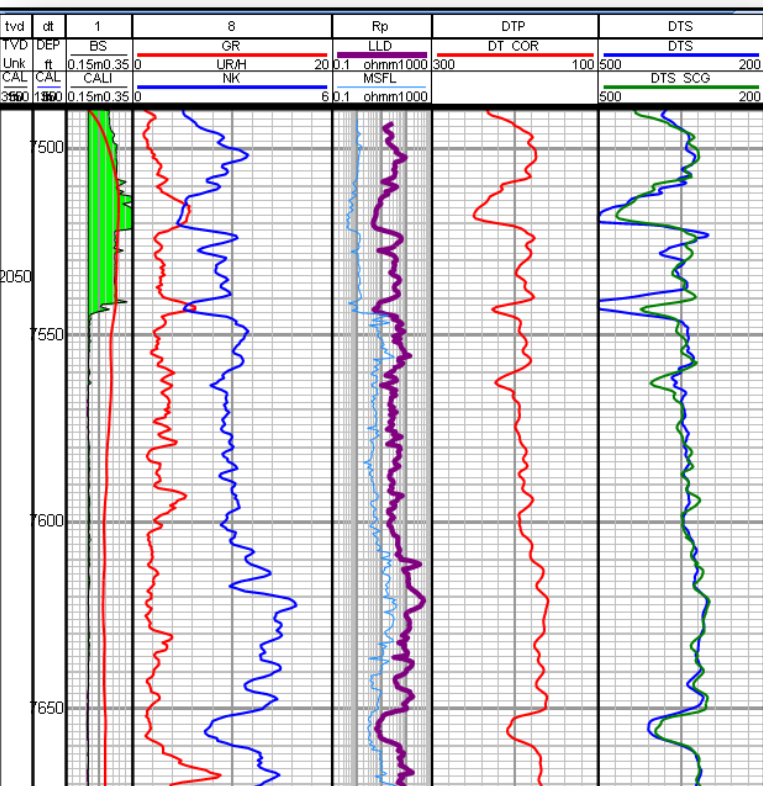
Коэффициенты Гарднера-Кастанья

Литология	a	b	c
Песчаник	-0.0115	0.261	1.515
Известняк	-0.0296	0.461	0.963
Долomit	-0.0235	0.39	1.242
Ангидрит	-0.0203	0.321	1.732

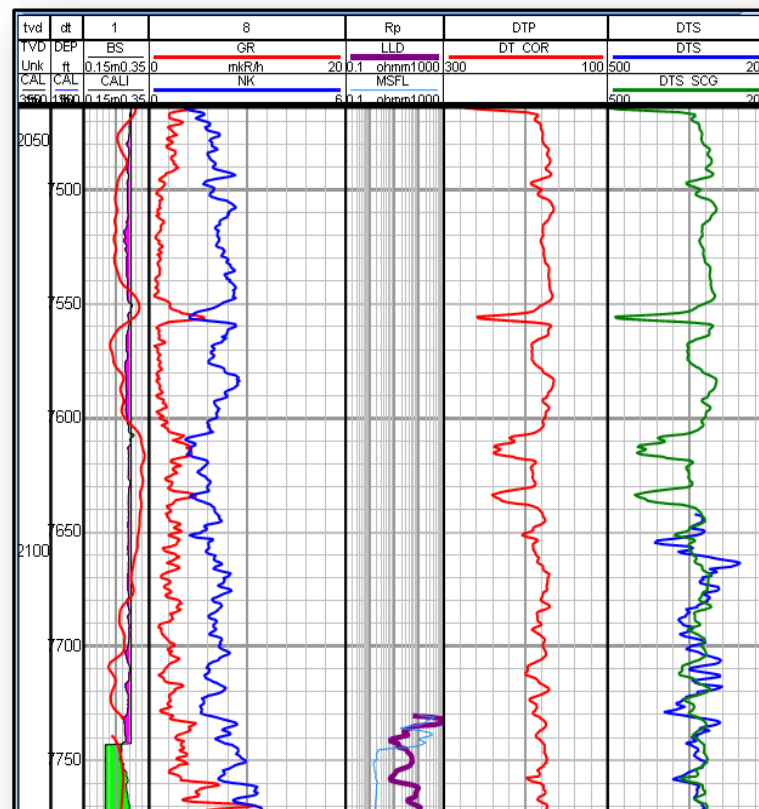
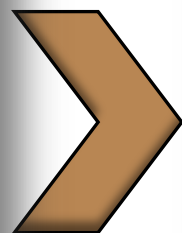
Коррекция данных ГИС

Коррекция данных DTS

Опорная скважина



DTS
DTS_SYN



DTS
DTS_SYN

$$V_{s_{pac}} = V_{s1} \cdot (1 - V_{sh}) + V_{s_sh} V_{sh}$$

$$V_s = a_2 V_p^2 + a_1 V_p + a_0$$

V_{sh} – двойной разностный параметр ГК

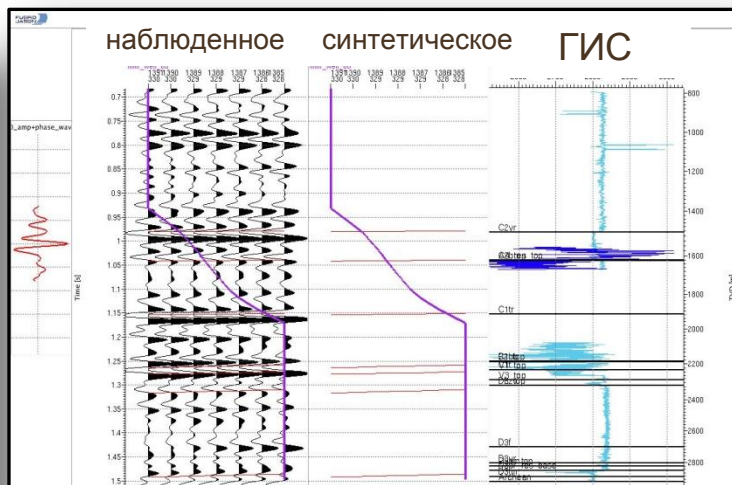
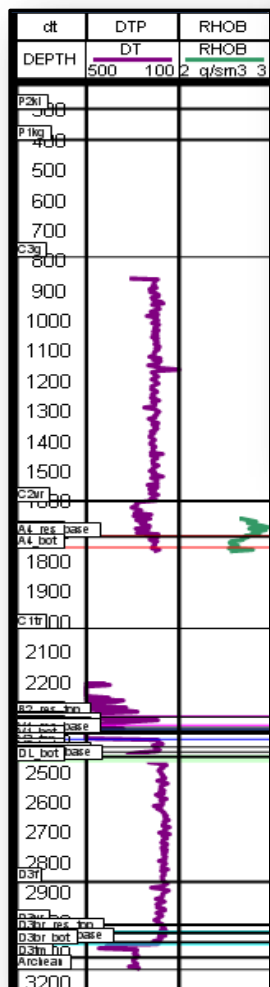
Коэффициенты Гринберга-Кастанья

Литология	a2	a1	a0
Песчаник	0	0.8416	-0.85588
Известняк	-0.05508	1.01677	-1.03049
Доломит	0	0.58321	-0.07775
Глина	0	0.76969	-0.86735

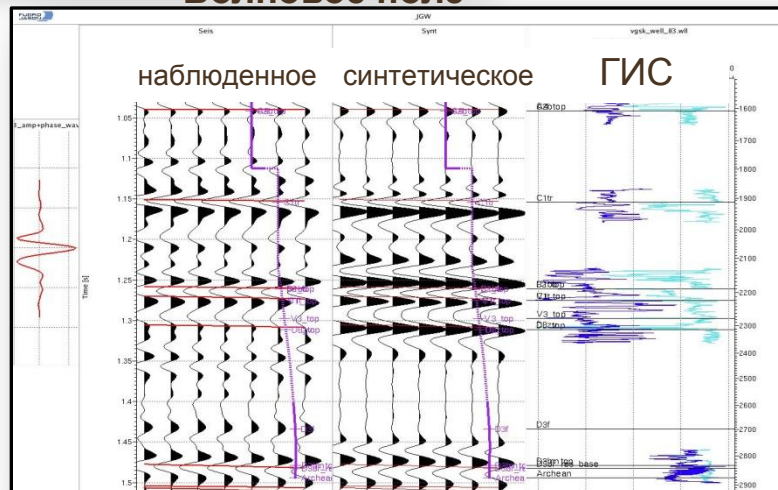
Оценка качества ГИС до введения поправок

Well X

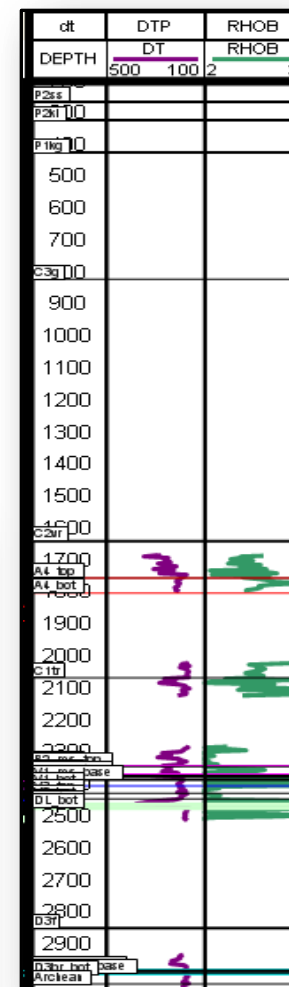
Волновое поле



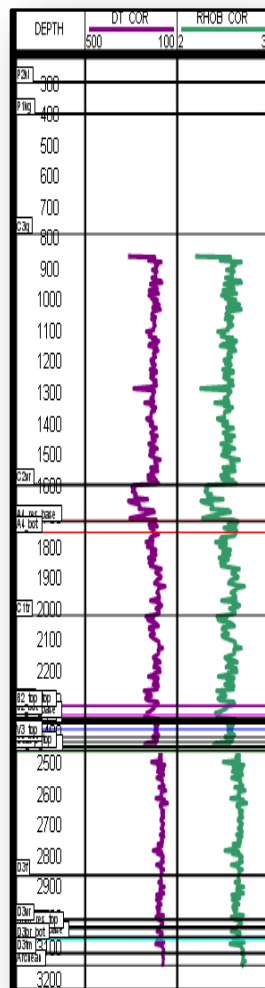
Волновое поле



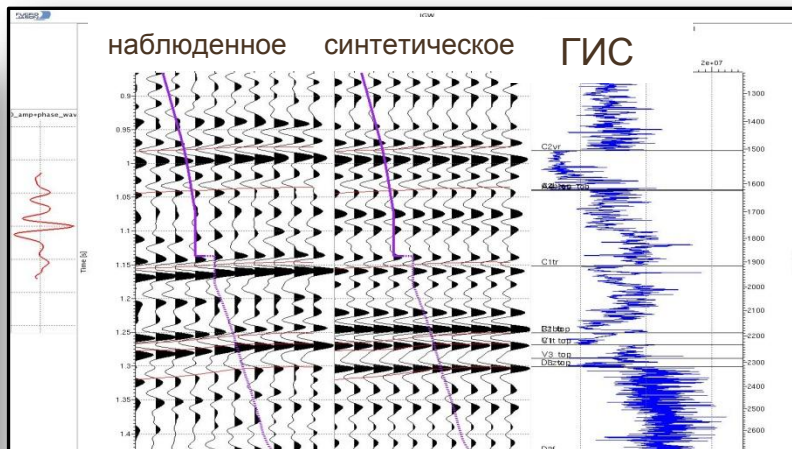
Well Y



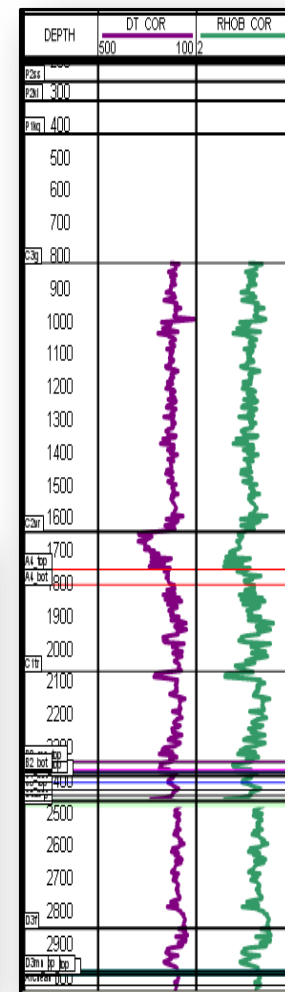
Well X



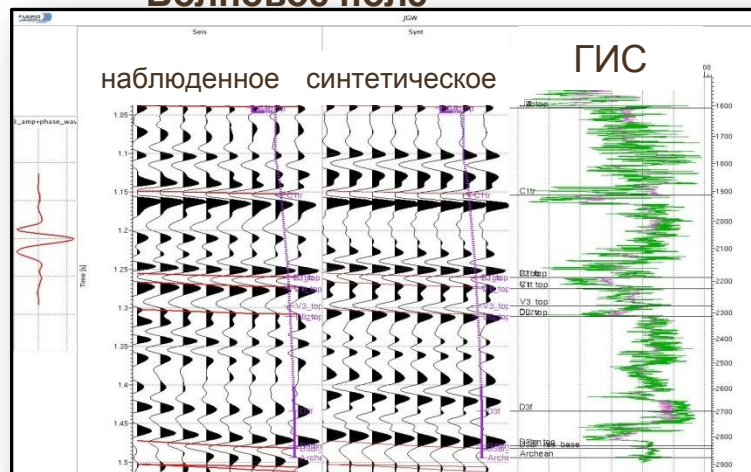
Волновое поле



Well Y



Волновое поле



I. Петрофизическая интерпретация скважинных данных

Оценка глинистости

Расчленение разреза по литологии

...

II. Анализ упругих свойств (Rock Physics)

Подбор параметров в известные эмпирические уравнения

Принять значения синтетических уравнений, в интервалах, где исходные замеры DT , DTs или $RHOV$ отсутствуют или искажены в интервалах размыва ствола скважины



Цель:

Выявить закономерности между физическими свойствами и упругими параметрами, определить тип сейсмической инверсии в исследуемом интервале

Задачи:

Построить кросс-плоты различных упругих параметров, выявить влияние каждого из физических свойств пород на упругие характеристики породы

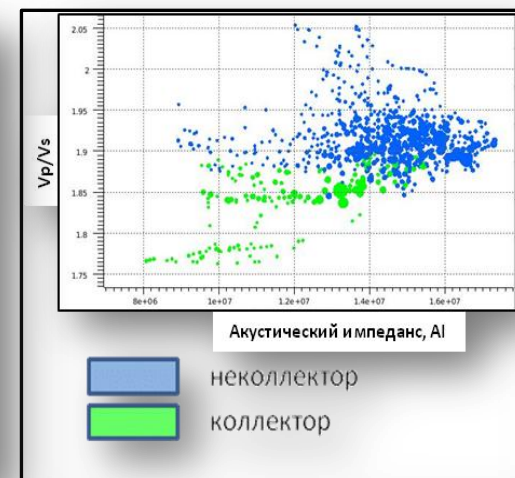
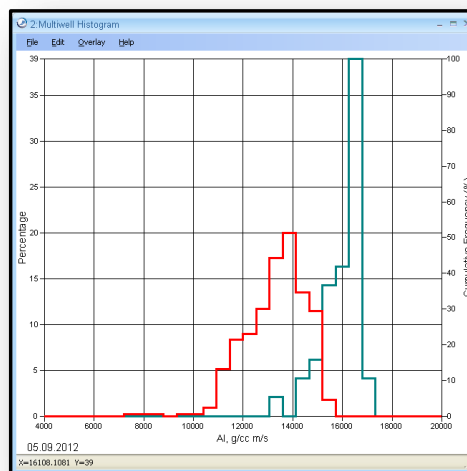
Скважинные данные:

DT

DTs

RHOV

Результаты интерпретации ГИС



Анализ скважинных данных для выполнения сейсмической инверсии

Определение физических свойств породы (построение объемной модели в исследуемом интервале разреза) и выделение «литотипов»

Оценка глинистости:

По палетке Ларионова,
RHOV+NK
DT+NK
RHOV+DT

Оценка пористости и минеральных компонент породы:

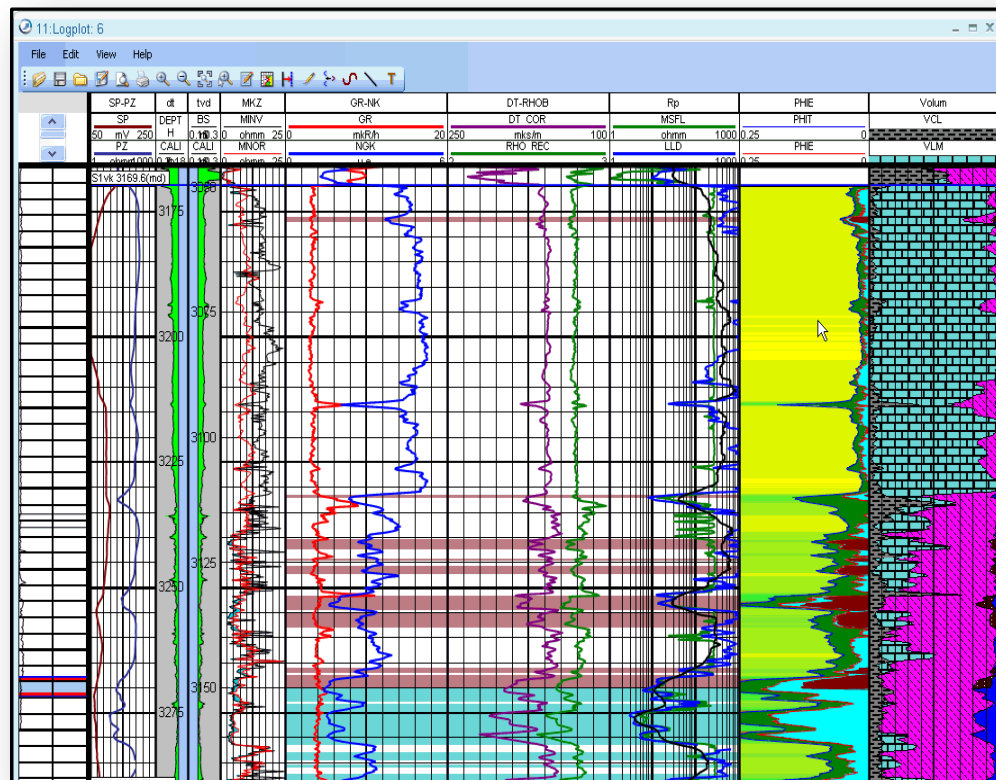
Детерминистический подход:

- по одному методу
- по комплексу методов

Стохастический подход

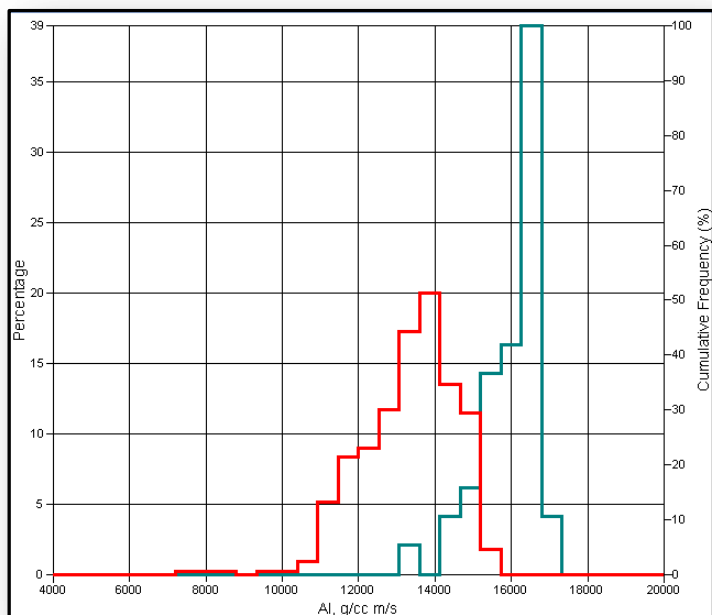
Оценка насыщения:

По методу Дахнова-Арчи
По методу Симанду

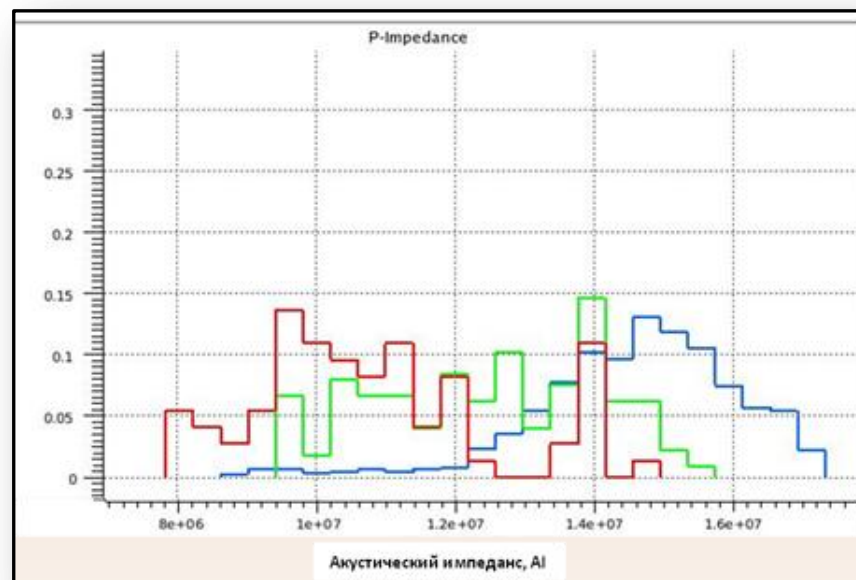


Анализ скважинных данных для выполнения сейсмической инверсии

Анализ данных в поле акустического импеданса



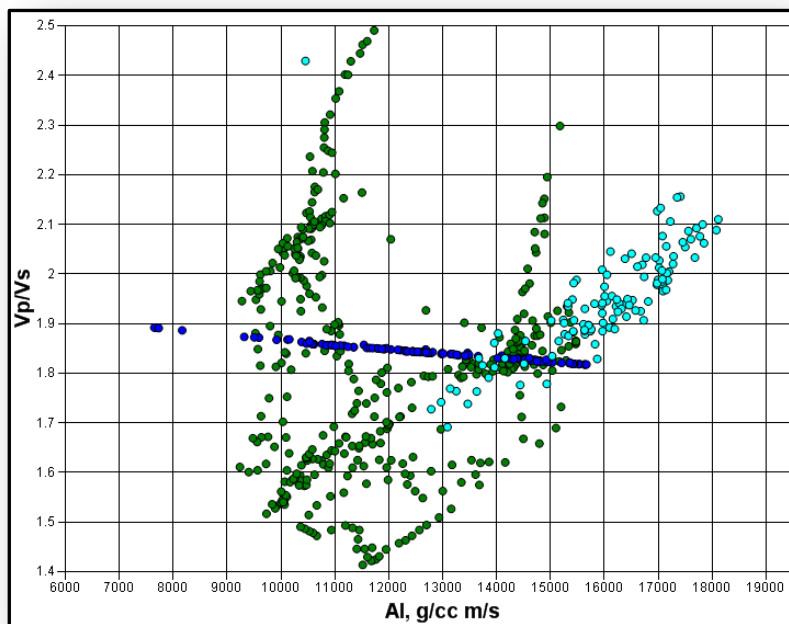
— Коллектор
— Неколлектор



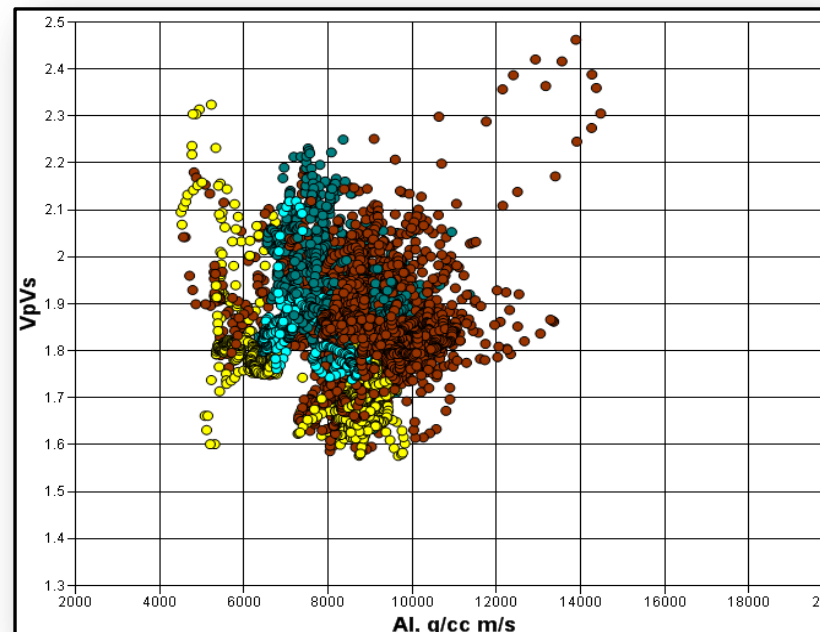
— Коллектор нефтенасыщенный
— Коллектор водонасыщенный
— Неколлектор

Анализ скважинных данных для выполнения сейсмической инверсии

Анализ данных в поле нескольких упругих свойств



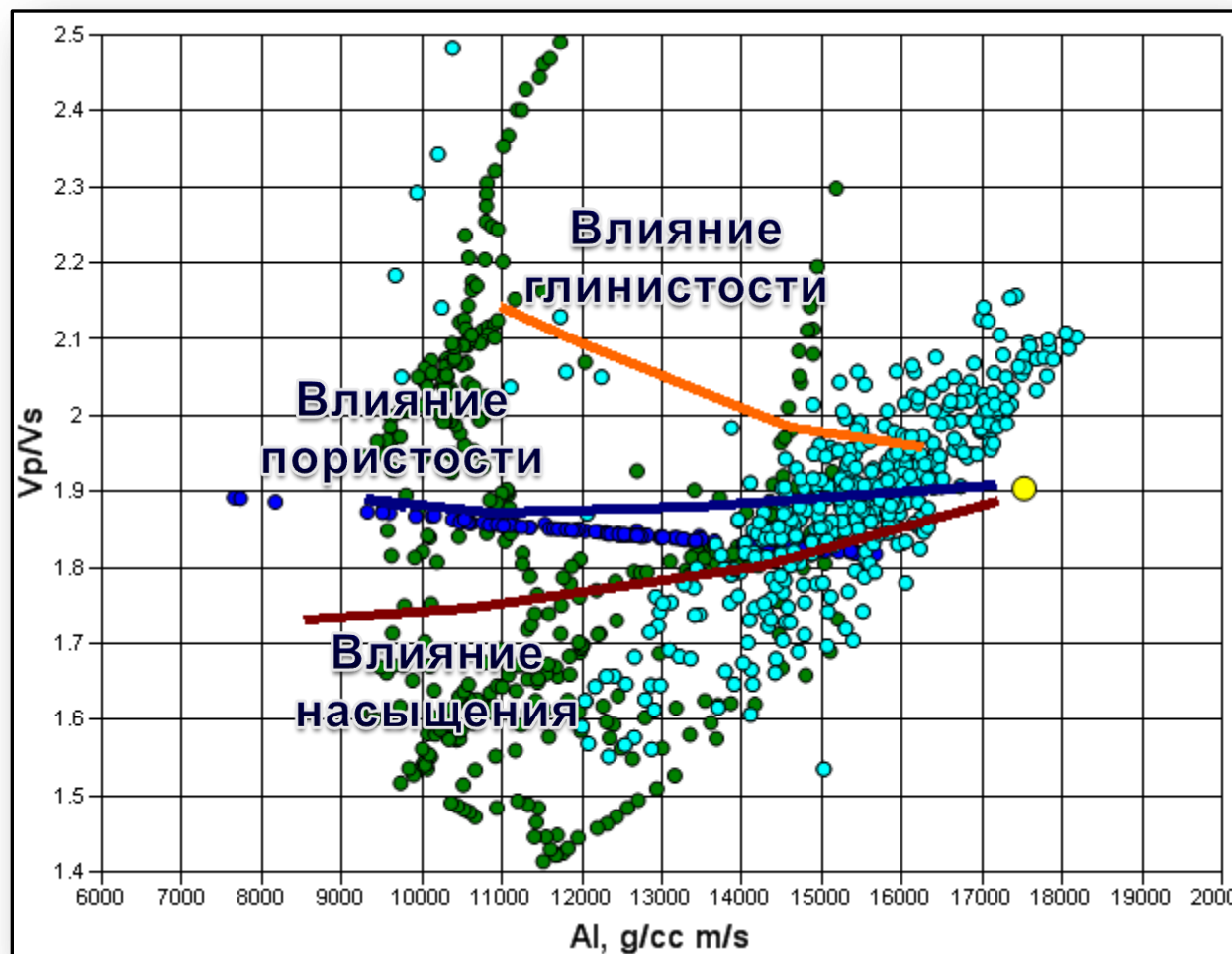
- Скважина 1
- Скважина 2
- Скважина 3



- Газонасыщенный коллектор
- Нефтенасыщенный коллектор
- Водонасыщенный коллектор
- Неколлектор

Анализ скважинных данных для выполнения сейсмической инверсии

Анализ данных в поле нескольких упругих свойств

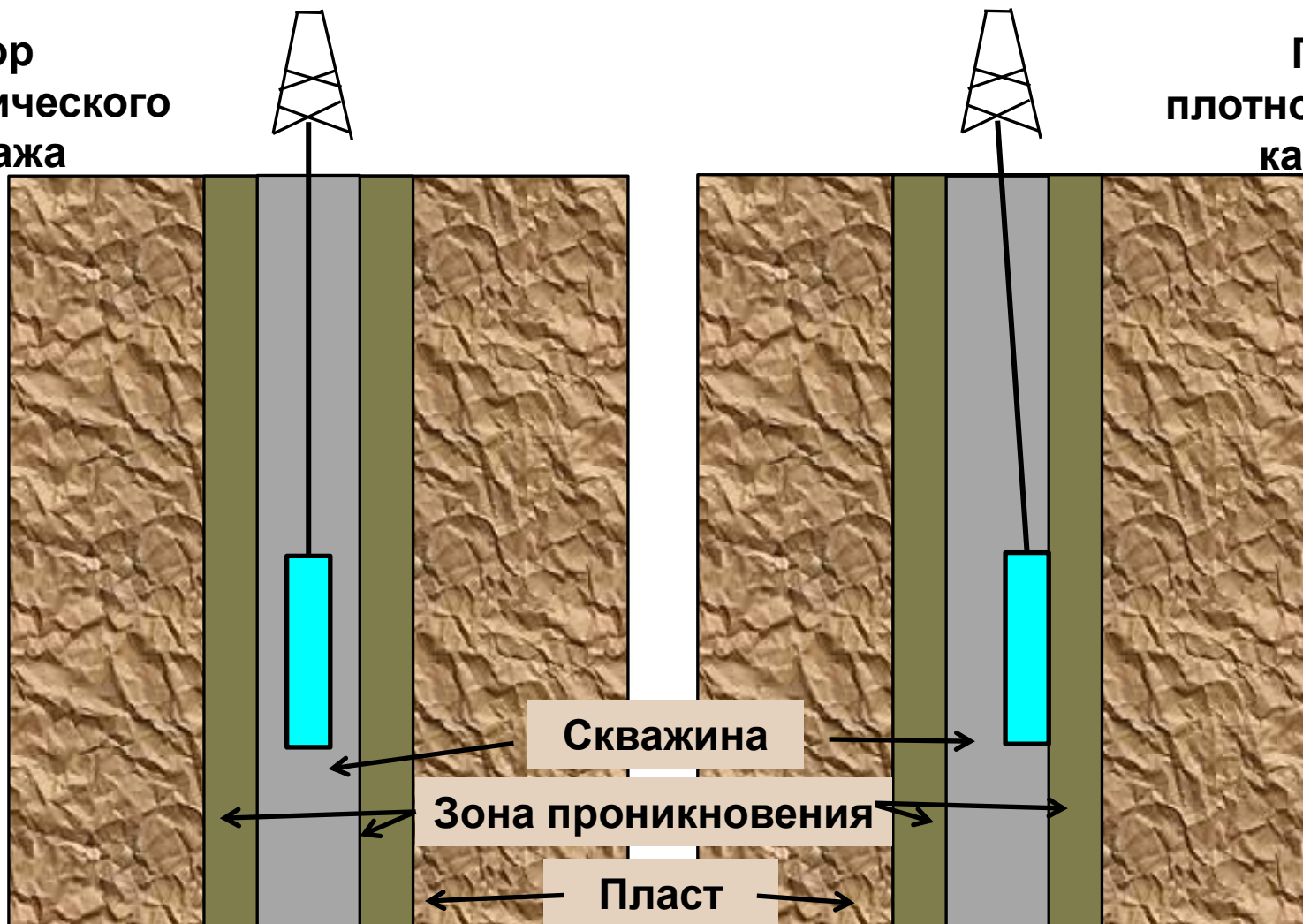


- Скважина 1
- Скважина 2
- Скважина 3

Анализ скважинных данных для выполнения сейсмической инверсии

Прибор
акустического
каротажа

Прибор
плотностного
каротажа



ВТОРАЯ ПРИЧИНА необходимости выполнения моделирования *RockPhysics* :

Применение теоретических подходов Rock Physics дает возможность учесть влияние различных скважинных условий на показания DT, DTS и RHOV

Алгоритм применения теоретического подхода RockPhysics



Модель породы по результатам
интерпретации ГИС

Твердая часть породы
(SOLIDS)

Общая пористость
(Total porosity)

Матрица породы
(Clean rock)

Глина
(Clay)

Открытая пористость
(Effective porosity)

Vdol

Vlm

Vss

Сухая глина
(dry clay)

Общее
водонасыщение
(total water sat)

углеводород

Модель Rock Physics

V минерала
K минерала
 μ минерала
плотность
 α аспектное
соотношение

V минерала
K минерала
 μ минерала
плотность
 α аспектное
соотношение

V минерала
K минерала
 μ минерала
плотность
 α аспектное
соотношение

V глины
K минерала
 μ минерала
плотность
 α аспектное
соотношение

Swt
минерализация
давление
температура

So, Sg
газовый фактор,
плотность нефти
Относительная
плотность газа
давление
температура

Выбирается определенная теоретическая модель
для оценки упругих модулей сухой породы

Выбирается модель для оценки
упругих модулей флюида

Используя модель Гассмана находятся упругие модули породы

Определение упругих модулей породы

Модель Гассмана

$$\frac{K}{K_0 - K} = \frac{K_{dry}}{K_0 - K_{dry}} + \frac{K_{fl}}{PHI(K_0 - K_{fl})} \quad , \mu = \mu_{dry}$$

Где K, μ - упругие модули породы,
 K_{dry}, μ_{dry} - упругие модули сухой породы,
 K_0 - объемный модуль минералов,
 K_{fl} - объемный модуль флюида, насыщающего породу,
 PHI - коэффициент пористости

$$\rho = \sum_{i=1}^N f_i \cdot \rho_i$$

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Оценка упругих модулей флюида породы

✓ $\mu_{fl} = 0$

✓ Исследования Batzle и Wang для определения упругих параметров компонент флюида

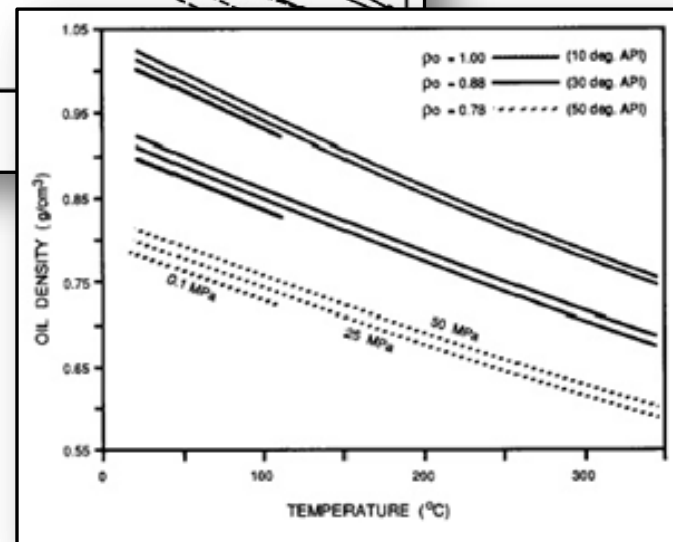
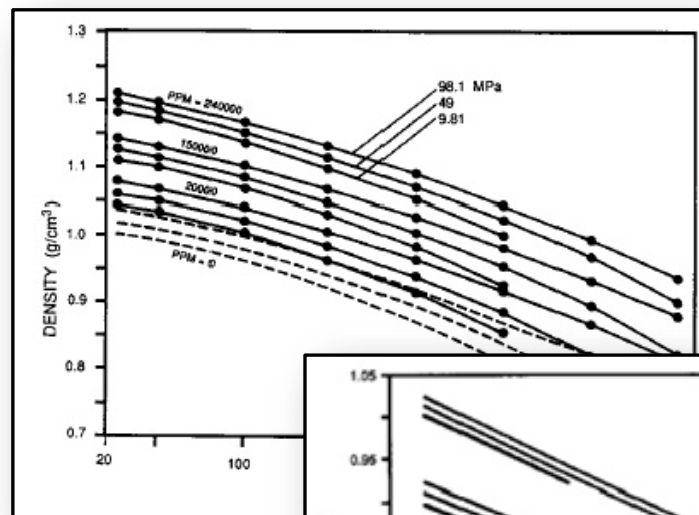
✓ $\rho_{fl} = \sum f_i \rho_i$

✓ Уравнения Wood, Bries или Hill для определения объемного модуля (K) флюида

$$K_{fl} = (K_{bt} - K_{hc}) \cdot S_{wt}^{BrN} + K_{hc}$$

$$\frac{1}{K_{fl}} = \frac{S_{wt}}{K_{bt}} + \frac{1 - S_{wt}}{K_{hc}}$$

$$K_f = \frac{1}{2} (S_{hydr} K_{hydr} + S_{brine} K_{brine}) + \frac{1}{2} \left(\frac{S_{hydr}}{K_{hydr}} + \frac{S_{brine}}{K_{brine}} \right)^{-1}$$



Теоретический подход Rock Physics

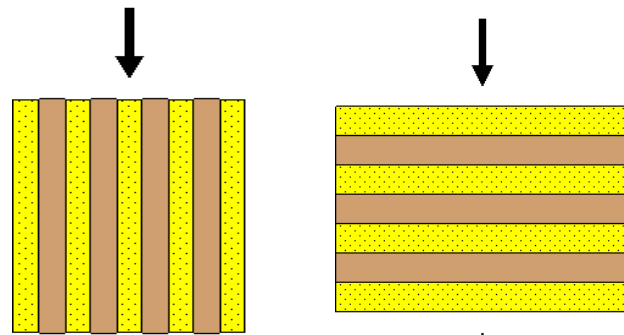
✓ $\rho_m = \sum f_i \rho_i$

✓ Параметры K и μ рассчитываются по

-Модель Voigt-Reuss-Hill

-Модель Hashin-Shtrikman

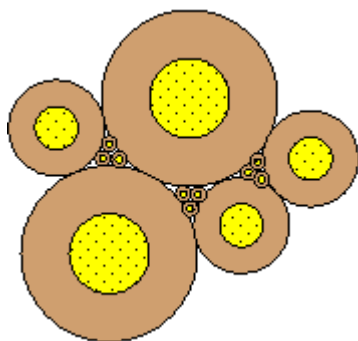
Оценка упругих модулей минералов



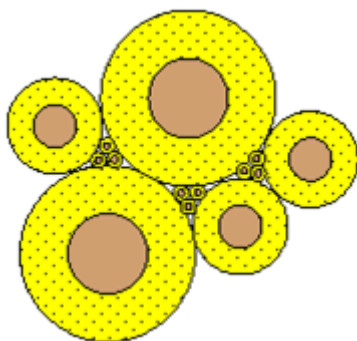
$$M_v = \sum_{i=1}^n f_i M_i$$

$$\frac{1}{M_r} = \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{M_i}$$

$$M_{mx} = \frac{M_v + M_r}{2}$$



Upper (+)



Lower (-)

$$K^+ = K_1 + \frac{f_2}{(K_2 - K_1)^{-1} + f_1(K_1 + 4\mu_1/3)^{-1}},$$

$$\mu^+ = \mu_1 + \frac{f_2}{(\mu_2 - \mu_1)^{-1} + 2f_1(K_1 + 2\mu_1)[5\mu_1(K_1 + 4\mu_1/3)]^{-1}},$$

$$K^- = K_2 + \frac{f_1}{(K_1 - K_2)^{-1} + f_2(K_2 + 4\mu_2/3)^{-1}},$$

$$\mu^- = \mu_2 + \frac{f_1}{(\mu_1 - \mu_2)^{-1} + 2f_2(K_2 + 2\mu_2)[5\mu_2(K_2 + 4\mu_2/3)]^{-1}}$$

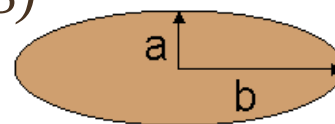
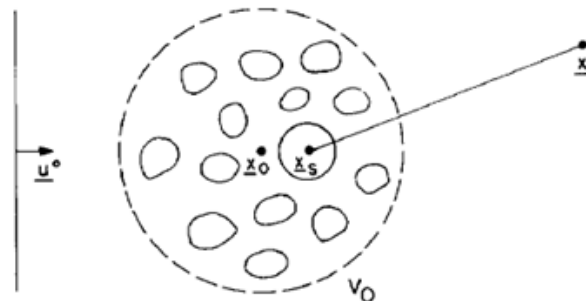
Теоретический подход Rock Physics

Оценка упругих модулей сухой породы

✓ $\rho d = \sum f_i \rho_i$

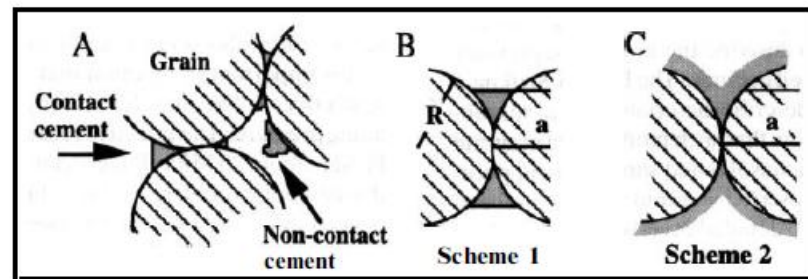
✓ Параметры K и μ рассчитываются по

- Модели включений (Inclusion models)
Eshelby (1957), Cheng (1978, 1993)
Kuster and Toksoz



$$\alpha = \frac{a}{b}$$

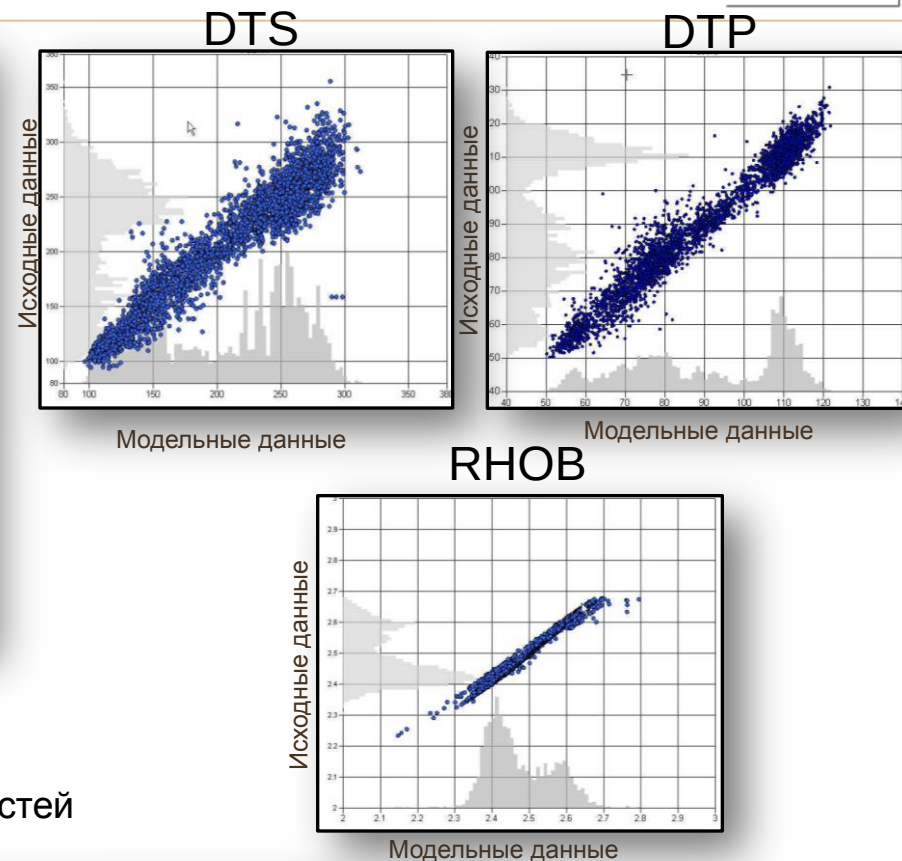
- Модели контактов (Contact models)
Dvorkin and Nur, 1996



Результат теоретического подхода Rock Physics

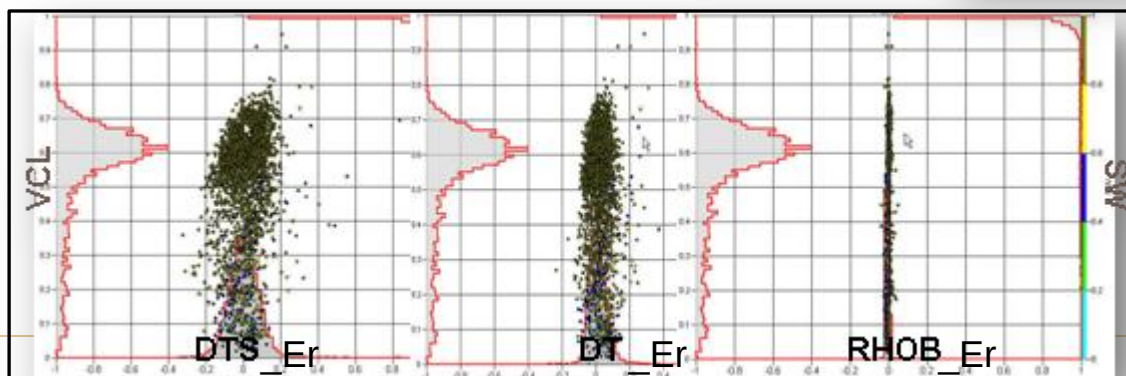


Исходные данные
Модельные данные



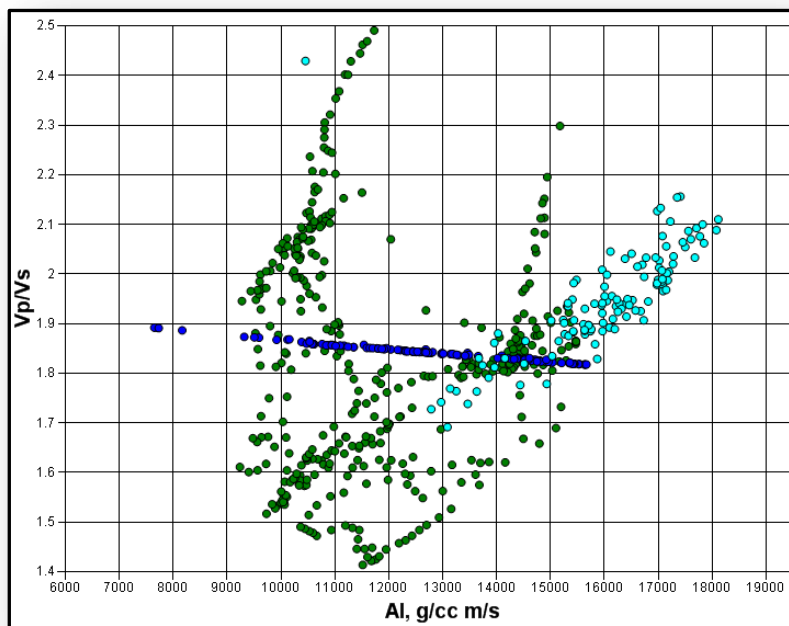
Оценка погрешностей

$$Error = \frac{2 \cdot (a - b)}{(a + b)}$$

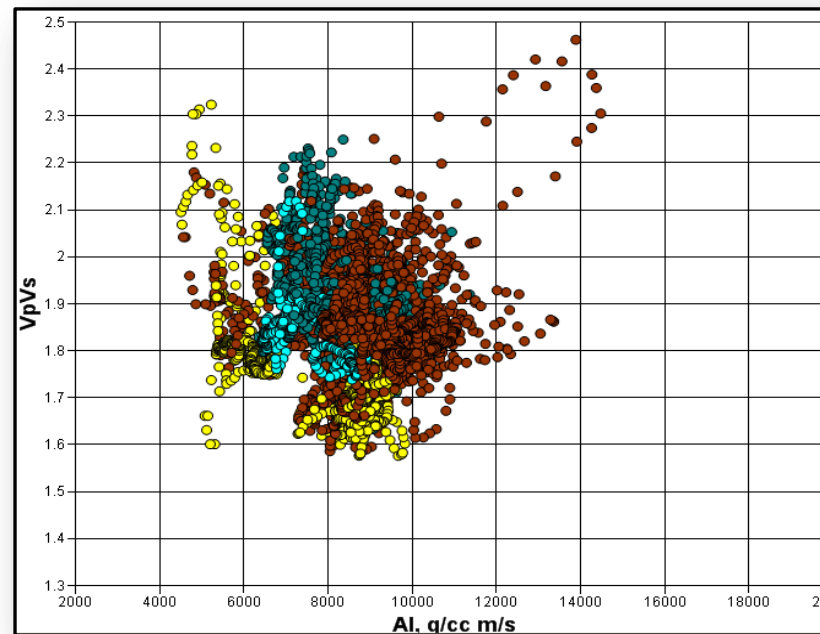


Анализ скважинных данных для выполнения сейсмической инверсии

Анализ исходных данных в поле нескольких упругих свойств



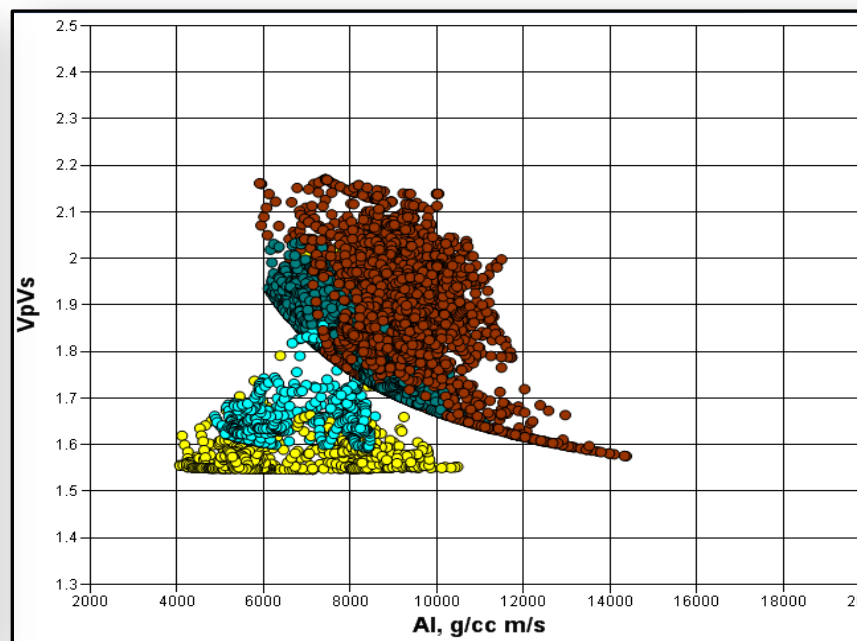
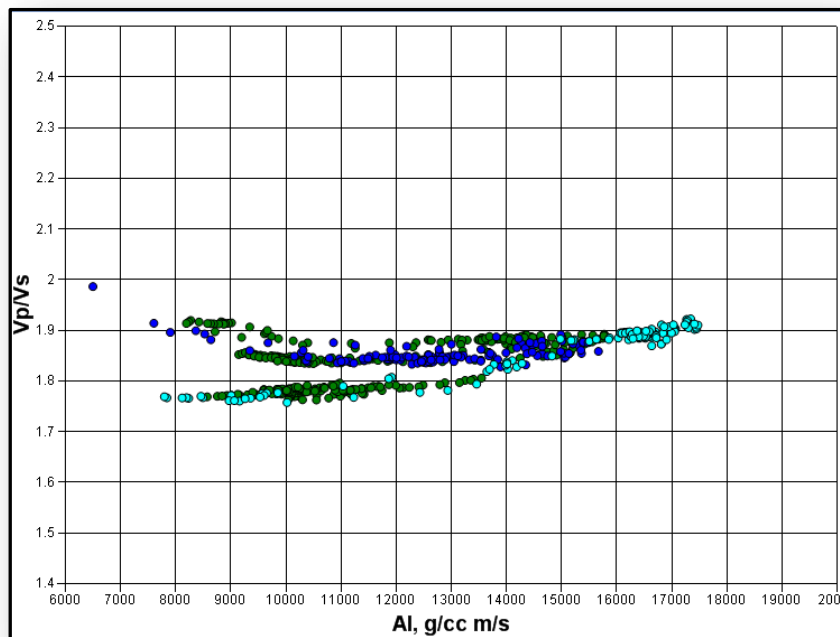
- Скважина 1
- Скважина 2
- Скважина 3



- Газонасыщенный коллектор
- Нефтенасыщенный коллектор
- Водонасыщенный коллектор
- Неколлектор

Анализ скважинных данных для выполнения сейсмической инверсии

Анализ модельных данных в поле нескольких упругих свойств



- Скважина 1
- Скважина 2
- Скважина 3

- Газонасыщенный коллектор
- Нефтенасыщенный коллектор
- Водонасыщенный коллектор
- Неколлектор

I. Петрофизическая интерпретация скважинных данных

Определение объемной модели породы

Выделение «литотипов»

II. Анализ упругих свойств (Rock Physics)

Оценка упругих параметров компонент породы

Определение упругих параметров сухой породы

Решение уравнения Гассмана

Построение необходимых кросс-плотов



Цель:

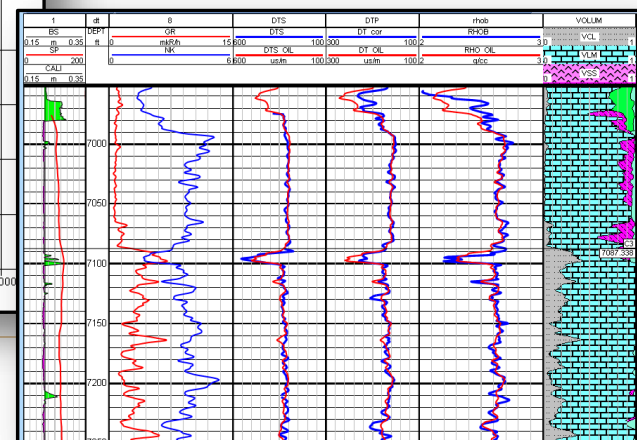
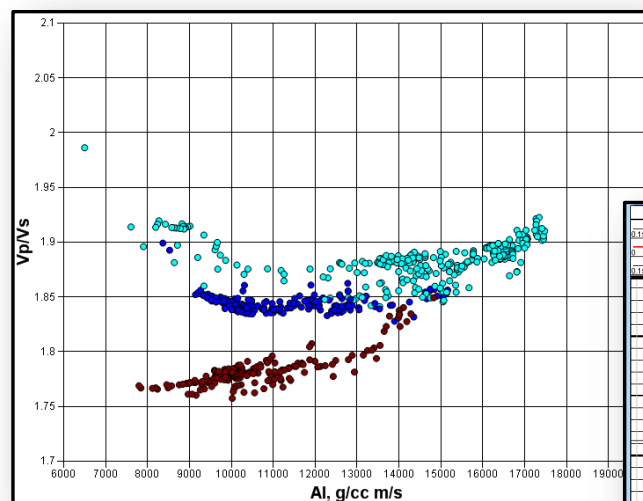
Выявить изменения упругих параметров при изменении свойств флюида и литологии

Задачи:

Получить модельные кривые, изменяя литологию, пористость и насыщение,
Построить в соответствии с изменением свойств кросс-плоты

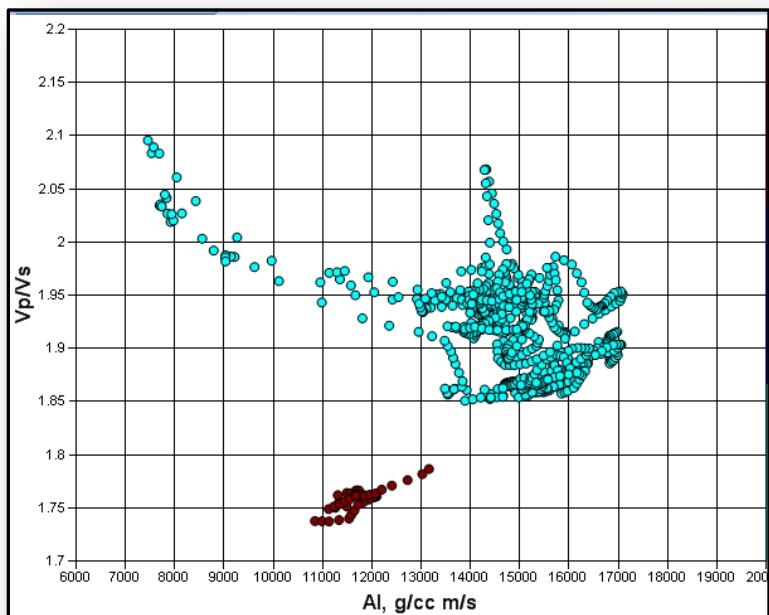
Скважинные данные:

Объемная модель Модель RockPhysics

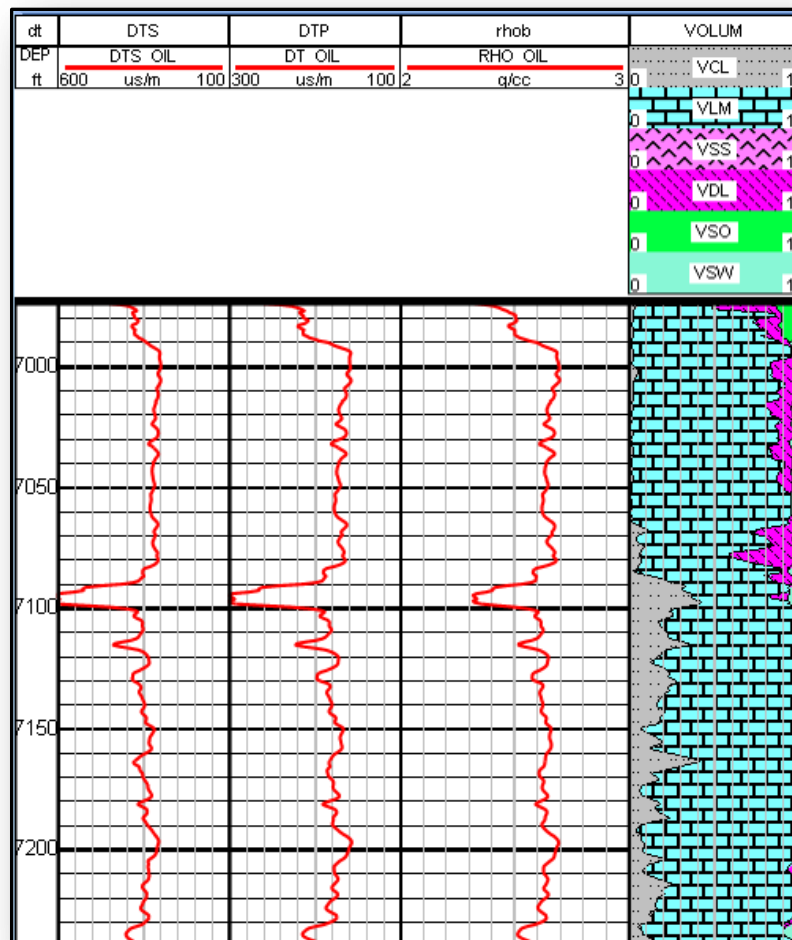


Замещение свойств породы

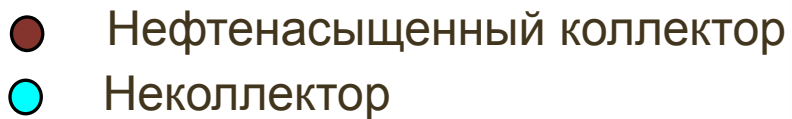
Замещение литологии



- Нефтенасыщенный коллектор
- Неколлектор

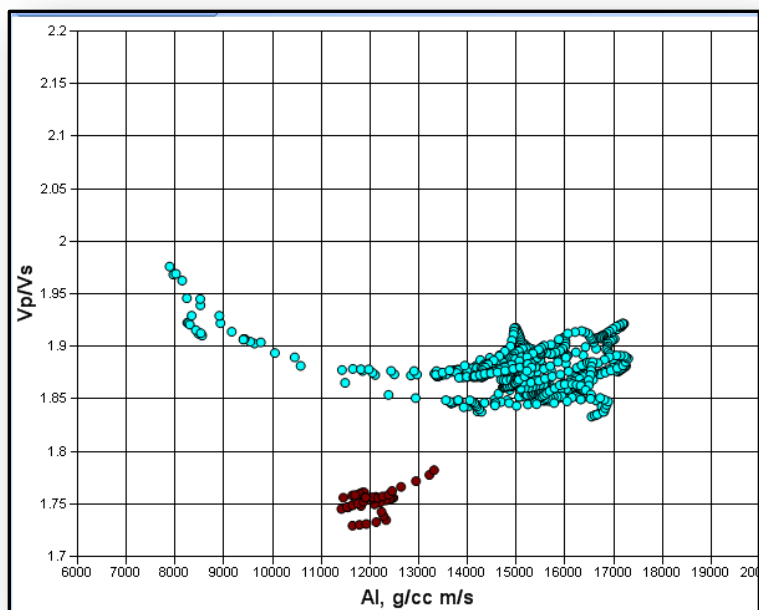


Замещение литологии

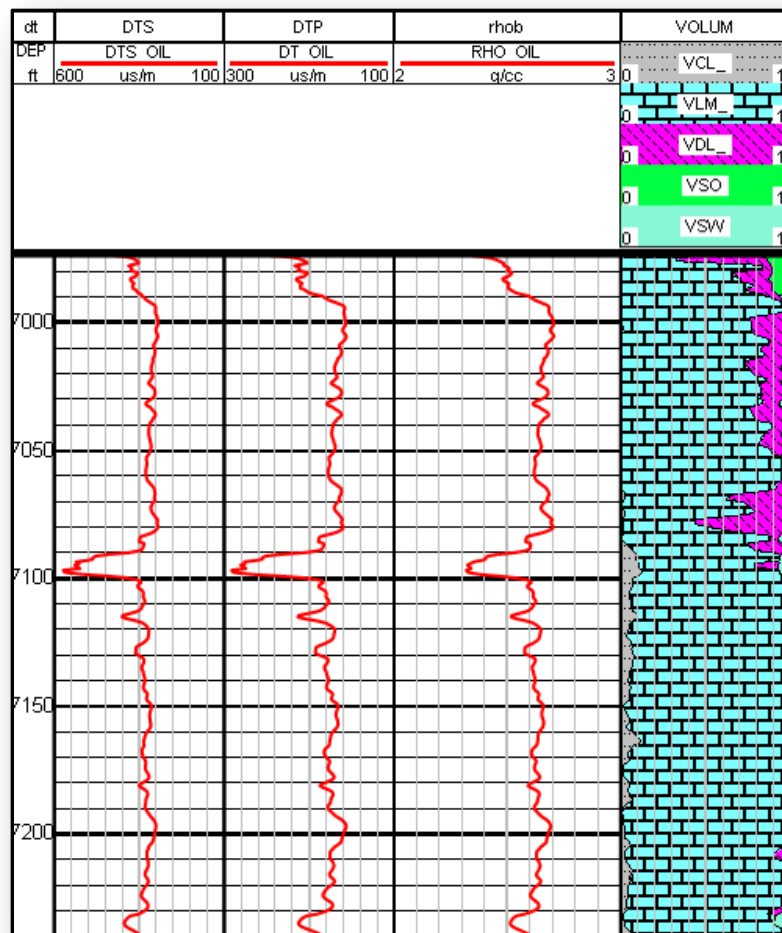


Замещение свойств породы

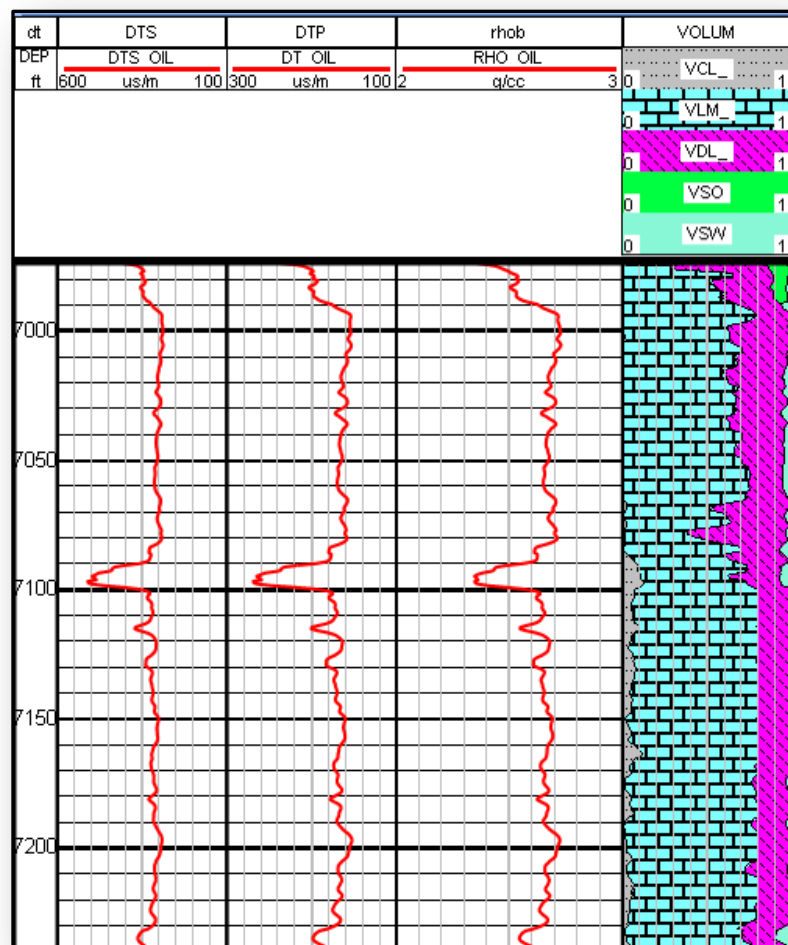
Замещение литологии



- Нефтенасыщенный коллектор
- Неколлектор

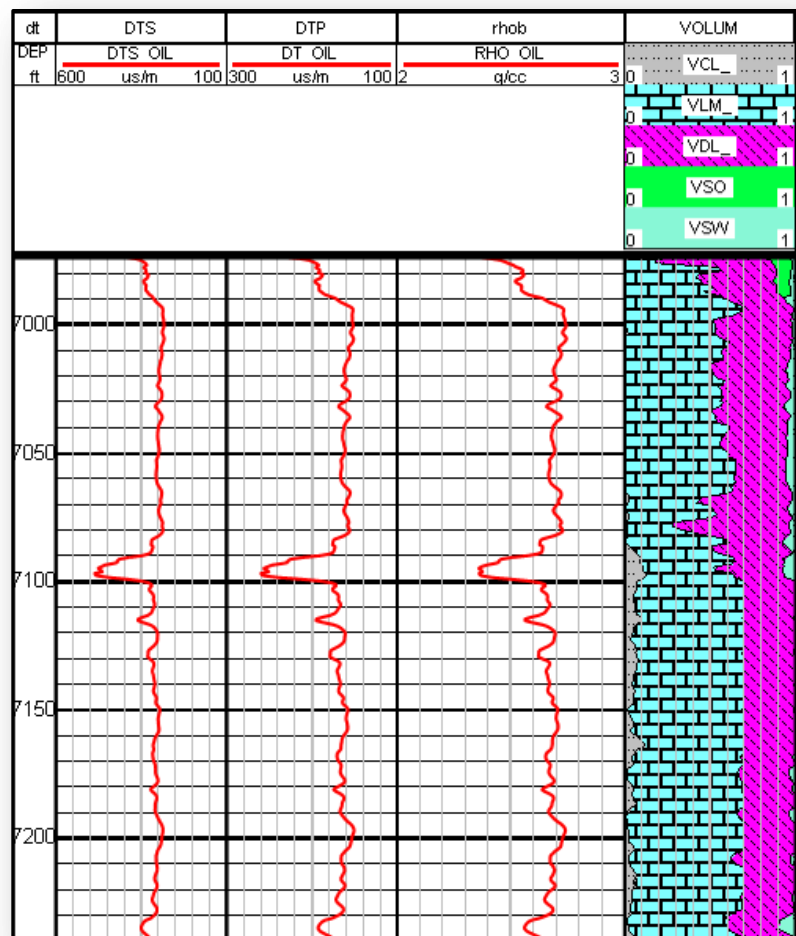


Замещение литологии



- Нефтенасыщенный коллектор
- Неколлектор

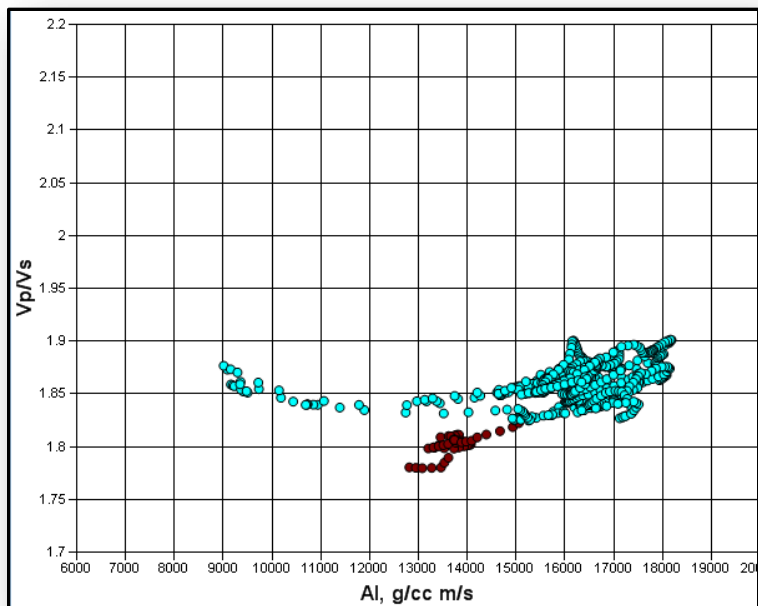
Замещение литологии



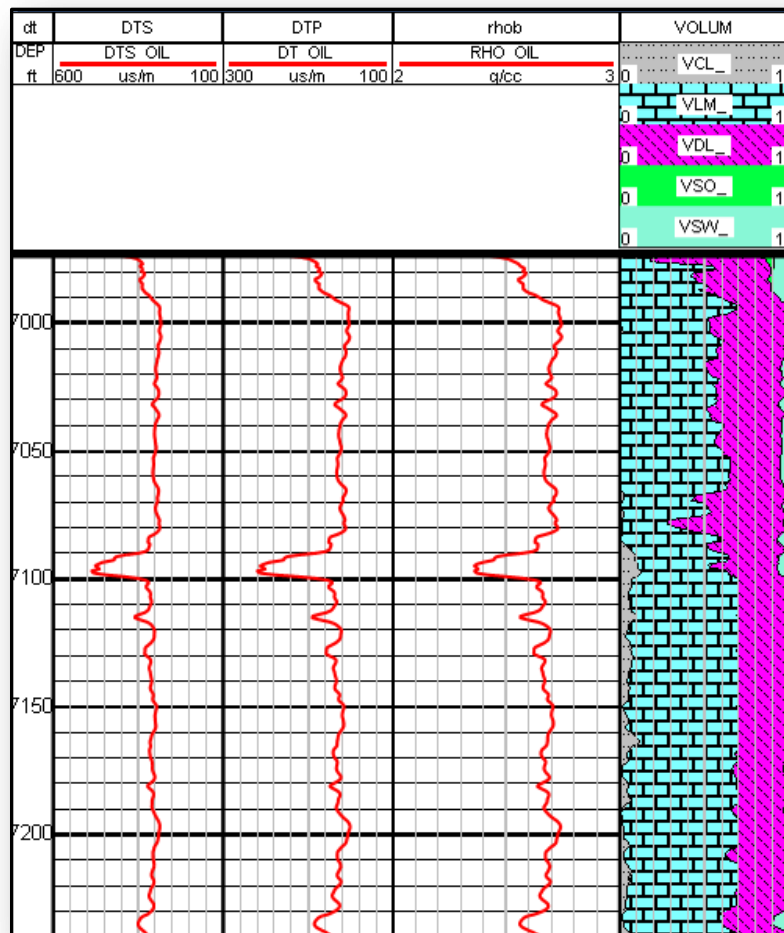
- Нефтенасыщенный коллектор
- Неколлектор

Замещение свойств породы

Замещение флюида



- Нефтенасыщенный коллектор
- Неколлектор



ТРЕТЬЯ ПРИЧИНА необходимости выполнения моделирования *RockPhysics* :

Применение теоретических подходов Rock Physics дает возможность прогнозирования упругих свойств пород в зонах литологического замещения и изменения характера насыщения



Применение комплексных подходов Rock Physics позволяет создать надежную петрофизическую базу, необходимую для качественного выполнения сейсмических инверсий