



**Междисциплинарный подход к  
прогнозированию  
макроскопических и  
фильтрационно-емкостных  
свойств коллекторов  
углеводородов**

Баюк Ирина Олеговна  
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

# **Цель работы**

**Повышение достоверности  
определения макроскопических и  
фильтрационно-ёмкостных свойств  
(ФЕС) анизотропных коллекторов  
углеводородов**

# Актуальность исследования

**Проблемы разведочной геофизики, решение которых позволит повысить добычу углеводородов:**

- Определение параметров строения пустотного пространства коллектора
- Определение «неизмеряемых» физических свойств по измеренным
- Восстановление полного тензора упругости (или транспортных свойств) анизотропной породы по ограниченному числу измерений физических свойств, недостаточному для применения традиционных методик
- Построение скоростной модели углеводородосодержащих сланцев (shale) с учетом ее анизотропии для мониторинга гидроразрыва
- Выделение зон трещиноватости в карбонатных коллекторах и их характеристика
- Прогноз физических свойств коллекторов в различных масштабах

# Классификация подходов к определению макроскопических физических свойств коллекторов углеводородов

- эмпирические методы
- инженерные методы, основанные на простых формулах, получивших в некоторых случаях подтверждение на практике
- методы теории эффективных сред, позволяющие связать макроскопические физические свойства с *микроструктурой породы*

# Требования к методу определения макроскопических физических свойств пород-коллекторов

**Метод должен быть применим при следующих условиях:**

1. Компоненты имеют контрастные свойства
2. Число компонент произвольно
3. Концентрация компонент произвольна
4. Упругие и транспортные свойства породы могут быть анизотропными без ограничения на тип симметрии

**Метод должен учитывать:**

1. Различие формы компонент
2. Особенности ориентации компонент в объеме среды
3. Степень связности компонент

**Проблема определения эффективных физических свойств является проблемой учета взаимодействия многих тел и, в общем случае, может быть решена лишь приближенно**

# Задачи исследований

1. Построение моделей коллекторов углеводородов, отражающих основные черты их внутреннего строения и позволяющих применить теорию эффективных сред для определения их макроскопических, в общем случае анизотропных, физических свойств.
2. Разработка методики и математического обеспечения, позволяющих по имеющимся экспериментальным данным восстанавливать параметры моделей коллекторов углеводородов (сланцев, песчаников, карбонатных пород), включающие характеристики порово-трещиноватого пространства, с учетом возможной анизотропии физических свойств коллекторов.

## Задачи исследований

3. Разработка методики и математического обеспечения для прогноза физических свойств одного типа по свойствам другого типа для коллекторов углеводородов.

4. Верификация теоретического прогноза анизотропных упругих и транспортных свойств на имеющихся экспериментальных данных.

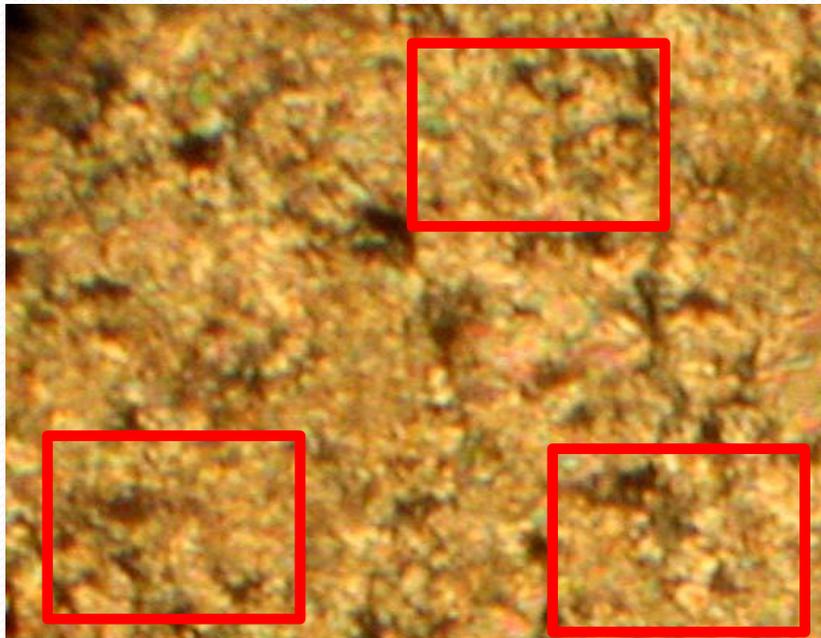
# **Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов**

**(Глава 1)**

# Эффективные физические свойства горных пород: определение

Горная порода - природный микроскопически неоднородный, макроскопически однородный композитный материал

**Статистически однородная среда:**  
Статистические характеристики для представительного объема не зависят от координат



**Общее определение**

$$\langle \mathbf{A}(\mathbf{r}) \rangle = \mathbf{X}^* \langle \mathbf{B}(\mathbf{r}) \rangle$$

**Эффективные упругие свойства**

$$\langle \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}) \rangle = \mathbf{C}^* \langle \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) \rangle \quad \text{Закон Гука}$$

**Эффективная электропроводность**

$$\langle \mathbf{j}(\mathbf{r}) \rangle = -\mathbf{S}^* \langle \nabla \varphi(\mathbf{r}) \rangle \quad \text{Закон Ома}$$

**Эффективная теплопроводность**

$$\langle \mathbf{q}(\mathbf{r}) \rangle = -\boldsymbol{\lambda}^* \langle \nabla T(\mathbf{r}) \rangle \quad \text{Закон Фурье}$$

**Эффективная гидравлическая  
проницаемость**      Закон Дарси

$$\langle \mathbf{Q}(\mathbf{r}) \rangle = -\mathbf{K}^* \langle \nabla h(\mathbf{r}) \rangle \quad h = \frac{P}{\rho g}$$

# Общая схема получения решения для эффективных физических свойств

$$\langle \mathbf{A}(\mathbf{r}) \rangle = \mathbf{X}^* \langle \mathbf{B}(\mathbf{r}) \rangle$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \langle \mathbf{A}(\mathbf{r}) \rangle + \mathbf{A}'(\mathbf{r}), \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \langle \mathbf{B}(\mathbf{r}) \rangle + \mathbf{B}'(\mathbf{r}), \quad \mathbf{X}(\mathbf{r}) = \langle \mathbf{X}(\mathbf{r}) \rangle + \mathbf{X}'(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{B}'(\mathbf{r}) = \mathbf{P} \langle \mathbf{B}(\mathbf{r}) \rangle$$

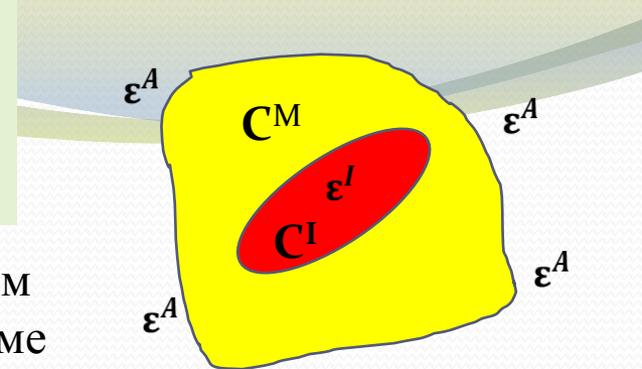
$$\mathbf{X}^* = \langle \mathbf{X}(\mathbf{r}) \rangle + \langle \mathbf{X}'(\mathbf{r}) \mathbf{P}(\mathbf{r}) \rangle$$

Определение оператора  $\mathbf{P}$  сводится к решению задачи о взаимодействии многих тел, которая, в общем случае, **может быть решена лишь приближенно.**

# Связь между локальным и средним полем деформаций

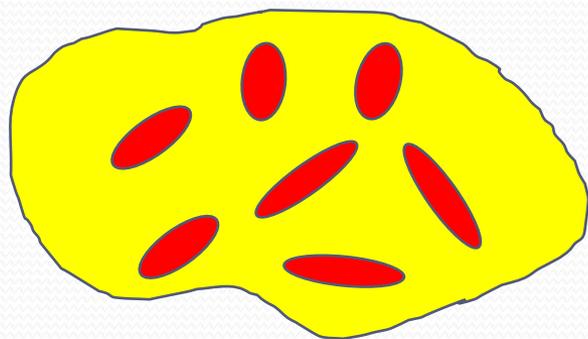
Задача о связи поля деформации во включении с постоянным полем деформации, приложенным на бесконечности к системе «матрица – включение» [Eshelby, 1957].

$$\boldsymbol{\varepsilon}^I = \left[ \mathbf{I} - (\mathbf{C}' + \mathbf{C}^M \mathbf{T}^{-1})^{-1} \mathbf{C}' \right] \boldsymbol{\varepsilon}^A$$



$$\mathbf{T} = -\mathbf{C}^M \mathbf{g}$$

$$g_{ijkl}(r) = \int_V G_{k(i,j)l}(r - r_1) dr_1$$



## Предположения:

- поля напряжений во включениях не зависят от наличия других включений
- среднее поле деформаций в матрице равно полю, приложенному на бесконечности

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



$$\langle \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}) \rangle = \mathbf{C}^* \langle \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) \rangle$$

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

# Обобщенная запись уравнения связи физических полей

$$\mathbf{L}(\mathbf{r})\mathbf{u}(\mathbf{r}) = -\mathbf{F}(\mathbf{r})$$

Упругие свойства

$$L_{ik} \equiv \nabla_j X_{ijkl} \nabla_l$$

Транспортные свойства

$$L \equiv \nabla_i X_{ij} \nabla_j$$

Физические свойства $X$	Поле $u$
Упругие свойства (тензор 4-го ранга)	Перемещение (вектор)
Теплопроводность (тензор 2-го ранга)	Температура (скаляр)
Электропроводность (тензор 2-го ранга)	Потенциал электрического поля (скаляр)
Гидравлическая проводимость (тензор 2-го ранга)	Давление (скаляр)

# Получение обобщенного решения для эффективных физических свойств

$$\mathbf{u}' \equiv \mathbf{u} - \mathbf{u}^C, \quad \mathbf{L}' \equiv \mathbf{L} - \mathbf{L}^C, \quad \mathbf{X}' \equiv \mathbf{X} - \mathbf{X}^C$$

Bayuk & Rodkin,  
PEPI, 1998

$$\mathbf{L}\mathbf{u} = -\mathbf{F}$$

$$\mathbf{L}^C\mathbf{u}' = -\mathbf{L}'\mathbf{u}$$

Bayuk & Chesnokov,  
Phys. Chem. Earth., 1998

$$\mathbf{L}^C\mathbf{u}^C = -\mathbf{F}$$

$$\mathbf{L}^C\mathbf{G} = -\mathbf{I}\delta(\mathbf{r}) \quad \longrightarrow \quad \mathbf{u}' = \mathbf{G} * \mathbf{L}'\mathbf{u}$$

$$\mathbf{u}'(\mathbf{r}) = \int_V \mathbf{G}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \mathbf{L}'(\mathbf{r}_1) \mathbf{u}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1.$$

Транспортные свойства

$$L \equiv \nabla_i X_{ij} \nabla_j$$

$$\nabla_i \mathbf{u}'(\mathbf{r}) \equiv u'_{,i} = \int G_{,im}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) X'_{mj}(\mathbf{r}_1) u_{,j}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1 \equiv Q_{im} X'_{mj} u_{,j}$$

Упругие свойства

$$L_{ik} \equiv \nabla_j X_{ijkl} \nabla_l$$

$$\varepsilon'_{ij} \equiv u'_{(i,j)} = \int G_{k(i,j)(l)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) X'_{klmn}(\mathbf{r}_1) \varepsilon_{mn} d\mathbf{r}_1 \equiv Q_{ijkl} X'_{klmn} \varepsilon_{mn}$$

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

Суммирование ряда в  
сингулярном приближении

$$[\mathbf{I} - \mathbf{Q}\mathbf{X}'(\mathbf{r})]^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (\mathbf{Q}\mathbf{X}')^n \approx \sum_{n=0}^{\infty} (\mathbf{g}\mathbf{X}')^n$$

$$G_{,im} \approx g_{im} \delta(\mathbf{r})$$

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

$$G_{k(i,j)(l)} \approx g_{ijkl} \delta(\mathbf{r})$$

Тело сравнения = матрица Эшелби!

$$G = G^0 + G^0 L' G^0 + G^0 L' G^0 L' G^0 + \dots \quad \text{ряд Дайсона}$$

# Тензор $\mathbf{g}$

Упругие свойства

$$g_{ijkl}(r) = \int_V G_{k(i,j)l}(r-r_1) dr_1$$

$$a_{imjn} = -\frac{1}{4\pi} \int n_{mn} \Lambda_{ij}^{-1} d\Omega, \quad \Lambda_{ij} \equiv C_{imjn}^M n_{mn},$$

$$a_{imjn}(\mathbf{r}) \equiv \int_V G_{im,jn}(\mathbf{r}-\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1$$

$$n_{mn} \equiv n_m n_n, \quad n_1 = \frac{1}{a_1} \sin \theta \cos \varphi, \quad n_2 = \frac{1}{a_2} \sin \theta \sin \varphi, \quad n_3 = \frac{1}{a_3} \cos \theta,$$

$$d\Omega \equiv \sin \theta d\theta d\varphi$$

Связь тензора  $\mathbf{g}$  с тензором Эшелби  $\mathbf{T}$ :  $\mathbf{g} = -(\mathbf{C}^C)^{-1} \mathbf{T}$

Транспортные свойства

$$g_{ij}(r) = \int_V G_{,ij}(r-r_1) dr_1$$

$$g_{kl} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} n_{kl} \Lambda^{-1} d\Omega$$

$$\Lambda^{-1} \equiv X_{ij}^C n_i n_j$$

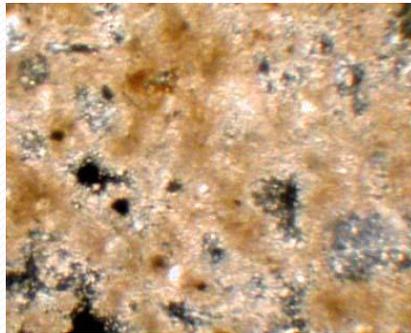
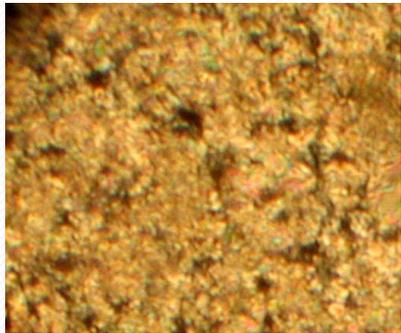
Связь тензора  $\mathbf{g}$  с тензором деполяризации  $\mathbf{D}$  Ландау и Лифшица:

$$\mathbf{g} = -(\mathbf{X}^C)^{-1} \mathbf{D}$$

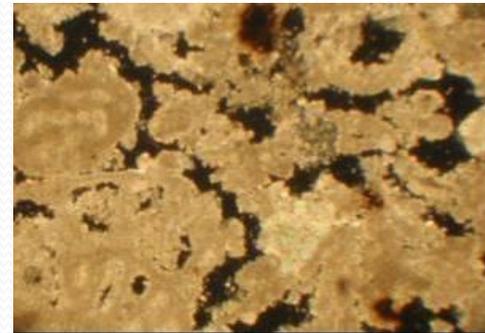
# Выбор тела сравнения

Тело сравнения = матрица Эшелби

Выбор тела сравнения диктуется внутренней структурой среды. Флуктуации физических свойств отсчитываются от тела сравнения. Удачный выбор тела сравнения в сингулярном приближении заменяет расчет пространственных статистических моментов в ряде Дайсона.



*Фото  
Д. Коробкова,  
(РГГРУ, 2003)*



Включения имеют замкнутую квазиэллипсоидальную форму, свойства тела сравнения выбираются равными эффективным  $\mathbf{X}^C = \mathbf{X}^*$

Включения одного типа могут быть представлены, как в виде эллипсоидов, так и в виде протяженных каналов; свойства тела сравнения определяются по формуле  $\mathbf{X}^C = (1-f)\mathbf{X}^M + f\mathbf{X}^I$

Альтернативный выбор тела сравнения ( $V$  – Фойгт,  $R$  – Ройсс)

$$C^C = (1 - \phi)C^V + \phi C^R$$

# Связь параметра $f$ с коэффициентом Био-Виллиса

$$\sigma_{ij}^{\varepsilon\phi\phi} = \sigma_{ij} - \alpha_{ij} P_{nop}$$

$$P^{\varepsilon\phi\phi} = P - \alpha P_{nop} \quad \text{Biot.1941, Biot \& Willis, 1957}$$

$$\alpha \approx 1 \quad \text{Terzaghi, 1923, 1943}$$

$$\mathbf{X}^C = (1-f)\mathbf{X}^M + f\mathbf{X}^I$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_S}{K_M} \quad \text{Geertsma, 1957}$$

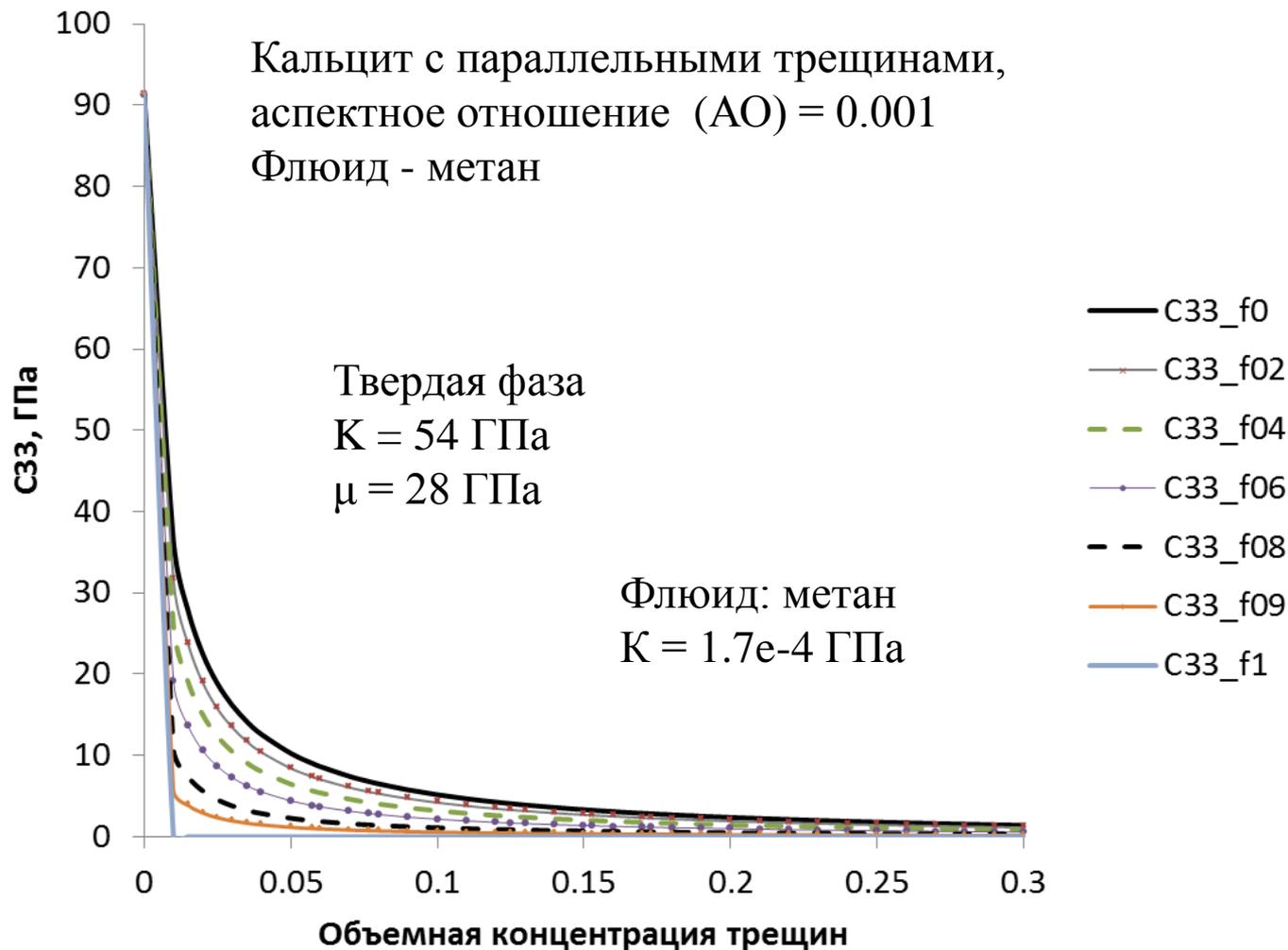
$$\mathbf{f} = \alpha \boldsymbol{\varepsilon}^I (\boldsymbol{\varepsilon}^C)^{-1} \quad (\mathbf{I} - \mathbf{f}) = \boldsymbol{\varepsilon}^M (\boldsymbol{\varepsilon}^C)^{-1} \quad \text{Jiang, 2013}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^C = \boldsymbol{\varepsilon}^I \xrightarrow{HS^{Lo}} \mathbf{f} = \alpha = \mathbf{I} \quad \text{(Terzaghi)}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^C = \boldsymbol{\varepsilon}^M \xrightarrow{HS^{Up}} \mathbf{f} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{f} = \alpha \left[ \mathbf{I} - \mathbf{QX}' \right]^{-1} \xrightarrow{\quad} \mathbf{f} = \alpha \left[ \mathbf{I} - \mathbf{gX}' \right]^{-1}$$

# Зависимость упругих свойств матрицы кальцита с трещинами от свойств тела сравнения (параметра $f$ )

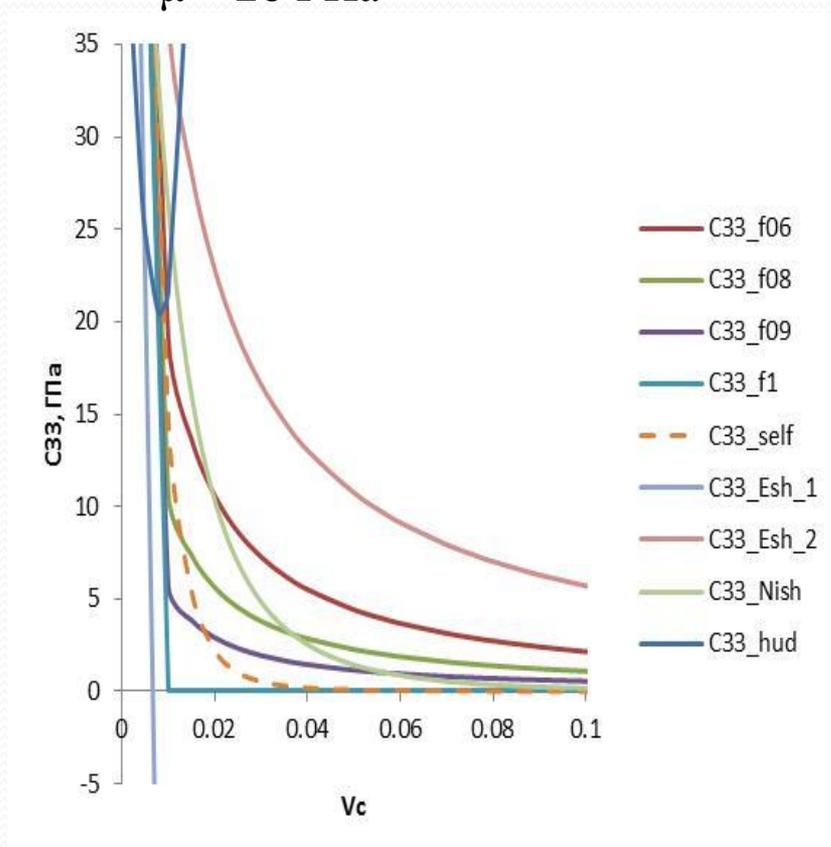
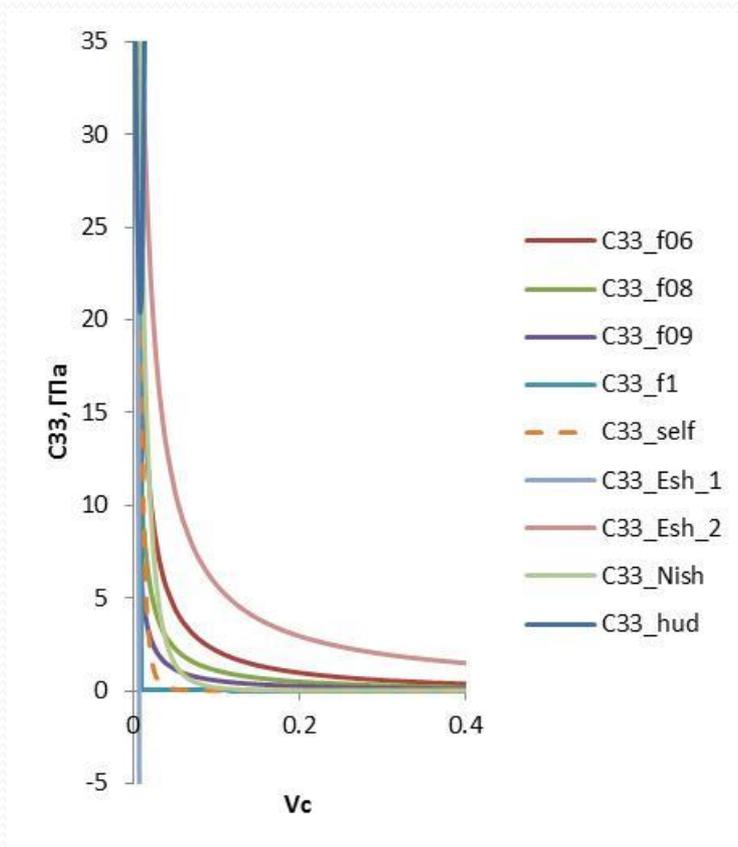


# Сравнение результатов, полученных различными методами ТЭС

Аспектное отношение трещин = 0.001  
Трещины параллельные

Твердая фаза  
 $K = 54$  ГПа  
 $\mu = 28$  ГПа

Флюид: метан  
 $K = 1.7e-4$  ГПа



# Границы для компонент эффективного тензора упругости

Базовые неравенства для получения границ для компонент эффективного тензора упругости (Willis, 1977)

$$\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle (\mathbf{C}^* - \bar{\mathbf{C}}) \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \geq 0,$$

$\mathbf{C}(\mathbf{r}) - \mathbf{C}^c$   
неотрицательно определен

или  $\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle (\mathbf{C}^* - \bar{\mathbf{C}}) \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \leq 0,$

$\mathbf{C}^c - \mathbf{C}(\mathbf{r})$   
неотрицательно определен

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

$$\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle (\bar{\mathbf{C}}^M - \mathbf{C}^*) \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \geq 0 \quad \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle (\mathbf{C}^* - \bar{\mathbf{C}}^I) \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \geq 0$$

# Границы для компонент эффективного тензора упругости

(Bayuk et al., 2008, *Geophys.J.Int.*)

$$\det \begin{pmatrix} a_{i_1 i_1} & a_{i_1 i_2} & \dots & a_{i_1 i_p} \\ a_{i_2 i_1} & a_{i_2 i_2} & \dots & a_{i_2 i_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i_p i_1} & a_{i_p i_2} & \dots & a_{i_p i_p} \end{pmatrix} \geq 0$$

Изотропная среда

$$\bar{C}_{11}^I \leq C_{11}^* \leq \bar{C}_{11}^M$$

$$\bar{C}_{44}^I \leq C_{44}^* \leq \bar{C}_{44}^M$$

$$\bar{C}_{11}^I - \bar{C}_{11}^M + \bar{C}_{12}^I \leq C_{12}^* \leq \bar{C}_{11}^M - \bar{C}_{11}^I + \bar{C}_{12}^M$$

Гексагональный и тетрагональный (классы 4mm, 2m, 422, 4/mmm) тип симметрии

$$\bar{C}_{11}^I - \bar{C}_{12}^I \leq C_{11}^* - C_{12}^* \leq \bar{C}_{11}^M - \bar{C}_{12}^M$$

$$\bar{C}_{33}^I \leq C_{33}^* \leq \bar{C}_{33}^M \quad \bar{C}_{44}^I \leq C_{44}^* \leq \bar{C}_{44}^M$$

$$(\bar{C}_{33}^I - C_{33}^*) [(\bar{C}_{11}^I + \bar{C}_{12}^I) - (C_{11}^* + C_{12}^*)] - 2(\bar{C}_{13}^M - C_{13}^*)^2 \geq 0,$$

$$(C_{33}^* - \bar{C}_{33}^M) [(C_{11}^* + C_{12}^*) - (\bar{C}_{11}^M + \bar{C}_{12}^M)] - 2(C_{13}^* - \bar{C}_{13}^M)^2 \geq 0$$



$$\bar{C}_{11}^I \leq C_{11}^* \leq \bar{C}_{11}^M \quad \bar{C}_{66}^I \leq C_{66}^* \leq \bar{C}_{66}^M.$$

$$\bar{C}_{11}^I - \bar{C}_{11}^M + \bar{C}_{12}^I \leq C_{12}^* \leq \bar{C}_{11}^M - \bar{C}_{11}^I + \bar{C}_{12}^M$$

Для  $C_{13}$  простой «вилки» нет

# Границы для компонент эффективного тензора упругости

(Bayuk et al., 2008, Geophys.J.Int.)

Орторомбический тип симметрии

$$\begin{aligned}
 &1 \quad \bar{C}_{11}^I \leq C_{11}^* \leq \bar{C}_{11}^M \\
 &2 \quad \bar{C}_{44}^I \leq C_{44}^* \leq \bar{C}_{44}^M \\
 &3 \quad \bar{C}_{55}^I \leq C_{55}^* \leq \bar{C}_{55}^M \\
 &4 \quad \bar{C}_{66}^I \leq C_{66}^* \leq \bar{C}_{66}^M \\
 &5, 6 \quad (\bar{C}_{22}^I - C_{22}^*)(\bar{C}_{11}^I - C_{11}^*) - (\bar{C}_{12}^I - C_{12}^*)^2 \geq 0 \\
 &\quad (C_{22}^* - \bar{C}_{22}^M)(C_{11}^* - \bar{C}_{11}^M) - (C_{12}^* - \bar{C}_{12}^M)^2 \geq 0 \\
 &\quad (\bar{C}_{11}^I - C_{11}^*)(\bar{C}_{22}^I - C_{22}^*)(\bar{C}_{33}^I - C_{33}^*) + 2(\bar{C}_{12}^I - C_{12}^*)(\bar{C}_{13}^I - C_{13}^*)(\bar{C}_{23}^I - C_{23}^*) - \\
 &\quad - (\bar{C}_{33}^I - C_{33}^*)(\bar{C}_{12}^I - C_{12}^*)^2 - (\bar{C}_{11}^I - C_{11}^*)(\bar{C}_{23}^I - C_{23}^*)^2 - \\
 &7,8,9 \quad - (\bar{C}_{22}^I - C_{22}^*)(\bar{C}_{13}^I - C_{13}^*)^2 \geq 0, \\
 &\quad (C_{11}^* - \bar{C}_{11}^M)(C_{22}^* - \bar{C}_{22}^M)(C_{33}^* - \bar{C}_{33}^M) + 2(C_{12}^* - \bar{C}_{12}^M)(C_{13}^* - \bar{C}_{13}^M)(C_{23}^* - \bar{C}_{23}^M) - \\
 &\quad - (C_{33}^* - \bar{C}_{33}^M)(C_{12}^* - \bar{C}_{12}^M)^2 - (C_{11}^* - \bar{C}_{11}^M)(C_{23}^* - \bar{C}_{23}^M)^2 - \\
 &\quad - (C_{22}^* - \bar{C}_{22}^M)(C_{13}^* - \bar{C}_{13}^M)^2 \geq 0.
 \end{aligned}$$

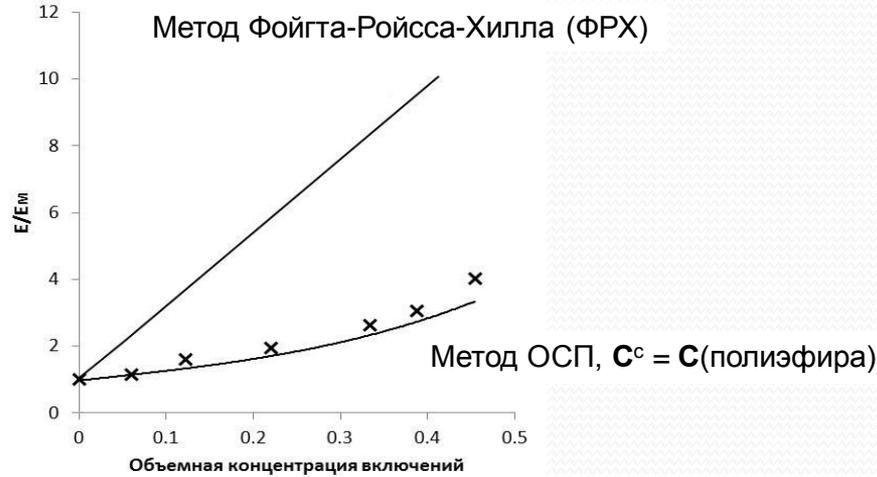


$$\begin{aligned}
 &\bar{C}_{22}^I \leq C_{22}^* \leq \bar{C}_{22}^M \\
 &\bar{C}_{33}^I \leq C_{33}^* \leq \bar{C}_{33}^M.
 \end{aligned}$$

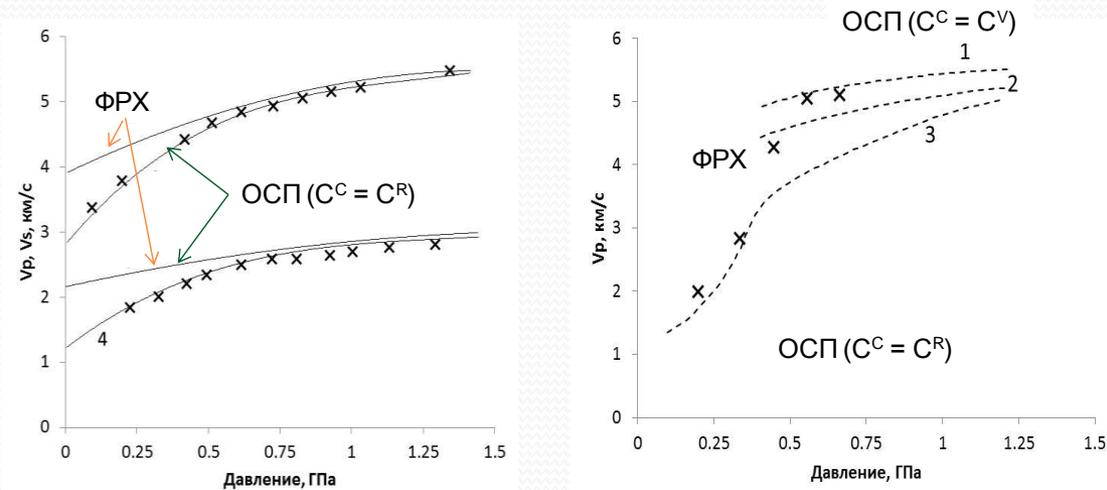
Аналогичные системы неравенств получены для тетрагональной и тригональной сингоний

# Верификация формулы для эффективного тензора упругости на данных эксперимента

## I. Стекланные сферы в полиэфирной матрице

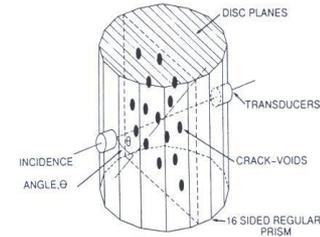


## II. Смесь «кварцевые зерна в стеарине»



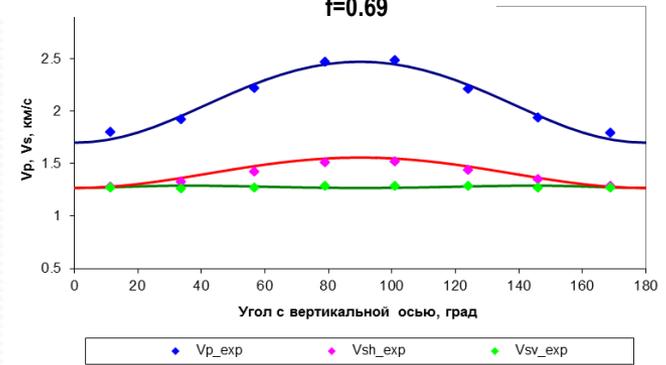
(эксперимент проведен Р.М. Насимовым и А.И. Левыкиным, ИФЗ РАН)

## III. Трещины в смеси кварцевого песка с эпоксидной смолой (Rathore et al. 1994)

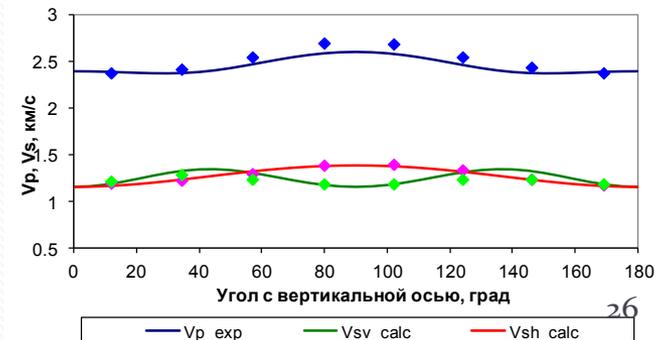


Аспектное отношение трещин = 0.0036  
Пористость = 0.15%

Сухой образец  
 $f=0.69$



Водонасыщенный образец  
 $f = 0.69, S_w = 0.84$



# Определение тензорного коэффициента линейного теплового расширения (ТКЛР)



$$\alpha^* = \langle \alpha_j \mathbf{B}_j \rangle$$

$$\sigma_j = \mathbf{B}_j \langle \sigma \rangle$$

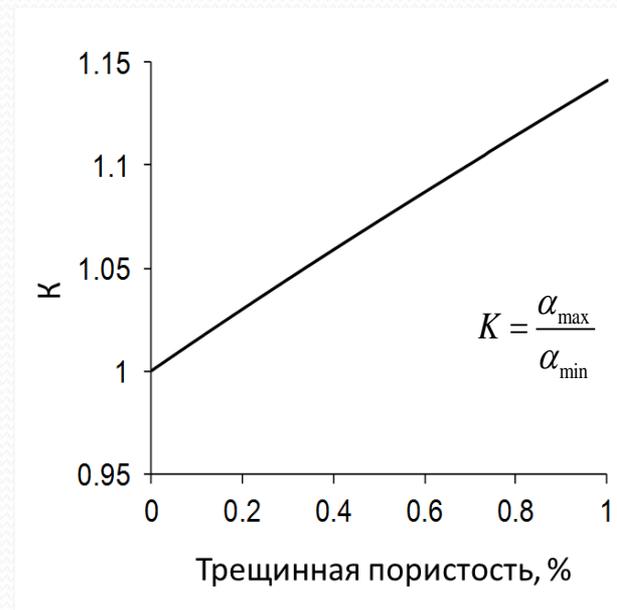
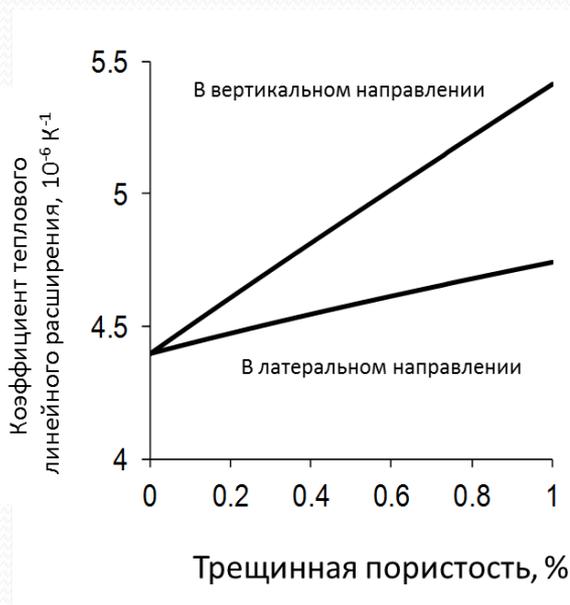
$$\epsilon_j = (\mathbf{I} - \mathbf{gC}')^{-1} \left\langle (\mathbf{I} - \mathbf{gC}')^{-1} \right\rangle^{-1} \langle \epsilon \rangle$$

$$\mathbf{B}_j = \mathbf{C}_j (\mathbf{I} - \mathbf{gC}')^{-1} \left\langle (\mathbf{I} - \mathbf{gC}')^{-1} \right\rangle^{-1} \mathbf{S}^*$$

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

ТКЛР зависит от формы, концентрации, степени связности, ориентации неоднородностей

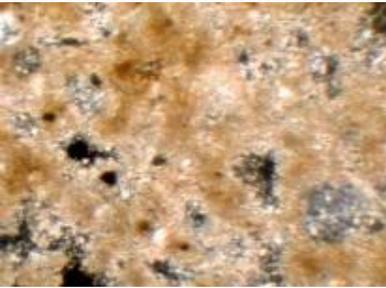
Известняк с горизонтальными трещинами  
аспектное отношение = 0.005



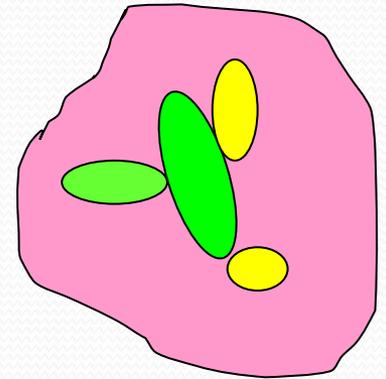
**Математическое  
моделирование эффективных  
физических свойств  
коллекторов углеводородов,  
основанное на едином  
описании их микроструктуры**

**Прямые и обратные задачи  
(Глава 2)**

# Этапы математического моделирования физических свойств коллектора



Построение модели коллектора углеводородов по данным анализа его внутреннего строения в различных масштабах



Параметризация модели коллектора в каждом масштабе

Определение способа учета связности компонент путем выбора тела сравнения в каждом масштабе

Исследование чувствительности модели к ее параметрам

Решение обратной задачи по определению параметров модели и корректировка модели в случае необходимости

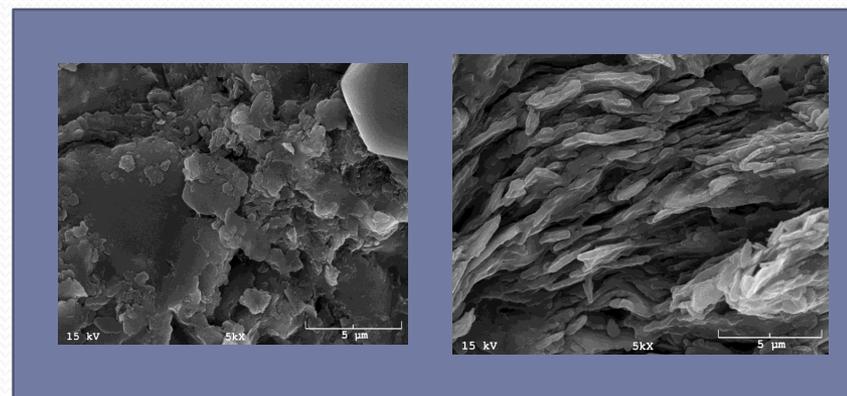
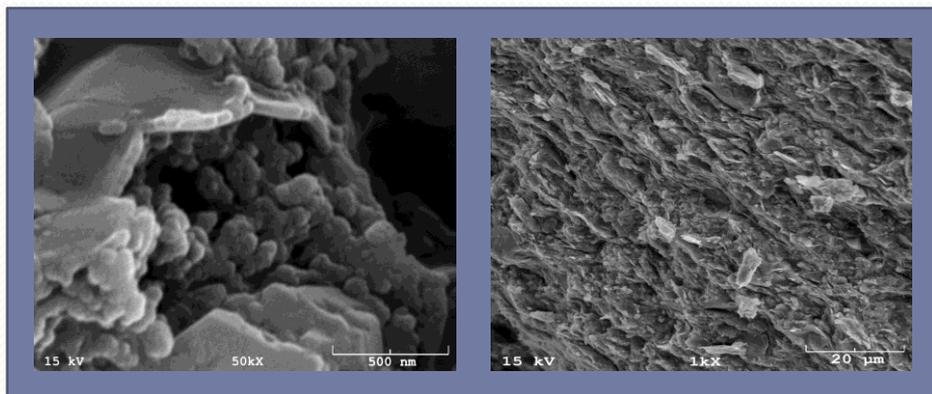
# Моделирование физических свойств коллекторов

(«от меньших размеров к бóльшим»)

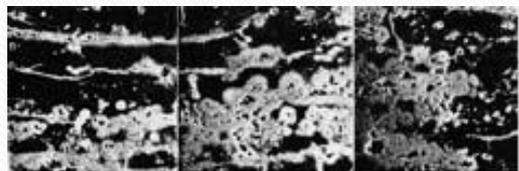
# Построение модели коллектора – от мелких неоднородностей к крупным

## Этапы построения модели коллектора

1. Лабораторные исследования микроструктуры (3D микросканер, электронный микроскоп, шлифы) – от нанометров до миллиметров



2. Визуальное изучение образцов керна

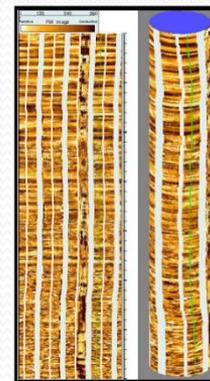


# Построения модели коллектора – от мелких неоднородностей к крупным

## Этапы построения модели коллектора

### 3. Изучение коллектора в масштабах работ ГИС

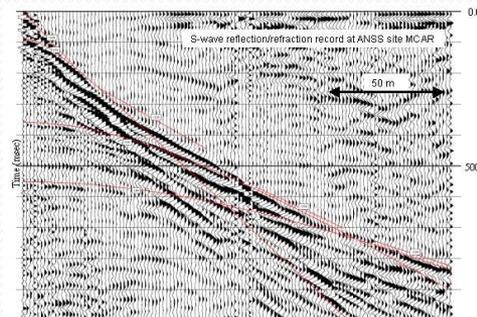
использование данных FMI каротажа  
(Formation MicroImager)



дипольного акустического каротажа  
( $V_p$ ,  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ )



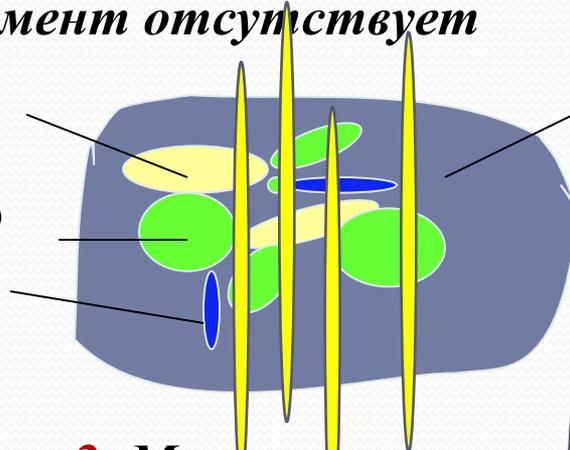
### 4. Изучение коллектора в масштабах работ ВСП и наземной сейсмики



# Модели коллекторов

**Модель 1.** Минеральные зерна контактируют друг с другом, цемент отсутствует

Поры, трещины, частицы твердого вещества (матрицы)

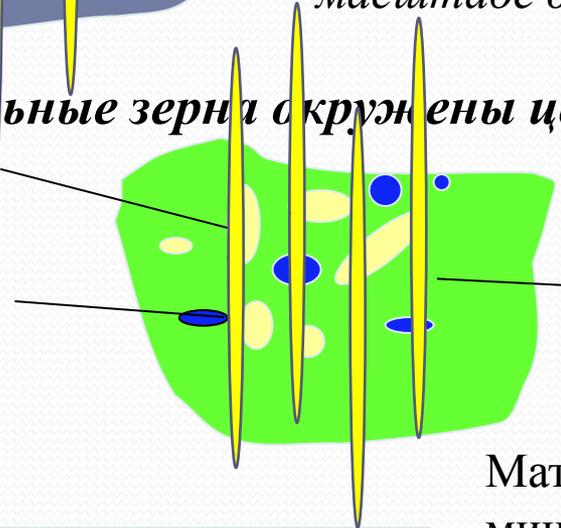


Карбонатный коллектор масштаб измерений в скважине

Терригенные коллекторы, карбонатные коллекторы в масштабе образца

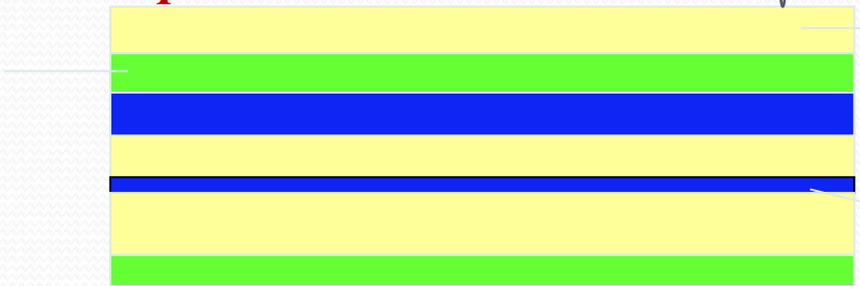
**Модель 2.** Минеральные зерна окружены цементом

Поры, трещины, частицы твердого вещества (матрицы)



Цемент

**Модель 3.** Слоистые среды



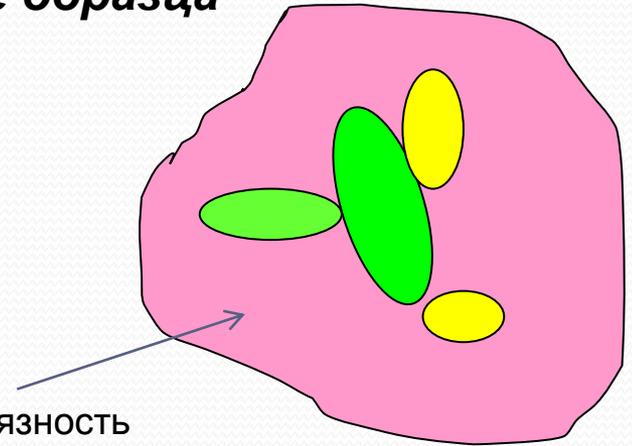
Матрица состоит из минеральных зерен, остатков органического вещества, капиллярной и связанной жидкости и изолированных пустот

# Параметризация моделей

## Модель карбонатного коллектора в масштабе образца

### Параметры модели

1. Физические свойства матрицы
2. Форма зерен
3. Форма трещин и пор (2 параметра Бэта-распределения)
4. Характер связи трещин, пор, зерен

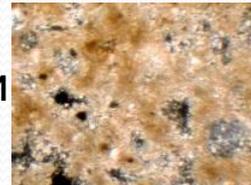


«Тело сравнения» - учитывает связность компонент

### Способы учета связи трещин и пор:

1. Трещины и поры (эллипсоиды) помещаются в среду с эффективными свойствами.

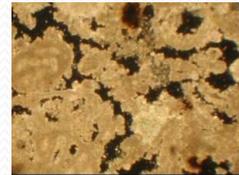
«Тело сравнения» - среда с эффективными свойствами



2. Используется линейную комбинацию свойств матрицы и включений:

$$\mathbf{X}^C = (1-f)\mathbf{X}^M + f\mathbf{X}^I$$

**Дополнительный параметр  $f$**  - параметр связности пор и трещин



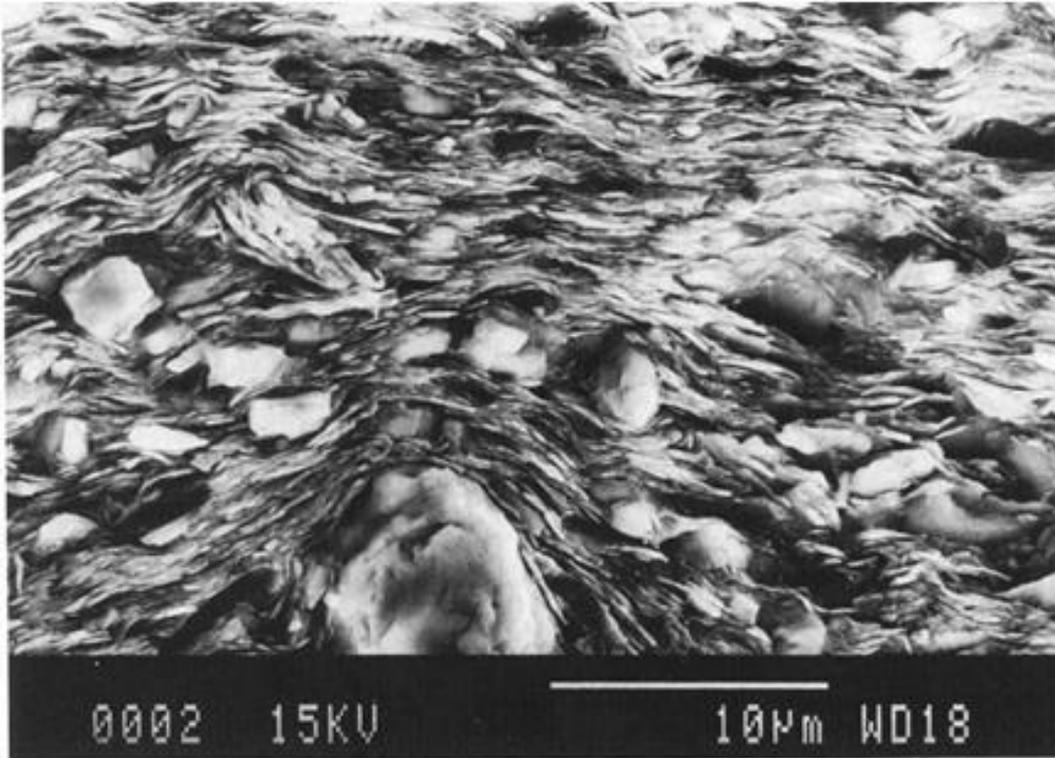
$\mathbf{X}^* = F(\text{свойства компонент, пористость, форма и ориентация пустот, свойства тела сравнения})$

$$\mathbf{X}^* = \langle \mathbf{X}(\mathbf{I} - \mathbf{g}\mathbf{X}')^{-1} \rangle \langle (\mathbf{I} - \mathbf{g}\mathbf{X}')^{-1} \rangle^{-1},$$

$$\mathbf{X}' \equiv \mathbf{X} - \mathbf{X}^c$$

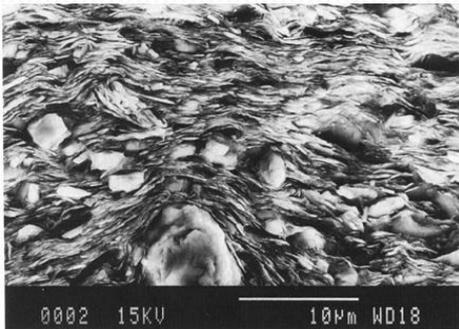
# **Модели коллекторов: сланцы (shale)**

# Внутреннее строение сланца (shale)

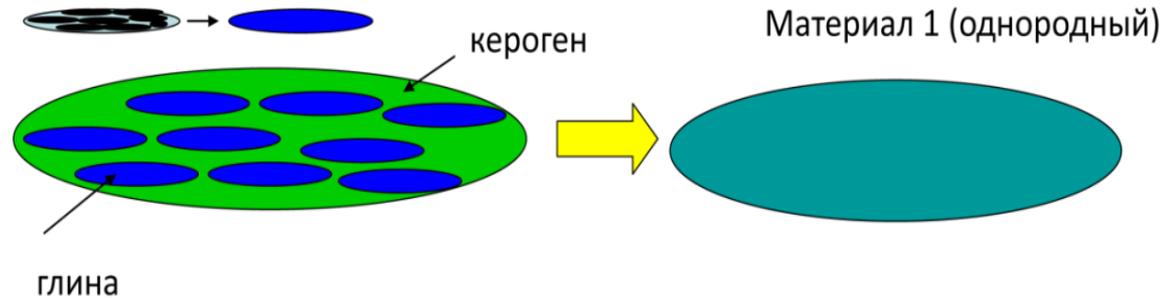


Фотография глинистого сланца Киммеридж, полученная на сканирующем электронном микроскопе (Hornby et al. 1994)

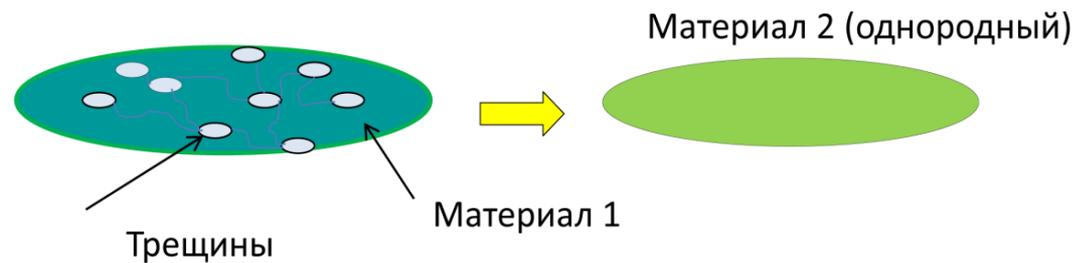
# Построение модели сланца (shale)



Этап 1. Внесение частиц глины в керогеновую матрицу

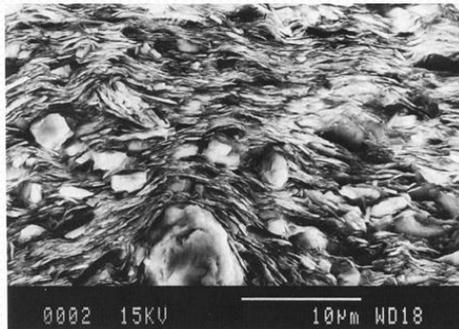
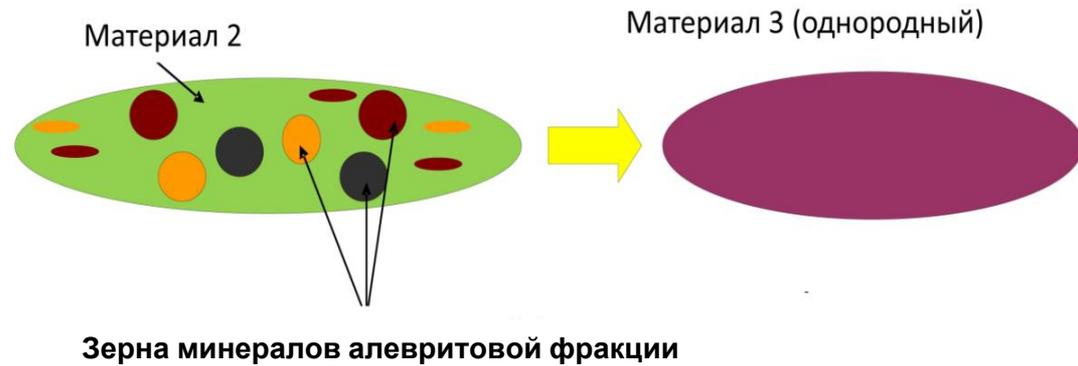


Этап 2. Внесение тонких трещин в Материал 1

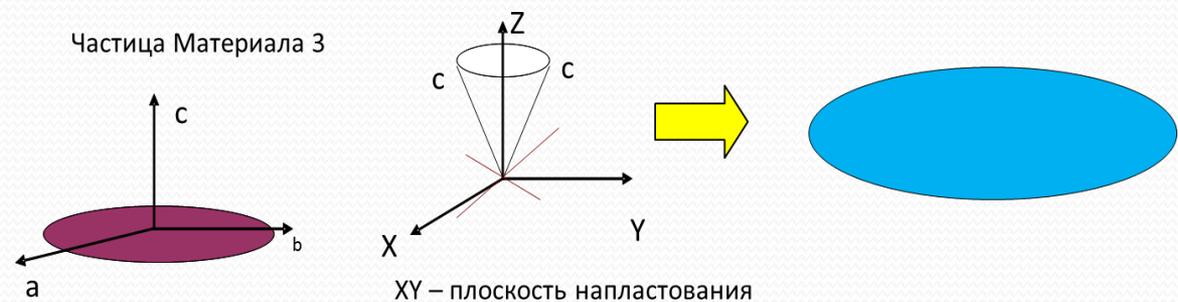


# Построение модели сланца (shale)

## Этап 3. Внесение минералов алевритовой фракции в Материал 2

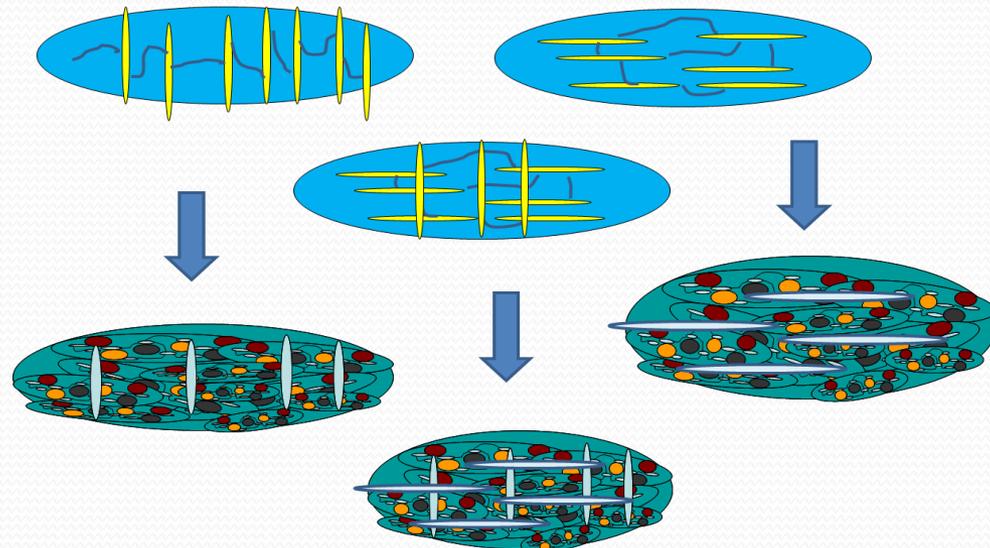
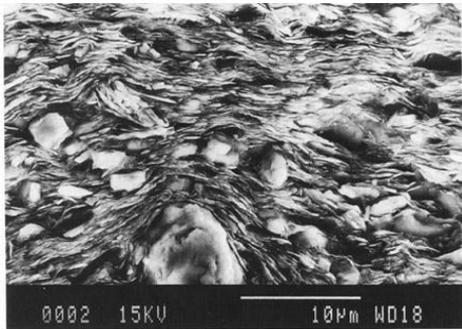


## Этап 4. Вращение частиц Материала 3



# Построение модели сланца (shale)

Этап 5. Внесение дополнительных систем трещин в Материал 4



Полная модель сланца

# Методы решения обратных задач по определению параметров моделей

- 1. Использование численных методов нелинейной оптимизации (минимизируется расхождение между измеренными и теоретическими значениями)**

*Получают одно решение, которое обеспечивает минимум невязки между экспериментальными и теоретическими значениями. Регуляризация задачи с использованием доступной априорной информации.*

- 2. Построение N-мерных сеток (N – число параметров модели), в узлах которых решена прямая задача, а узлы являются набором параметров модели**

*Сетка рассчитывается один единственный раз для модели среды. По измеренным значениям находятся узлы, параметры которых обеспечивают заданное расхождение (много решений, по которым строятся статистические характеристики).*

- 3. Использование нейронных сетей**

*Метод требует обширной базы данных («свойства – внутренняя структура породы»), в которой находят свойства, близкие к измеренным и определяет возможную внутреннюю структуру.*

# Использование нелинейной оптимизации для определения параметров модели

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

Нормировка дает возможность использовать измерения различных физических величин  $P$  (скоростей, электропроводности, теплопроводности)

Задача может быть недоопределенной: число неизвестных больше, чем число измерений

На неизвестные параметры модели накладываются ограничения, полученные из других информационных источников

**Нелинейная оптимизация с ограничениями**

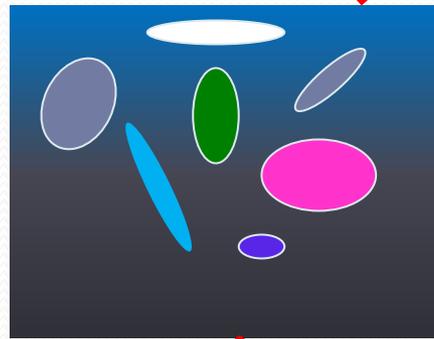
# Алгоритм прогноза «неизмеряемых» свойств через «измеряемые»

Измерения  $V_p$  (и  $V_s$ ),  
электропроводности,  
пористости и  
минералогического  
состава

Решение обратной задачи по  
определению геометрии  
порового пространства

*(Bayuk, Popov, Parshin, SCA, 2011):  
Определение геометрии порового  
пространства по данным о  
теплопроводности*

*Прогноз теплопроводности по  
скоростям упругих волн и(или)  
электропроводности)*



*(Bayuk, Chesnokov, Physics and  
Chemistry of the Earth,  
1998): (расчет упругих свойств,  
электропроводности,  
проницаемости на основе единой  
модели породы)*

*(Chesnokov, Bayuk, Metwally, SEG,  
2010)*

*Прогноз упругих и тепловых  
свойств по данным о  
проницаемости*

Гидравлическая  
проницаемость  
Теплопроводность  
ТКЛР

# Определение формы пустот по данным о теплопроводности

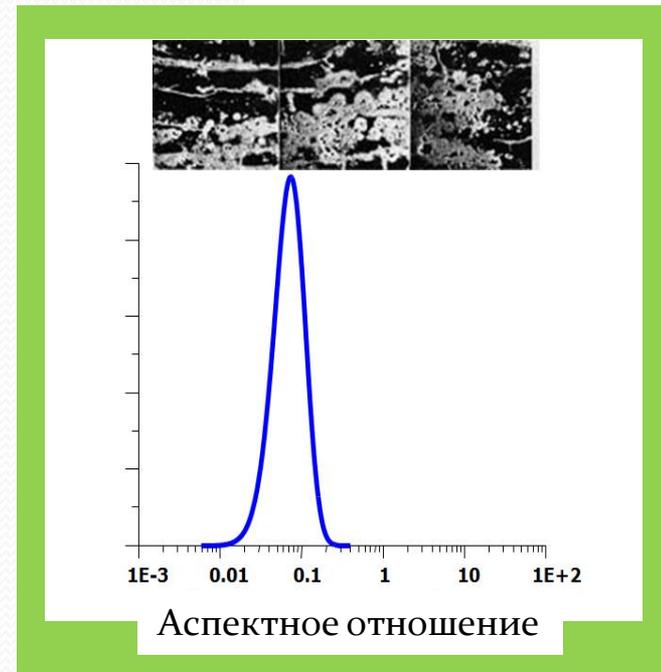
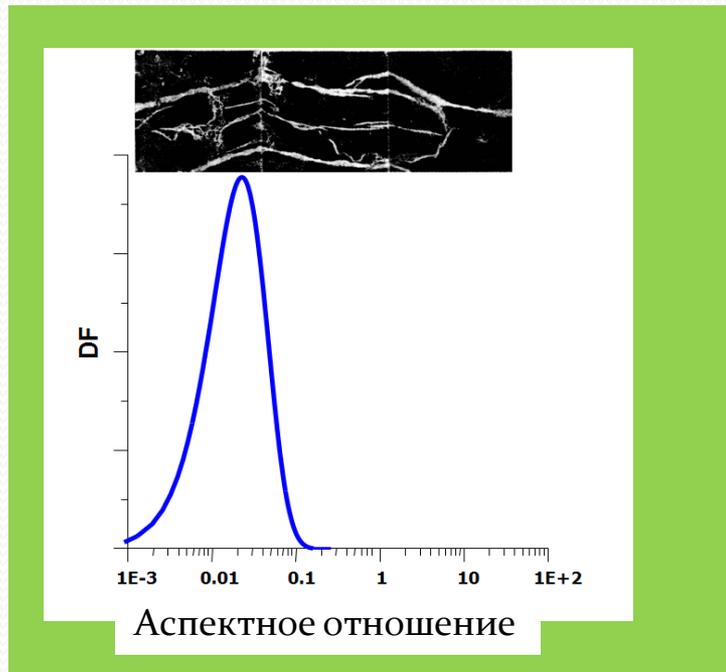
## Экспериментальные данные:

- (1) теплопроводность, измеренная при 100-% насыщении образца не менее, чем двумя флюидами с контрастными свойствами,
- (2) пористость,
- (3) минеральный состав

## Бэ́та-распределение

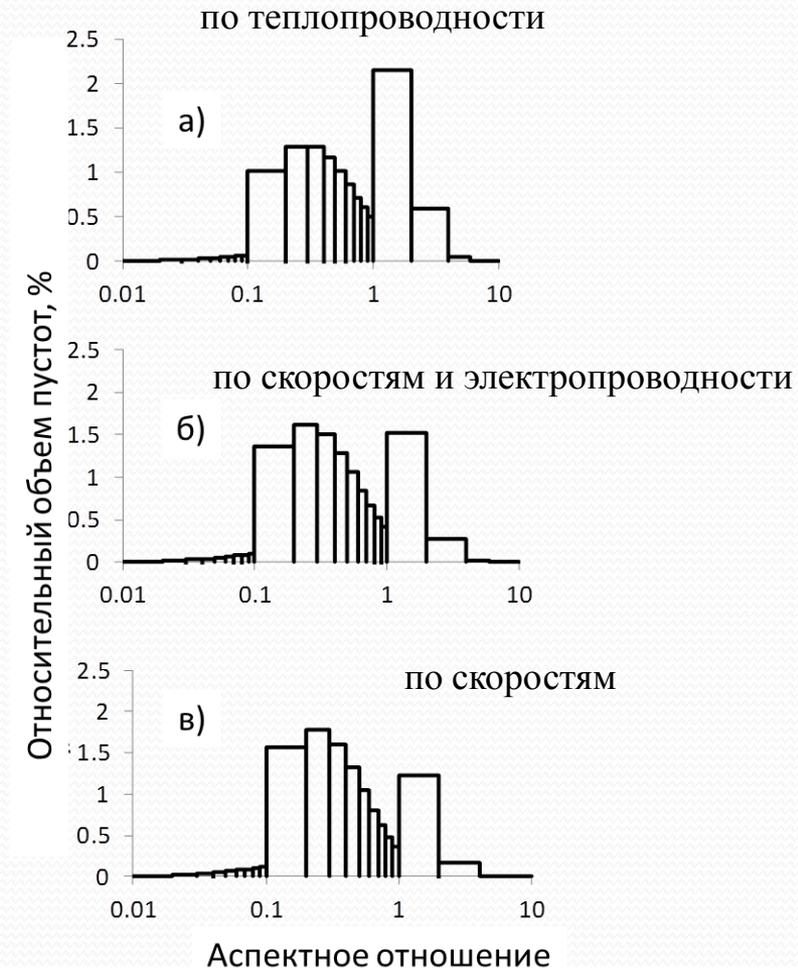
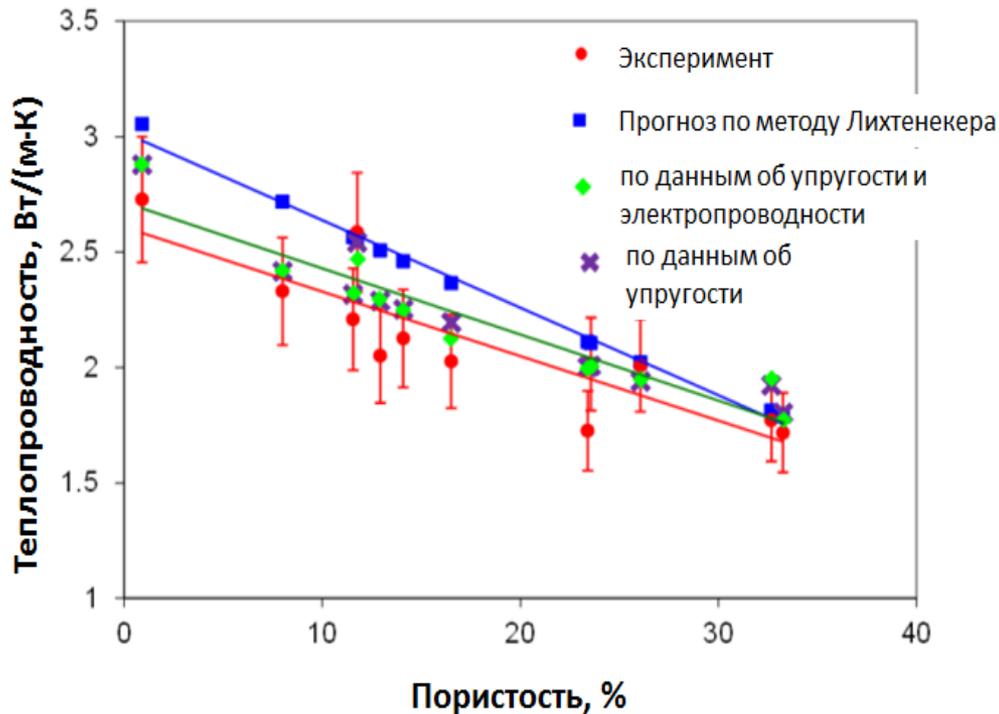
$$P(F) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} F^{\alpha-1}(1-F)^{\beta-1}$$

*Bayuk, Popov, Parshin, SCA, 2011*



# Прогноз физических свойств одного типа через свойства другого типа

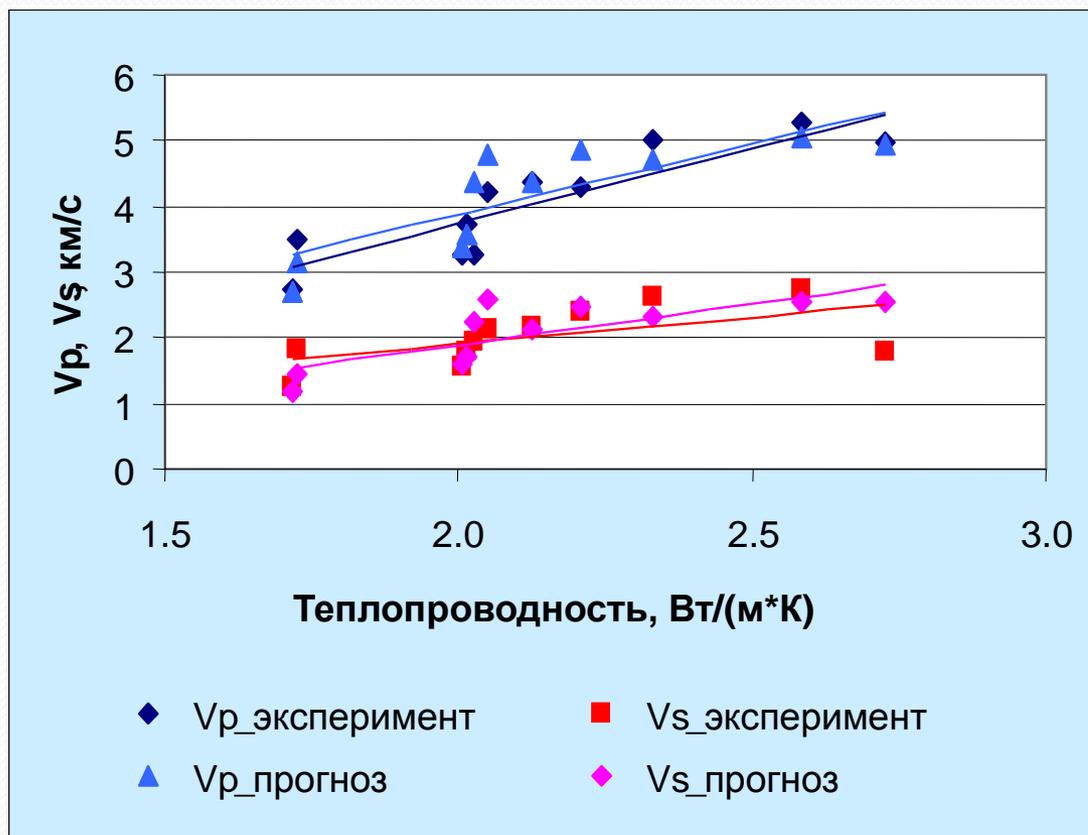
## Прогноз теплопроводности по измерениям скоростей упругих волн и(или) электропроводности



# Прогноз свойств одного типа через свойства другого типа

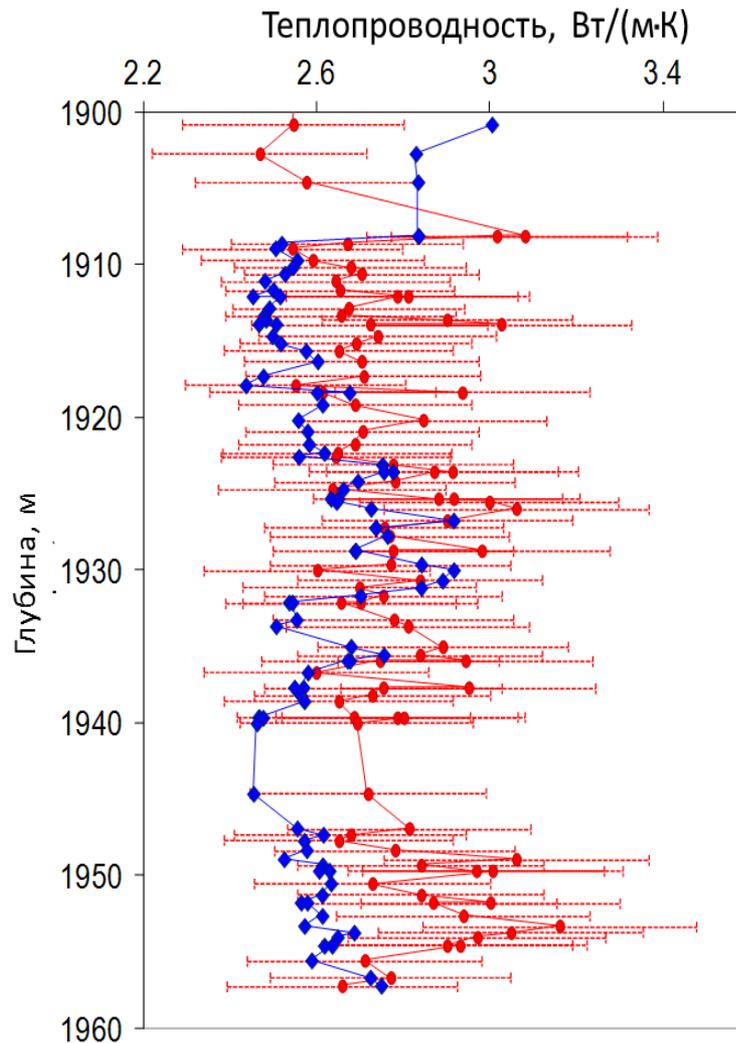
## Прогноз скоростей упругих волн по измерениям теплопроводности

Сравнение теоретического прогноза скоростей с экспериментальными данными



# Прогноз распределения теплопроводности вдоль скважины по данным акустического каротажа

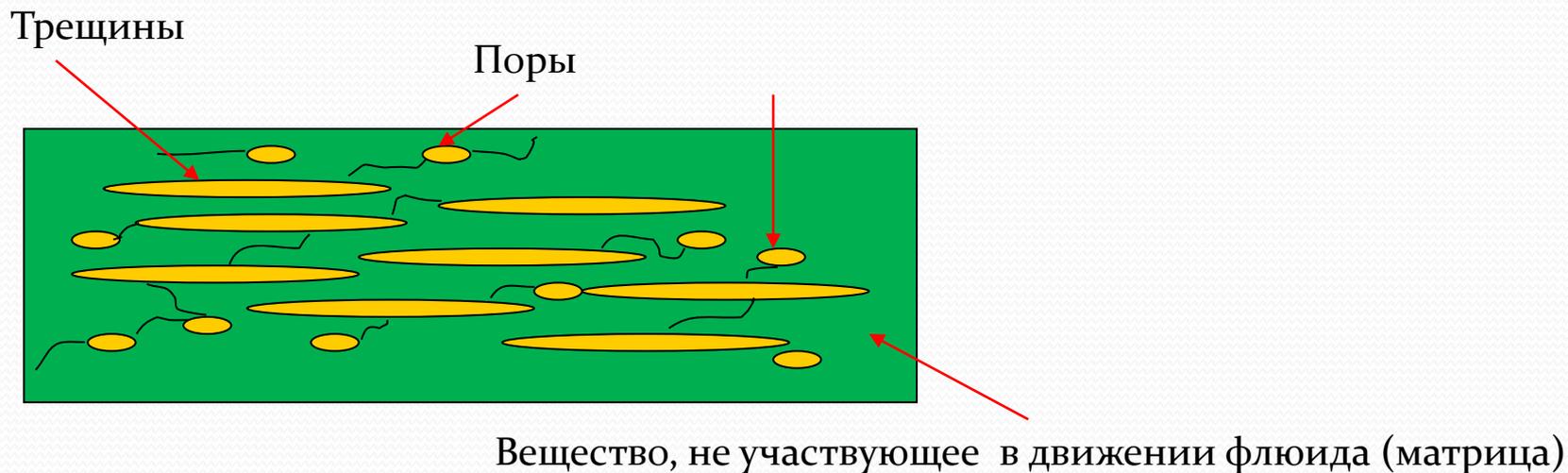
## Карбонатный коллектор





Эффективная  
гидравлическая  
проницаемость

# Модель сланца для определения эффективной проницаемости



## Параметры модели:

- (1) Проницаемость зон, относящихся к матрице (matrix patches) - ненулевая
- (2) Проницаемость флюидопроводящих зон ("fluid" patches)
- (3) Пористость (трещинная и поровая)
- (4) Форма частиц зон матрицы и зон, относящихся к трещинам и порам
- (5) Параметр связности пустот  $f$

# Моделирование эффективной проницаемости сланцев

## Предположения

- (1) Проницаемость матричных зон ненулевая, т.к. контакты зерен негерметичны
- (2) Проницаемость флюидных зон не оценивается по их форме и размеру, поскольку внутренняя поверхность может быть гидрофильна или гидрофобна, а инвертируется из данных эксперимента по измерению проницаемости



Проницаемость флюидных зон включает в себя эффект размера частиц и свойства внутренней поверхности породы и должна быть различна для различных пород

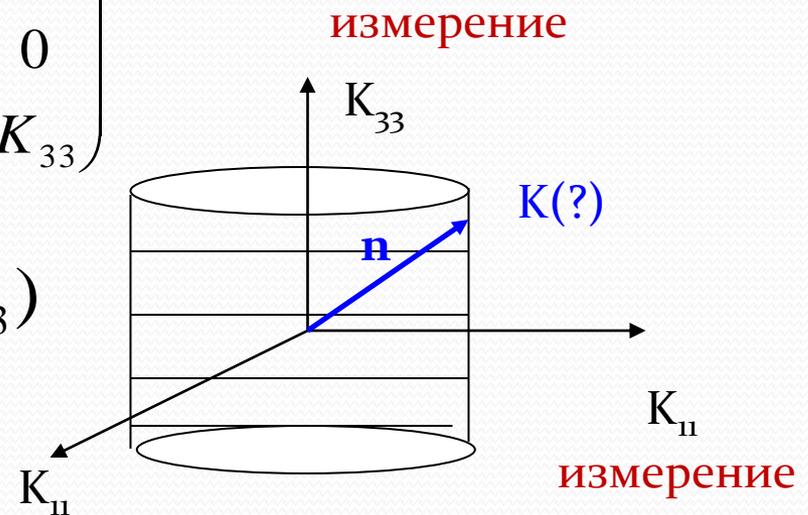
# Определение проницаемости в произвольном направлении по экспериментальным данным

Тензор проницаемости в главной системе координат  
(общий случай)

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$$

$n_i$  - направляющие косинусы



Проницаемость в направлении вектора  $\mathbf{n}$  (общий случай)

$$K = K_{ij}n_i n_j = K_{11}n_1^2 + K_{22}n_2^2 + K_{33}n_3^2$$

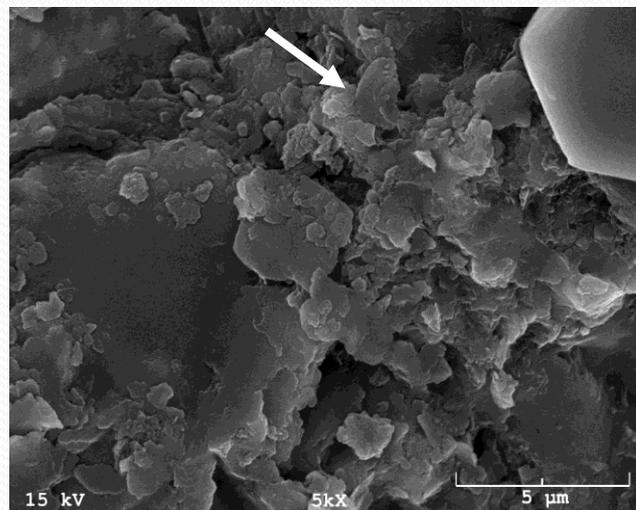
Среда VTI (shale):

$$K_{11} = K_{22}$$

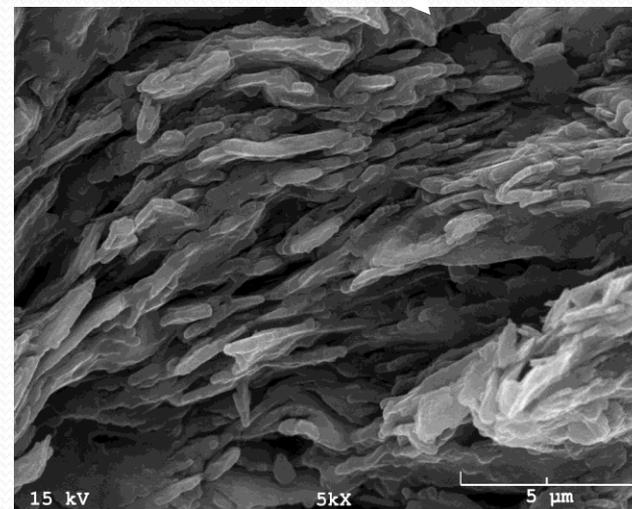
$$K = K_{11}(n_1^2 + n_2^2) + K_{33}n_3^2$$

# Результаты ТЭС-инверсии

Плоскость напластования (вид сверху)



Плоскость напластования (вид сбоку)



Проницаемость матричных зон:  $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  нД

Проницаемость флюидных зон :  $10^3$  –  $10^4$  нД

AR трещин: 0.01 – 0.02

AR пор : 0.5 – 0.9

AR зерен : 0.17 – 0.23

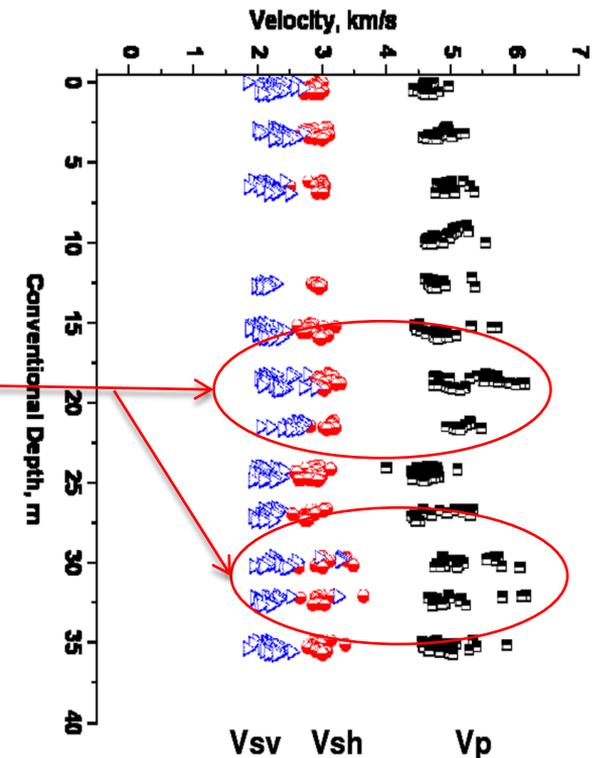
Параметр связности пустот: 0.75 - 0.86

# Прогноз скоростей упругих волн по данным о проницаемости

Сравнение со скоростями упругих волн, полученными по данным ГИС для глубин, близких к глубинам извлечения керна

	Обозначение скорости	Теоретические значения скорости (Sw=1), км/с	Скорости по данным ГИС км/с	Относительная разница для данных ГИС, (%)
Образец 1	Vp_z	4.29	4.16	3
	Vs_z	2.41		1
	Vp_x	5.87		
	Vsh_x	3.59		
Образец 2	Vp_z	4.47	2.38 (перпендикулярно плоскости напластования)	7
	Vs_z	2.47		3
	Vp_x	5.73		
	Vsh_x	3.47		
Образец 3	Vp_z	4.10	2.38 (перпендикулярно плоскости напластования)	1
	Vs_z	2.00		16
	Vp_x	5.55		
	Vsh_x	3.36		

В плоскости напластования



Разница в скоростях в масштабах лабораторных исследований образцов керна и ГИС может достигать 20% (Tiwary et al., 2009)

**Построение скоростной модели  
углеводородосодержащих сланцев  
с учетом их анизотропии по  
данным ГИС**

**(Глава 3)**

# Упругие свойства агрегатов «глина – связанная вода»

(Bayuk, Chesnokov, Ammerman, Geophysics, 2007)

## Исходные данные:

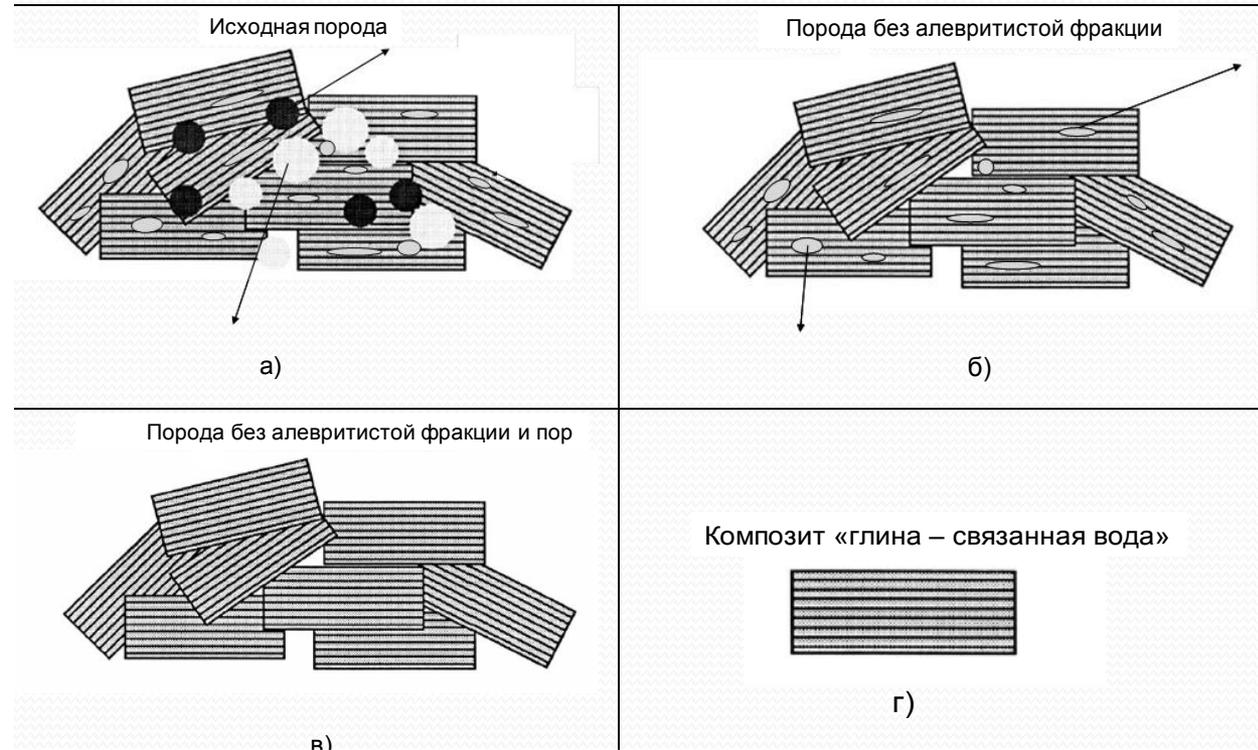
Тензор упругости сланца  
Гринхорн  
(Jones, Wang, 1991)

## Состав:

кварц – 53%  
глинистые минералы –  
27%  
полевой шпат – 11%  
пирит – 9%

## Глинистые минералы:

иллит (36%)  
сметтит (34%)  
каолинит (17%)  
хлорит (13%)



Этапы определения тензора упругости композита «глина – связанная вода»: удаление минералов алевритовой фракции (а), удаление пор (б), «поликристалл», составленный анизотропными частицами композита «глина – связанная вода» (в), композит «глина – связанная вода» (г).

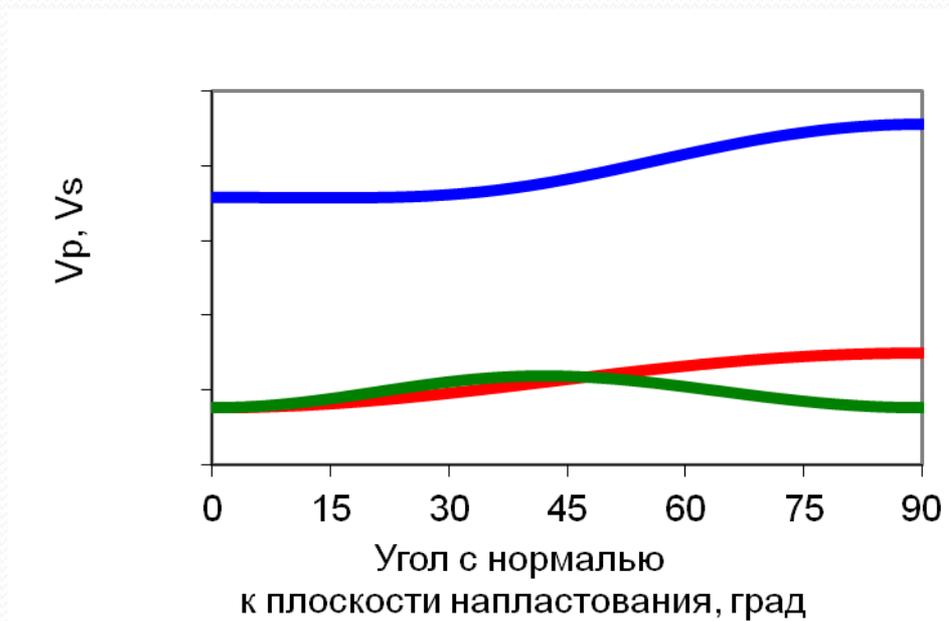
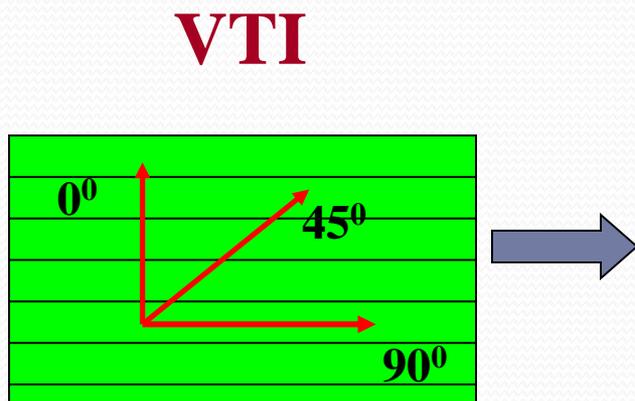
## Тензор упругости композита «глина – связанная вода»

$$C_{11} = 23.7, C_{33} = 8.5, C_{44} = 0.8, C_{66} = 5.7, C_{13} = 3.1, \text{плотность } 2.17 \text{ г/см}^3$$

**Определение тензора  
упругости глинистого  
сланца по ограниченному  
числу измерений**

# Классический подход к определению тензора упругости глинистого сланца

Тензор упругости определяется по измерениям скоростей в направлениях, составляющих  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ , and  $90^{\circ}$  относительно плоскости напластования

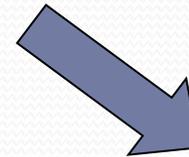


5 независимых констант:  $C_{11}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{66}$ ,  $C_{13}$  и плотность определяют  $V_p$ ,  $V_{s1}$ , and  $V_{s2}$  в любом направлении

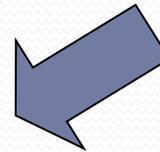
# Блок-схема решения обратной задачи

## Исходные данные:

Лабораторные измерения скоростей, пористости, плотности и минерального состава



Решение обратной задачи по определению параметров модели



## Параметры модели:

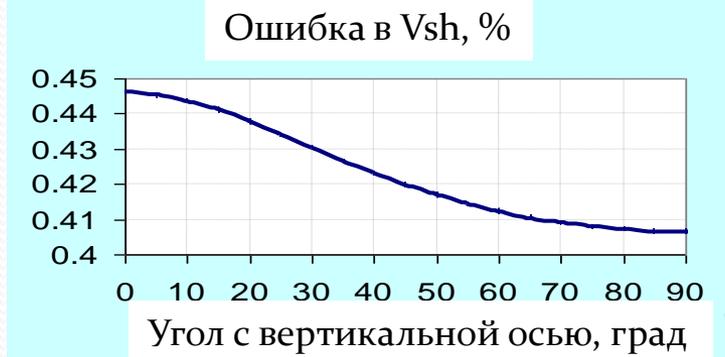
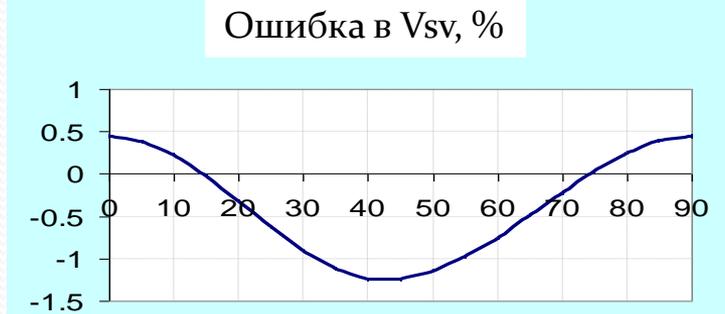
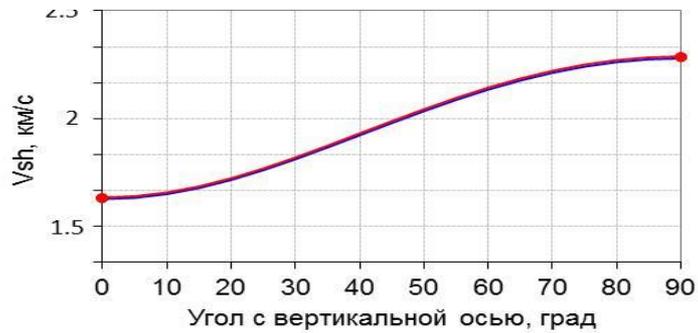
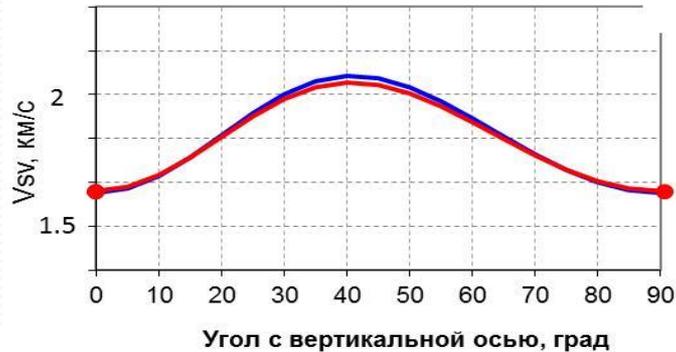
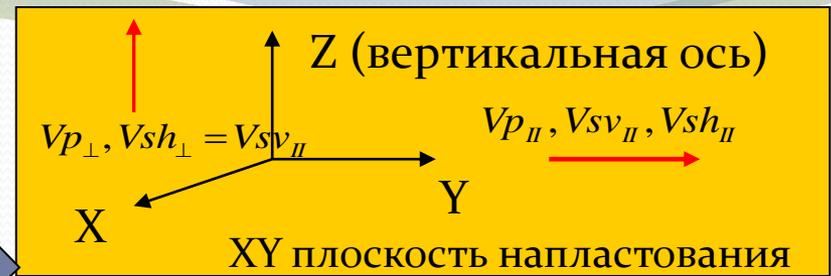
- (1) AR пустот
- (2) параметр связности пустот  $f$
- (3) угол конуса вращения осей глинистых частиц (СКО)
- (4) АО дополнительной системы трещин
- (5) объемная концентрация дополнительной системы трещин

На каждой итерации обратной задачи решается прямая задача с текущими значениями искомых параметров

# Верификация методики

Greenhorn shale (Jones & Wang, 1981)

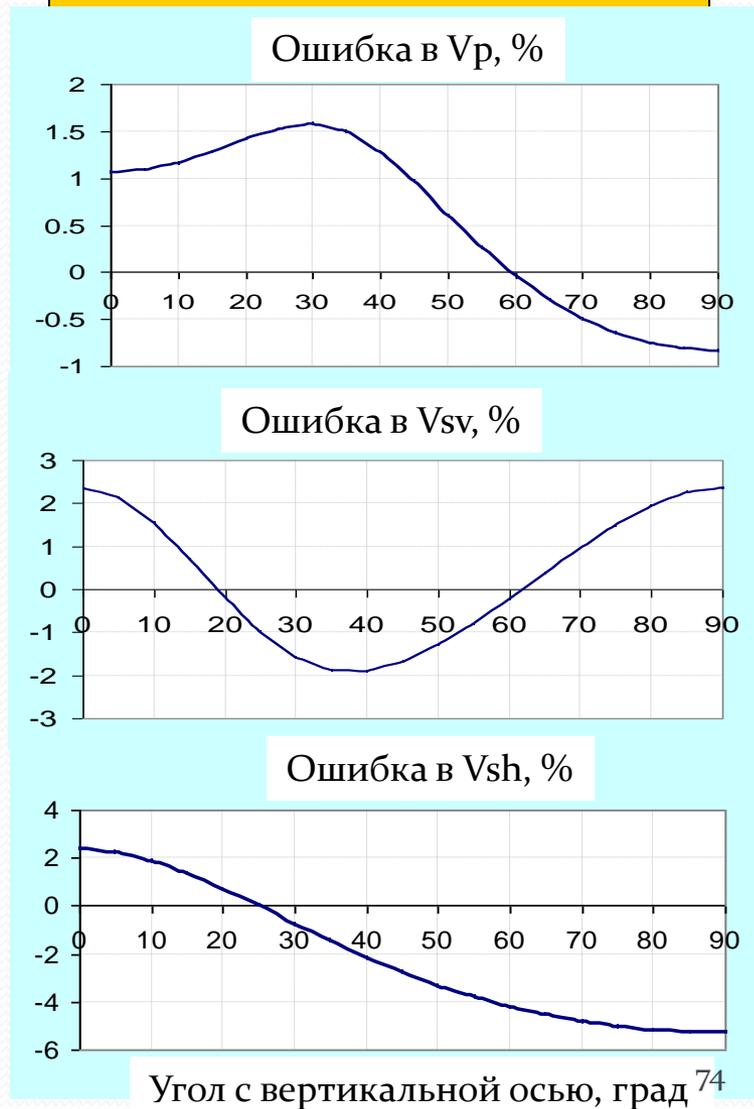
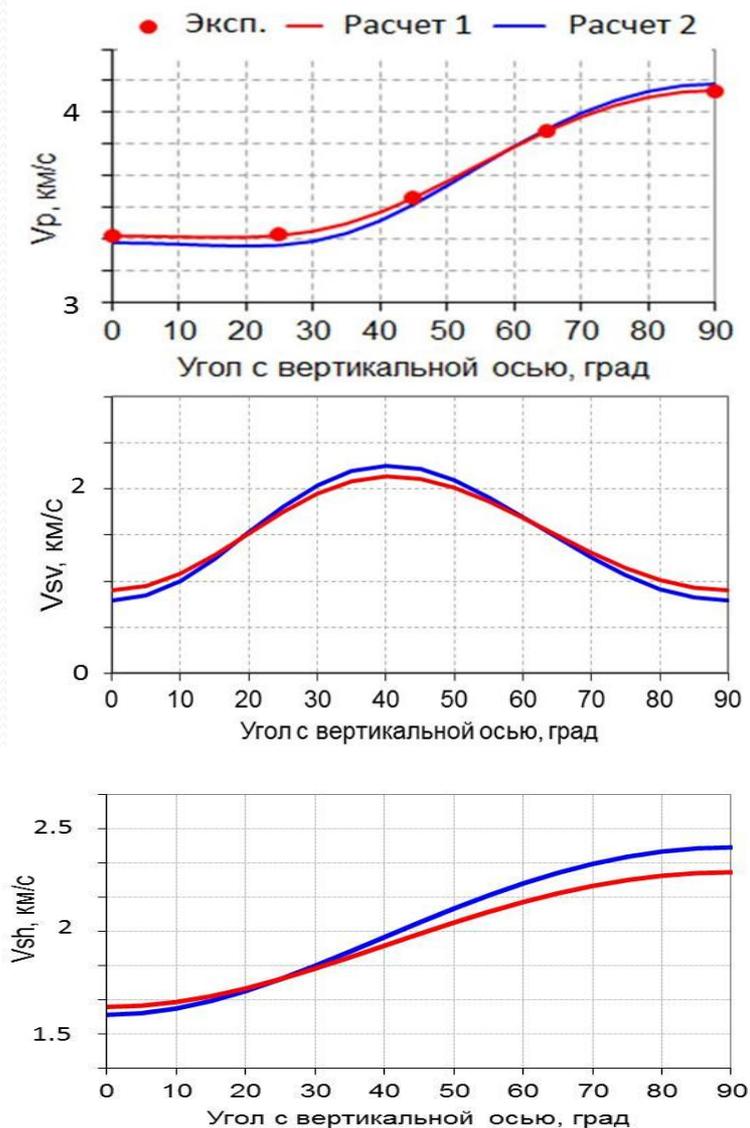
$C_{ij}$  и плотность известны



# Верификация методики

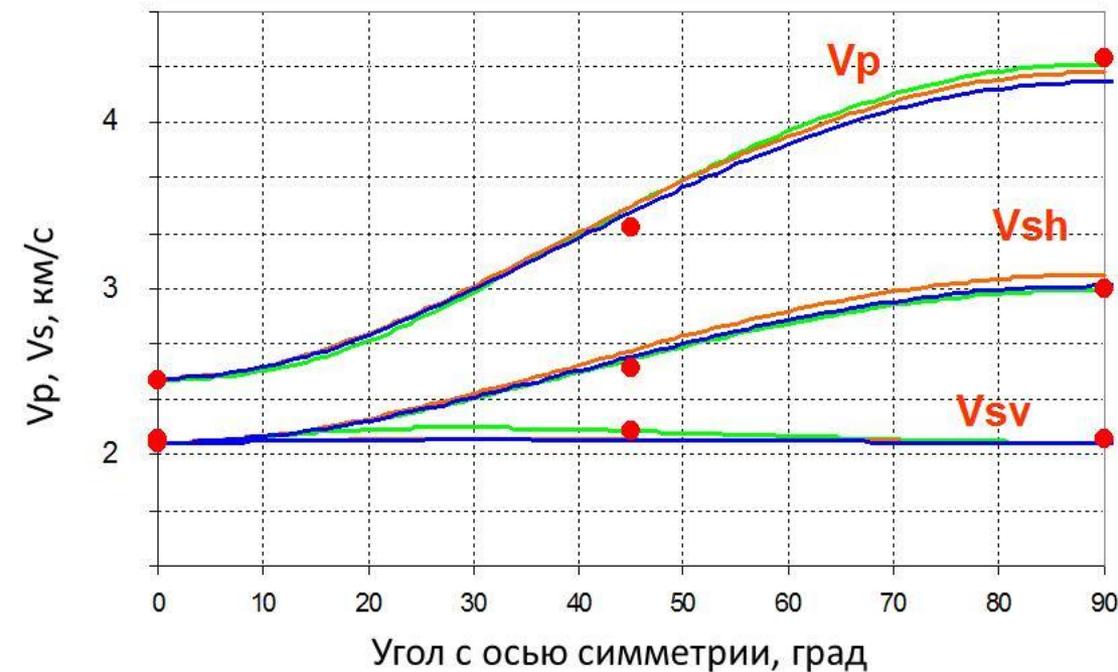
Greenhorn shale (Jones & Wang, 1981)

$C_{ij}$  и плотность известны



# Верификация методики

Глинистый сланец формации Барнетт



**Минеральный состав**

Кварц – 40%

Кальцит – 30%

Иллит – 30% (ориентирован)

**Красные значки** – данные эксперимента

**Зеленые кривые** – скорости, полученные по стандартной методике

**Синие линии** – по методике, основанной на теории эффективных сред по тем же измерениям скоростей

**Оранжевые кривые** – скорости, определенные по методике, основанной на теории эффективных сред, но только по скоростям вдоль и перпендикулярно напластованию

## Сланец Вудфорт

### Минеральный состав

Кварц – 43.1%

Альбит – 4.7%

Пирит – 1.9%

Кальцит – 10.3%

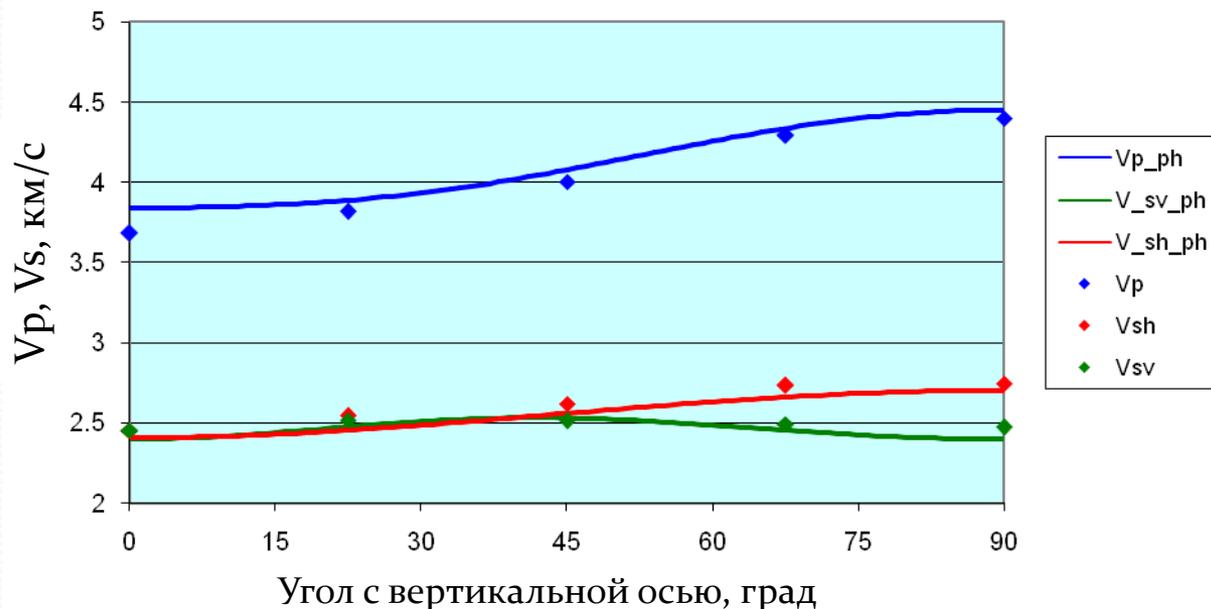
Мусковит/иллит – 2.2%

Глина (иллит/смектит) – 37.8%

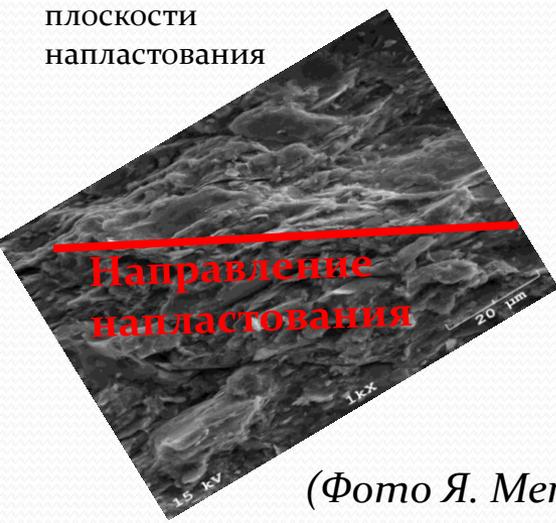
*(Баюк, Дьяур, Технологии Сейсморазведки, 2012)*

# Результаты Инверсии. Сланец Вудфорт

Все измеренные скорости использованы для ТЭС-инверсии

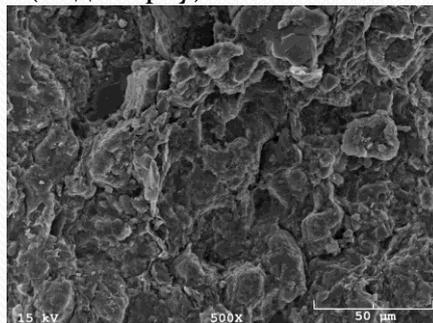


Вид сбоку плоскости напластования



## Параметры микроструктуры (ТЭС-инверсия)

Плоскость напластования (вид сверху)



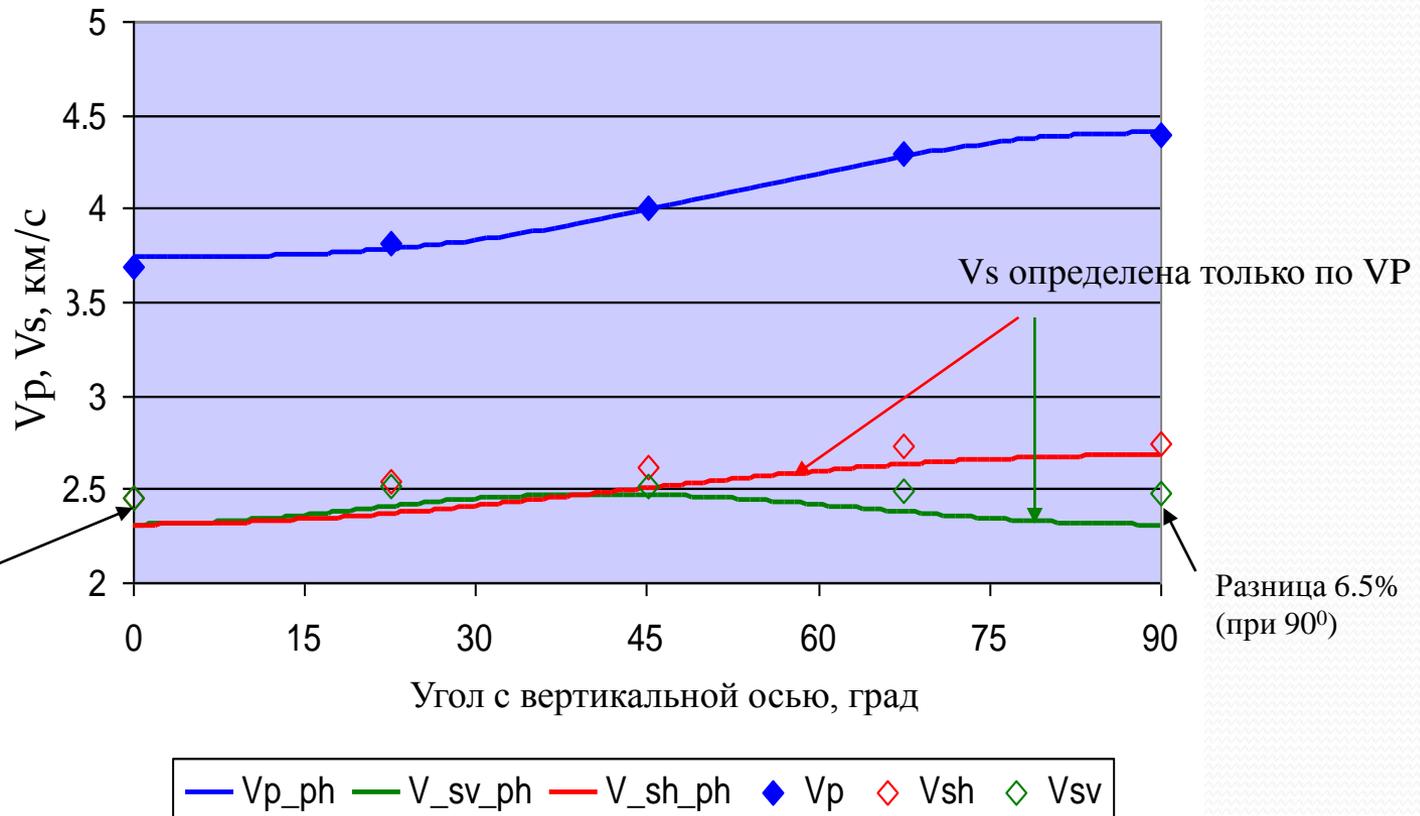
Органическое вещество=3.8%  
 Параметр связности пустот = 0.3  
 АО пор = 0.01  
 Объемная концентрация пор = 4.9%  
 «Гауссова Сигма»= 11<sup>0</sup>  
 Горизонтальные трещины= 0.01%  
 АО горизонтальных трещин=0.009

(Фото Я. Метвелли)

# ТЭС-инверсия только по $V_p$

Органическое  
вещество=2%  
Параметр связности пустот  
= 0.6  
AR пор = 0.03  
Объемная концентрация  
пор = 4.2%  
«Гауссова Сигма»= 11.6°  
Горизонтальные трещины=  
0.01%  
AR горизонтальных  
трещин=0.01

## Сланец Вудфорт

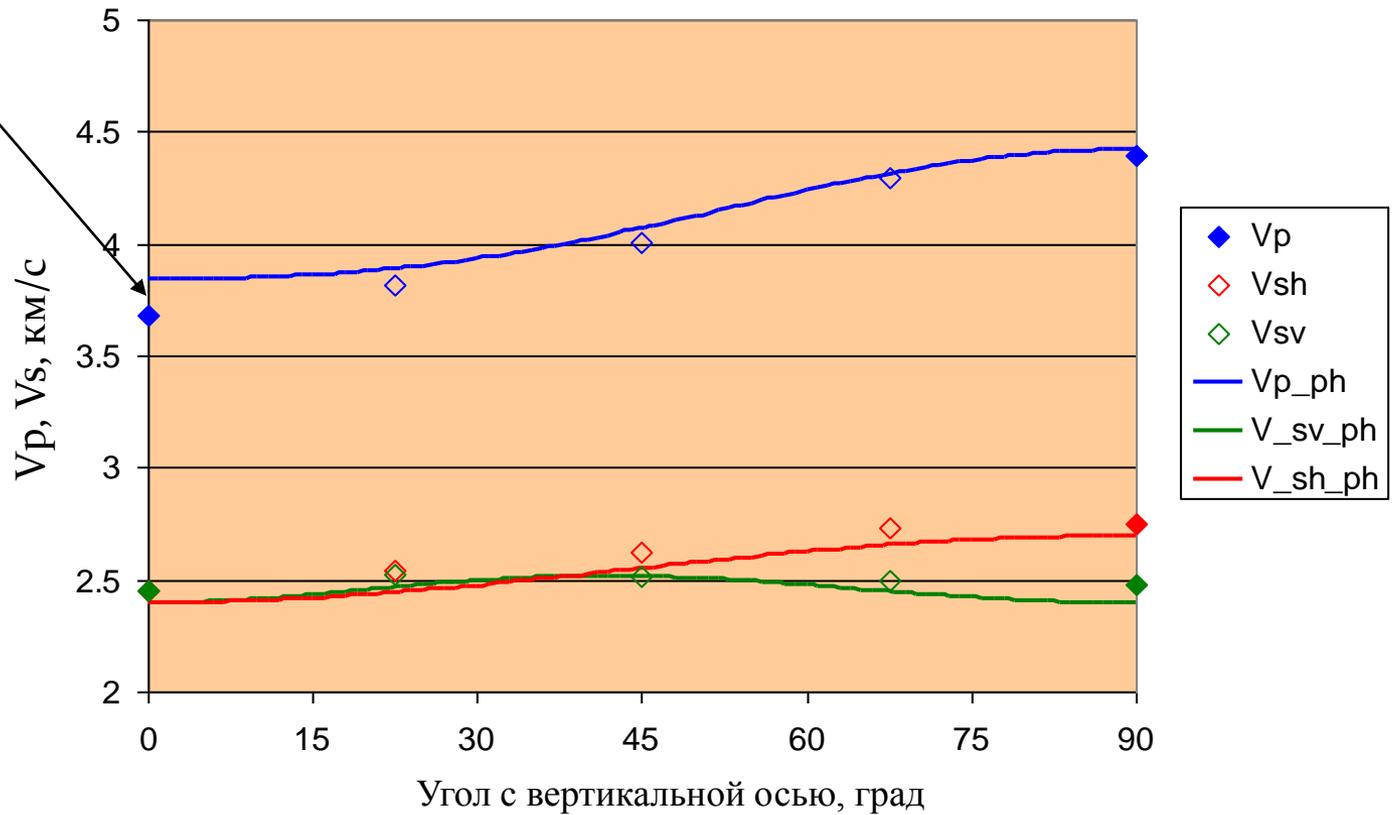


Для ТЭС-инверсии использованы только скорости, показанные знаками, заполненными цветом

# ТЭС-инверсия только по $V_p$ и $V_s$ , измеренным вдоль и поперек напластования

## Сланец Вудфорт

Разница 4%



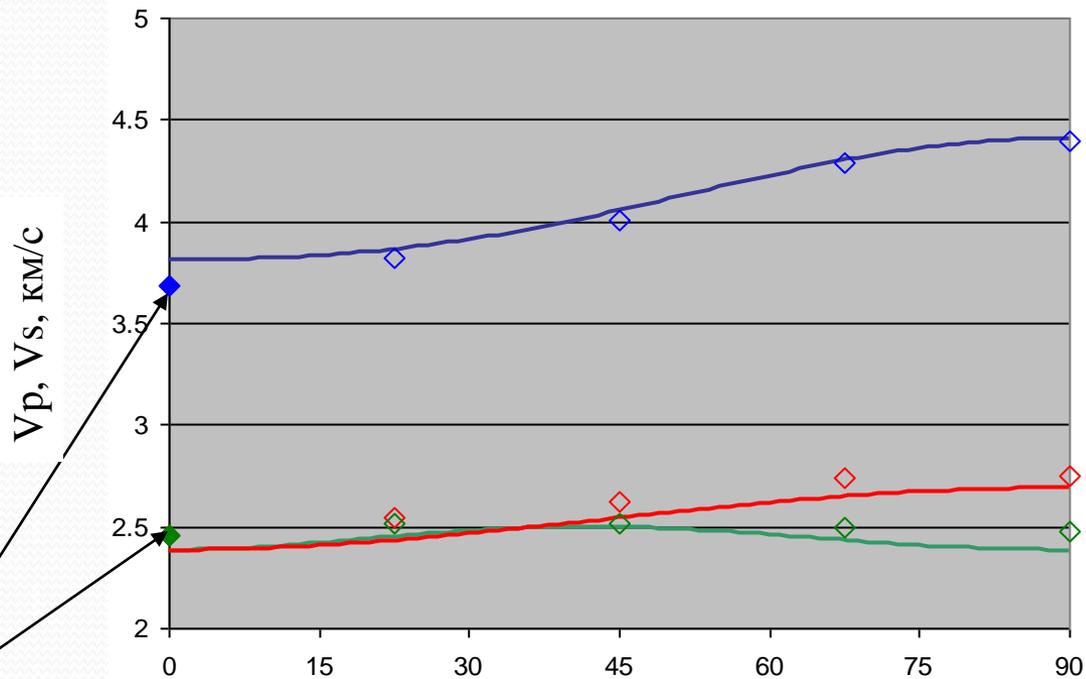
Органическое вещество=3%  
Параметр связности пустот = 0.3  
AR пор = 0.01  
Объемная концентрация пор = 6%  
«Гауссова Сигма»=  $12^0$   
Горизонтальные трещины= 0.01%  
AR горизонтальных трещин=0.01

Для ТЭС-инверсии использованы только скорости, показанные знаками, заполненными цветом

# ТЭС-инверсия только по $V_p$ и $V_s$ , измеренным перпендикулярно плоскости напластования (аналог данных акустического каротажа)

## Сланец Вудфорт

Максимальная разница в скоростях 3%



Органическое вещество=2%  
Параметр связности пустот = 0.3  
AR пор = 0.01  
Объемная концентрация пор = 6%  
«Гауссова Сигма»= 13°  
Горизонтальные трещины= 0.01%  
AR горизонтальных трещин=0.01

Только эти значения  $V_p$  и  $V_s$  использованы для ТЭС-инверсии

Угол с вертикальной осью, град

# Сравнение компонент тензора упругости, полученных различными методами

	<b>C11</b>	<b>C33</b>	<b>C44</b>	<b>C66</b>	<b>C13</b>	$\varepsilon$	$\gamma$	$\delta$
<b>Классический подход (по уравнению Грина-Кристоффеля)</b>	48.64	34.61	15.38	18.97	8.27	0.20	0.12	0.15
<b>ТЭС-инверсия по полному набору <math>V_p</math> и <math>V_s</math>, необходимому для классического подхода</b>	52.73	36.17	15.37	19.64	11.15	0.17	0.14	0.07
<b>ТЭС-инверсия только по <math>V_p</math></b>	51.57	37.08	15.40	19.09	10.89	0.20	0.17	0.06
<b>ТЭС-инверсия по <math>V_p</math> and <math>V_s</math> в направлениях <math>0^\circ</math> и <math>90^\circ</math> относительно напластования</b>	52.25	39.00	15.35	19.47	11.20	0.17	0.13	0.08
<b>ТЭС-инверсия по <math>V_p</math> и <math>V_s</math> только перпендикулярно напластованию</b>	51.70	38.61	15.12	19.24	11.19	0.17	0.14	0.07 $\delta_1$

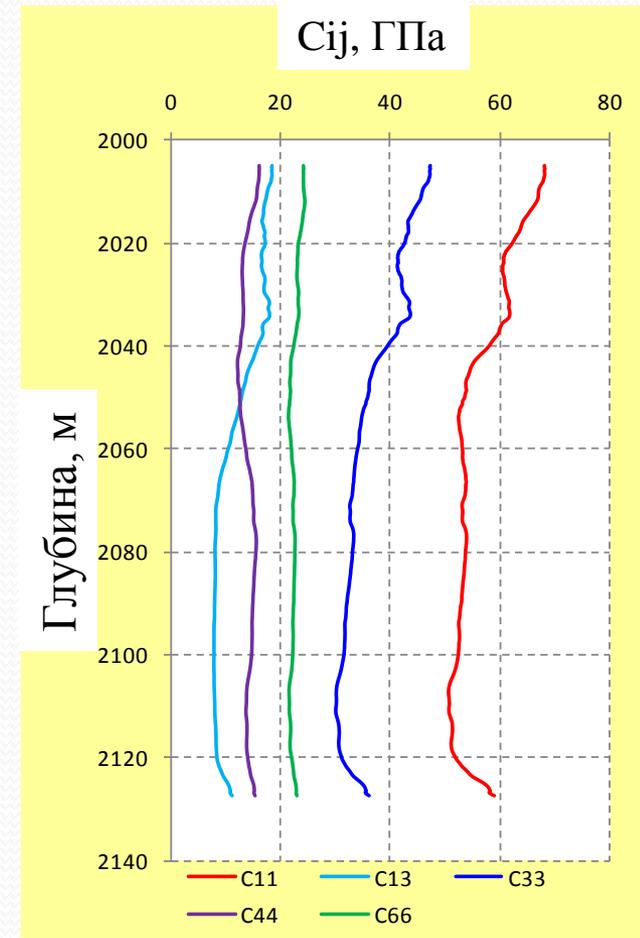
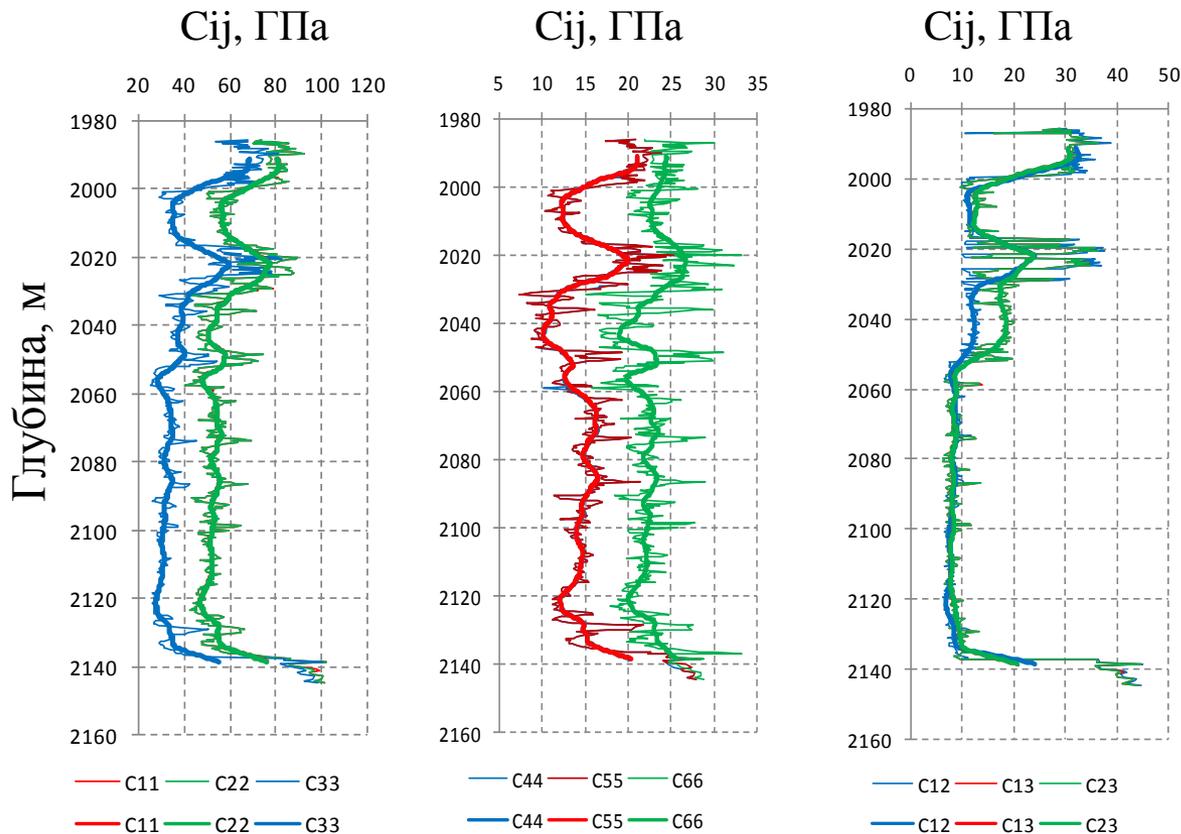
**Построение начальной скоростной  
модели глинистых сланцев  
(анизотропной и частотно-зависимой)  
для мониторинга гидроразрыва**

*Bayuk, Chesnokov, Ammerman, Geophys. J. Int., 2008*  
*Bayuk, Chesnokov, Ammerman, Geophysical Prospecting, 2010*

# Частотно-зависимый тензор упругости

Частота апскейлинга 500 Гц  
межскважинная томография

Частота апскейлинга 100 Гц  
сейсмика



(Bayuk, Chesnokov, Ammerman, Geophysical Prospecting, 2010)

# Сравнение тензора упругости, полученного в результате ТЭС-инверсии, с независимыми данными полевого эксперимента

(для продуктивного слоя 2052 – 2137 м)

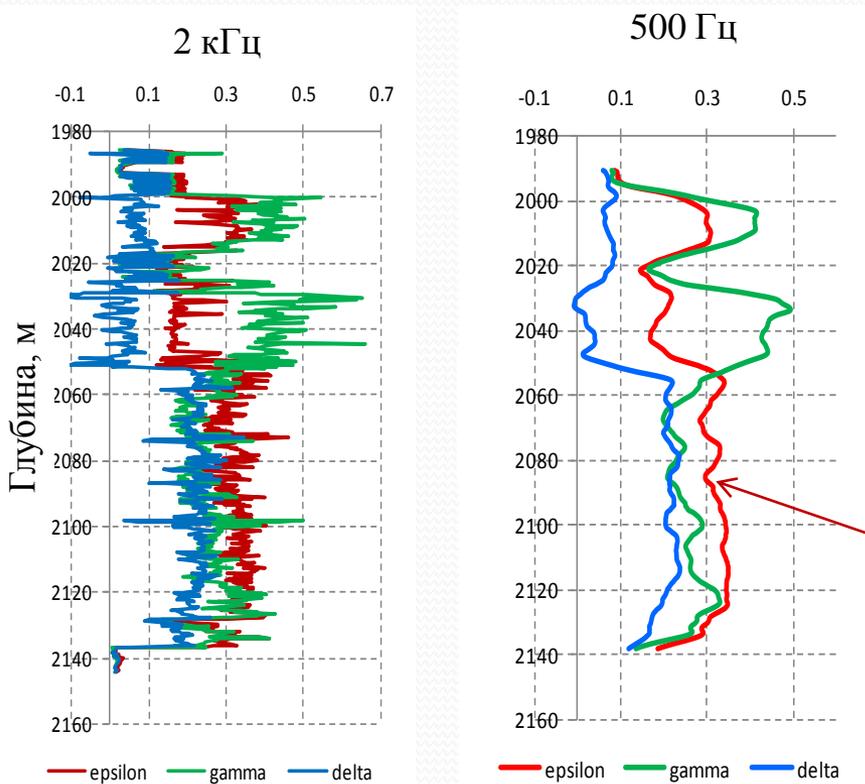
Компоненты тензора упругости	Результаты данного исследования, (компоненты тензора упругости в ГПа)	Результаты работы Walsh et al. (2007), (компоненты тензора упругости в ГПа)
$C_{11}$	53	55
$C_{13}$	8.5	10
$C_{33}$	32	36
$C_{44}$	15	15
$C_{66}$	22	20.5

(Bayuk, Chesnokov, Ammerman, Geophysical Prospecting, 2010)

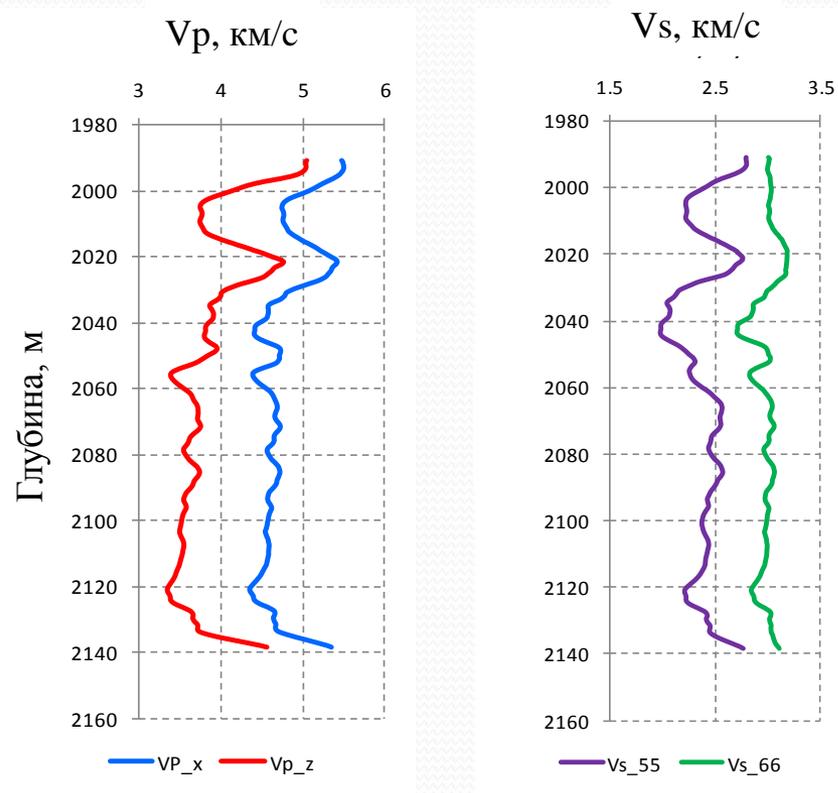
# «Апскейлинг» упругих свойств для частоты межскважинной томографии

(Bayuk, Chesnokov, Ammerman, *Geophysical Prospecting*, 2010)

## Параметры Томсена



Частота апскейлинга 500 Гц



Индикатор залежи газа  
2052 – 2137 м  
 $\epsilon > \gamma$   
(Chesnokov, Bayuk, Ammerman,  
*Geophysical Journal International*, 2009)

# Защищаемое положение 1

Разработанный междисциплинарный подход к определению эффективных физических свойств коллекторов углеводородов позволяет прогнозировать их физические свойства на основе единого описания внутреннего строения коллекторов с использованием параметрических моделей. Эти модели являются специфическими для коллекторов разных типов и отражают их строение в разных масштабах.

Разработанный подход дает возможность прогнозировать физические свойства одного типа по свойствам другого типа и восстанавливать полный тензор физических свойств анизотропных коллекторов по измерениям свойств в отдельных направлениях, количество которых недостаточно для применения стандартных методик.

## **Защищаемое положение 2**

Разработанный междисциплинарный подход к определению эффективных физических свойств коллекторов углеводородов позволяет по данным ГИС строить анизотропную скоростную модель углеводородосодержащих сланцев, необходимую для надежной локализации микроземлетрясений, возникающих в процессе гидроразрыва пласта.

**Локализация трещиноватых зон  
карбонатных коллекторов и  
определение их параметров по  
данным акустического  
дипольного каротажа**

**(Глава 4)**

*(Баяк, Рыжков, Технологии сейсморазведки, 2010)*

# Введение в проблему

**Наличие преимущественной ориентации трещин** – залог успешной нефте- и газодобычи

**Субвертикальные трещины** – причина анизотропии карбонатных коллекторов, приводящая к расщеплению поперечных волн

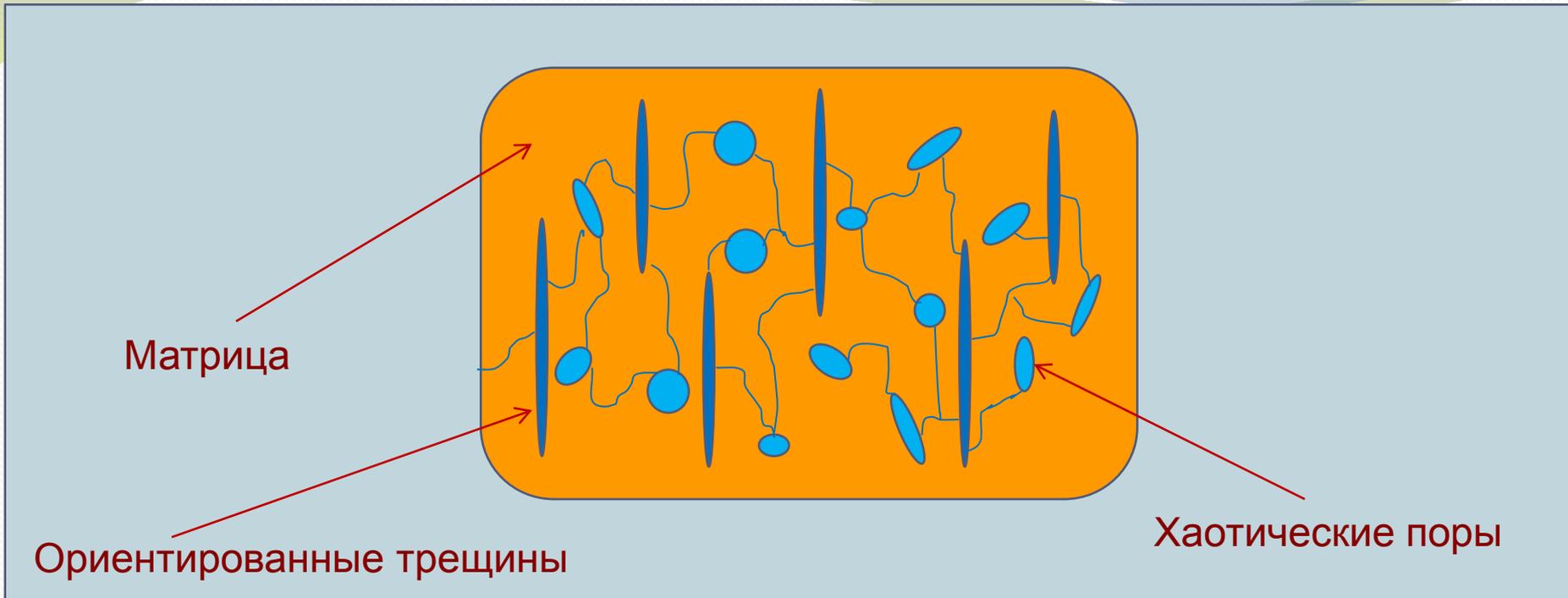
**Дипольный акустический каротаж** – средство обнаружения эффекта расщепления поперечных волн и, как следствие, выявления трещиноватых зон

**Проблема скважин, наклонных к плоскости трещин** – уменьшение кажущегося расщепления и «потеря» трещиноватой зоны

Знание параметров трещин - **объемной концентрации и формы** - позволяет определять проницаемость коллекторов

**Границы применимости метода для наклонных скважин**

# Модель карбонатного коллектора



**Матрица:** минеральные зерна, остатки органического вещества, закрытая и субкапиллярная пористость

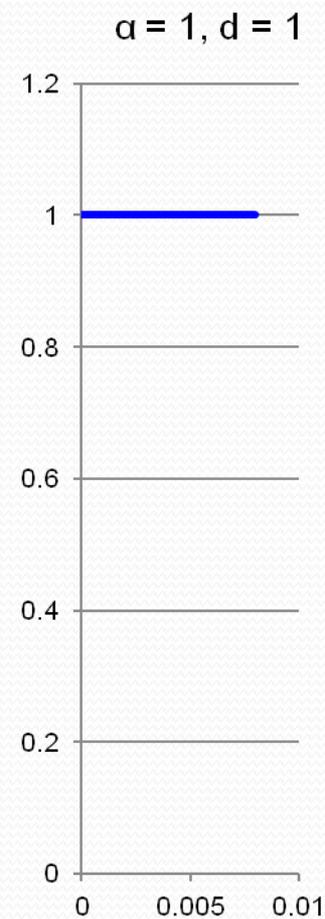
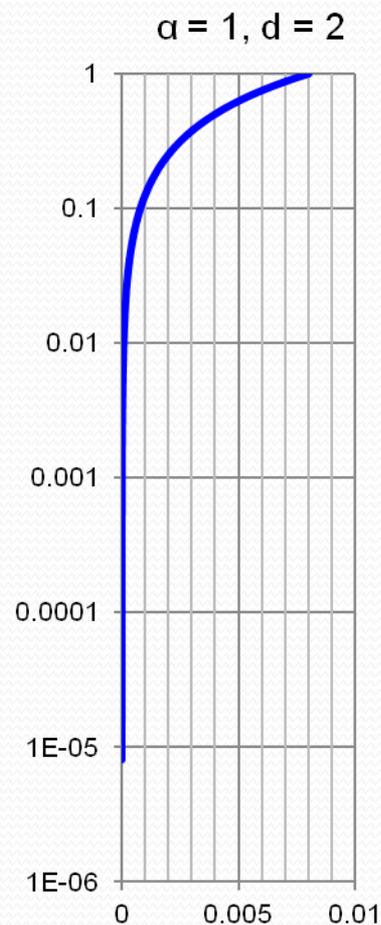
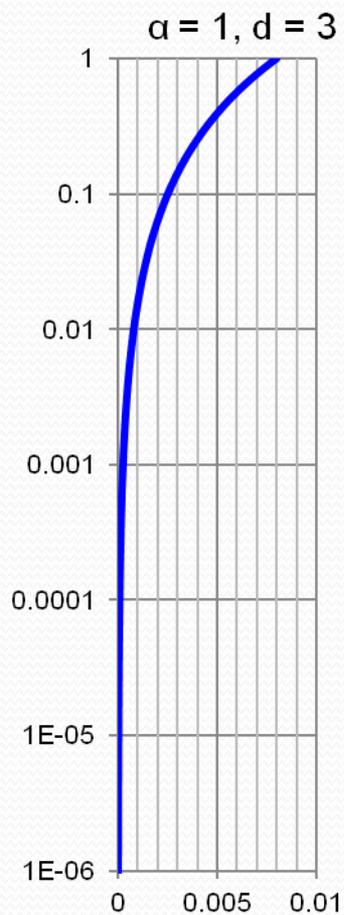
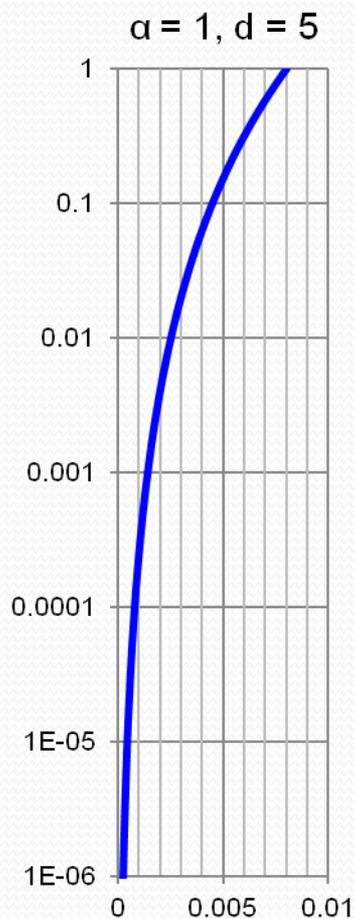
**Ориентированные трещины:** эллипсоиды с аспектным отношением, изменяющимся в интервале  $[1e-5, A_1]$

**Хаотически ориентированные поры:** эллипсоиды с аспектным отношением в интервале  $[A_2, 1]$

Распределение объема пустот по аспектным отношениям описывается Бэта-распределением

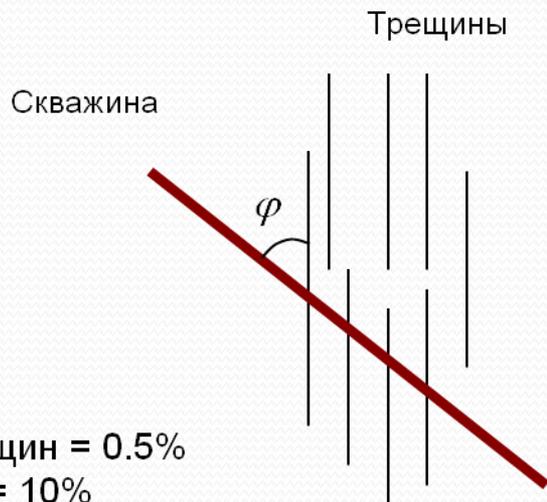
# Зависимость вида Бэ́та-распределения от параметров

$$P(F) = \frac{\Gamma(\alpha + d)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(d)} F^{\alpha-1} (1 - F)^{d-1}$$

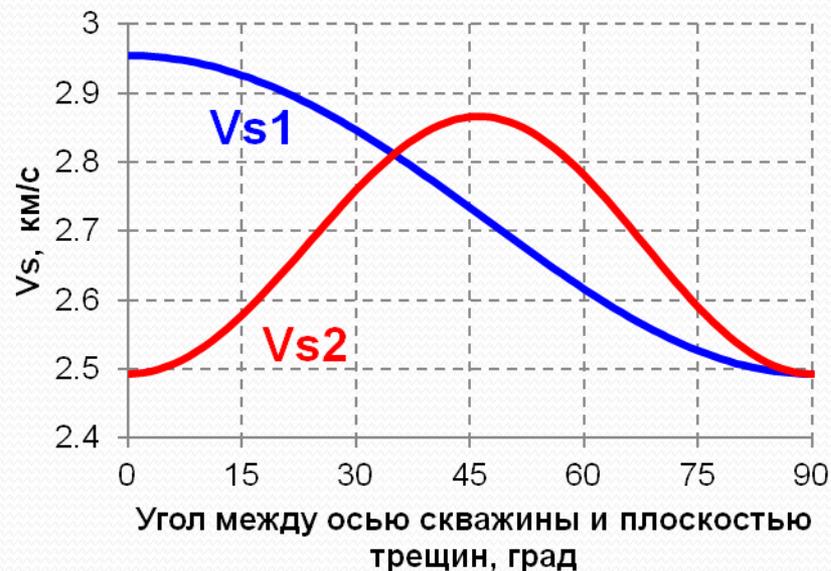
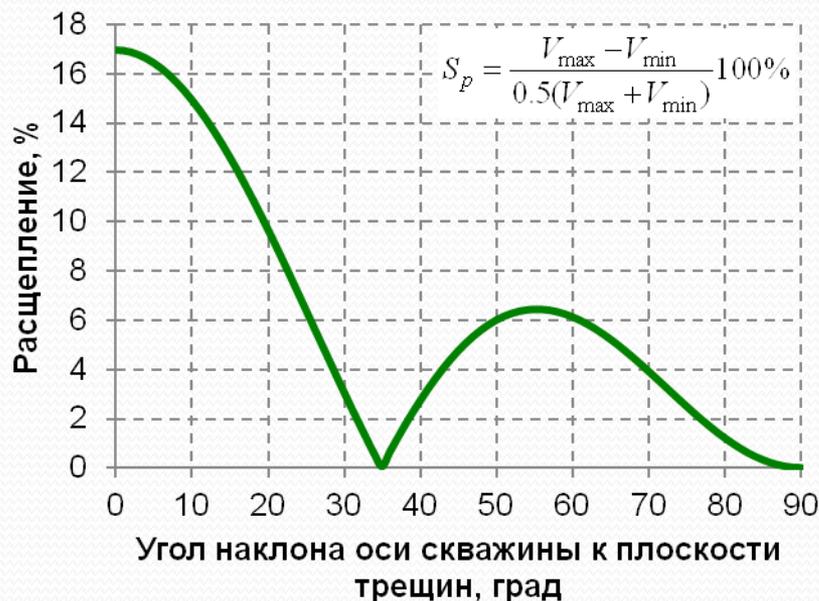


Аспектное отношение трещин

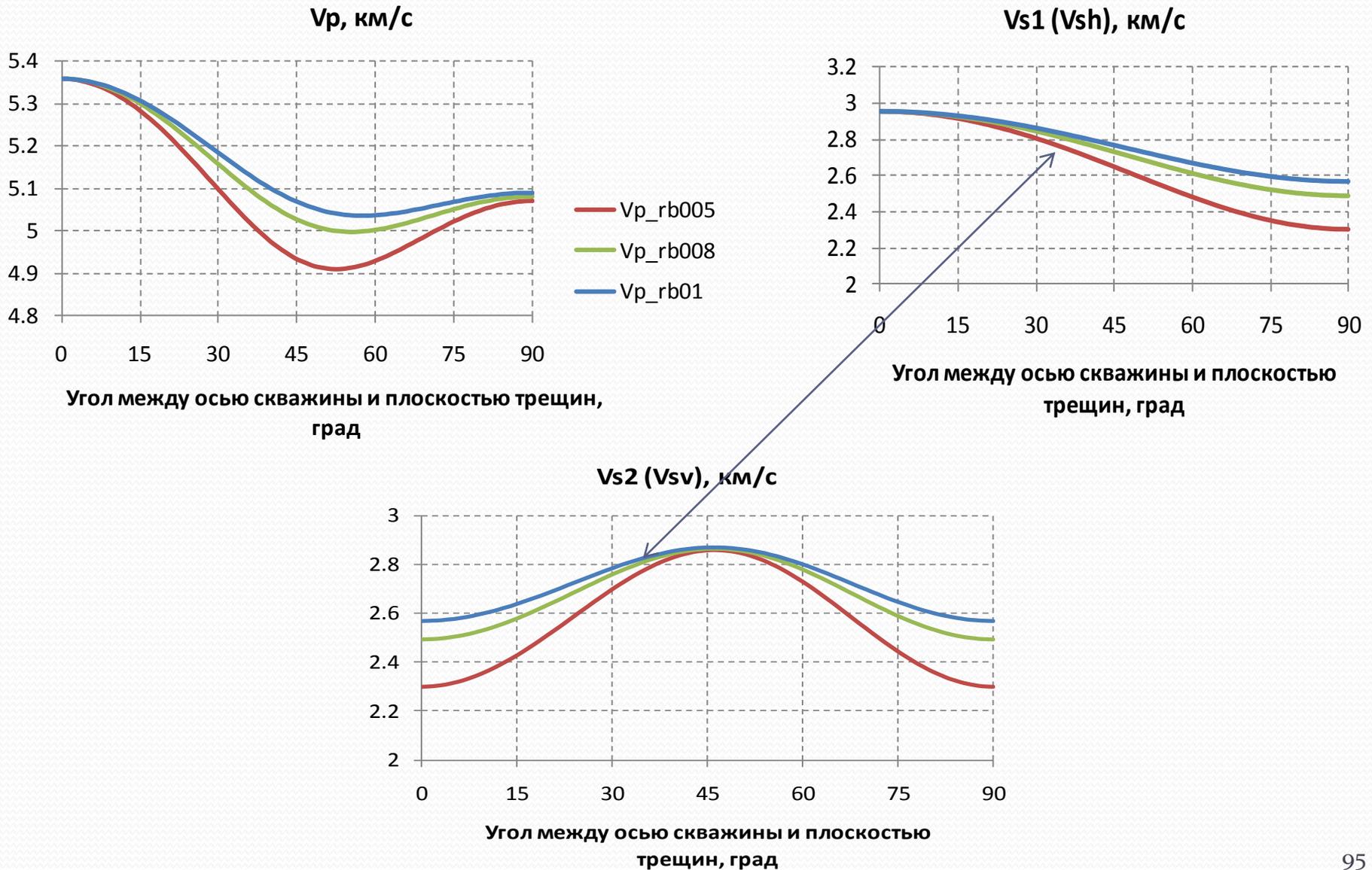
# Скорости упругих волн в карбонатном коллекторе с субвертикальными трещинами



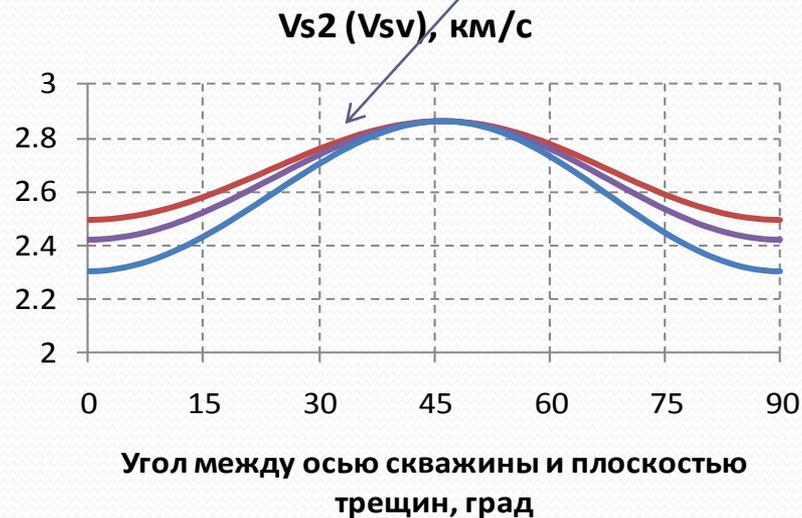
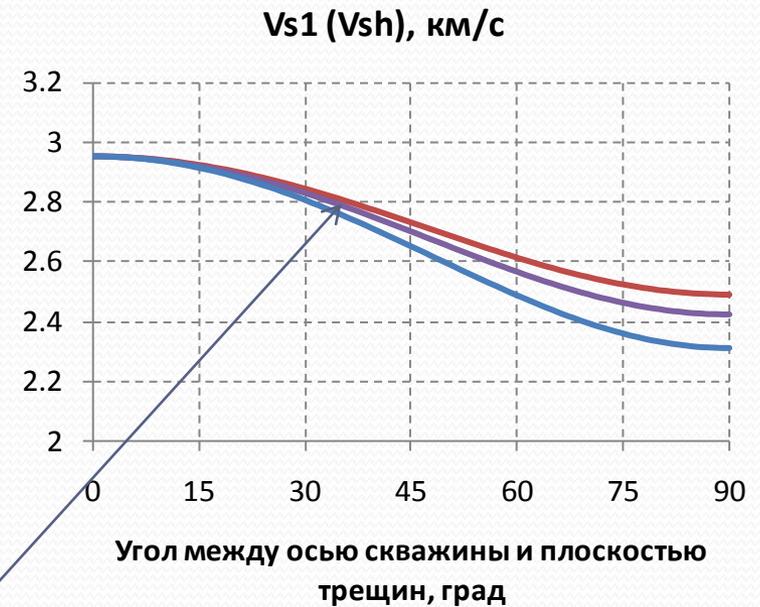
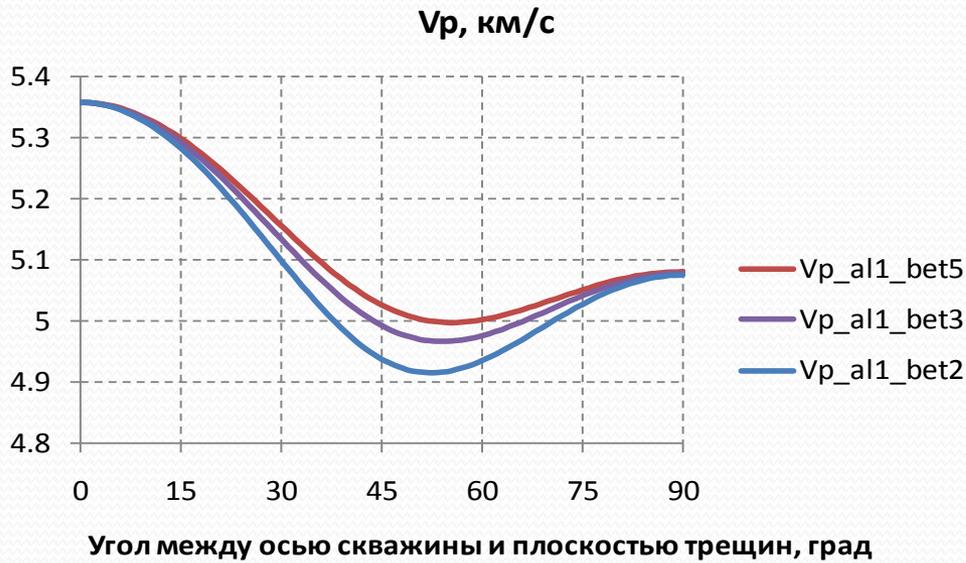
Емкость трещин = 0.5%  
 Пористость = 10%  
 $d = 5$  в Бэта-распределении



# Зависимость поведения скоростей от правой границы аспектного отношения трещин

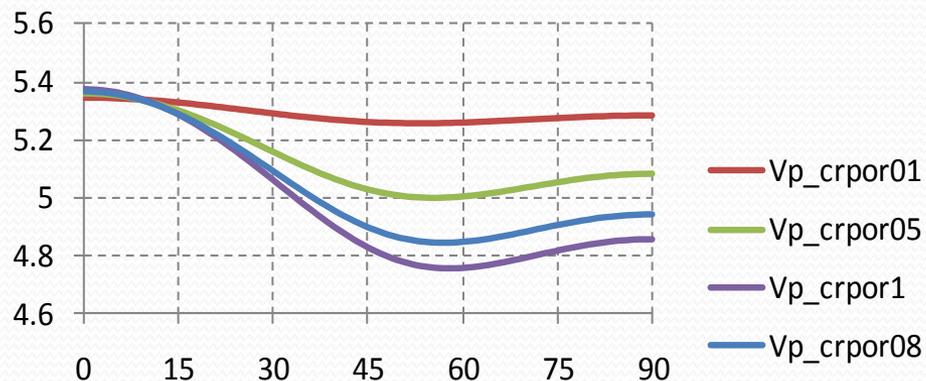


# Зависимость поведения скоростей от распределения объема трещин по их форме



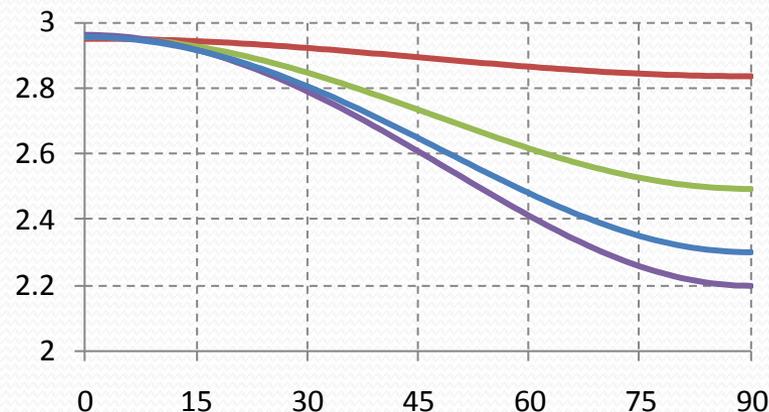
# Зависимость поведения скоростей от емкости трещин

$V_p$ , км/с



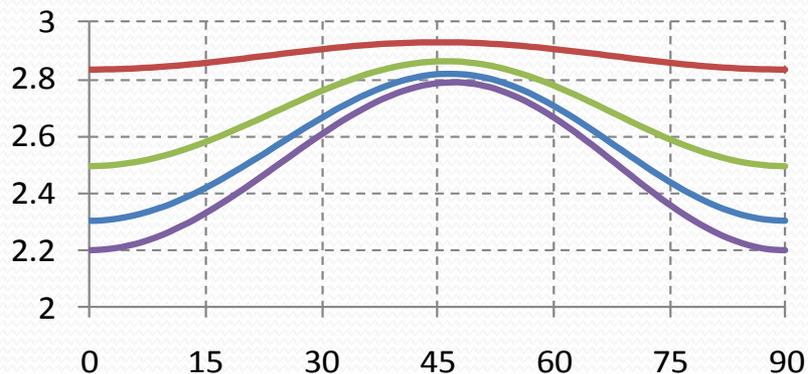
Угол между осью скважины и плоскостью трещин, град

$V_{s1}$  ( $V_{sh}$ ), км/с



Угол между осью скважины и плоскостью трещин, град

$V_{s2}$  ( $V_{sv}$ ), км/с

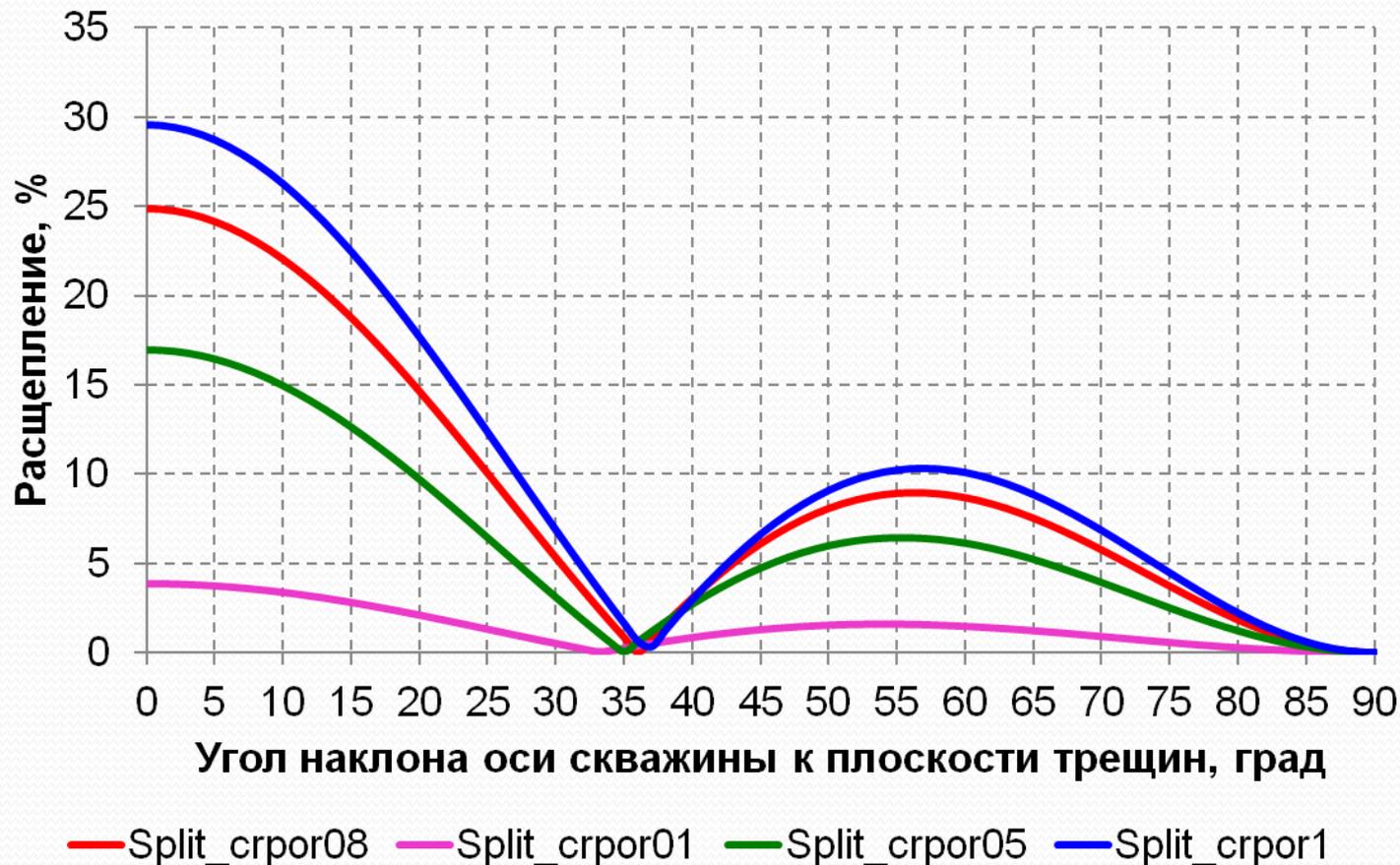


Угол между осью скважины и плоскостью трещин, град

# Зависимость величины расщепления от емкости трещин

Расщепление

$$S_p = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{0.5(V_{\max} + V_{\min})} 100\%$$



# Решение обратной задачи по определению параметров трещин и пор карбонатного коллектора по данным ГИС

$$\Psi = \left( \frac{V_P^t - V_P^e}{V_P^e} \right)^{m_1} + \left( \frac{V_{s1}^t - V_{s1}^e}{V_{s1}^e} \right)^{m_2} + \left( \frac{V_{s2}^t - V_{s2}^e}{V_{s2}^e} \right)^{m_3} + \left[ (Sp^t - Sp^e) / 100 \right]^{m_4} \rightarrow \text{Min}$$

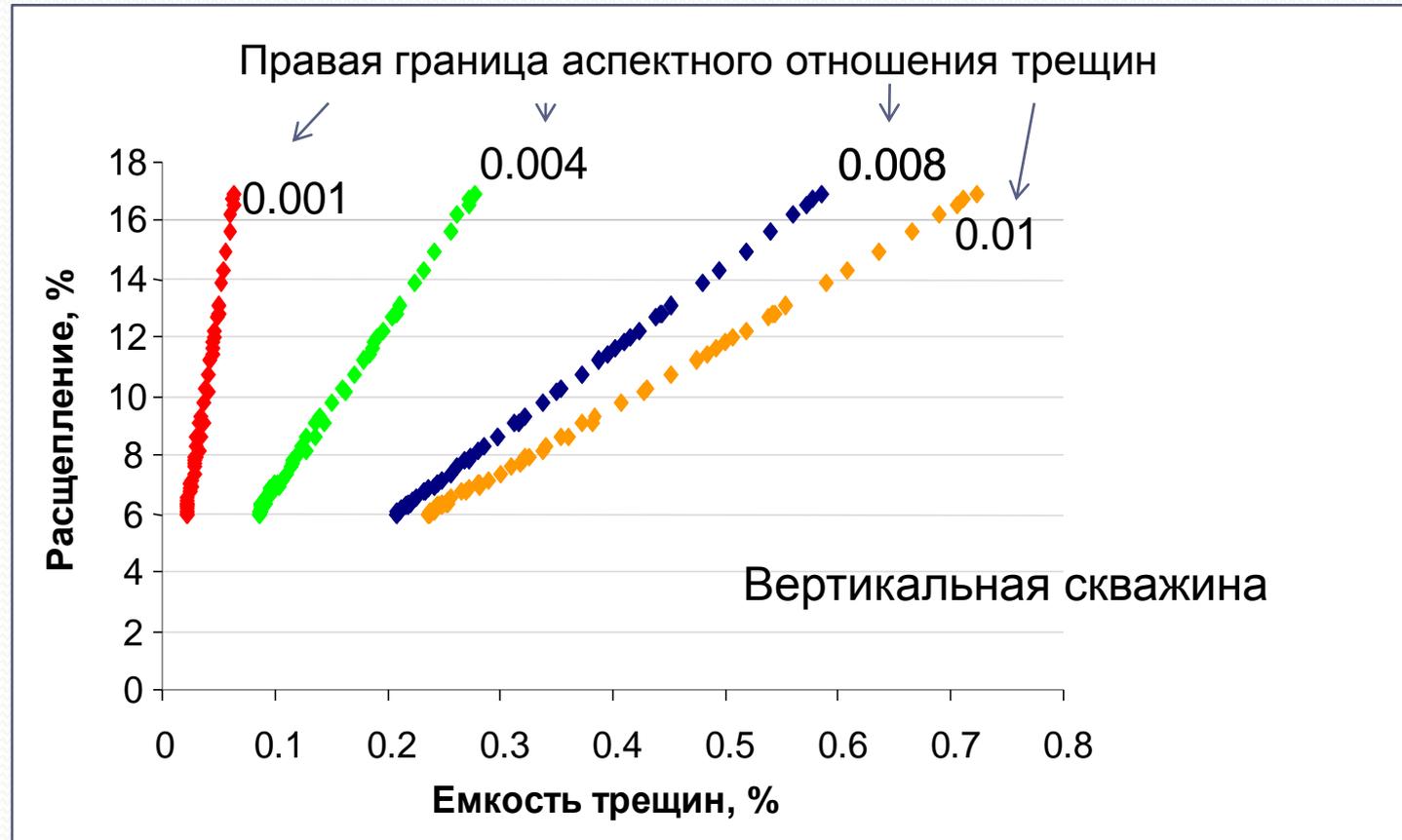
## Входные параметры:

1. азимут трещин, угол между осью скважины и вертикалью, азимут оси скважины (ГИС)
2.  $V_p, V_{s1}, V_{s2}$  (ГИС)
3. Плотность (ГИС)
4. Общая пористость (ГИС)
5. Правая граница аспектного отношения трещин
6. Левая граница аспектного отношения пор
7. Скорости упругих волн и плотность матрицы

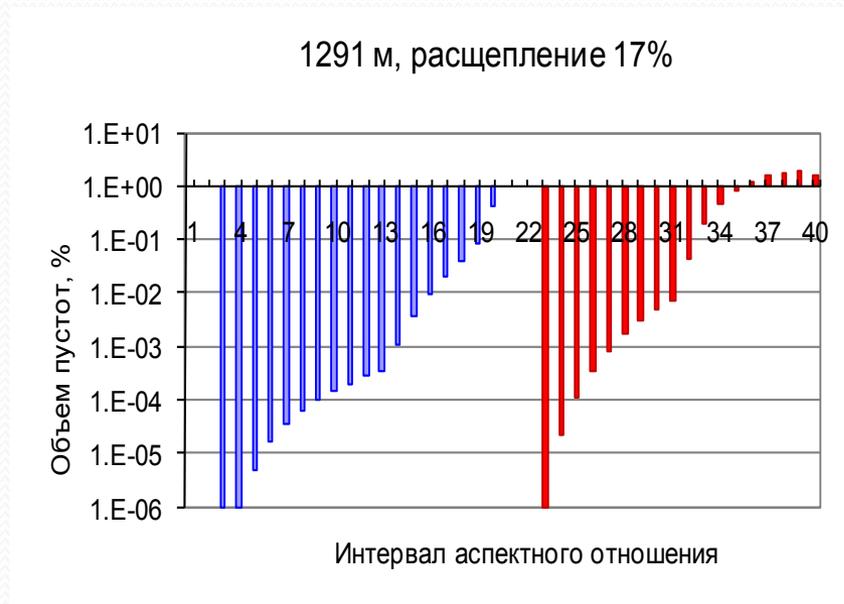
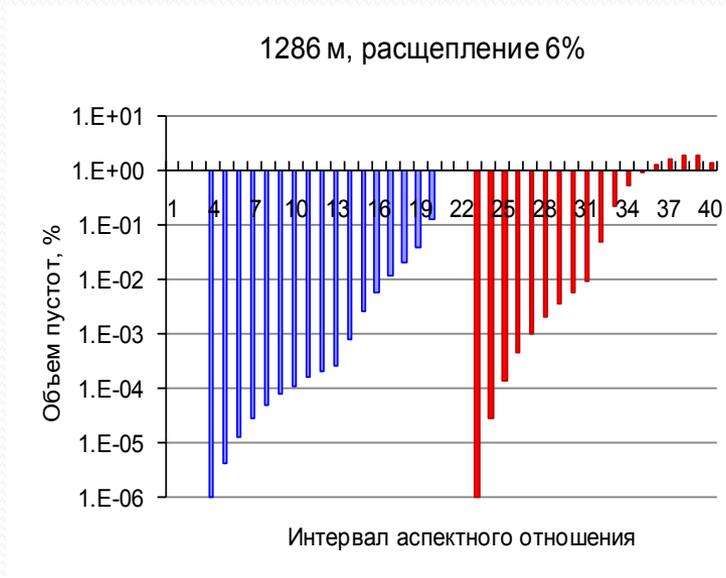
## Выходные параметры:

1. Емкость трещин
2. Открытая пористость
3. Параметр  $d$  Бэта распределения для формы трещин и пор

# Результаты: зависимость истинного расщепления от емкости трещин

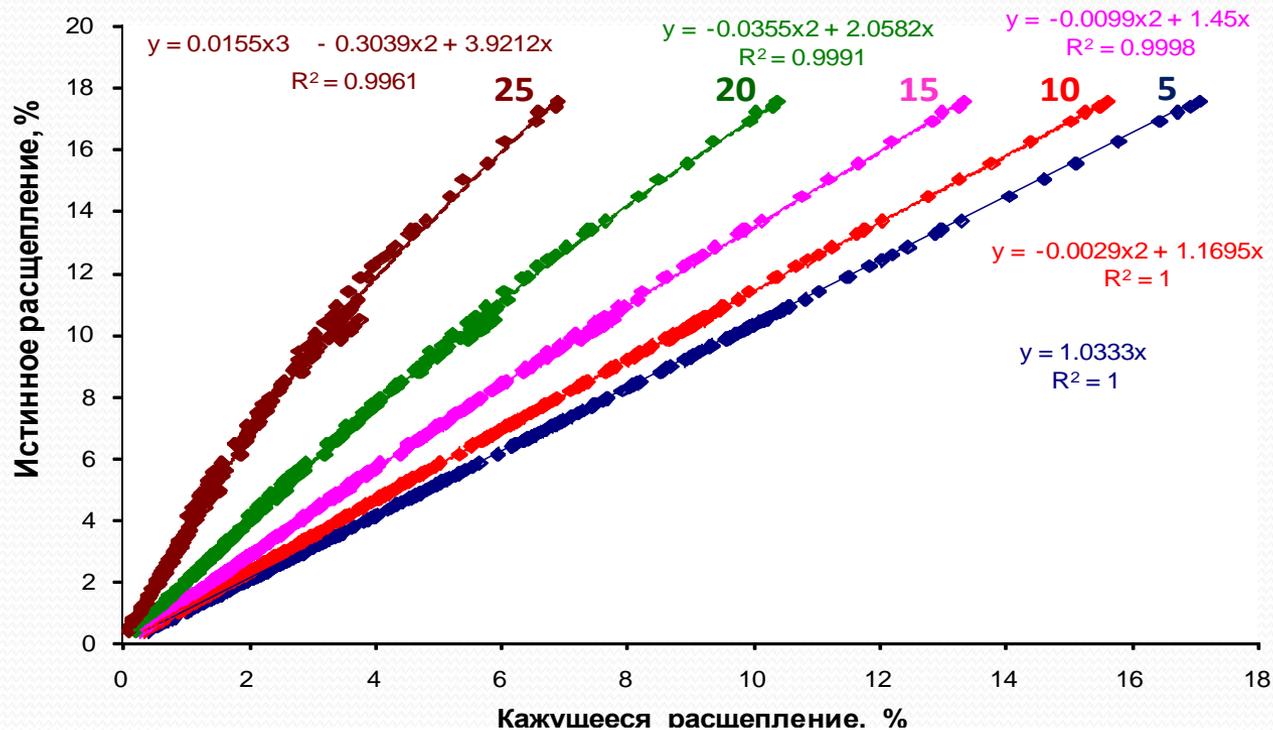


# Результаты: гистограммы распределения емкости трещин и объема пор по аспектным отношениям



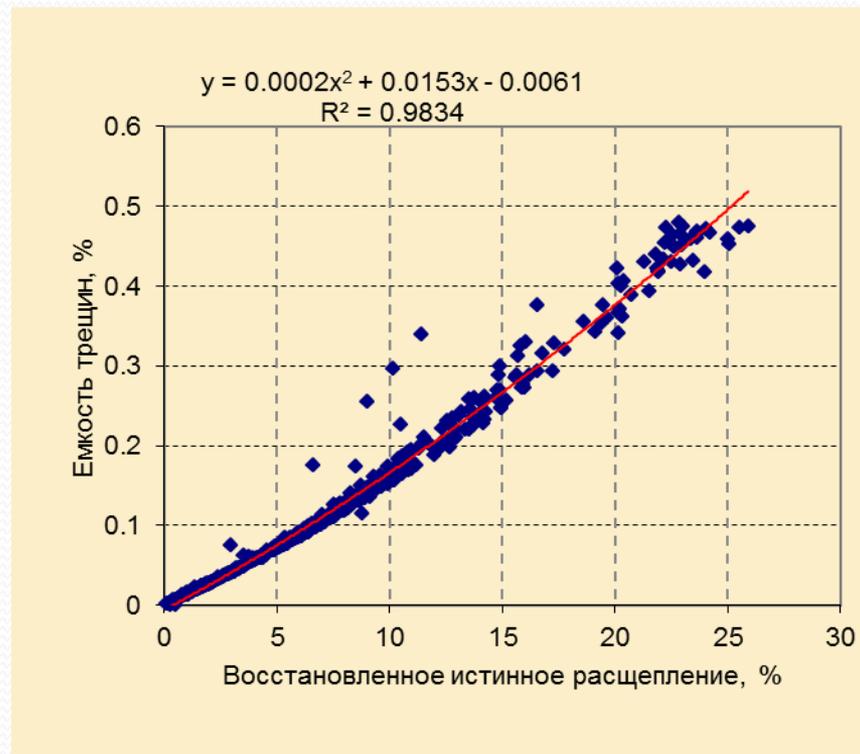
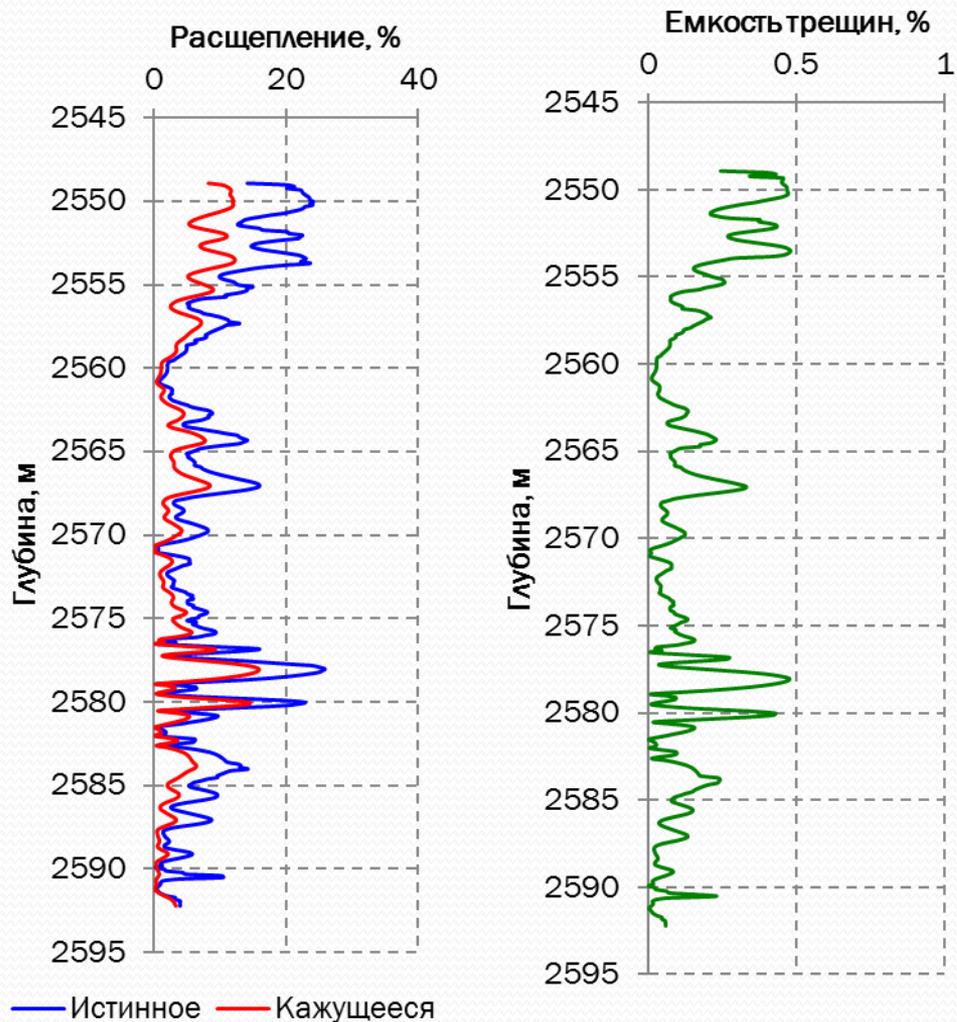
До аспектного отношения  $1e-4$  включительно ширина одного интервала аспектного отношения равна  $2.5e-5$  (интервалы 1 – 4). Для аспектных отношений, больших  $1e-4$  и до  $1e-3$  включительно, ширина интервала составляет  $1e-4$  (интервалы 5 – 13). До аспектных отношений  $0.01$  включительно ширина интервала равна  $0.001$  (интервалы 14 – 22). До аспектного отношения  $0.1$  ширина интервала составляет  $0.01$  (интервалы 23 – 31). Для интервалов 32 – 40 ширина интервала равна  $0.1$ .

# Результаты: номограмма для определения истинного расщепления по кажущемуся расщеплению

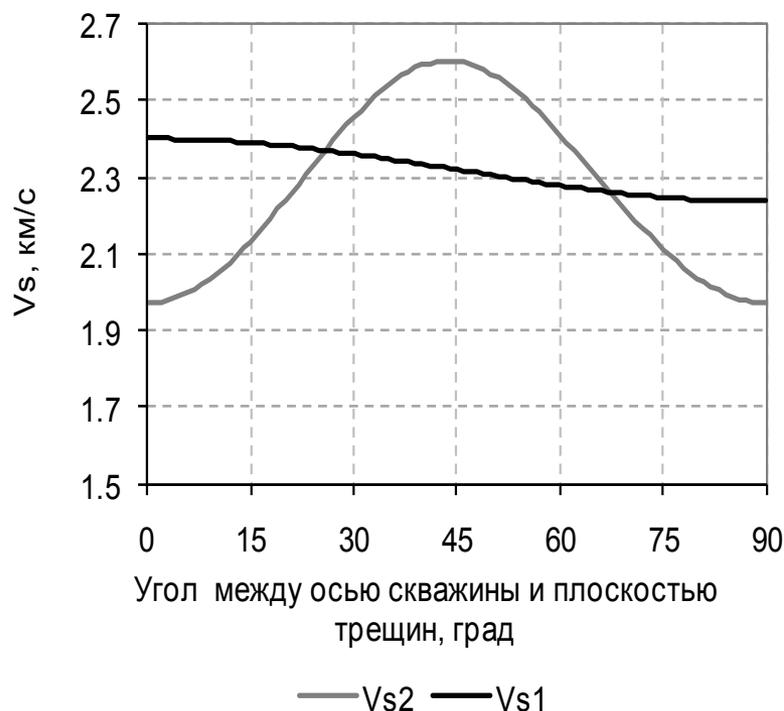


Цифрами на кривых показано значения угла наклона оси скважины к плоскости трещин

# Результаты: восстановление истинного расщепления и определение емкости трещин



# Скорости поперечных волн и расщепление в карбонатном коллекторе, содержащем прослой глины



Угол, при котором расщепление становится равным нулю, уменьшается до 20 градусов

## Защищаемое положение 3

Разработанная методика определения по данным ГИС параметров порово-трещиноватого пространства карбонатных коллекторов позволяет локализовать систему субвертикальных трещин и оценить емкостные свойства коллекторов.

# Научная новизна

1. Разработан междисциплинарный подход к определению эффективных физических свойств коллекторов углеводородов, учитывающий такие особенности их внутреннего строения, как форма, ориентация и особенности взаимного расположения неоднородностей.

2. Разработана концепция математического моделирования коллекторов углеводородов, включающая: построение их разномасштабной модели на основе анализа внутреннего строения, параметризацию модели, выбор способа учета связности компонент; исследование чувствительности модели к ее параметрам, сравнение теоретических значений физических свойств с соответствующими экспериментальными значениями и корректировку модели коллектора в случае необходимости.

3. Разработана методика решения обратной задачи по восстановлению параметров модели углеводородосодержащих сланцев с учетом анизотропии их макроскопических физических свойств, вызванной преимущественной ориентацией неизометричных флюидонасыщенных включений и преимущественной ориентацией минералов, обладающих выраженной анизотропией.

# Научная новизна

4. Разработана методика определения полного тензора упругости минералов глины с учетом влияния связанной воды. Методика применена к определению тензора упругости природной смеси минералов глины (иллит, смектит, каолинит, хлорит).
5. На основе теоретического моделирования по данным ГИС определен тензор упругости иллита с учетом влияния связанной воды.
6. Разработана методика определения полного тензора упругости анизотропных пород по ограниченному набору измерений, недостаточному для применения стандартного подхода.

# Научная новизна

7. Разработан способ определения по данным ГИС начальной анизотропной скоростной модели углеводородосодержащих сланцев, необходимой для корректной локации микроземлетрясений, возникающих при гидроразрыве.
8. На основе вариационного принципа Хашина-Штрикмана выведены неравенства, определяющие ограничения для компонент эффективного тензора упругости и тензора транспортных свойств для различных типов симметрии.
9. Предложен способ прогноза свойств одного типа по свойствам другого типа, основанный на инверсии параметров модели коллектора по известным свойствам. Способ апробирован для пересчета различных физических свойств («упругость → теплопроводность», «проницаемость → упругость», «теплопроводность → упругость»).

# Практическая значимость

Методика определения параметров внутренней структуры коллектора по измеряемым физическим величинам вдоль скважины (скорости упругих волн, электропроводность) может быть применена для оценки распределения по глубине различных физических характеристик (гидравлическая проницаемость и теплопроводность), прямое измерение которых в условиях залегания невозможно. Распределение по глубине этих величин (в общем случае анизотропных) на более низких сейсмических частотах может быть оценено с помощью методов масштабирования (апскейлинга).

Разработанная методика определения полного тензора упругости по ограниченному набору измерений, недостаточному для применения стандартного подхода, основанного на использовании уравнения Грина-Кристоффеля, широко применялась в экспериментальной практике группы лаборатории «Геофизики упорядоченных сред» при исследованиях упругих свойств газоносных сланцев.

# Практическая значимость

Тензоры упругости, описывающие анизотропные упругие свойства минералов глины с учетом влияния связанной воды, полученные в результате решения обратной задачи, могут быть использованы для математического моделирования упругих свойств сланцев в условиях естественного залегания. Показано, что связанная вода сильно меняет упругие свойства и анизотропию глинистых минералов (особенно смектита) и что использование свойств сухих минералов или изотропных свойств глины сильно искажает упругие свойства породы, что может привести к неправильной интерпретации полевых измерений (ошибочно показать зоны повышенной трещиноватости).

Метод определения начальной анизотропной частотно-зависимой скоростной модели анизотропных сланцев для последующей локализации микроземлетрясений, инициируемых гидроразрывом, реализован в виде программного обеспечения и передан для практического применения в нефтяную компанию Devon .

Метод определения по данным ГИС геометрии порово-трещиноватого пространства и емкости трещин, разработанный для карбонатных коллекторов, содержащих систему субвертикальных трещин, позволяет выделить зоны повышенной трещиноватости и оценить емкостные свойства этих коллекторов.

**Спасибо за внимание!**

