



**Методология и алгоритмы  
использования данных 3D-сейморазведки  
для изучения трещиноватости  
в программном комплексе INPRES**

**А. Г. Авербух, С. Ю. Граф**

**ОАО Центральная геофизическая экспедиция, г. Москва  
Тверской государственный университет, г. Тверь**

# Методология использования данных 3-D сейсморазведки

- Выявление зон с благоприятными геологическими предпосылками трещиноватости
- Математическое сейсмо моделирование как инструмент поиска диагностических признаков трещиноватости
- Анализ кинематических и динамических характеристик сейсмической записи
- Выявление аномальных зон по диагностическим признакам трещиноватости
- Оценка параметров трещиноватости
- Математическое сейсмо моделирование как инструмент проверки результатов интерпретации

# Методология программного комплекса INPRES-Прогноз для анализа, интерпретации и моделирования трещиноватости по сейсмическим данным

## ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Суммарный сейсмический куб
2. Мигрированные сейсмограммы ОТО до суммирования
3. Сейсмограммы ОСТ до миграции
4. Данные ВСП, результаты скоростного анализа

## ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ

1. Зоны повышенного рассеяния
2. Зоны повышенной нерегулярной энергии
3. Зоны разломов, геологические предпосылки

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

1. Спряmlение осей синфазности
2. Определение параметров негиперболичности
3. Определение азимутальных амплитуд и градиентов
4. Определение направлений регулярной трещиноватости

## АЗИМУТАЛЬНАЯ УГЛОВАЯ ИНВЕРСИЯ

1. Построение азимутальных моделей
2. Подбор параметров трещиноватости
3. Численное моделирование волновых полей для анизотропных моделей
4. Уточнение параметров моделей
5. Определение азимутальных параметров модели коллектора.

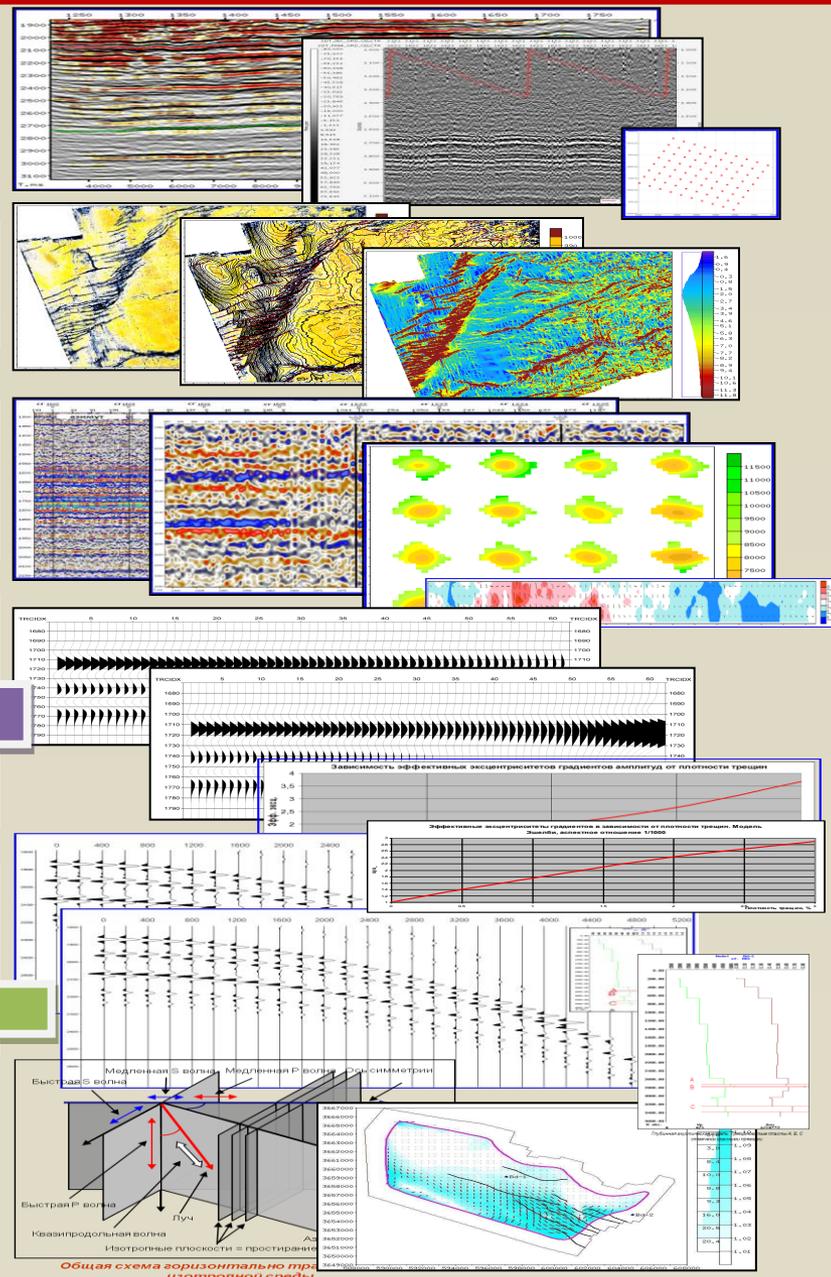
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

1. Выбор модели трещиноватой среды
2. Эвристическое определение плотности трещин
3. Определение эффективных параметров модели

4. Верификация модели. Численные эксперименты

## ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

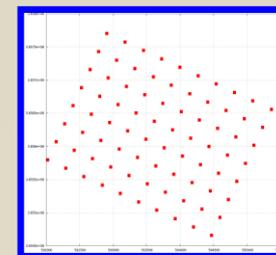
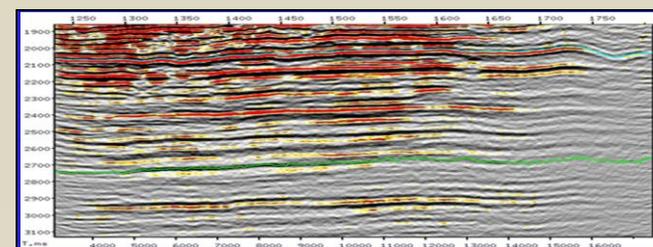
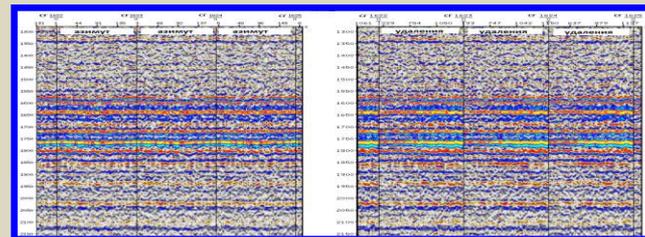
1. Модель трещиноватой среды
2. Оценки физических параметров трещиноватого пласта
  - преобладающее направление трещин
  - плотность трещин
  - оценки скоростей и плотностей в трещинах и вмещающей среде



# Методология программного комплекса INPRES-Прогноз для анализа, интерпретации и моделирования трещиноватости по сейсмическим данным

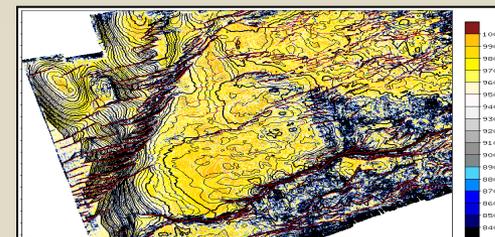
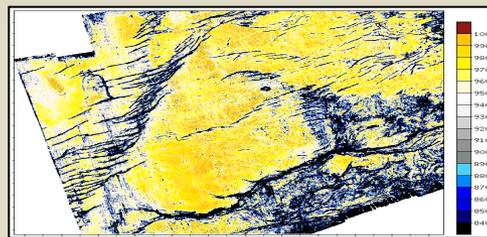
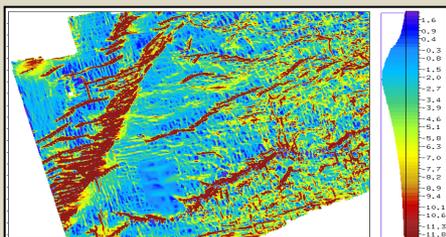
## ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Суммарный сейсмический куб
2. Мигрированные сейсмограммы ОТО и супербины до суммирования
3. Скоростной анализ сейсмограмм до миграции
4. Данные ГИС о скоростях  $V_p$ ,  $V_s$  и плотностях



## ВЫЯВЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЗОН

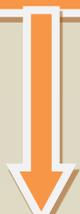
1. Зоны повышенной нерегулярной энергии
2. Зоны разломов, повышенных кривизн горизонтов и др. геологические предпосылки



# Методология программного комплекса INPRES-Прогноз для анализа, интерпретации и моделирования трещиноватости по сейсмическим данным

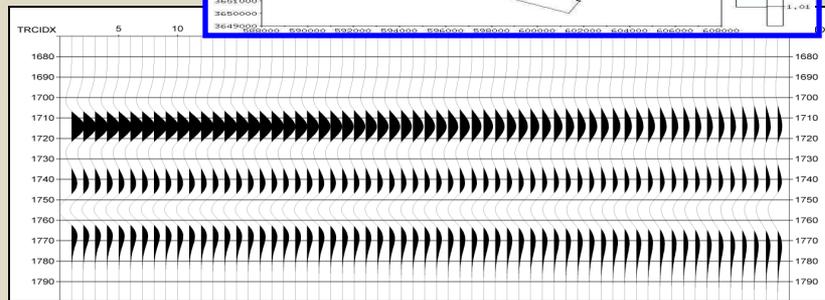
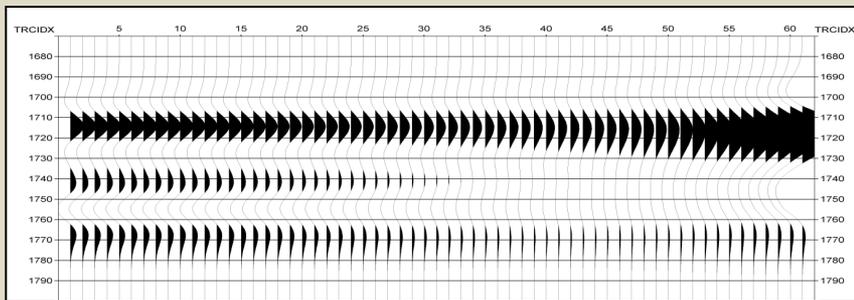
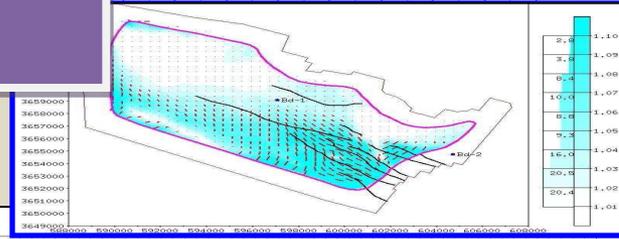
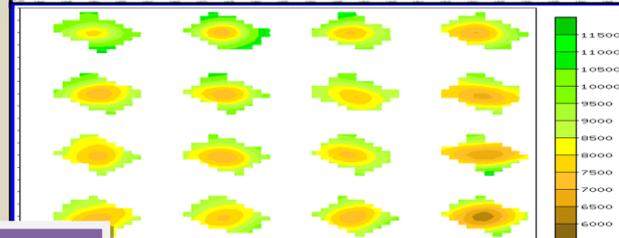
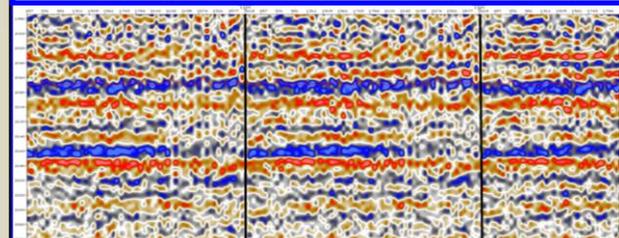
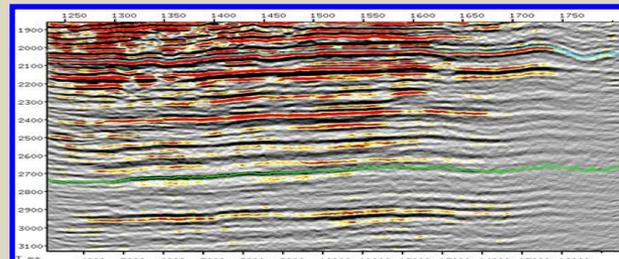
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

1. Спрямление осей синфазности
2. Определение параметров негиперболичности
3. Выявление азимутальной изменчивости амплитуд и градиентов
4. Определение направлений регулярной трещиноватости

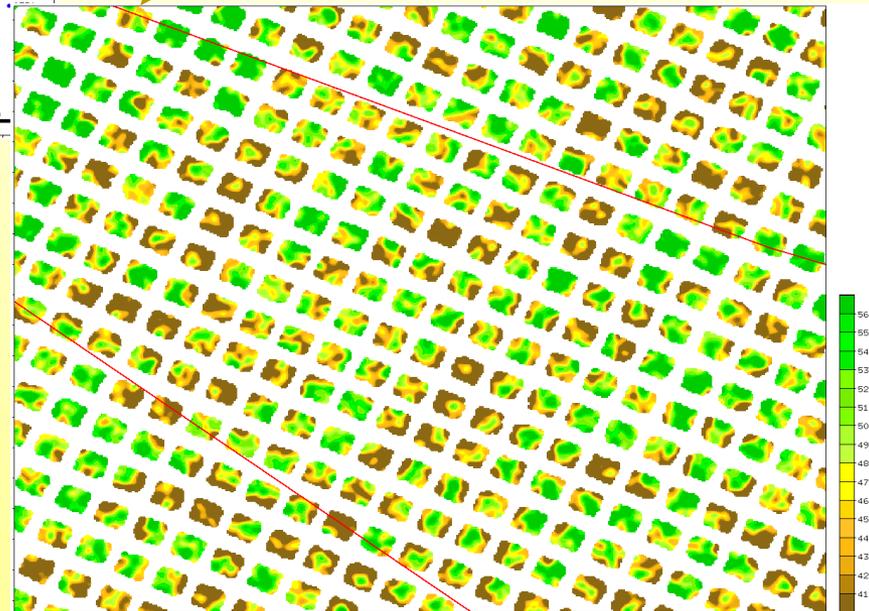
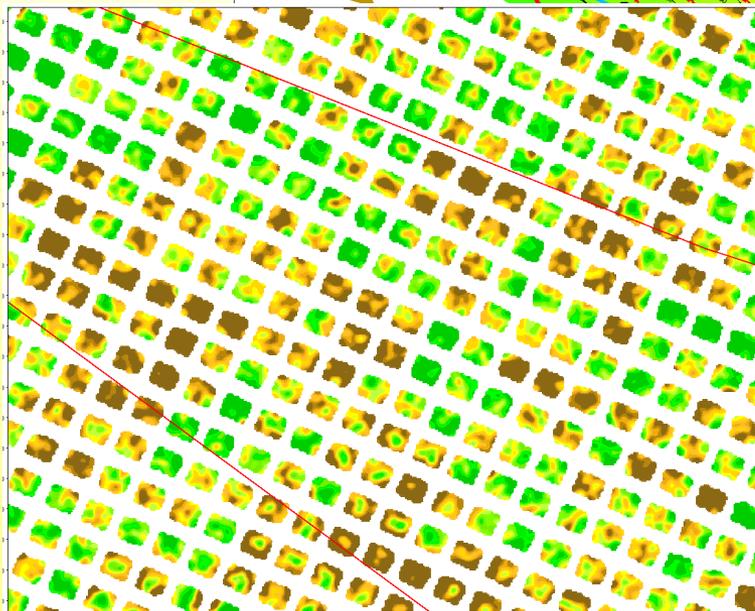
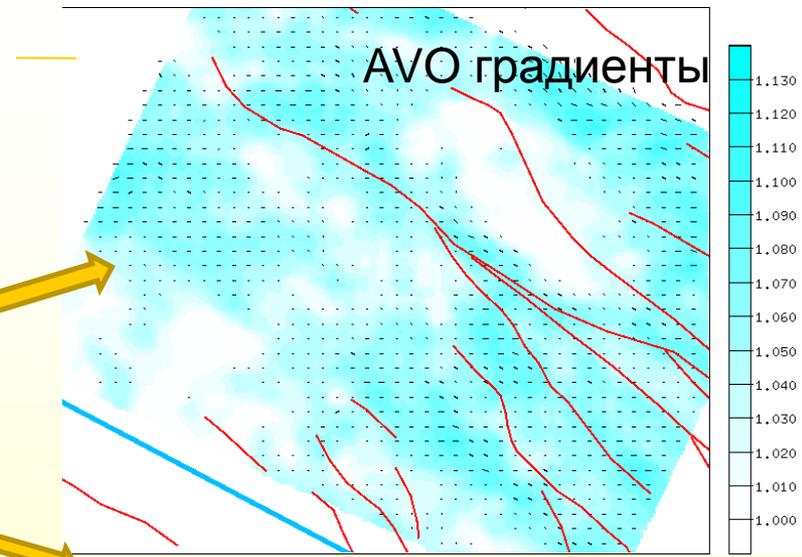


## АЗИМУТАЛЬНАЯ УГЛОВАЯ ИНВЕРСИЯ

1. Построение азимутальных моделей
2. Задание начальной модели трещиноватости
3. Численное моделирование волновых полей для заданных моделей трещиноватых сред
4. Инверсионное уточнение параметров моделей



Поиск аномалий



1:20000

1 км

Негиперболичность

Интенсивность

# Методология программного комплекса INPRES-Прогноз для анализа, интерпретации и моделирования трещиноватости по сейсмическим данным

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

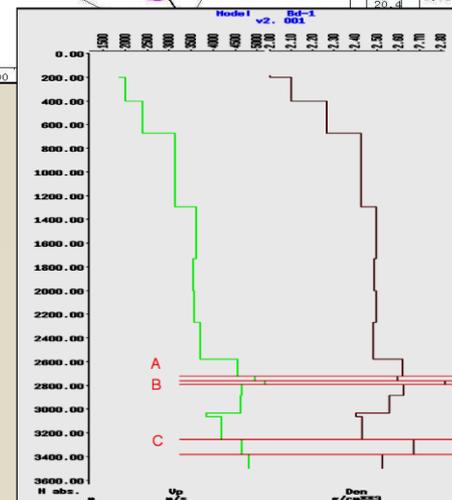
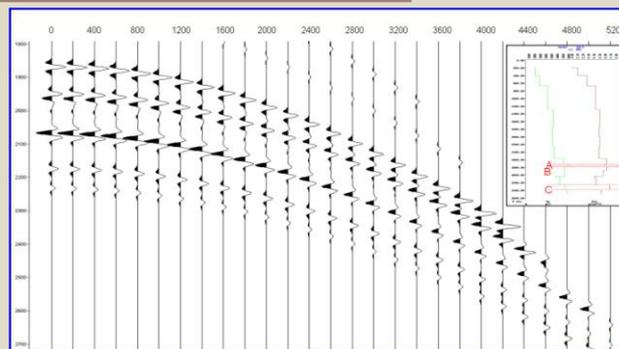
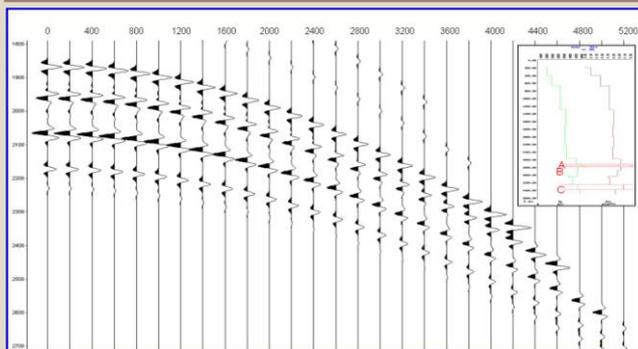
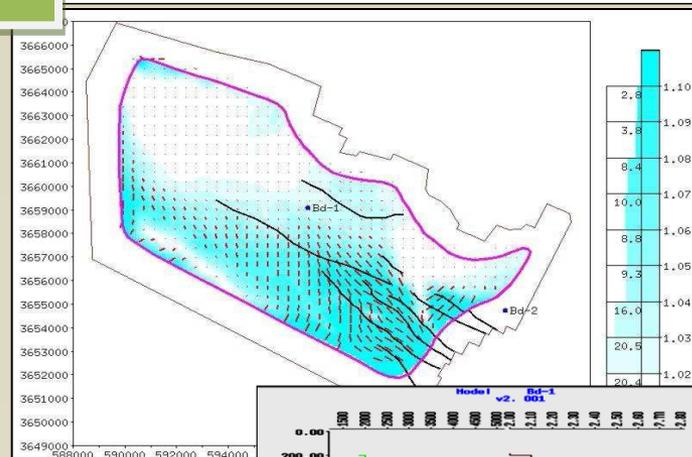
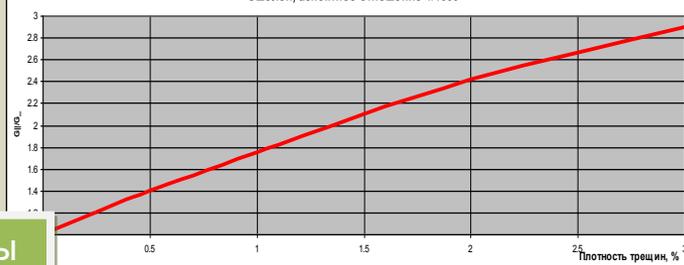
1. Выбор модели трещиноватой среды
2. Эвристическое определение плотности трещин
3. Определение эффективных параметров модели

4. Верификация модели. Численные эксперименты

## ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Модель трещиноватой среды
2. Оценки физических параметров трещиноватого пласта
  - преобладающее направление трещин
  - плотность трещин
  - оценки скоростей и плотностей в трещинах и вмещающей среде

Эффективные эксцентриситеты градиентов в зависимости от плотности трещин. Модель Желби, аспектное отношение 1/1000



Глубинная акустическая модель. Трещиноватые пласты А, В, С отмечены красными прямыми.

# Диагностические признаки трещиноватости

- Изменение абсолютных значений акустических параметров и динамических характеристик сейсмической записи в зонах трещиноватости

## 1. Изменение пластовых скоростей продольных и поперечных волн



Наличие трещиноватости приводит к уменьшению абсолютных значений вертикальных продольных скоростей и их отношений к вертикально-поляризованным поперечным скоростям

## 2. Изменение отношений коэффициентов отражения (и амплитуд) прямых и обменных



Наличие трещиноватости приводит к изменению абсолютных значений коэффициентов отражения продольных и обменных волн в зависимости от угла падения.

## 3. Влияние наличия трещиноватости на результаты сейсмической инверсии

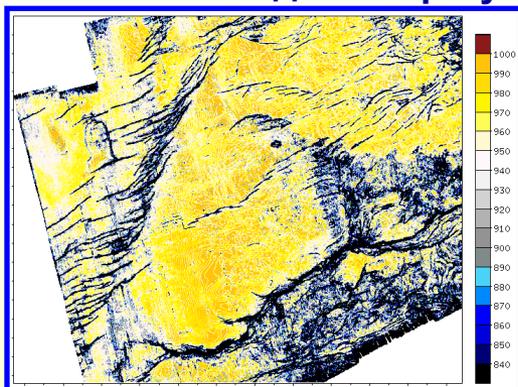


Наличие трещиноватости приводит к различиям скоростей, определенным по результатам упругой сейсмической инверсии, от скоростей в нетрещиноватых средах

# Диагностические признаки трещиноватости

- **Повышение доли рассеянной компоненты и отношения энергии нерегулярных колебаний к регулярным на сейсмической записи трещиноватых зон**

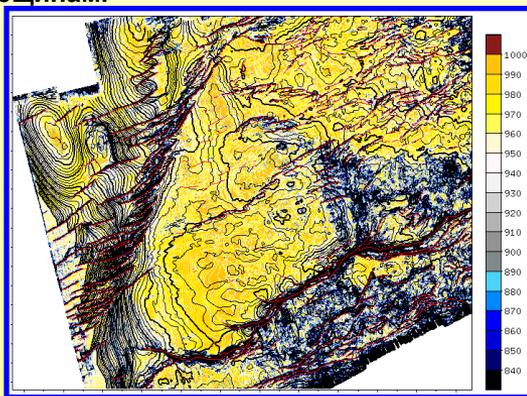
## 1. Повышение доли нерегулярной энергии.



В зонах повышенной трещиноватости отмечается понижение доли регулярной энергии в сейсмическом кубе вследствие рассеяния энергии в результате дифракции в зонах трещиноватости

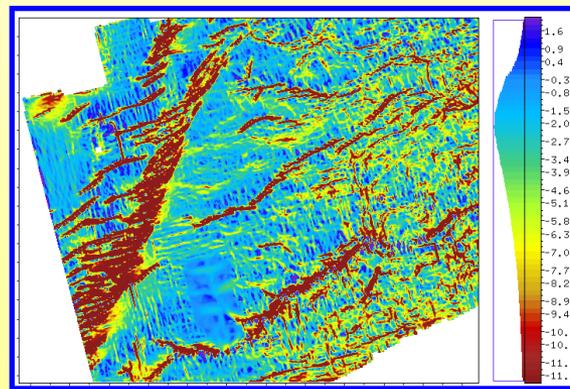
## 2. Структурные и тектонические предпосылки трещиноватости

Близость зон трещиноватости к разломам и мегатрещинам.



Зоны повышенной трещиноватости естественным образом обрамляют зоны структурных нарушений, разломов и мегатрещин

Повышенная степень деформации геологических границ.

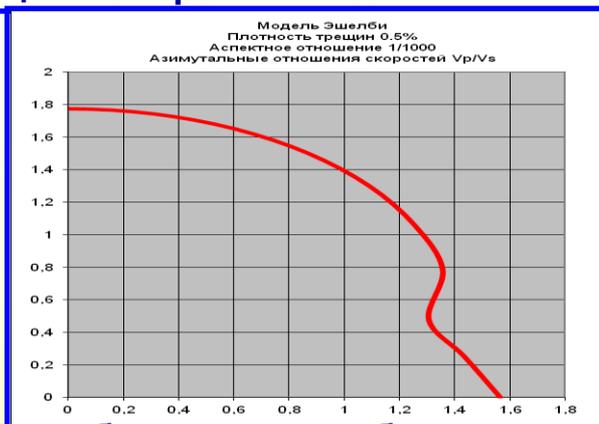
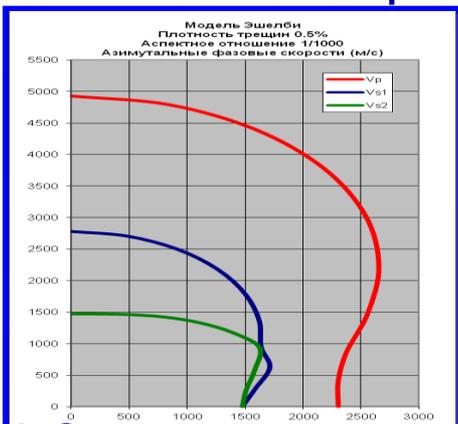


Карты сейсмических горизонтов в зонах трещиноватости могут обладать повышенными абсолютными значениями гауссовой кривизны.

# Диагностические признаки регулярной трещиноватости

## ■ Азимутальные изменения кинематических параметров

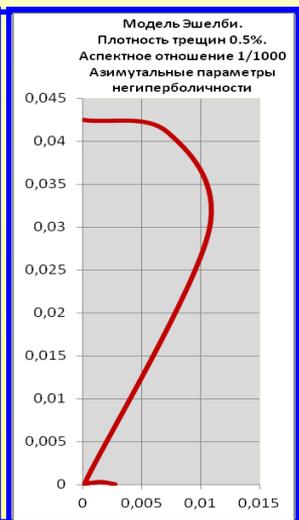
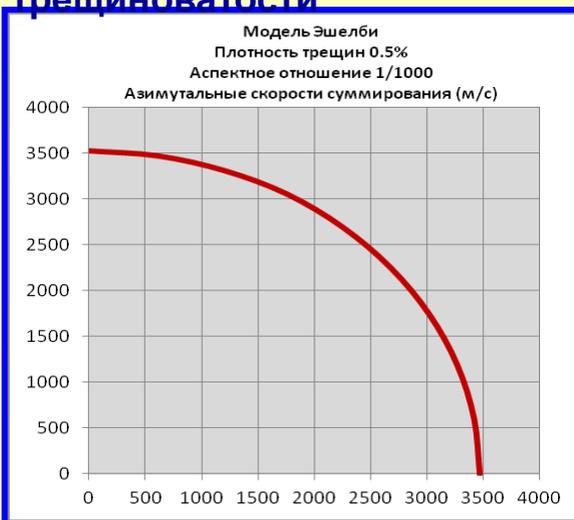
1. Характерной особенностью регулярно трещиноватых сред с субвертикальной ориентацией трещин является наличие азимутальной зависимости скоростей распространения акустических волн и явление поляризации поперечных волн



Для тонких трещиноватых пластов сейсмические скорости, определенные по сейсмограммам ОСТ с учетом степени негиперболичности, малочувствительны к азимутальным вариациям пластовых скоростей и не могут рассматриваться как устойчивый диагностический признак

2. Скорости суммирования обладают пренебрежимо малой азимутальной зависимостью.

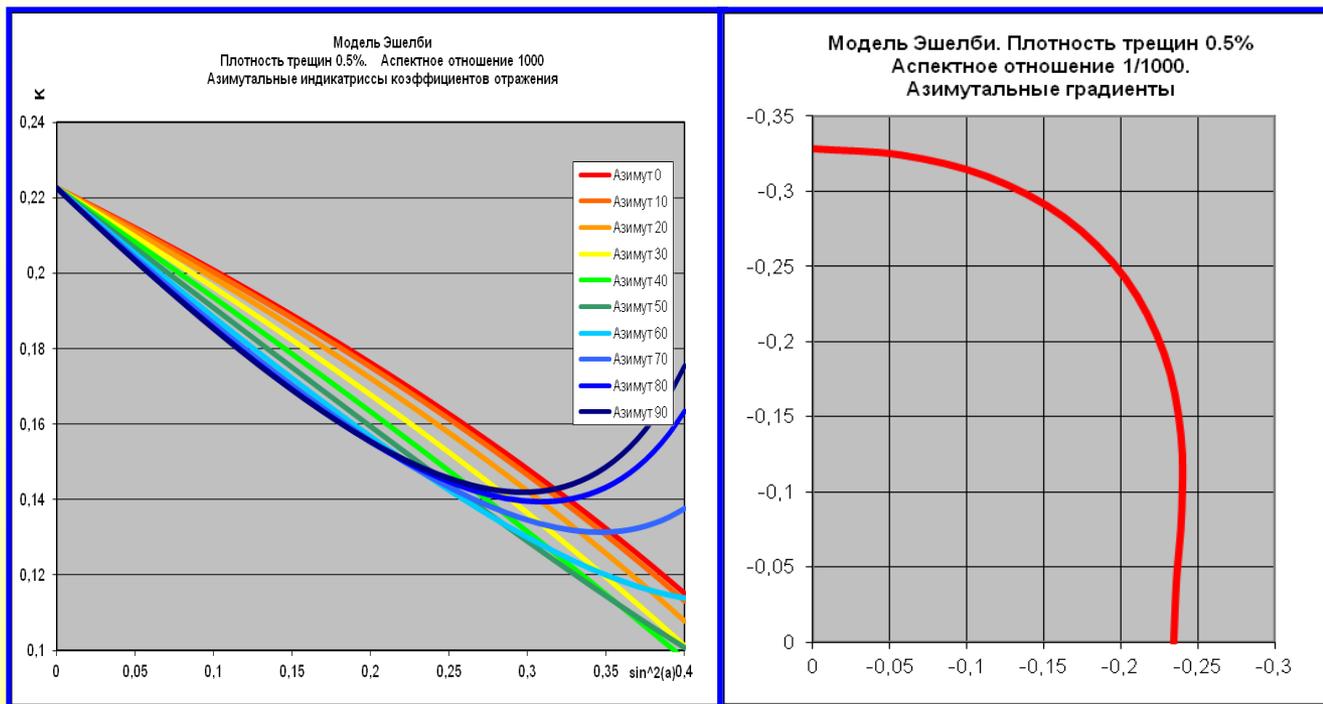
Параметр негиперболичности для сейсмограмм ОСТ чувствителен к регулярной трещиноватости



На азимутальных диаграммах горизонтальная ось соответствует направлению, перпендикулярному простиранию трещин, а вертикальная – вдоль

# Диагностические признаки регулярной трещиноватости

- **Азимутальные изменения динамических параметров**
  1. Регулярная трещиноватость оказывает существенное влияние на азимутальные угловые зависимости коэффициентов отражения квазипродольных отраженных волн и на градиенты коэффициентов отражения

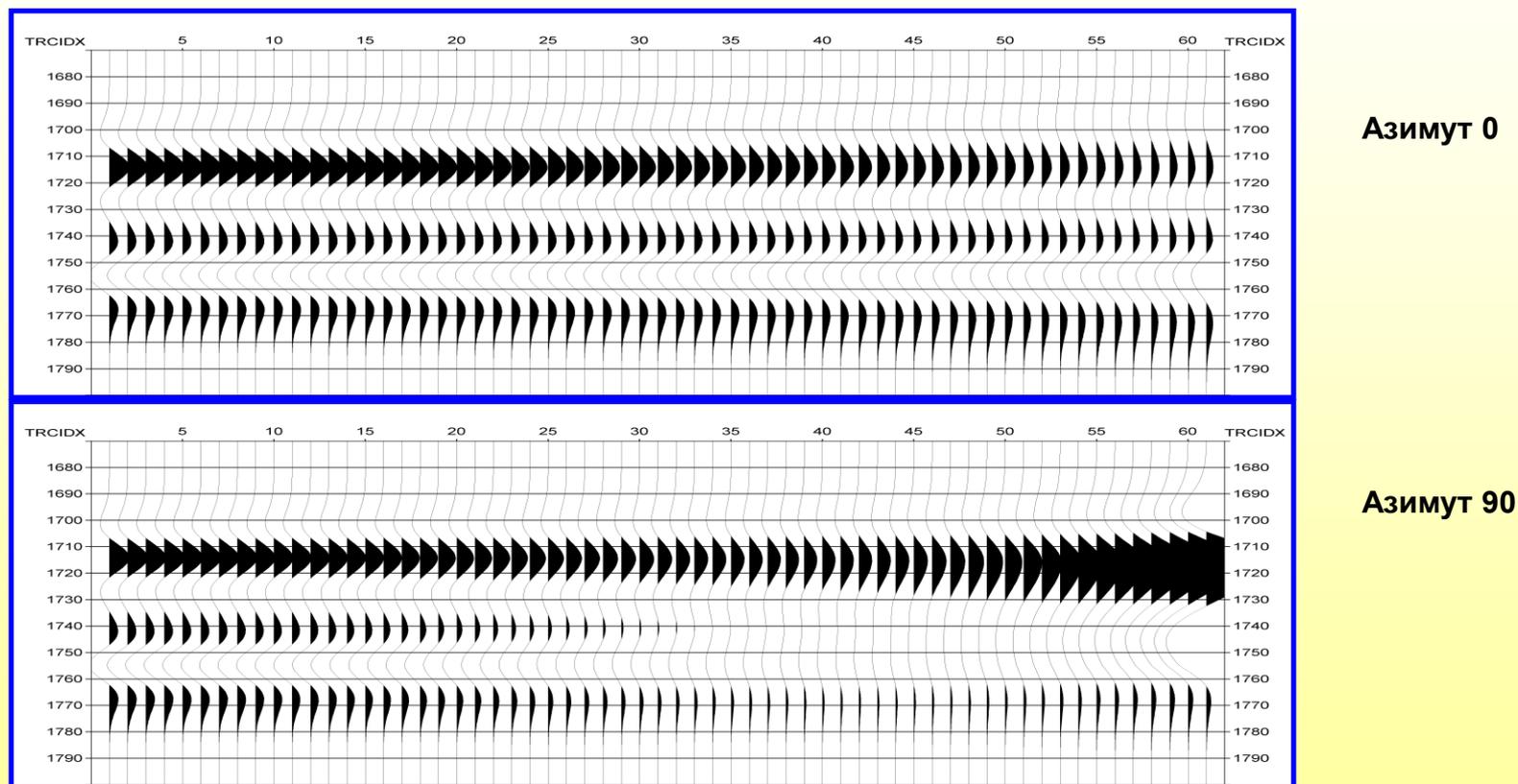


Индикатриссы коэффициентов отражения и градиенты коэффициентов отражения продольных волн от кровли трещиноватого коллектора обладают выраженной азимутальной зависимостью даже при незначительном проценте трещиноватости

# Диагностические признаки регулярной трещиноватости

## ■ Азимутальные изменения динамических параметров

2. Выраженная азимутальная зависимость сохраняется и для амплитуд, соответствующих однократно отраженным от трещиноватого пласта квазипродольным волнам

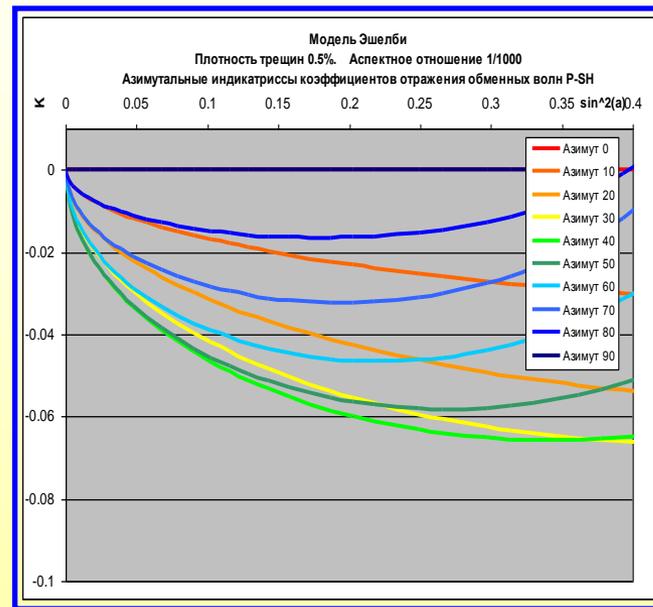
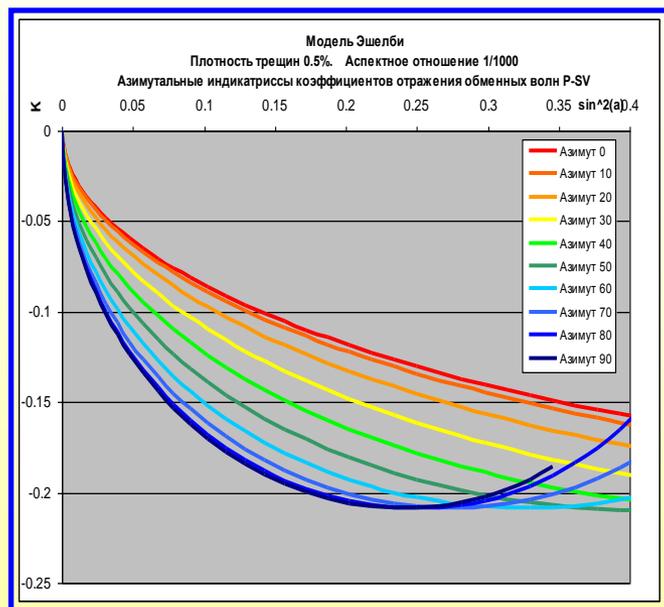


Спрямленные дистанционные сейсмограммы ОСТ.  
Отражение от трещиноватого газонасыщенного пласта. Модель Эшелби.  
Плотность трещин 0.5%. Аспектное отношение 1/1000.

# Диагностические признаки регулярной трещиноватости

## ■ Азимутальные изменения динамических параметров

3. Ярким диагностическим признаком трещиноватости и анизотропии в целом является поляризация поперечных волн и значительные азимутальные вариации коэффициентов отражения и амплитуд обменных волн

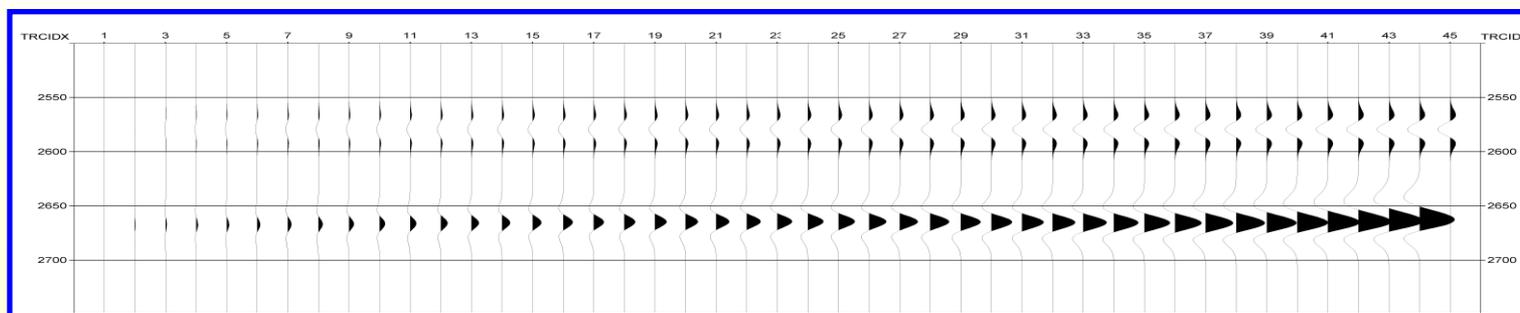


Индикатриссы коэффициентов отражения обменных (вертикально и горизонтально поляризованных) волн от кровли трещиноватого коллектора обладают выраженной азимутальной зависимостью даже при незначительном проценте трещиноватости

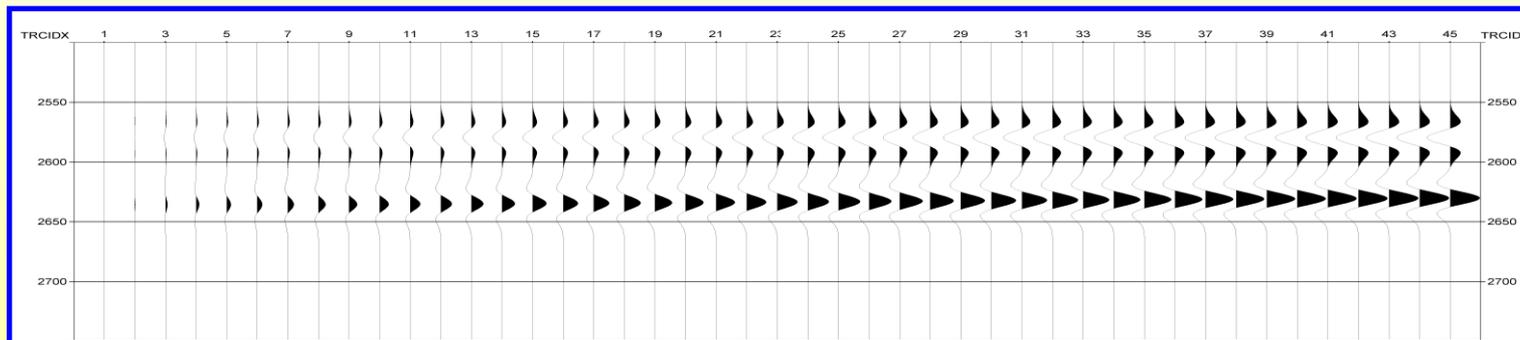
# Диагностические признаки регулярной трещиноватости

## ■ Азимутальные изменения динамических параметров

### 4. Выраженная азимутальная зависимость на сейсмограммах обменных волн



Азимут 0



Азимут 90

Спрямленные дистанционные сейсмограммы ОСТ.

Отражение от трещиноватого газонасыщенного пласта. Модель Эшелби.

Плотность трещин 0.5%. Аспектное отношение 1/1000.

Явление поляризации и азимутальная зависимость амплитуд отчетливо видны на сейсмограммах ОСТ благодаря запаздыванию обменных волн в азимуте, ортогональном простиранию трещин

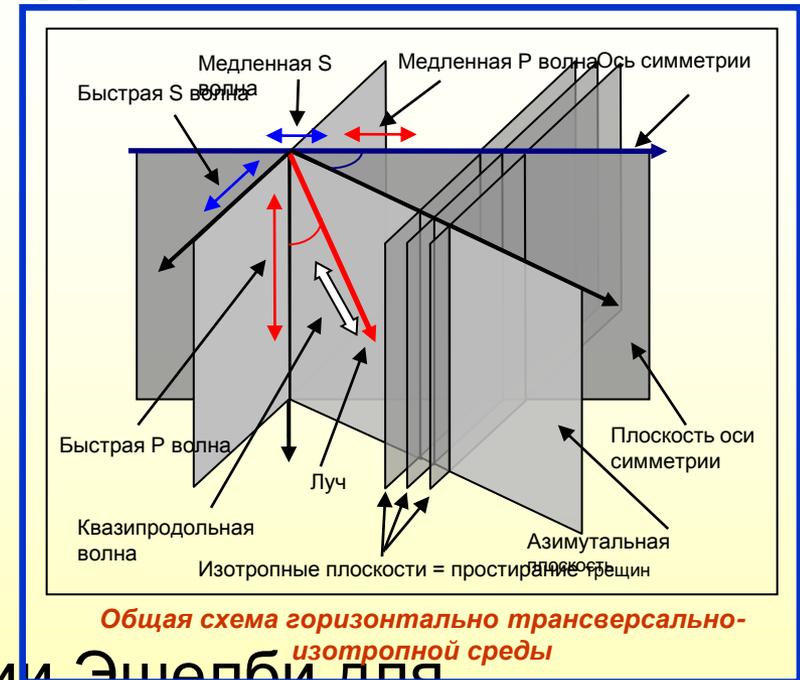
## Диагностические признаки трещиноватости. Выводы

1. **Изменение абсолютных значений акустических параметров и динамических характеристик сейсмической записи в зонах трещиноватости**
  - Изменение пластовых скоростей продольных и поперечных волн
  - Изменение отношений коэффициентов отражения (и амплитуд) прямых и обменных волн от трещиноватых пластов
  - Повышение доли рассеянной компоненты и отношения энергии нерегулярных колебаний к регулярным на сейсмической записи трещиноватых зон
2. **Азимутальные изменения кинематических и динамических параметров**
  - **Азимутальные изменения кинематических параметров**
    - Фазовых скоростей
    - Скоростей суммирования
    - Параметров негиперболичности и недоспрямленности сейсмограмм
  - **Азимутальные изменения динамических параметров**
    - Амплитуд отраженных продольных и обменных волн
    - Градиентов амплитуд
3. **Структурные и тектонические предпосылки трещиноватости**
  - Близость зон трещиноватости к разломам и мегатрещинам
  - Повышенная степень деформации геологических границ

# Модели трещиноватых сред

- ❑ **Физические модели**
- ❑ **Стохастические модели**
- ❑ **Фрактальные модели**
- ❑ **Эффективные модели**

- Модель Хадсона
- Модель Шоенберга
- Модели, основанные на решении Эшелби для поля деформаций в среде со включением
- Сравнимость и квазиэквивалентность эффективных моделей



## Заключение. Основные результаты

- **Предлагается методология определения сейсмических характеристик регулярно трещиноватых сред по упругим свойствам матрицы породы и заполнителя трещин, позволяющая получать количественные решения широкого круга прямых и обратных задач сейсморазведки**
- **Предлагается инструмент для численного моделирования, анализа и интерпретации кинематических и динамических вариаций волновых полей, соответствующих отражениям от трещиноватых пластов**
- **Предлагается методология выявления и оценки параметров трещиноватых зон (коллекторов) по азимутальным вариациям сейсмических характеристик однократно отраженных и обменных волн**



**Спасибо за внимание**