

Комплексные разномасштабные исследования керна коллекторов углеводородов - новые возможности и перспективы

Петромодел 2015
Петергоф

Авторы



Баюк И.О. – ИФЗ РАН – докладчик

Белобородов Д.Е. – ИФЗ РАН

Березина И.А. – ИФЗ РАН

Гилязетдинова Д.Р. – МГУ им. М.В. Ломоносова

Краснова М.А. - ИФЗ РАН

Корост Д.В. - МГУ им. М.В. Ломоносова

Патонин А.В. - ГО «Борок» ИФЗ РАН

Пономарев А.В. – ИФЗ РАН

Тихоцкий С.А. – ИФЗ РАН

Фокин И.В. – ИФЗ РАН

Хамидуллин Р.А. - МГУ им. М.В. Ломоносова

Цельмович В.А. – ГО «Борок» ИФЗ РАН

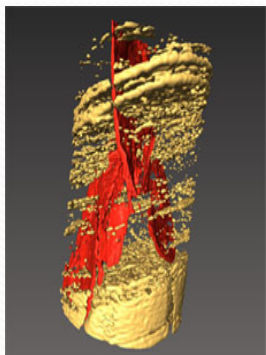
Факторы, определяющие скорости сейсмических волн:

- Состав породы и свойства компонент
- Внутренне строение породы
- Тип флюида и его свойства
- Пластовые условия

Разномасштабность строения пород

Downscaling

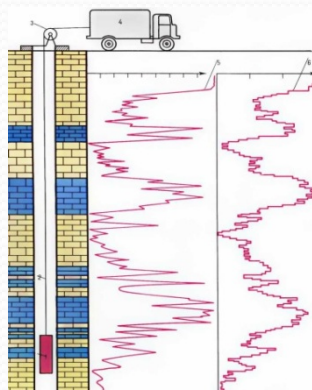
Рентгеновская
томография
(нм - мкм)



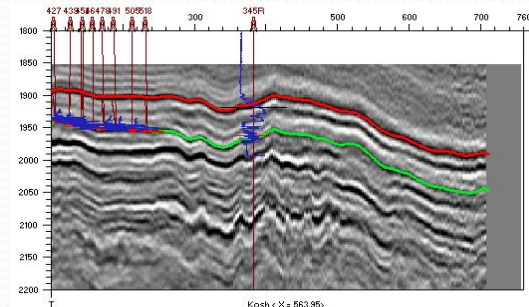
Буровой
кern
(мм)



Каротаж
(дм - м; 10^3 Гц)



Сейсмическая
съёмка
(м - 10 м; 10 Гц)



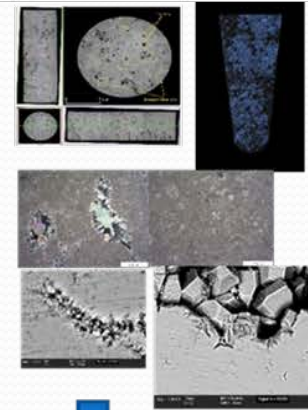
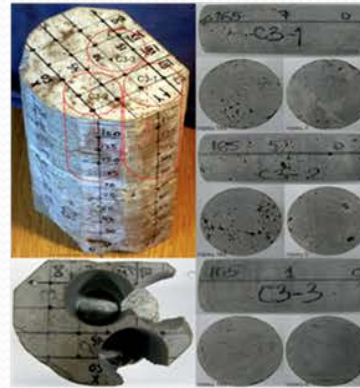
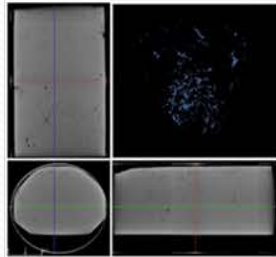
Upscaling

Экспериментальный комплекс для изучения физических свойств керна

3а. СТ-сканирование, микроструктура образцов-
"близнецов" (30 на 60 мм)

2. Изготовление образцов-"близнецов"

1а. СТ-сканирование
полноразмерного керна

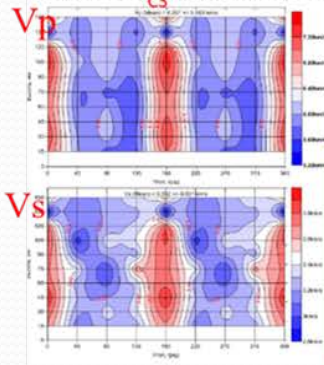


6.
Изготовление
образцов –
"близнецов"
10 на 30 мм
+
УЗ-
томография

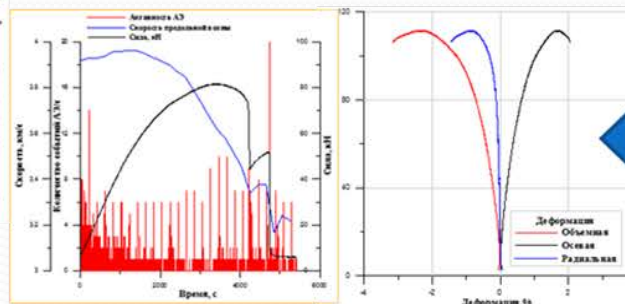


7. Изготовление
образцов –
"близнецов" 3
на 3 мм, УЗ-
томография
+
Численное
моделирование
физических
полей

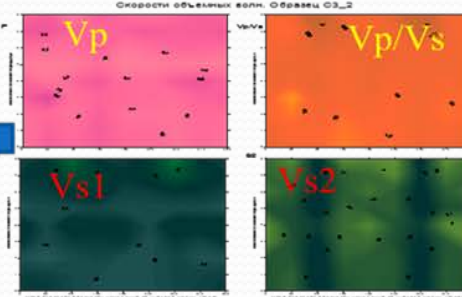
1б. УЗ-томография керна



4. Измерение скоростей и прочностных
характеристик при пластовых условиях



3б. УЗ-томография
образцов+диагональные измерения
(норм. усл.)



5. Построение параметрической математической модели физических свойств



Модельная среда

Параметры модели

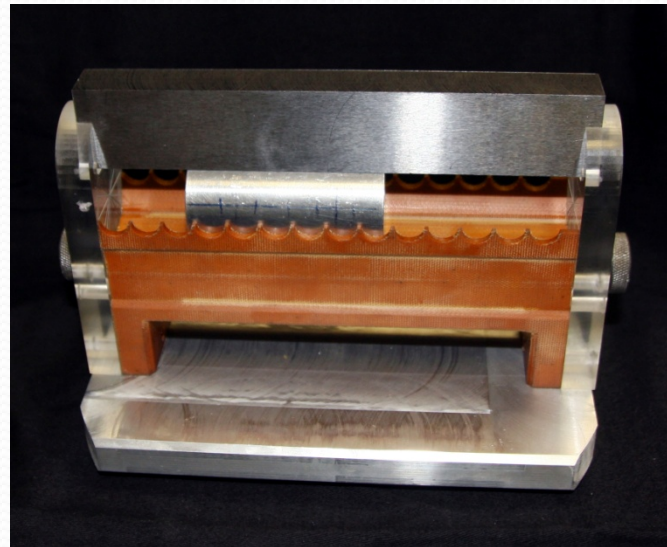
Уравнения связи
Физические свойства = $f(\text{Параметры модели})$

Измерение скоростей упругих волн при нормальных условиях

Полноразмерный керн



Стандартные образцы



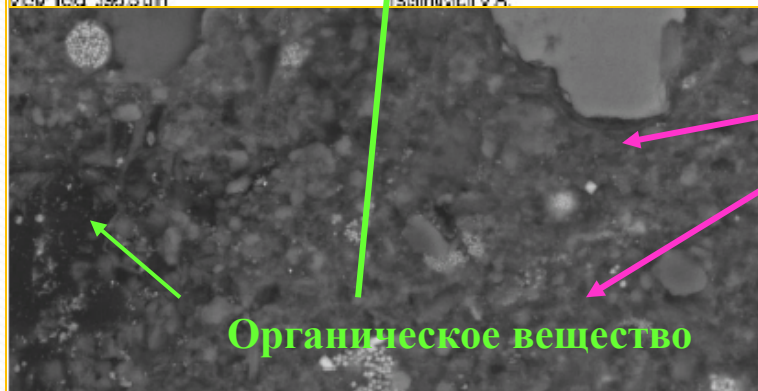
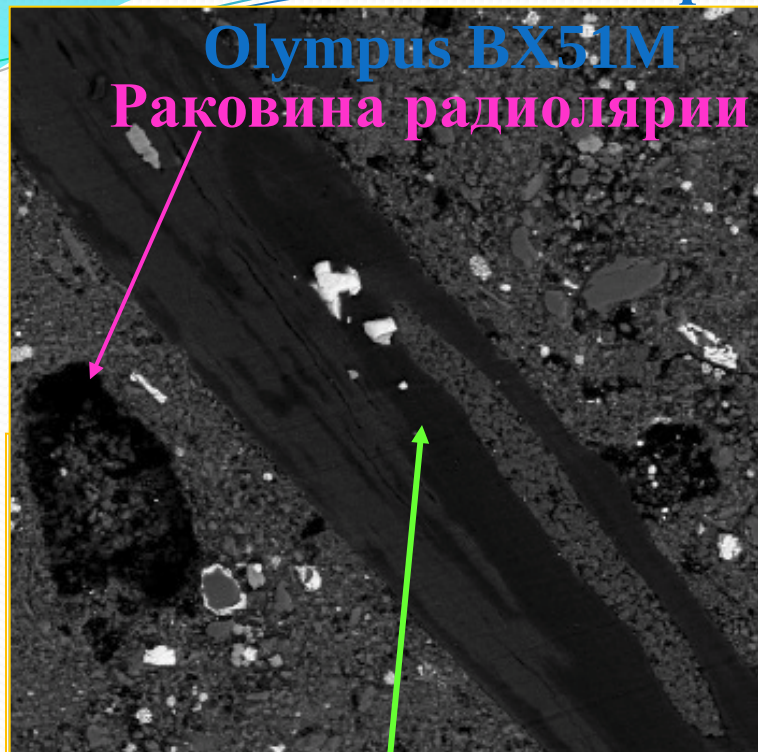
Изучение минерального и химического состава и микроструктуры



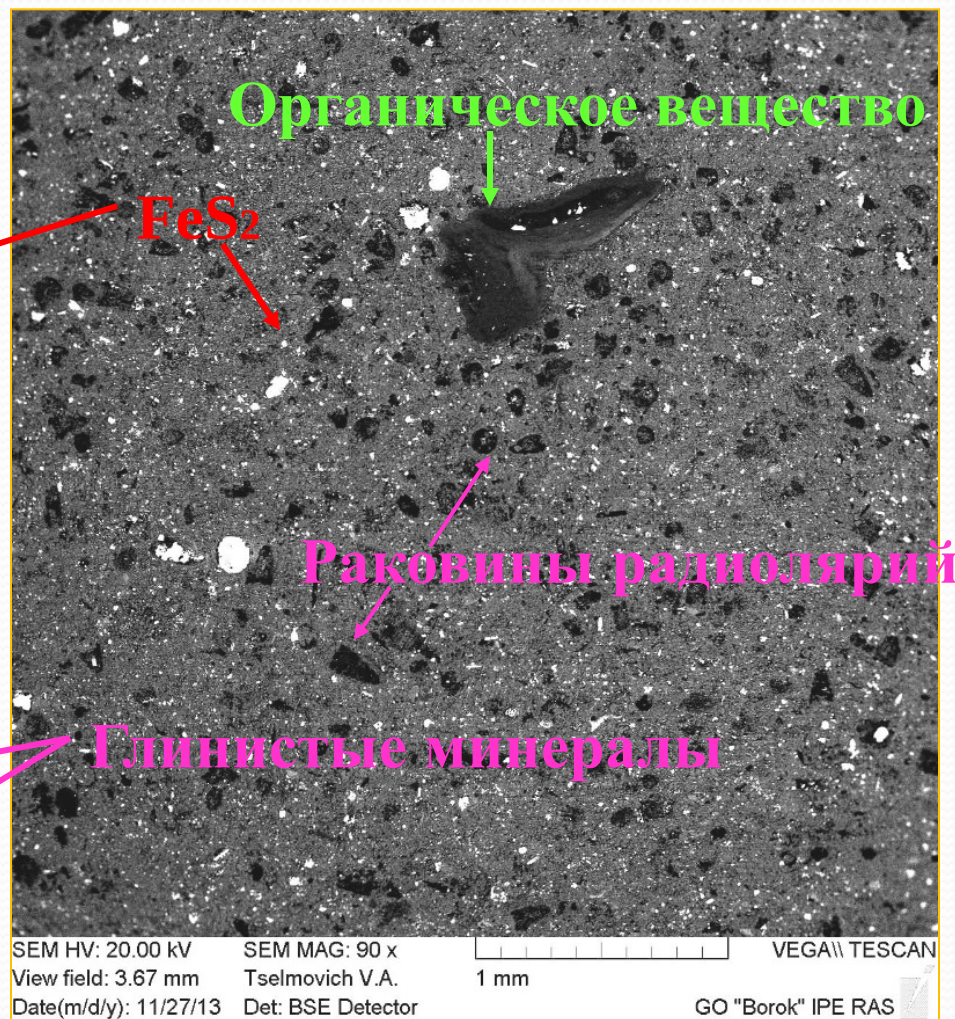
Микрозонд «Тескан Вега II» с энергодисперсионным и волновым спектрометрами (ИФЗ РАН)

Микроструктура: сланец баженовской свиты

Фото в оптический микроскоп,



SEM, микрозонд Tescan Vega II



Исследования в установках высоких давлений



Пресс INOVA



Оправка для образца



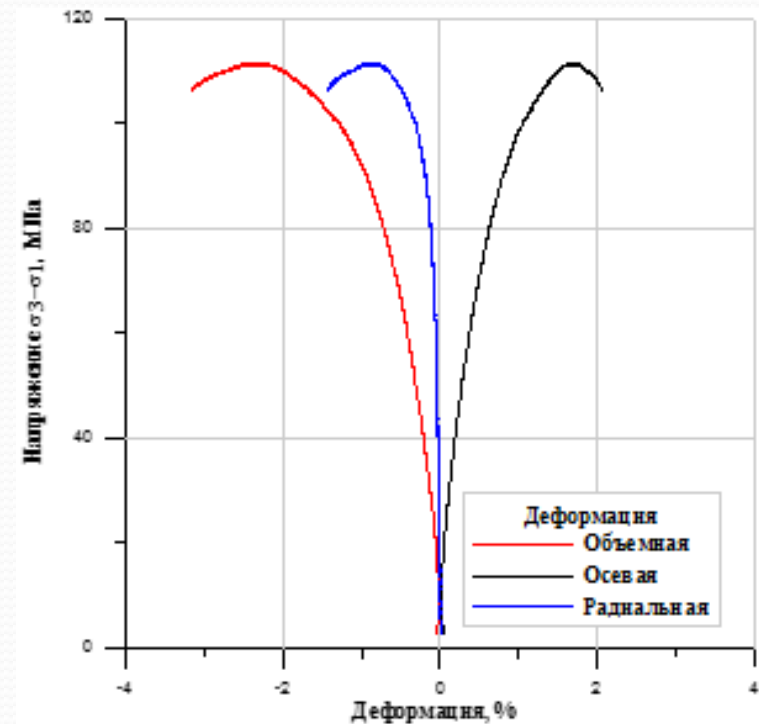
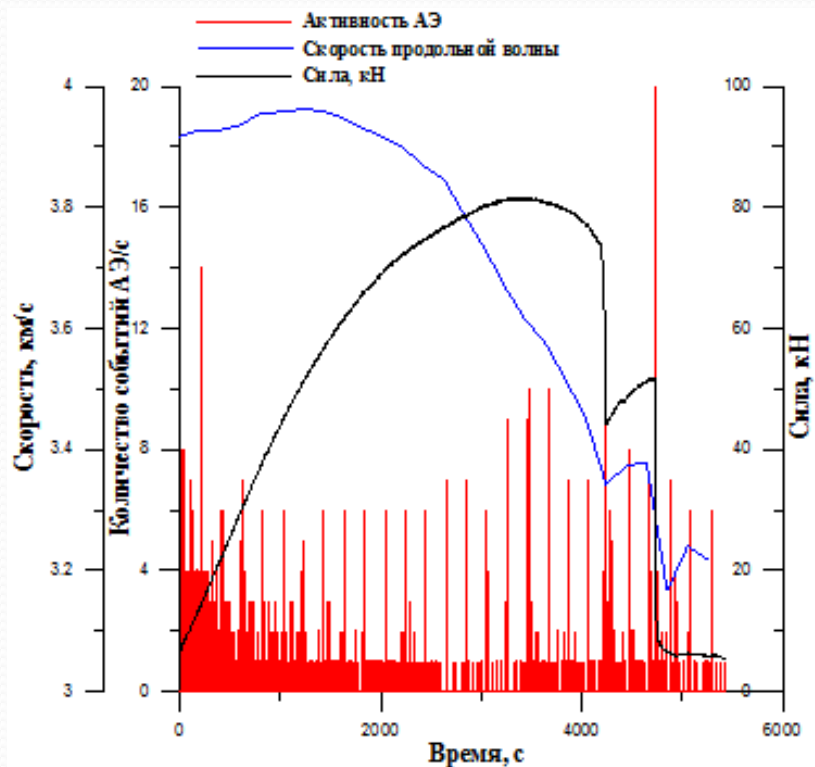
Образец базеновской свиты
после испытаний в прессе

Характеристики	INOVA 1000	RTR 4500
Предельная нагрузка kN	1000	4600
Система управления	Аналоговый PID регулятор, цифровой задающий генератор	Цифровой PID регулятор и задающий генератор
Управление	6 параметров, включая перемещение и нагрузку	Перемещение Сила Девиатор напряжения Поровое давление
Разрешение по нагрузке	± 25 Н	± 1 Н
Разрешение по перемещению	± 0.1 мкм	± 0.05 мкм
Жесткость MN/mm	0.380	10
Всестороннее и поровое давление МПа	200/50	400/140
Размер испытуемого материала	$\Phi 30 \times 60$ мм	$\Phi 30 \times \geq 60$ мм $\Phi 54 \times \geq 108$ мм $\Phi 63 \times \geq 126$ мм $\Phi 100 \times \geq 200$ мм

Установка RTR 4500



Испытания образцов на прессе



Общая схема исследования микроструктуры и физических свойств керна

1. Измерения
при пластовых
условиях

→ Кривая «напряжение-деформация»

→ Скорость Р-волн

→ Акустическая эмиссия

→ Геомеханические параметры

3. Микроструктура

Пористость
Проницаемость
Плотность
Минеральный
состав

2. Измерения
при нормальных
условиях

→ Тензор упругости

→ Скорость Р-волн

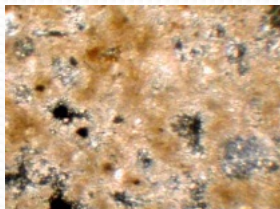
→ Скорости S1, S2-волн

→ Анизотропия скоростей

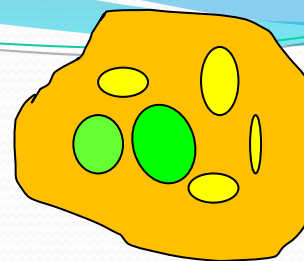
Физико-математическое моделирование физических свойств пород



Математическая модель физических свойств



Реальная порода



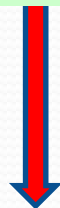
Модельная среда



Параметры модели

Измерения
физических свойств

$$\Psi(\text{параметры}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{\text{exp}} - P_{\text{theor}}(\text{параметры})}{P_{\text{exp}}} \right]^2$$



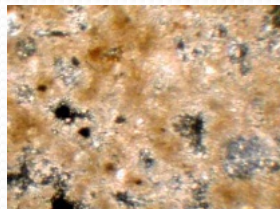
Физические свойства компонент
Пористость
Форма зерен
Форма пор
Форма трещин
Ёмкость трещин
Степень связности пустот
Параметр ориентации пустот

Часть
параметров
может быть
известна



Уравнения связи
Физические свойства =
F(Параметры модели)

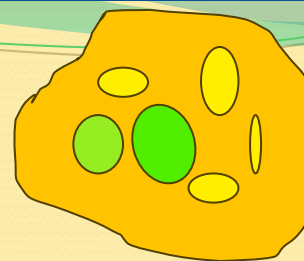
Математическая модель физических свойств



Реальная порода

Измерения
физических свойств

$$\Psi(\text{параметры}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{\text{exp}} - P_{\text{theor}}(\text{параметры})}{P_{\text{exp}}} \right]^2$$



Математическая
модель
физических
свойств

Модельная среда

Параметры модели

Физические свойства компонент
Пористость
Форма зерен
Форма пор
Форма трещин
Ёмкость трещин
Степень связности пустот
Параметр ориентации пустот

Часть
параметров
может быть
известна

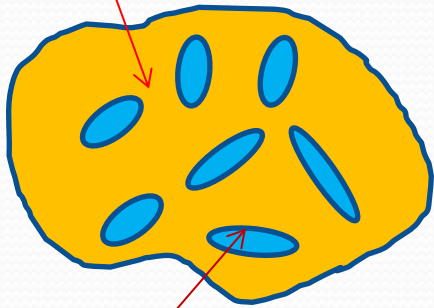
Уравнения связи
Физические свойства =
F(Параметры модели)

Уравнение связи упругих свойств с параметрами модели

Метод обобщенного сингулярного приближения

$$\mathbf{C}^* = \left\langle \mathbf{C}(\mathbf{r}) [\mathbf{I} - \mathbf{g} \mathbf{C}'(\mathbf{r})]^{-1} \right\rangle \left\langle [\mathbf{I} - \mathbf{g} \mathbf{C}'(\mathbf{r})]^{-1} \right\rangle^{-1}$$

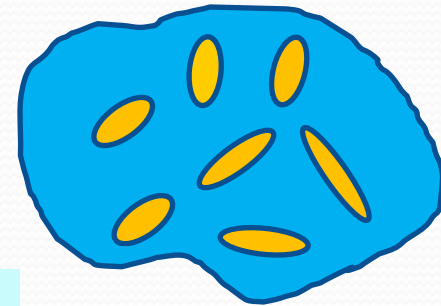
Solid



$$\mathbf{C}' \equiv \mathbf{C} - \mathbf{C}^C$$

$\langle \rangle$ усреднение по объему

$$\mathbf{C}^C = (1 - f) \mathbf{C}^{Solid} + f \mathbf{C}^{Fluid}$$



Fluid

f – параметр связности пустотного пространства

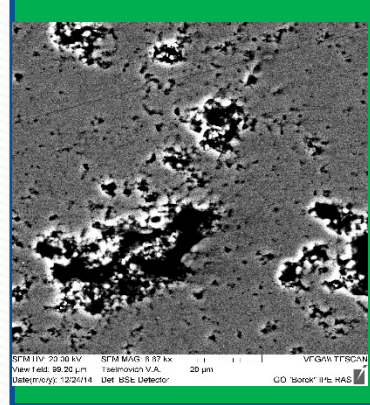
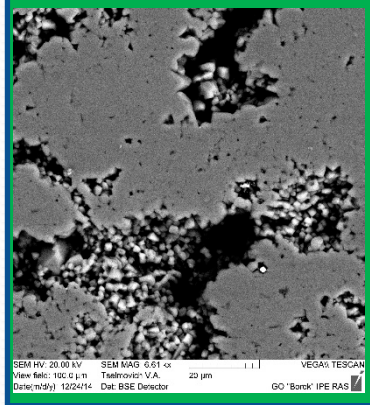
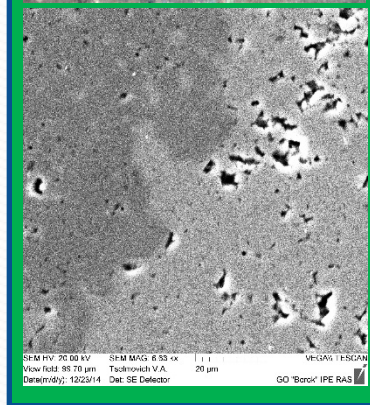
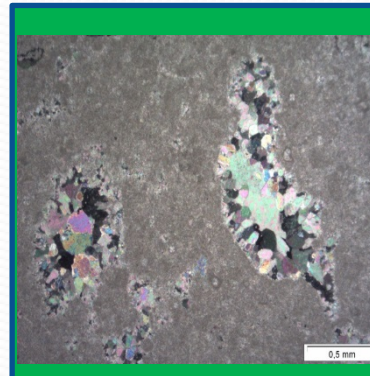
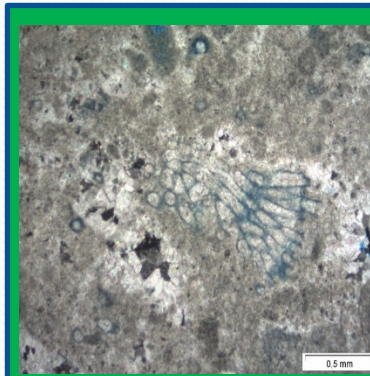
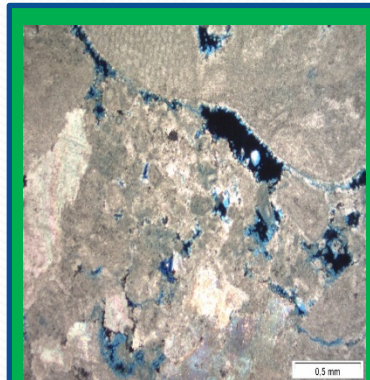
$$g = \psi(\text{форма компонент, связность компонент})$$

$$\mathbf{f} = \alpha [\mathbf{I} - \mathbf{Q} \mathbf{X}']^{-1}$$

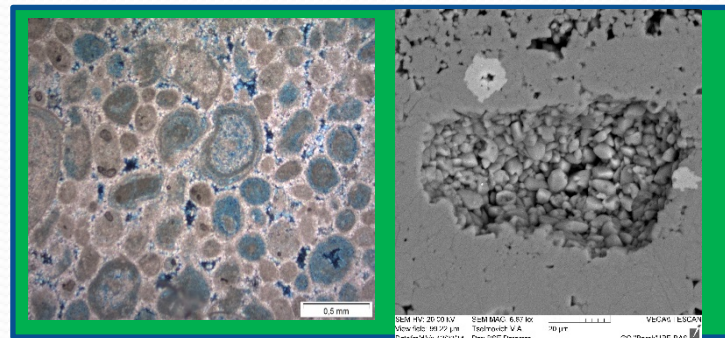
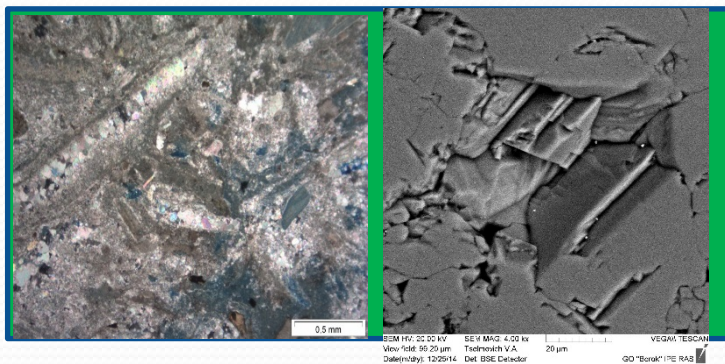
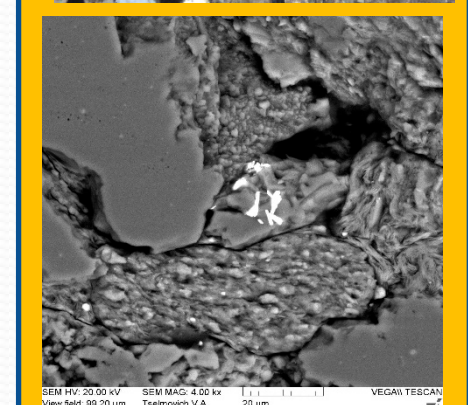
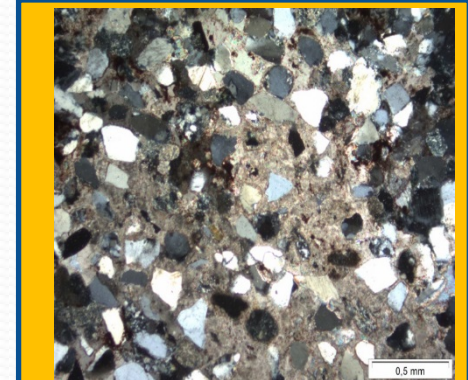
Электронная и оптическая микроскопия пород

Поле зрения в оптическом микроскопе ~ 2.6 мм, в электронном ~100 микрон

Карбонатные породы

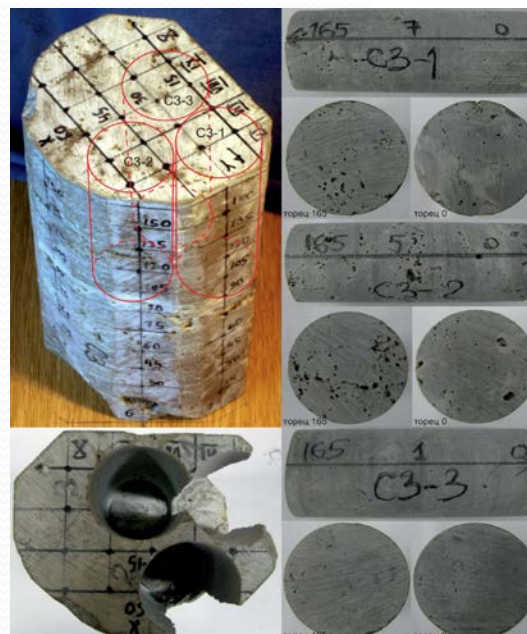
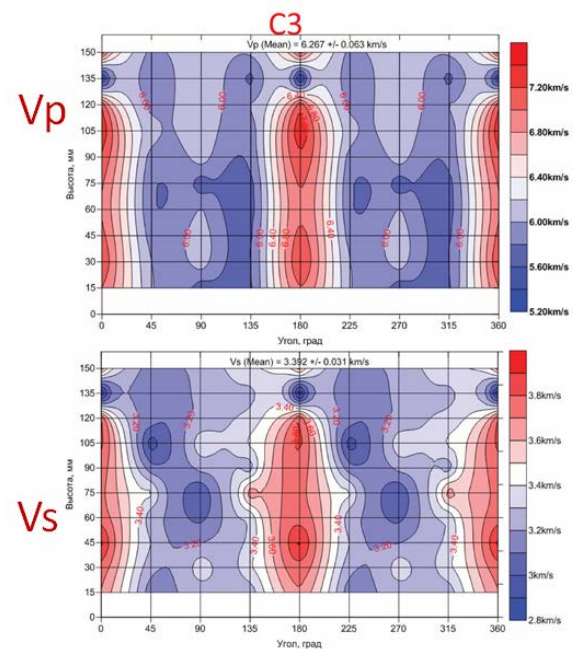
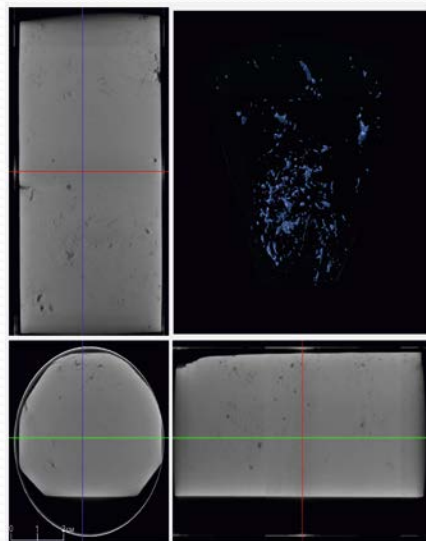


Терригенная порода



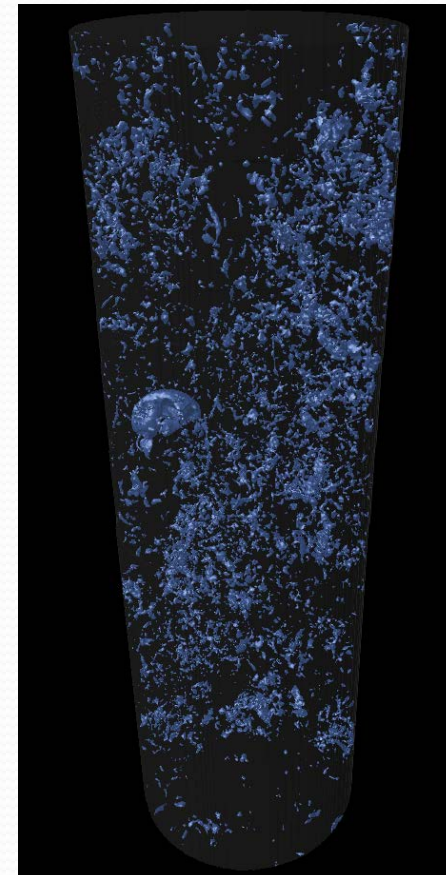
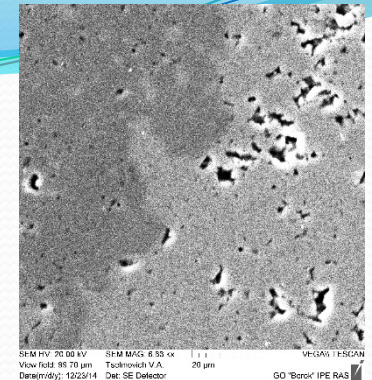
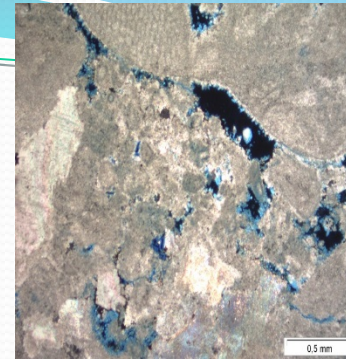
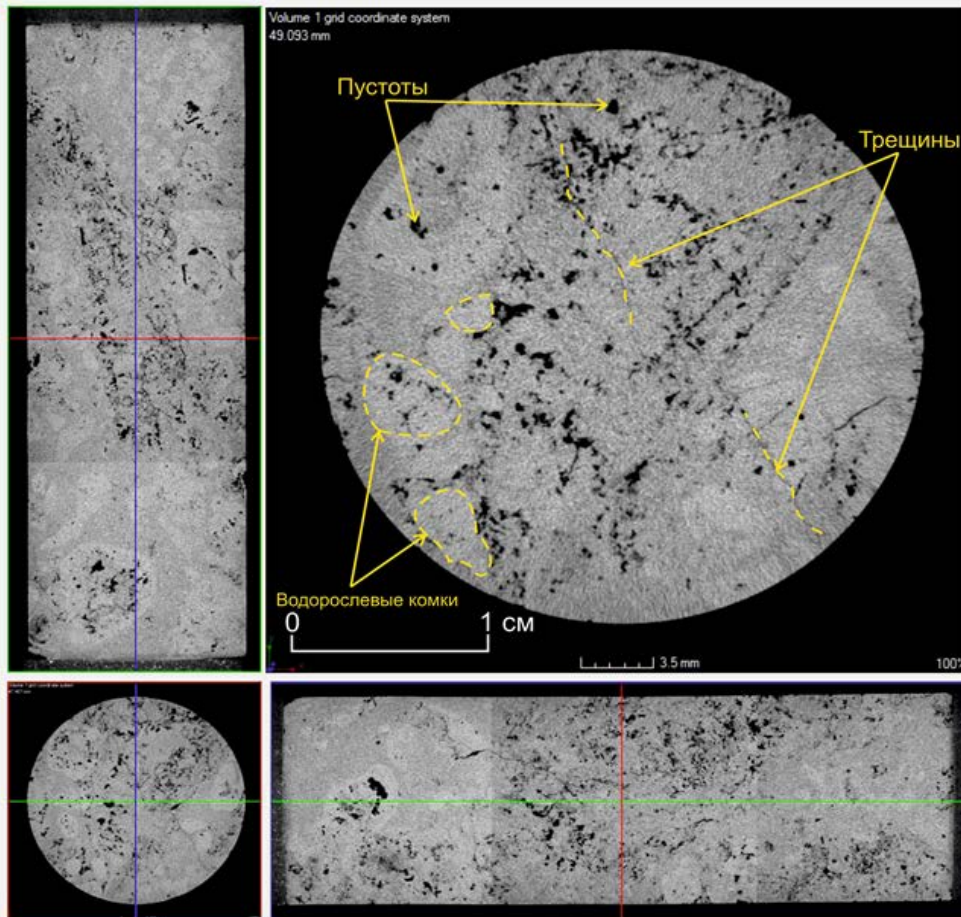
SEM HV: 20.00 kV SEM MAG: 6.57 kx
View field: 99.20 µm
Date: 12/22/14 Det: BSE Detector
GO 'Borok' IPE RAS

СТ-сканирование и УЗ-томография полноразмерного керна



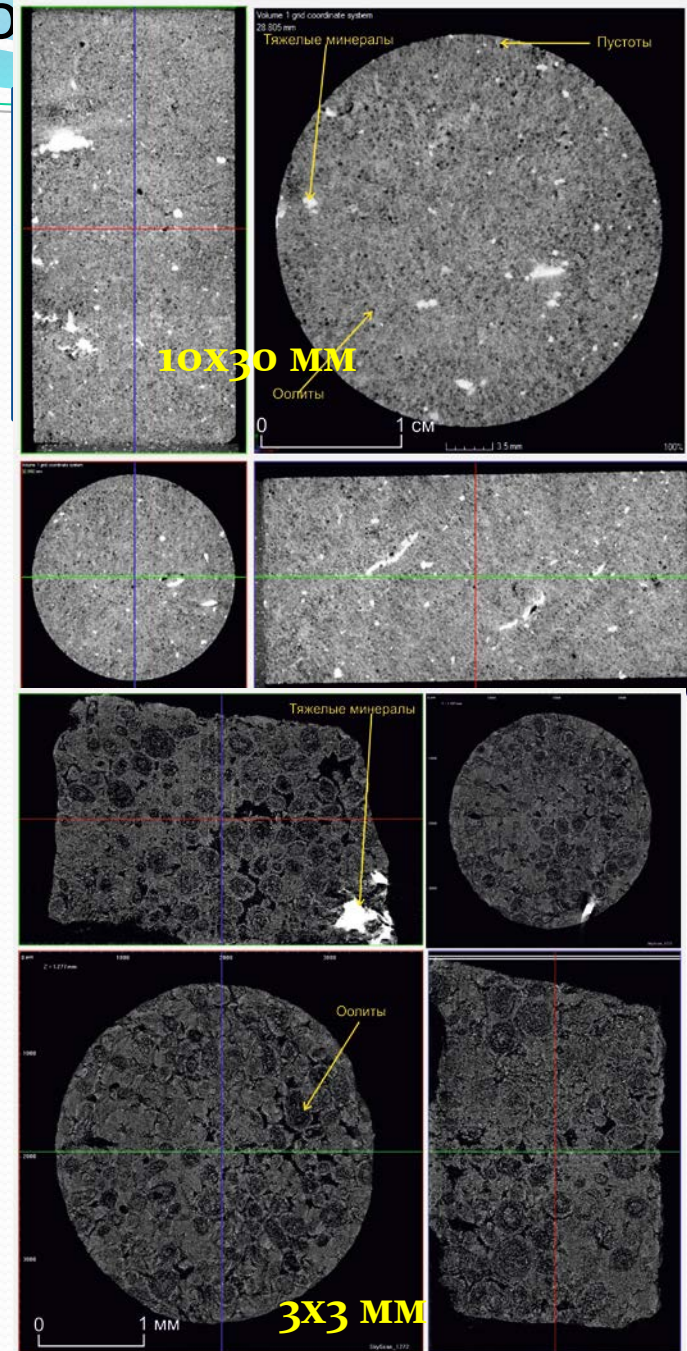
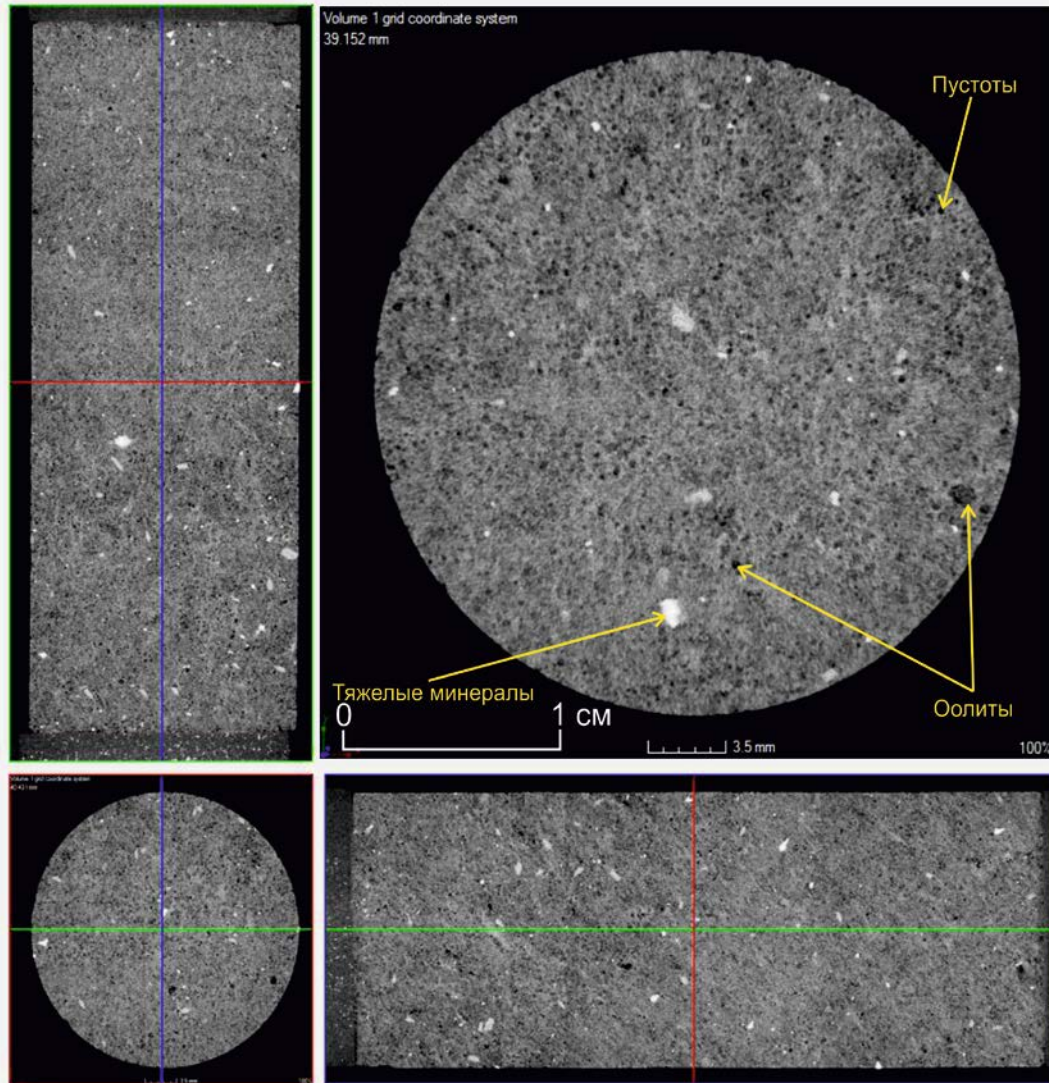
Изготовление
«образцов-близнецов»

Ортогональные рентгено- плотностные срезы стандартного цилиндрического образца (30 на 60 мм) и 3D модель его пустотного пространства

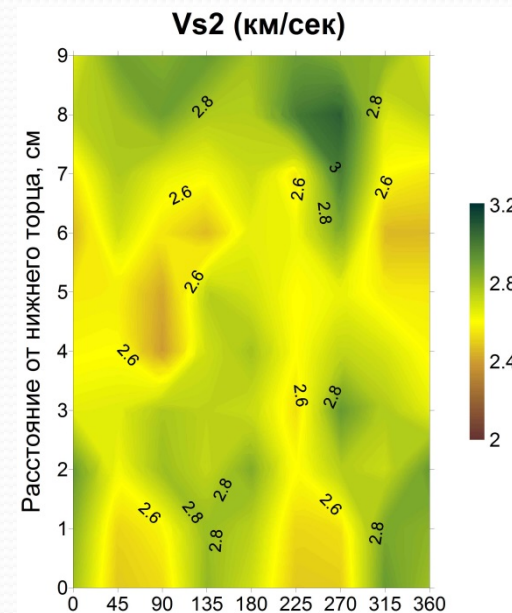
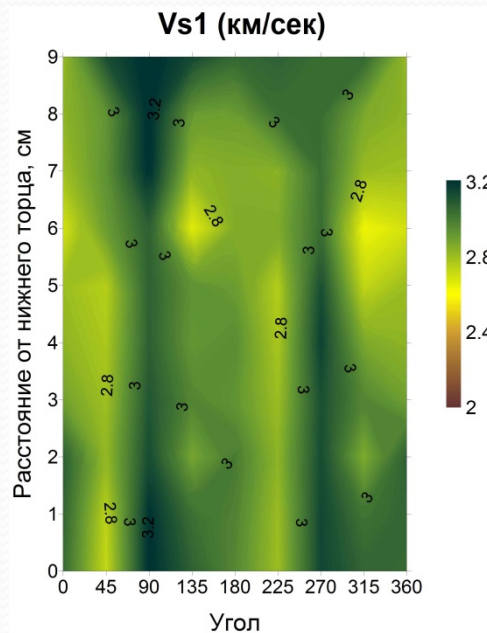
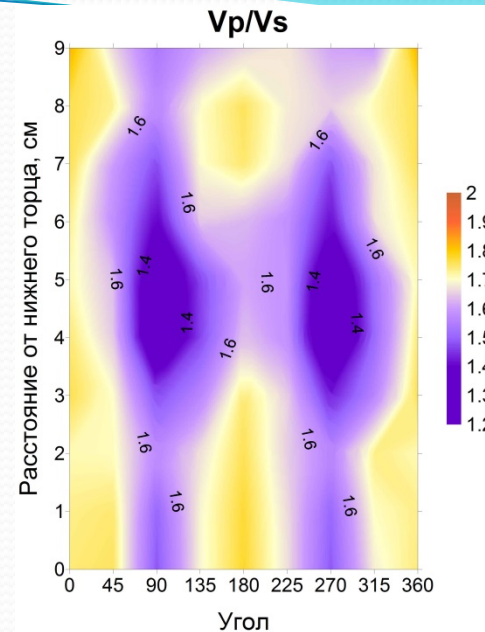
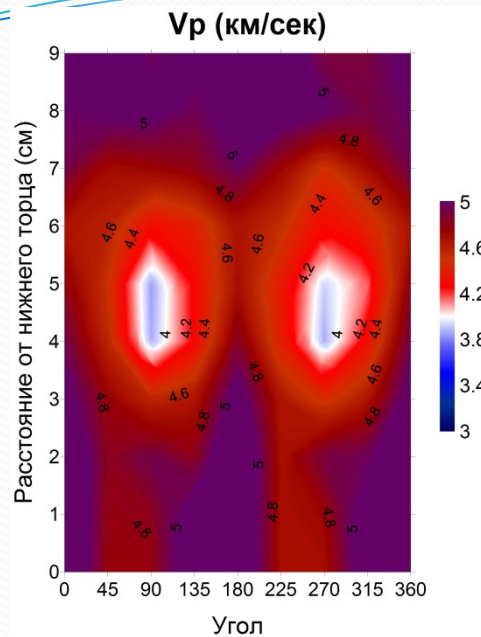


Микроструктура образца оолитового известняка

30x60 мм



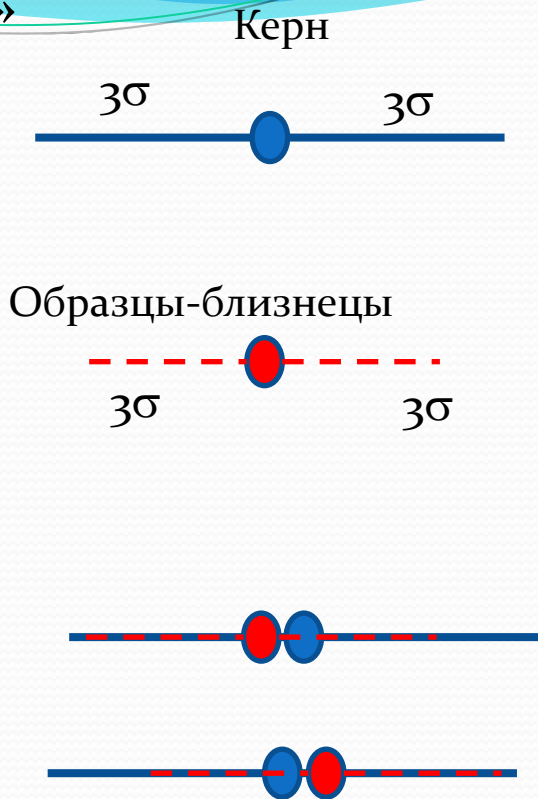
Результаты УЗ томографии для стандартного цилиндрического образца



«Угол» - угол поворота плоскости измерений от нулевой отметки

Скорости упругих волн, измеренные в образцах полноразмерного керна и цилиндрических «образцах-близнецах»

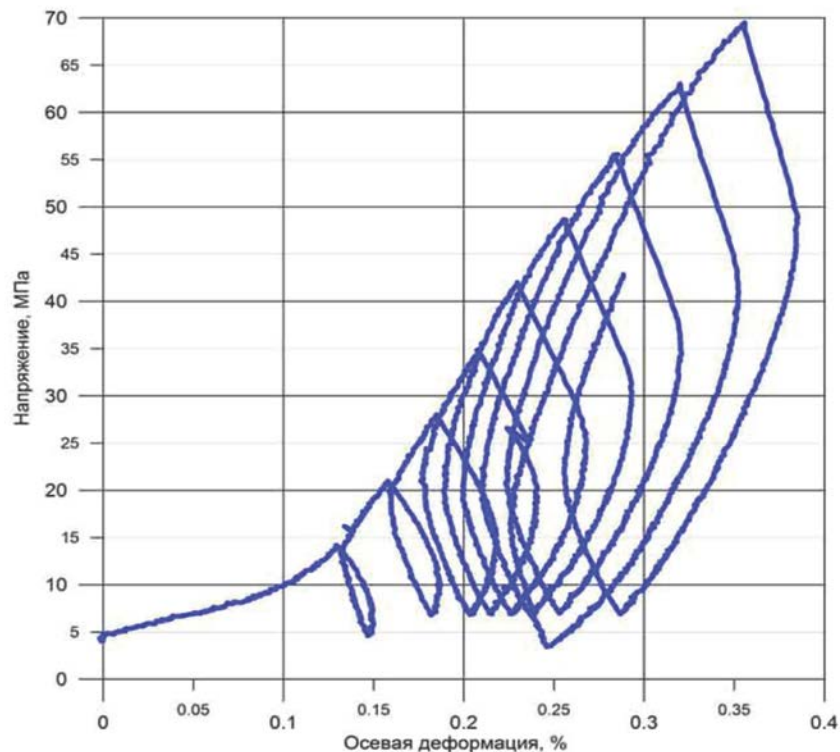
Образец	V _P , км/с		V _S , км/с		
	Керн	“Образцы-близнецы”	Керн	“Образцы-близнецы”	
C1	5.19 0.36	4.90 0.34	3.41 0.26	2.85 0.18	
C2	5.50 0.57	5.79 0.40	3.43 0.32	3.06 0.26	
C3	6.29 0.58	6.21 0.36	3.67 0.40	3.26 0.22	
C4	4.91 0.48	4.93 0.36	3.27 0.32	3.07 0.16	
C5	3.55 0.45	3.56 0.26	2.31 0.35	2.16 0.15	
C6	3.56 0.23	3.80 0.20	2.17 0.13	2.20 0.16	



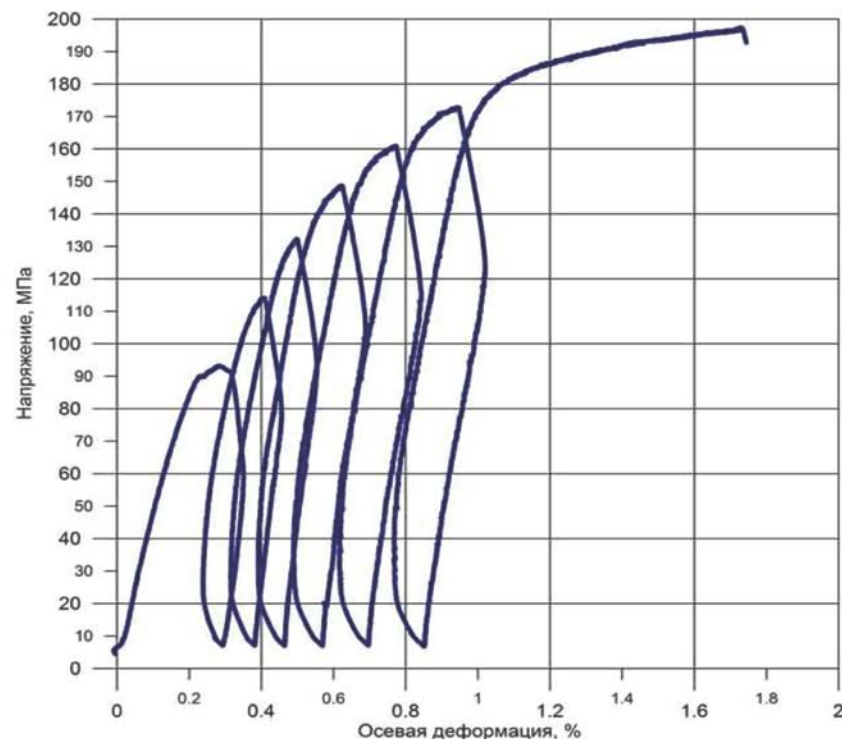
Скорости на керне и образцах-близнецах «одинаковые». Анизотропия не может быть выявлена на фоне неоднородности.

Кривые «напряжение-деформация», полученные для образцов карбонатных пород на прессе INOVA

Пластичность – упругость - пластичность



Циклическое нагружение
образца С5-4 при $P_c=30$ МПа

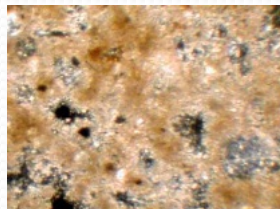


Циклическое нагружение образца
С1-1, при различных уровнях
всестороннего давления от 10 до
70 МПа с шагом 10 МПа

Прочностные свойства пород

Образец	Прочность на сжатие USC, МПа	Сцепление С, МПа	Угол внутреннего трения ϕ , °	Пористость Кп, %
C ₁₋₁	79,93	1,64	14,02	7,64
C ₂₋₁	110,86	1,97	19,03	3,936
C ₃₋₁	73,79	2,75	27,85	1,923
C ₄₋₁	144,00	28,46	46,86	2,925
C ₅₋₂	73,70	1,19	5,05	11,542

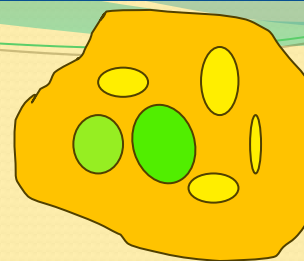
Математическая модель физических свойств



Реальная порода

Измерения
физических свойств

$$\Psi(\text{параметры}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{\text{exp}} - P_{\text{theor}}(\text{параметры})}{P_{\text{exp}}} \right]^2$$



Математическая
модель
физических
свойств

Модельная среда

Параметры модели

Физические свойства компонент

Пористость

Форма зерен

Форма пор

Форма трещин

Ёмкость трещин

Степень связности пустот

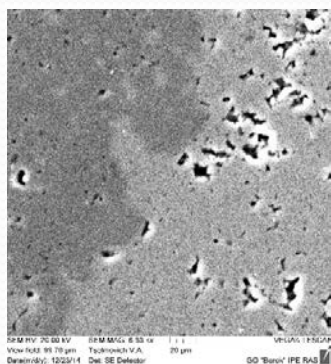
Параметр ориентации пустот

Часть
параметров
может быть
известна

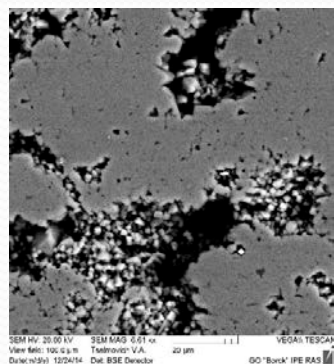
Уравнения связи
Физические свойства =
F(Параметры модели)

Параметры моделей пород с двойной пористостью (тип “Модель 1”)

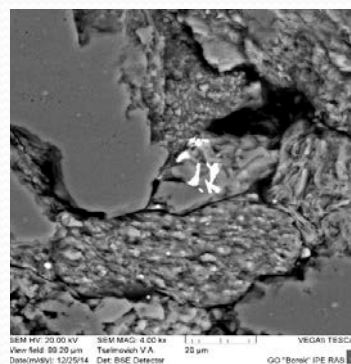
Порода	Аспектное отношение пор	Аспектное отношение трещин	Параметр связности пустот	V_p матрицы, км/с	V_s матрицы, км/с	Трещинная пористость, %
C_1	$\frac{0.310}{0.055}$	$\frac{0.0086}{0.0007}$	$\frac{0.530}{0.093}$	$\frac{5.84}{0.14}$	$\frac{3.30}{0.06}$	$\frac{0.18}{0.05}$
C_2	$\frac{0.661}{0.082}$	$\frac{0.0062}{0.0005}$	$\frac{0.197}{0.041}$	$\frac{6.39}{0.07}$	$\frac{3.27}{0.06}$	$\frac{0.15}{0.02}$
C_4	$\frac{0.260}{0.059}$	$\frac{0.0093}{0.0005}$	$\frac{0.230}{0.052}$	$\frac{5.40}{0.12}$	$\frac{3.32}{0.03}$	$\frac{0.32}{0.04}$
C_5	$\frac{1.196}{0.080}$	$\frac{0.0076}{0.0007}$	$\frac{0.25}{0.040}$	$\frac{4.64}{0.14}$	$\frac{2.50}{0.05}$	$\frac{0.64}{0.04}$



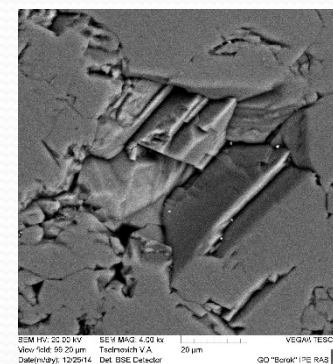
C_1



C_2



C_4

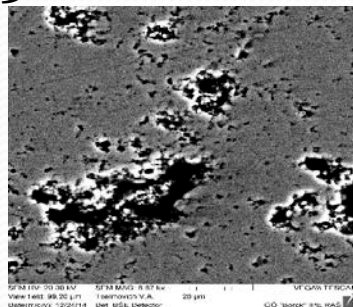
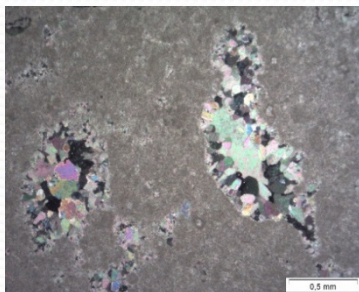


C_5

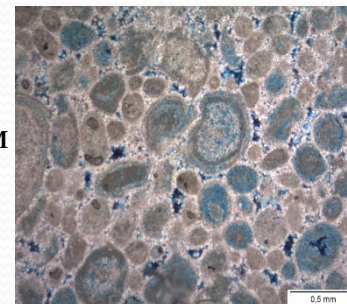
Параметры моделей пород типа “Модель 2”

Порода	Аспектное отношение пор матрицы	Аспектное отношение пустот высокопористых зон (оолитов в породе C6)	Параметр связности пор матрицы	Пористость высокопористых зон	Объемная концентрация пористых зон в матрице	V_p матр., км/с	V_s матр., км/с
C ₃	$\frac{1.29}{0.13}$	$\frac{1.57}{0.18}$	$\frac{0.59}{0.17}$	$\frac{34.5}{6.4}$	$\frac{6.0}{1.4}$	$\frac{6.48}{0.04}$	$\frac{3.30}{0.02}$
C ₆	$\frac{0.60}{0.22}$	$\frac{2.68}{0.12}$	$\frac{0.54}{0.12}$	$\frac{47.4}{2.5}$	$\frac{7.8}{1.3}$	$\frac{4.94}{0.16}$	$\frac{2.70}{0.11}$

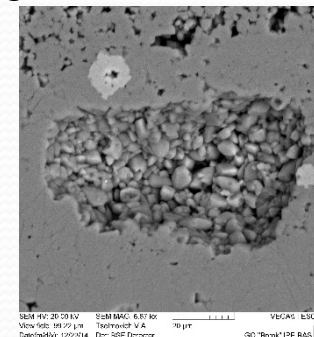
C₃



Поле зрения
~ 2.6 мм

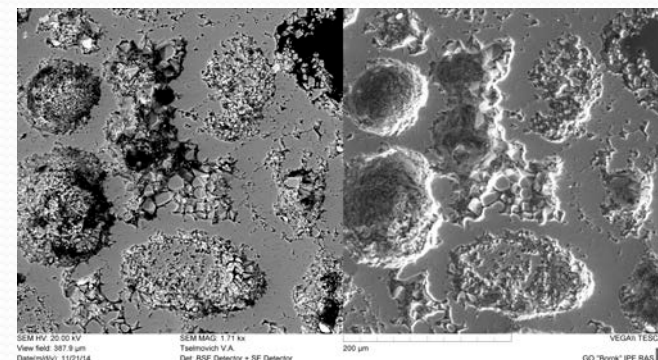
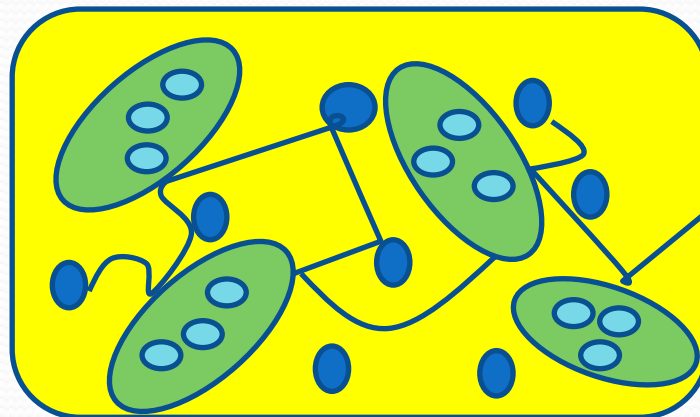


C₆



Поле зрения
~ 100 микрон

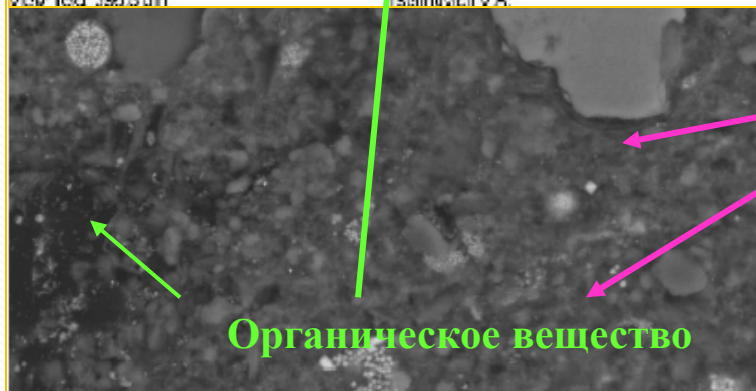
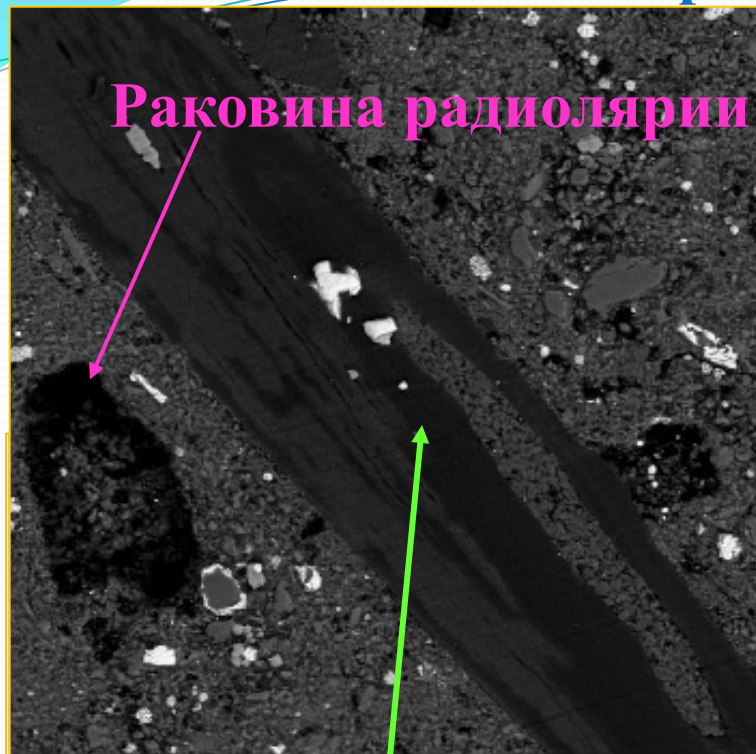
Модельная среда



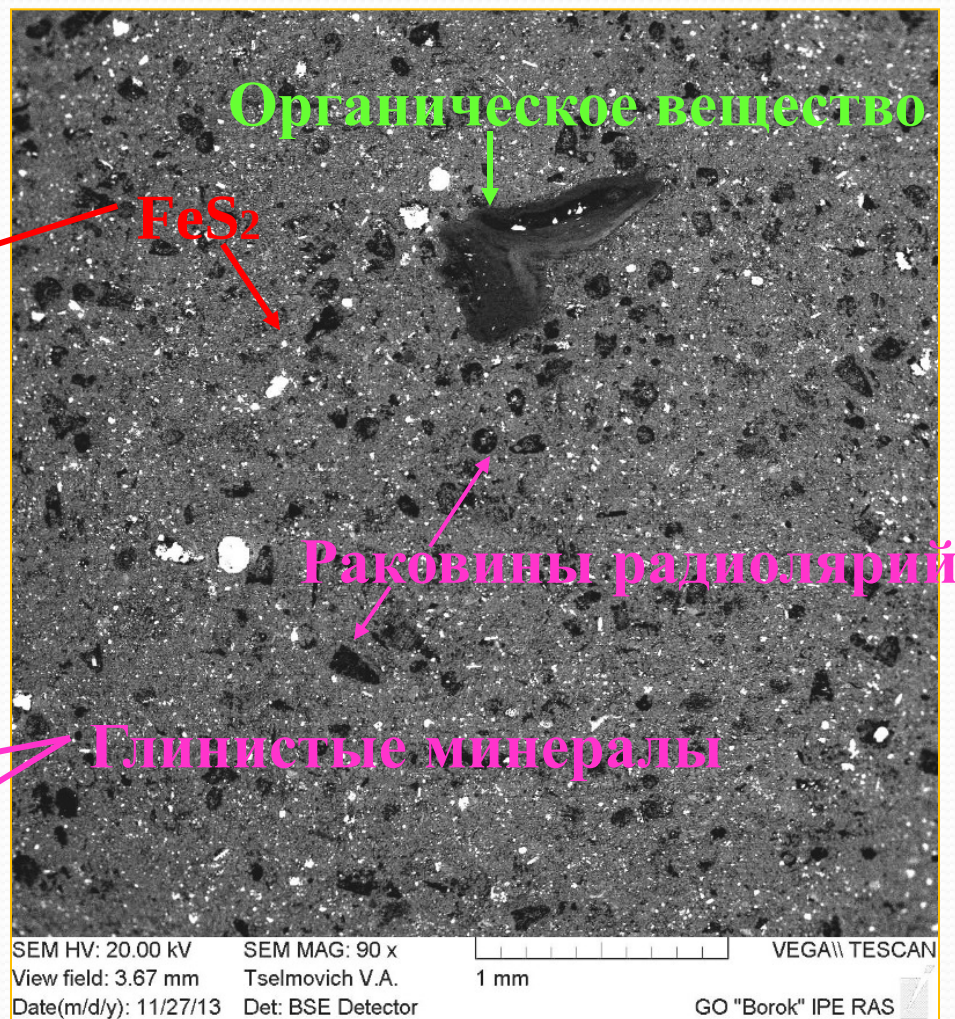
Поле зрения ~ 390 микрон

Микроструктура: сланец баженовской свиты

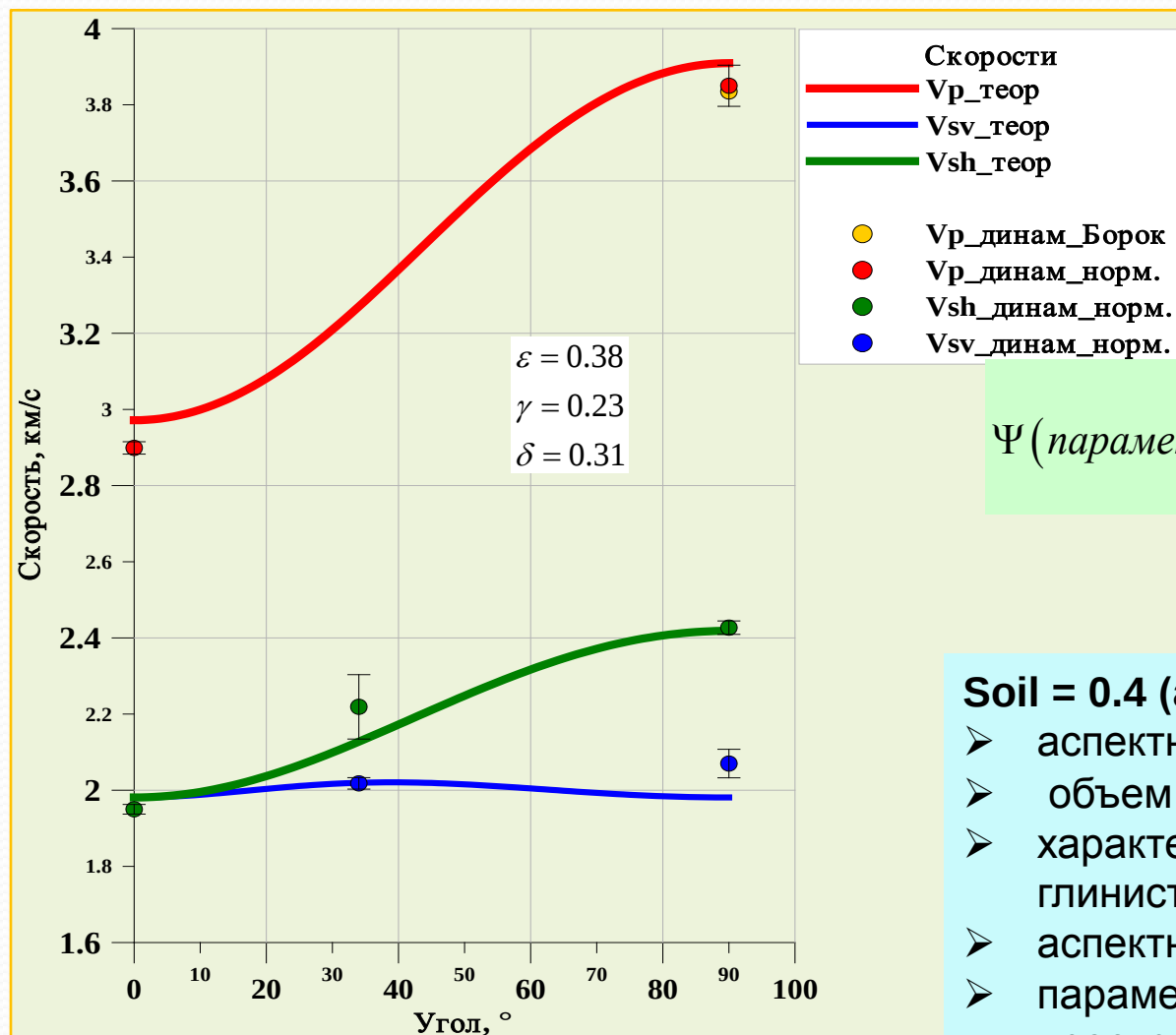
Фото в оптический микроскоп,



SEM, микрозонд Tescan Vega II



Результаты определения параметров модели УВ-сланца по данным эксперимента



$$C = \begin{pmatrix} 40.5 & 9.5 & 8.5 & 0 & 0 & 0 \\ 9.5 & 40.5 & 8.5 & 0 & 0 & 0 \\ 8.5 & 8.5 & 23.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15.5 \end{pmatrix}$$

$$\Psi(\text{параметры}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{\text{exp}} - P_{\text{theor}}(\text{параметры})}{P_{\text{exp}}} \right]^2$$

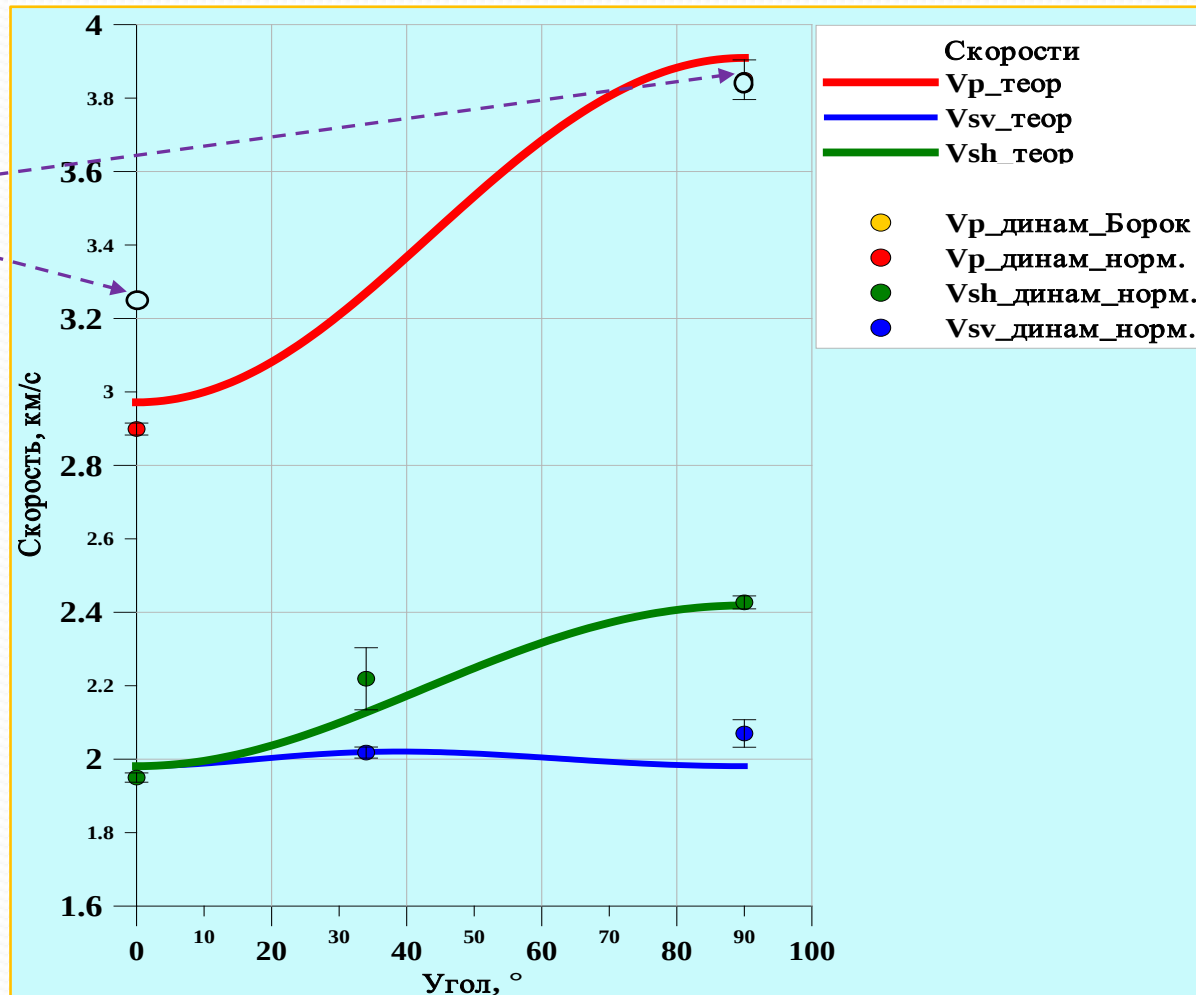
Soil = 0.4 (атм. условия)

- аспектное отношение трещин – 0.05
- объем тонких трещин - 0.0006%
- характеристика упорядоченности глинистых частиц – 4.3 градуса
- аспектное отношение пор – 0.54
- параметр связности пустотного пространства – 0.99
- скорректированная пористость - 1.5%
- Содержание керогена – 14%

Адаптация модели к пластовым условиям

Эксперимент при высоких давлениях
(P вертикальное = 70 МПа, P обжимное = 20 МПа)

Скорости при
пластовых
условиях

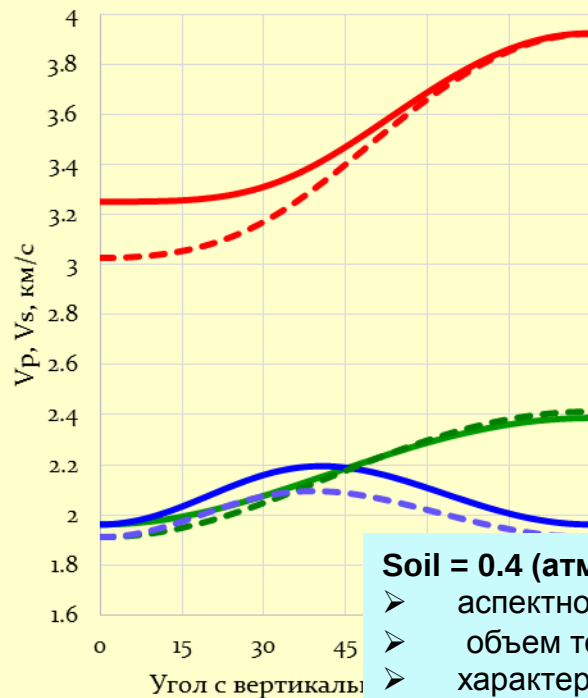


Адаптация модели к пластовым условиям

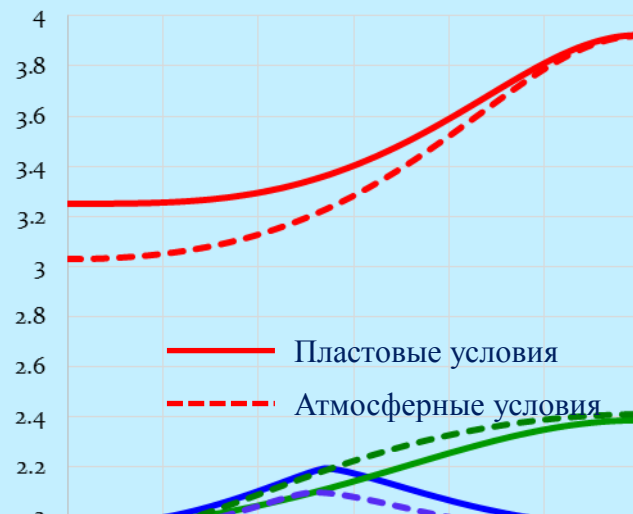
Эксперимент при высоких давлениях

(P вертикальное = 70 МПа, P обжимное = 20 МПа)

Фазовые скорости



Лучевые скорости



Soil = 0.4 (атм. условия)

- аспектное отношение трещин – 0.05
- объем тонких трещин - 0.0006%
- характеристика упорядоченности глинистых частиц – 4.3 градуса
- аспектное отношение пор – 0.54
- параметр связности пустотного пространства – 0.99
- скорректированная пористость - 1.5%
- Содержание керогена – 14%

Атмосферные условия

$$\varepsilon = 0.38$$

$$\gamma = 0.23$$

$$\delta = 0.12$$

Пластовые условия

$$\varepsilon = 0.23$$

$$\gamma = 0.24$$

$$\delta = 0.02$$

Параметры модели

(пластовые условия): Soil = 0.4

- аспектное отношение трещин – 0.02
- объем тонких трещин - 0.1%
- характеристика упорядоченности глинистых частиц – 4 градуса
- аспектное отношение пор – 0.8
- параметр связности пустотного пространства – 0.99
- скорректированная пористость - 1.3%
- Содержание керогена – 14%

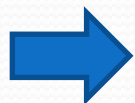
Параметры математической модели упругих свойств УВ-сланца

Числитель – среднее значение, знаменатель – стандартное отклонение

Параметры модели	Нормальные условия	Пластовые условия
Аспектное отношение трещин	$\frac{0.037}{0.001}$	$\frac{0.033}{0.013}$
Объем тонких трещин, %	$\frac{0.006}{0.007}$	$\frac{0.033}{0.114}$
Характеристика упорядоченности частиц, градусы	$\frac{3.2}{0.1}$	$\frac{3.2}{0.1}$
Аспектное отношение пор	$\frac{0.53}{0.03}$	$\frac{0.53}{0.08}$
Параметр связности пустотного пространства	$\frac{0.9900}{0.0006}$	$\frac{0.9900}{0.0305}$
Скорректированная пористость, %	$\frac{1.32}{0.03}$	$\frac{1.25}{0.13}$
Содержание керогена, %	14	14

Неустойчивость параметра Томсена «дельта»

$$\begin{aligned}C_{11} &= 40.5 \\C_{33} &= 23.4 \\C_{44} &= 10.4 \\C_{66} &= 15.5 \\C_{13} &= 8.5\end{aligned}$$



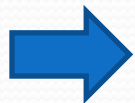
$$\begin{aligned}\varepsilon &= 0.37 \\ \gamma &= 0.24 \\ \delta &= 0.31\end{aligned}$$



Отличие «дельта» почти в 3 раза!!!

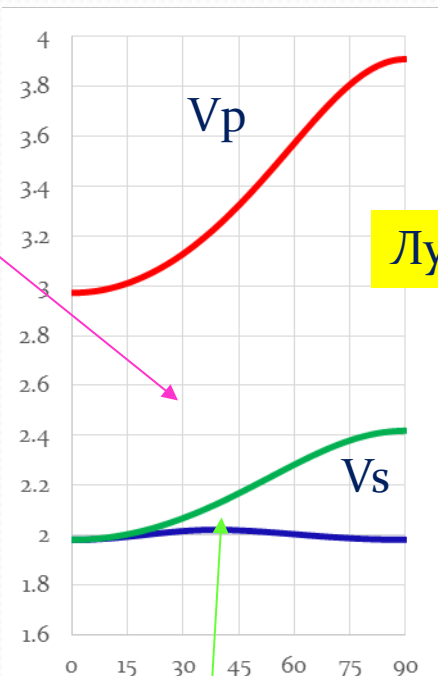


$$\begin{aligned}C_{11} &= 40.7 \\C_{33} &= 24.3 \\C_{44} &= 9.7 \\C_{66} &= 15.4 \\C_{13} &= 7.5\end{aligned}$$



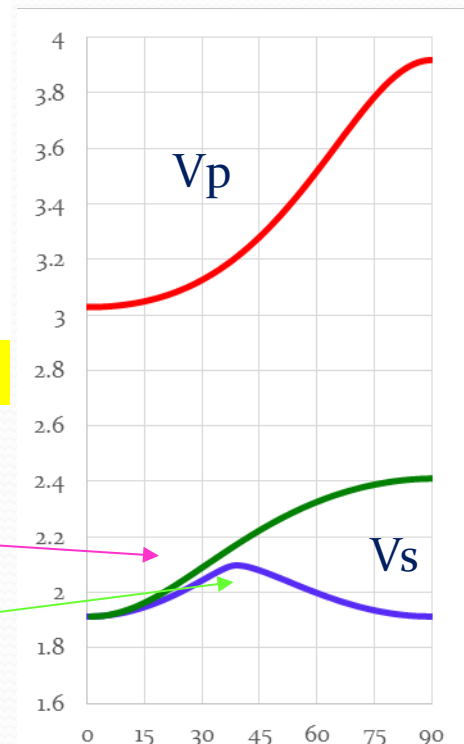
$$\begin{aligned}\varepsilon &= 0.38 \\ \gamma &= 0.23 \\ \delta &= 0.12\end{aligned}$$

Разница в скоростях менее 5%



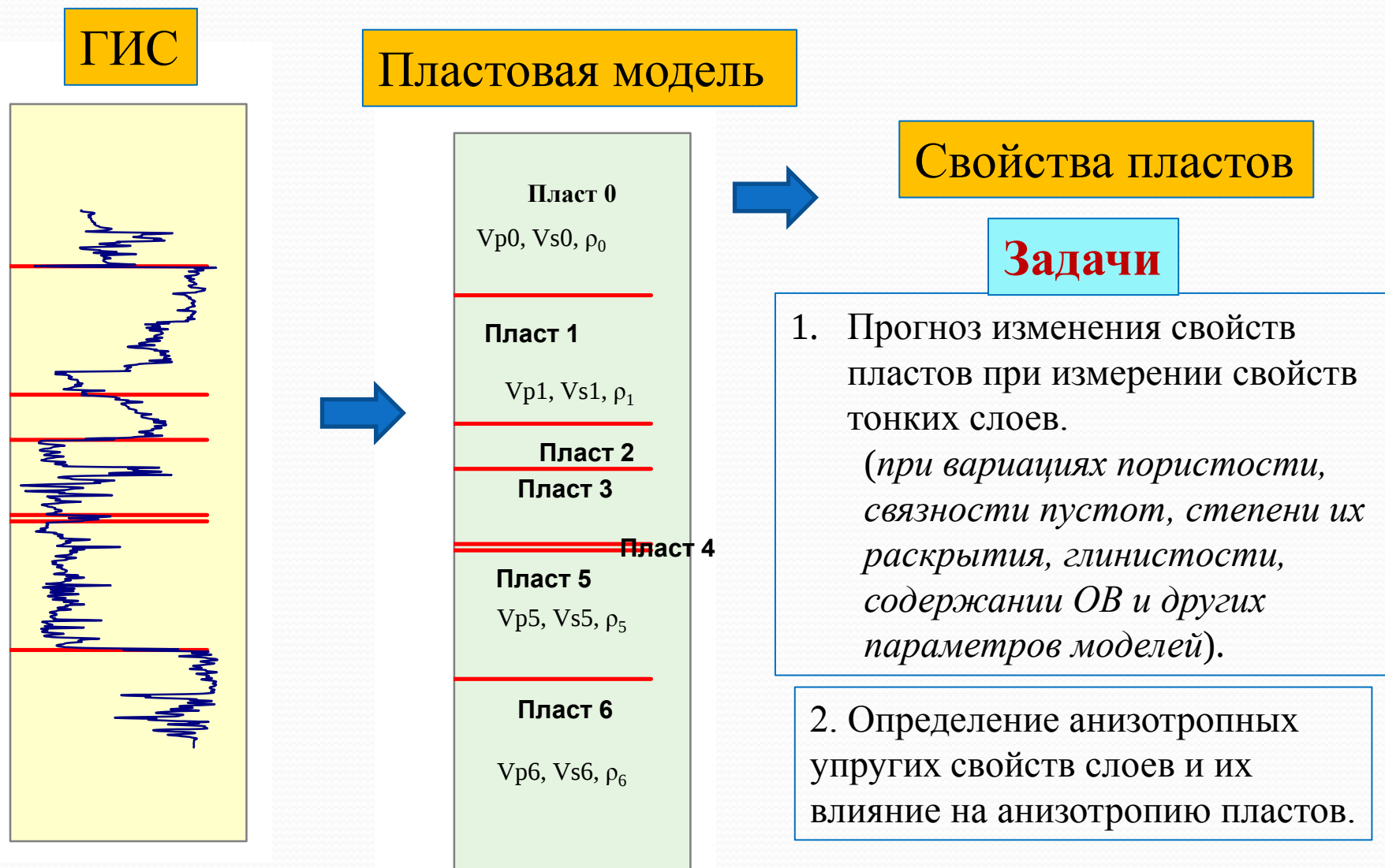
Лучевые скорости

Угол с вертикалью, град



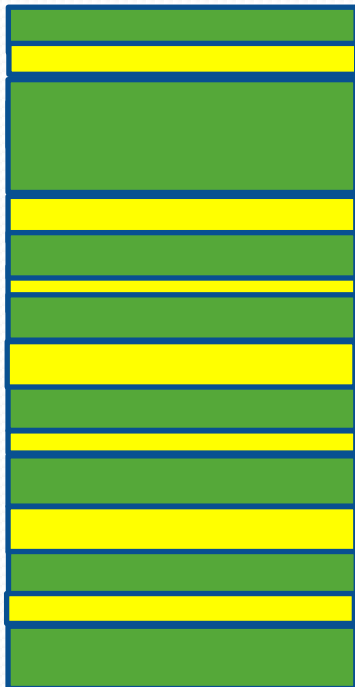
Угол с вертикалью, град

Использование результатов моделирования, основанных на исследованиях керна, для создания и анализа пластовой модели

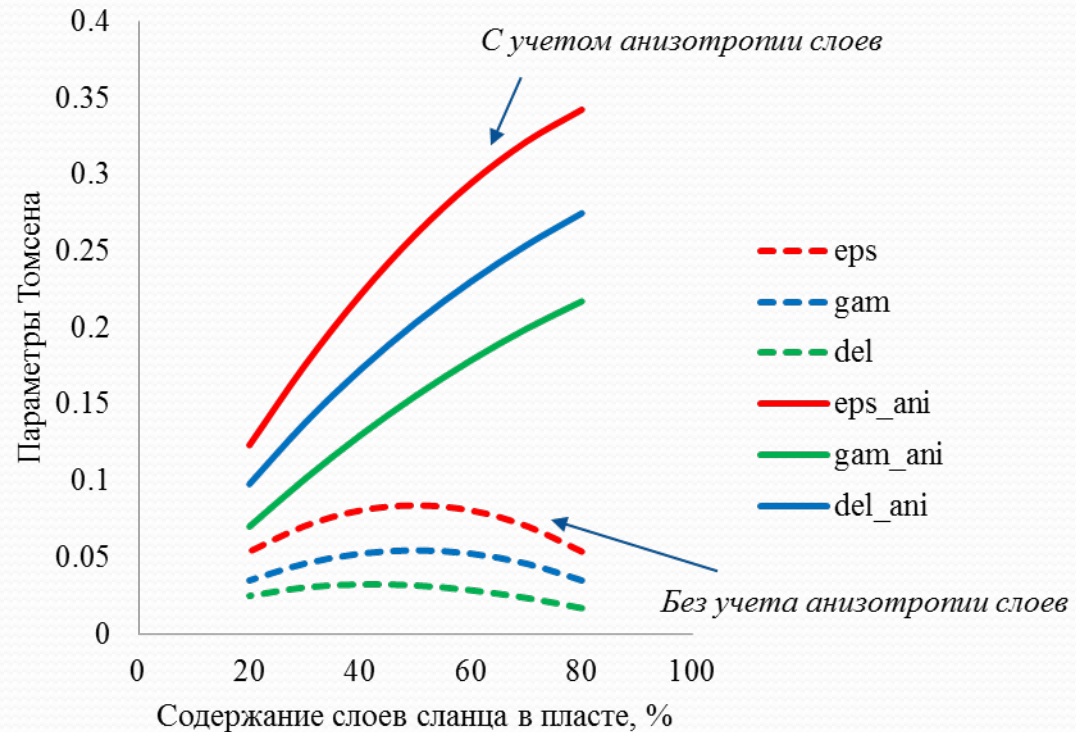


Необходимость учета «собственной» анизотропии слоев при создании пластовой модели

Модель пласта



Параметры Томсена



Сланец

Карбонатная
порода

Выводы - 1

Предложенный в работе комплекс экспериментальных и теоретических работ на керне позволяет проводить разномасштабные исследования керна, включающие:

- изучение микроструктуры породы как с помощью СТ-сканера, так и УЗ томографии, электронной и оптической микроскопии;
- измерение ФЕС и состава породы;
- измерение скоростей упругих волн в направлениях, необходимых для построения полного тензора упругости;
- трехосные испытания на прессе для получения геомеханических параметров породы;
- построение математической модели эффективных упругих свойств пород с помощью подходов RockPhysics при нормальных и пластовых условиях.

Выводы - 2

Помимо возможности получения информации о микроструктуре, ФЕС, составе, физических свойствах и параметрах математической модели упругих свойств такой комплекс экспериментально-теоретических работ позволяет:

- решать вопрос о представительности стандартных образцов определенного размера для характеристики упругих свойств породы в масштабе полноразмерного керна;
- определять причину зависимости скоростей упругих волн от направления (отличить анизотропию упругих свойств от эффекта неупорядоченных неоднородностей);

Выводы - 3

- связывать особенности поведения физических свойств с параметрами микроструктуры породы;
- решать вопросы апскейлинга упругих свойств;
- прогнозировать скорости упругих волн (как продольных, так и поперечных) в требуемых направлениях;
- предсказывать поведение скоростей упругих волн при изменении пористости, типа флюида, минерального состава, связности компонент, степени раскрытия пор и трещин;
- моделировать изменение сейсмического отклика среды на изменение параметров моделей сред, слагающих изучаемую формацию.



Спасибо за внимание!