

Цифровой двойник реального геологического объекта: построение и применение для верификации сейсмических методов его реконструкции

Чеверда В.А., Лисица В.В., Протасов М.И., Решетова Г.В.,
Мельник А.А., Петров Д.А., Шиликов В.В., Волянская В.В.,
Мерзликина А.С.

Содержание

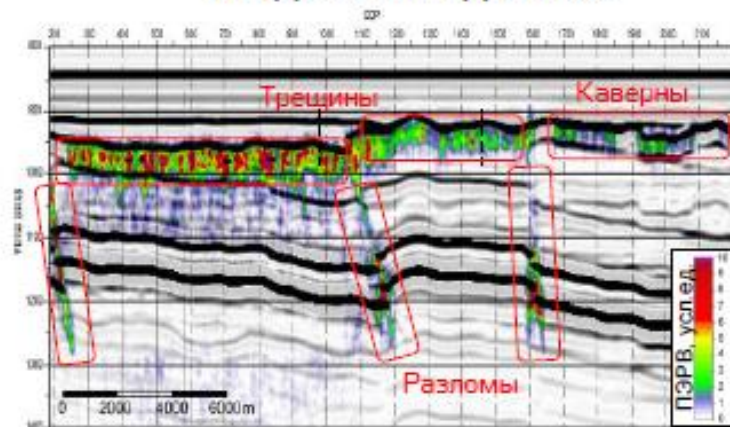
1. Мотивация
2. Цель работы
3. Построение реалистичной модели
4. Трёхмерное сейсмическое моделирование
5. Обработка синтетических данных

Содержание

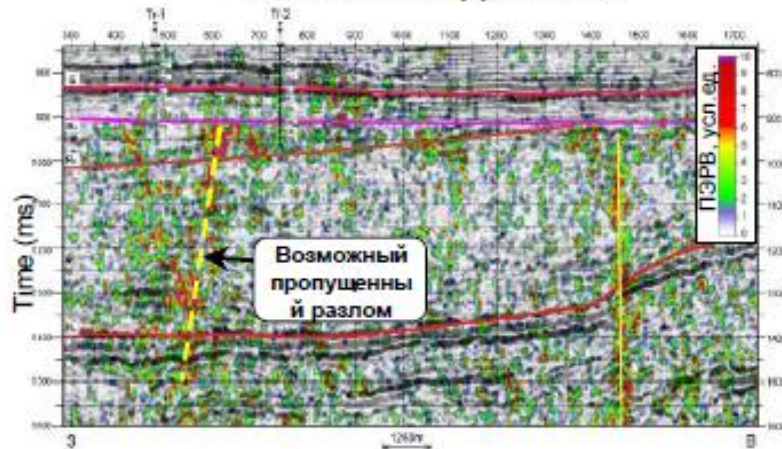
1. **Мотивация**
2. Цель работы
3. Построение реалистичной модели
4. Трёхмерное сейсмическое моделирование
5. Обработка синтетических данных

Мотивация работ: накопленный опыт профильных наблюдений

Модельные данные



Реальные данные



Содержание

1. Мотивация
2. Цель работы
3. Построение реалистичной модели
4. Трехмерное сейсмическое моделирование
5. Обработка синтетических данных

Основные цели исследования

- Создать реалистичную трёхмерную сейсмогеологическую модель, содержащую основные геологические элементы некоторых лицензионных участков;
- Провести полномасштабное численное моделирование 3D сейсморазведки;
- Провести обработку с целью выделения скоплений мелкомасштабных геологических объектов.

- Создать реалистичную трёхмерную сейсмогеологическую модель, содержащую основные геологические элементы некоторых лицензионных участков;
- Провести полномасштабное численное моделирование 3D сейсморазведки;
- Провести обработку с целью выделения скоплений мелкомасштабных геологических объектов.

Построение трёхмерной геологической модели

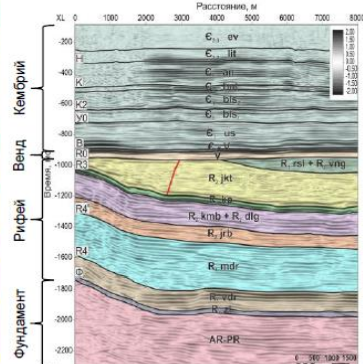
- Построение макроскоростной модели
- Геомеханическое моделирование по данным палеотектонических движений
- Реконструкция распределений деформаций в ядре разлома
- Построение полной геологической модели

Построение трёхмерной геологической модели

Выкопировка геологической карты предвентской эрозионной поверхности

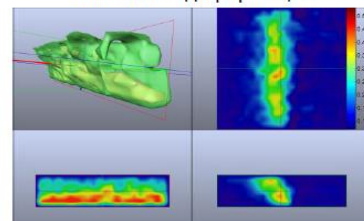


Сейсмический разрез

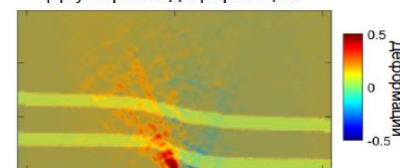


Геомеханическое моделирование

Объемные деформации



Двумерные деформации



Макромасштаб

- Моделирование в трехмерной постановке проводилось для определения и анализа распределения деформаций в горизонтальном направлении вдоль разлома.

Мезомасштаб

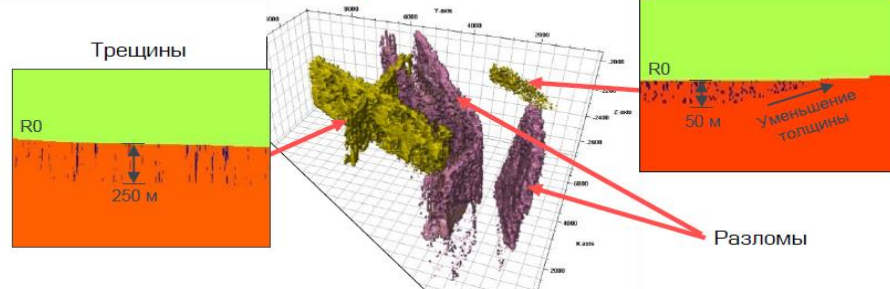
- Моделирование распределения деформаций в зоне, окружающей разлом с разрешением до 2 м проводилось серии численных экспериментов в двумерной постановке.

Основа моделирования – Куямбинское НГКМ

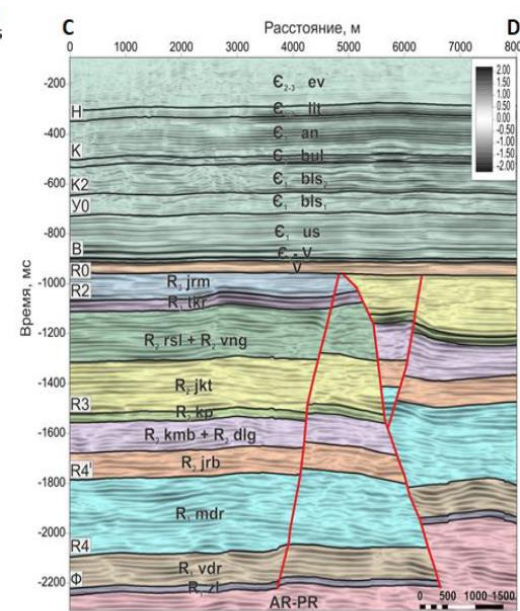
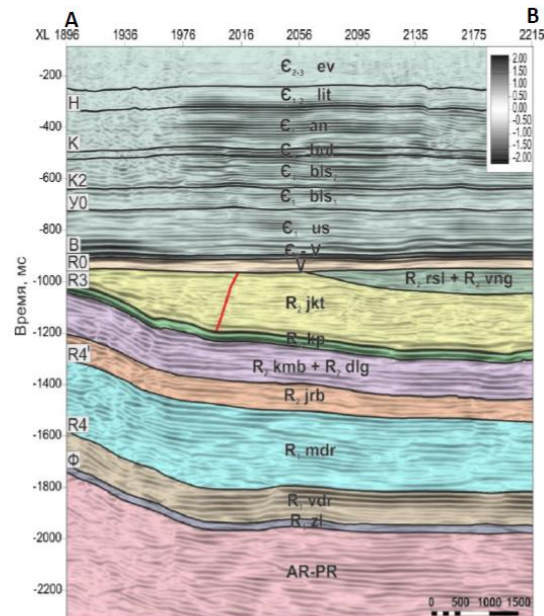
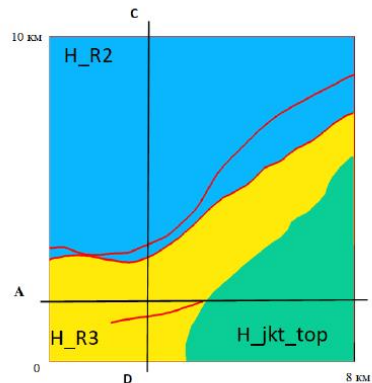
- В качестве основы для моделирования использовались сейсмогеологические свойства Куямбинского ЛУ.
- На основе выполненной переинтерпретации небольшого участка данных сейсморазведки 3D был построен каркас трехмерной модели.
- Упругие параметры среды построены исходя из данных ГИС на месторождении.
- Модель была усложнена внедрением неоднородностей в виде зон трещиноватости и кавернозности. Неоднородности располагались вдоль границы соответствующей предвентской эрозионной поверхности.

РН-КРАСНОЯРСКИЙ ПИНЕФТЬ

Микронеоднородности

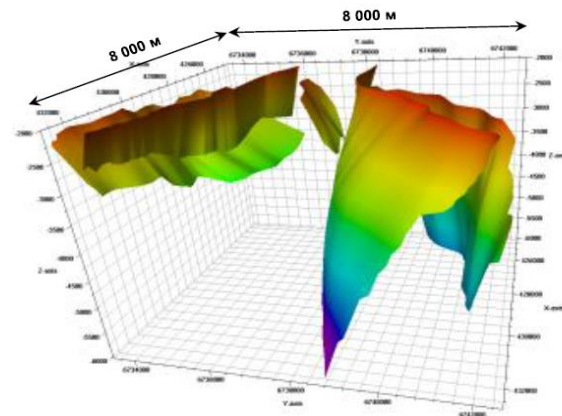
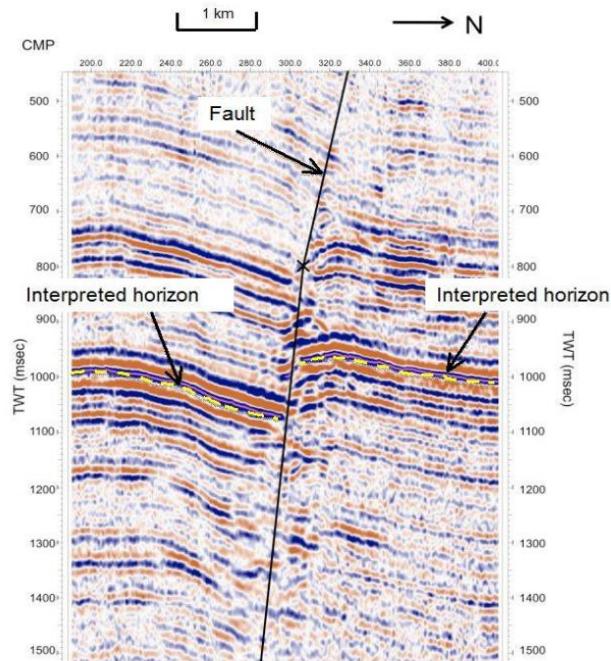


Построение трёхмерной геологической модели: структурная модель

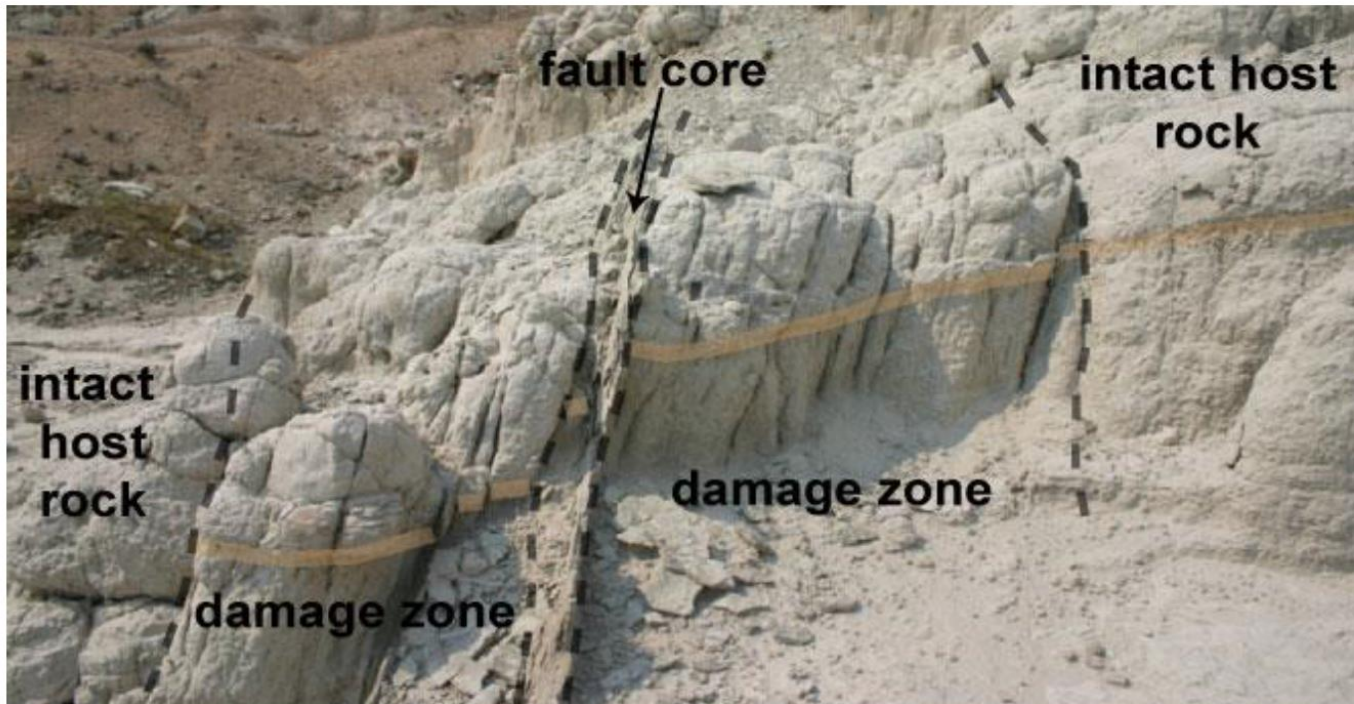


Построение трёхмерной геологической модели: моделирование разломов и приразломных зон

Геофизическая интерпретация разломов



Построение трёхмерной геологической модели



Геологический разлом

Геологический разлом, или разрыв — нарушение сплошности горных пород. Он может реализовываться как без смещения (трещина), так и со смещением пород по разным сторонам поверхности разрыва. Чаще всего разломы состоят не из единственной трещины или разрыва, а из структурной зоны одностипных тектонических деформаций, которые ассоциируются с плоскостью разлома.

Примеры разломов

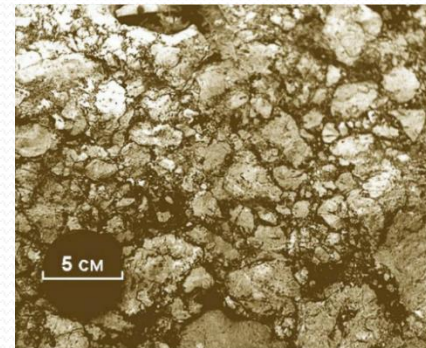
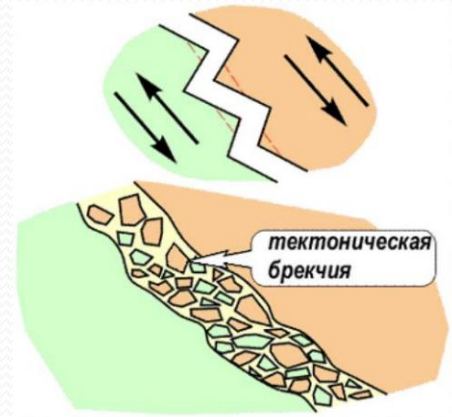
Многомасштабность разломов



Геологический разлом

Остановимся теперь кратко на особенностях строения смесителей сбросов и взбросов, так как именно моделированию разломам этого типа будет уделено основное внимание в данном отчёте.

Сбросы и взбросы образуются при растяжении земной коры. Первоначально возникают трещины отрыва, для которых характерны неровные стенки и наличие между ними некоторого пустотного пространства. При смещении блоков неровности скалываются, а обломки заполняют промежутки между стенками трещинами. Впоследствии обломки цементируются более мелкими продуктами истирания и минералами, отложившимися из гидротермальных растворов.



Современные подходы к геомеханическому моделированию разломов

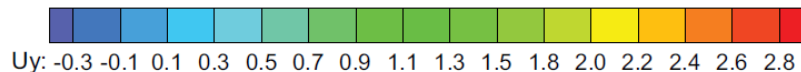
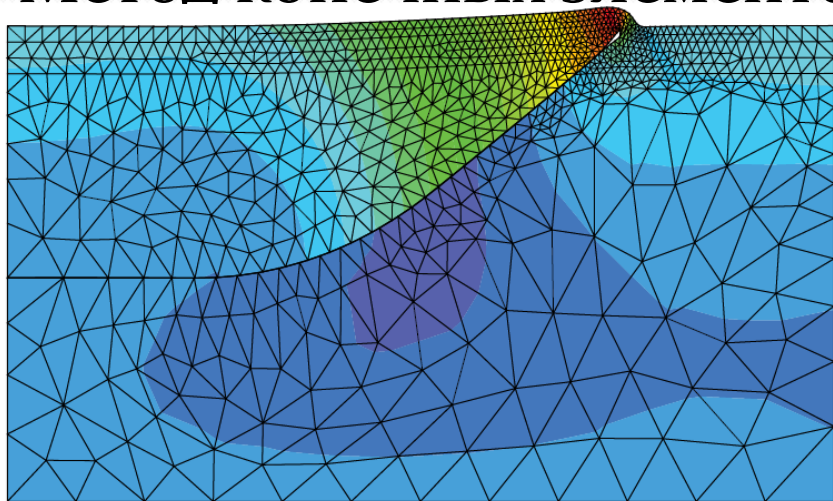
Прямое моделирование геомеханических процессов в последние годы становится всё более и более популярным средством в структурной геологии (см. обзор в статье (Gray et al., 2014)). Действительно, оно позволяет получить фундаментальное понимание образования, развития и геометрических особенностей сложных геологических процессов. Среди богатого разнообразия этих подходов наибольшее распространение получили метод конечных элементов и метод дискретных элементов. Геологов, в первую очередь, интересует поведение природных систем после начала формирования нарушений сплошности слоёв. В частности, разломы после начала своего формирования начинают трансформироваться и перемещаться в пространстве, непрерывно меняя состояние системы. Такой тип поведения геологических объектов является кинематически разрывным по своей природе и, как правило, обладает большими смещениями и деформациями. Накопление больших деформаций обуславливает значительные искажения сеток, используемых при моделировании в рамках механики сплошных сред, что существенно затрудняет обеспечение сходимости так получаемых решений к очным. Именно необходимость корректного моделирования таких значительных смещений/деформаций является основной проблемой при численном моделировании геомеханических процессов.

Численные методы предназначены для изучения геологических процессов, которые слишком сложны для упрощённого аналитического описания. Механическое поведение геологического материала может моделироваться как с континуальной, так и с дискретной точек зрения. Остановимся кратко на основных достоинствах и недостатках каждого из этих подходов.

Современные подходы к геомеханическому моделированию разломов

Континуальный подход:

Метод конечных элементов и конечных разностей



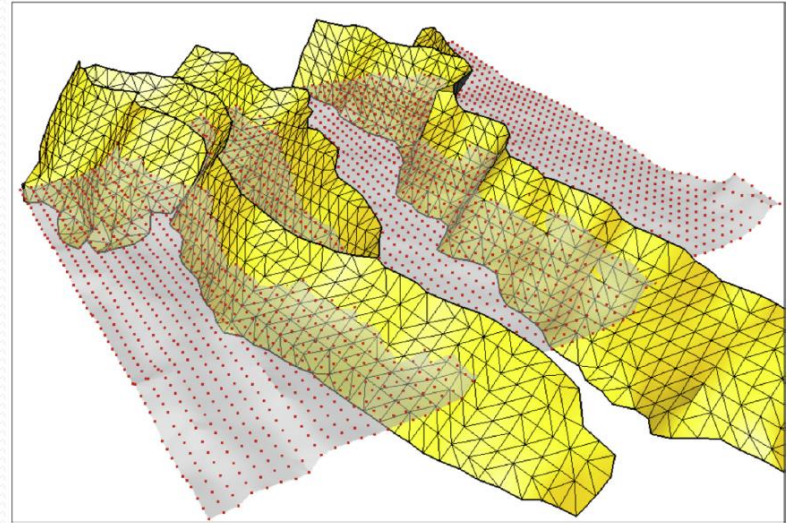
Типичное конечно-элементное представление геологической структуры с заранее заданной поверхностью скольжения. Цвета соответствуют смещениям выделенных элементов в вертикальном направлении (Sanz, 2008)/

Современные подходы к геомеханическому моделированию разломов

Континуальный подход:

Метод граничных
элементов

аппроксимируем только
границы



Современные подходы к геомеханическому моделированию разломов

Континуальный подход:

Вычисления с использованием континуальной модели выполняются в виде серии временных шагов. На каждом шаге сетка перемещается под воздействием задаваемых нагрузок и/или смещений на границах модели.

Континуальные методы предполагают, что моделируемые процессы и свойства могут быть описаны с использованием *гладко изменяющихся полей (скалярных, векторных, тензорных)*. Три упомянутых класса континуальных методов (метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод граничных элементов) работают с этими континуумами с разных позиций. Методы конечных разностей и конечных элементов используют похожие стратегии построения сеток во всей расчётной области.

Основной недостаток континуальных методов на современном уровне их развития заключается в неспособности описывать процессы с большими деформациями, и, следовательно, образование разрывов в среде. Все они, как правило, требуют априорного введения поверхности разрыва с последующим моделированием её эволюции.

Современные подходы к геомеханическому моделированию разломов

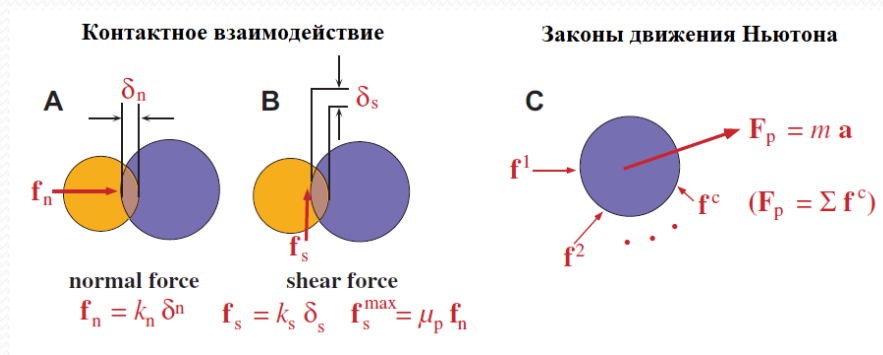
Метод дискретных элементов (из группы методов основанных на динамике частиц):

Методы динамики частиц адаптированы из молекулярной динамики и используют не сетки, а именно частицы. Этот класс подходов относится к группе так называемых **бессеточных методов частиц**. При этом все частицы отличаются друг от друга и, что особенно важно для класса исследуемых нами задач геомеханики, **не накладывается никаких специальных требований на непрерывность свойств при переходе от частицы к частице**. Каждой частице приписываются материальные свойства (размер, плотность, упругие модули и др.), а также определяется межчастичное взаимодействие путём определения трения и межчастичных связей, таких как сдвиговые и сжимающие/растягивающие усилия и др. Взаимодействие частиц и результирующие силы вычисляются и обновляются попарно во время моделирования. Ускорение, скорости и перемещения частиц вычисляются на каждом состоянии системы путём применения законов Ньютона.

Современные подходы к геомеханическому моделированию разломов

Метод дискретных элементов (из группы методов основанных на динамике частиц):

Наиболее распространённой формой частиц являются двумерные и трёхмерные сферы. Общее поведение системы определяется силами межчастичного взаимодействия, которые могут описывать жёсткие сферы, мягкие сферы, нелинейные законы притяжения – отталкивания и другие. **Основное достоинство методов частиц заключается в том, что разрывы среды могут возникать и развиваться естественным образом в процессе выполнения расчётов.** Кроме того, ввиду отсутствия сеток, отпадают необходимость накладывания ограничений на смещения/деформации. И, наконец, так как свойства частиц и законы их взаимодействия могут различаться в разных точках расчётной области, открывается возможность изучать поведение композитных материалов, которыми и являются все геологические среды

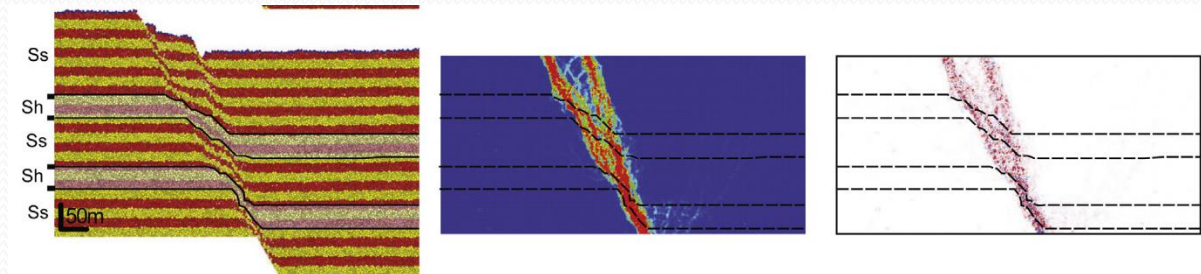
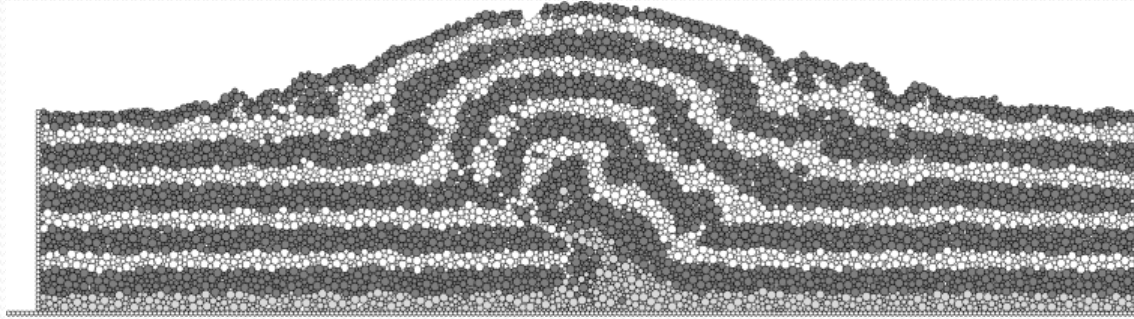


Генерация сетки для описания зоны разлома

Как уже было отмечено, для моделирования геомеханического процесса формирования зоны разлома используется *бессеточный* метод, основанный на использовании дискретных элементов. Но при пересчёте полученных в результате моделирования деформаций, определяемых смещениями дискретных элементов в механические параметры необходимо задавать их на весьма мелкой сетке. Для этого мы используем при проведении моделирования сферические частицы достаточно маленького радиуса. Однако при последующем моделировании формирования и распространения сейсмического волнового поля вне зоны разлома можно использовать уже сетки с более крупным шагом путём объединения в один несколько дискретных элементов.

Как показали наши предварительные исследования, вполне достаточно иметь сетку с пространственным шагом в одну десятую доминирующей длины волны. Таким образом, мы вновь приходим к использованию конечно-разностных методов, базирующихся на сетках с локальным пространственно-временным измельчением.

Геомеханическое моделирование: метод дискретных элементов



Hardy S., and Finch E. Mechanical stratigraphy and the transition from trishear to kink-band fault-propagation fold forms above blind basement thrust faults: A discrete-element study // Marine and Petroleum Geology. - 2007. - V. 24. - pp. 75-90.

Botter C., et al. From mechanical modeling to seismic imaging of faults: A synthetic workflow to study the impact of faults on seismic // Marine and Petroleum Geology. - 2014. - V. 57. - pp. 187-207.

Метод дискретных элементов

$$M^j \frac{d^2 \bar{x}^j}{dt^2} = \sum_{i \in J(i)} \left(\bar{F}_{ji}^n(\bar{x}^i, \bar{x}^j) + \bar{F}_{ji}^t(\bar{x}^i, \bar{x}^j) \right) - \nu \frac{d\bar{x}^j}{dt}$$

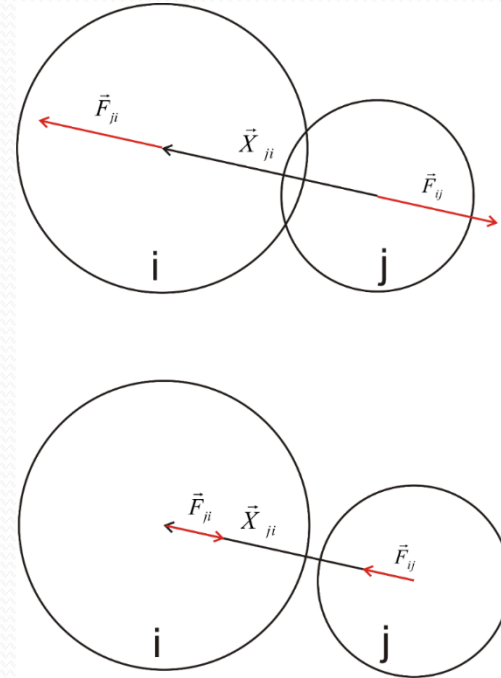
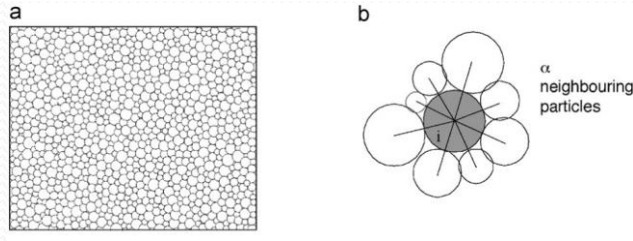
В случае упругого взаимодействия силы не зависят явным образом от скоростей частиц, а только от их координат. Явная зависимость от скорости проявляется только в диссипативном члене. Следует также отметить, что согласно приведенным формулам взаимодействие между частицами локальное, то есть частицы взаимодействуют если расстояние между ними не превосходит допустимой длины связи r_0 . Максимальное число частиц, взаимодействующих с заданной частицей номер i можно оценить, зная максимальный и минимальный радиусы частиц в системе

$$\dim(J(i)) \leq \frac{2\pi}{\arctg\left(\frac{2R_m}{R_M + R_m + r_0}\right)},$$

Метод дискретных элементов: интегрирование уравнений движения

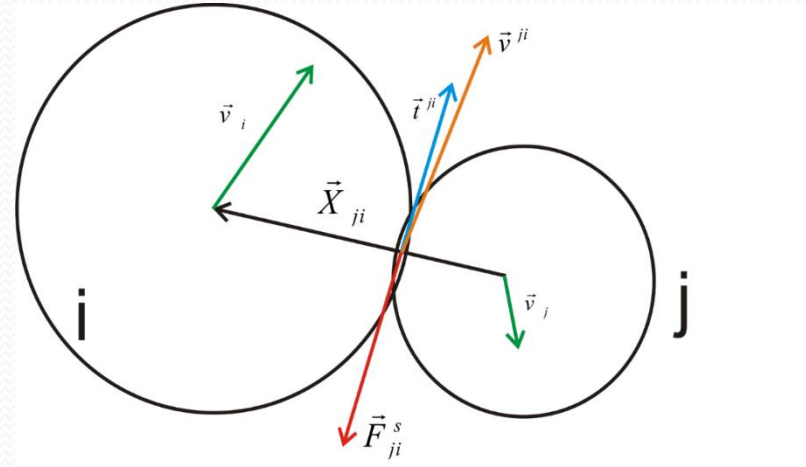
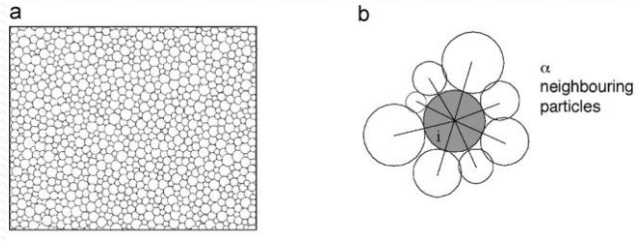
Взаимодействие между элементами (частицами) является ключевым параметром, определяющим макромасштабные свойства среды. При этом целесообразно выделять два типа взаимодействия и связанные с ними силы. Нормальные силы – связанные с отталкиванием (притягиванием) частиц, описываемые упругими, вязкоупругим или пластическими деформациями/напряжениями. Касательные силы, в основном силы трения, обусловленные относительным движением частиц, включая как скольжение, так и вращение. В рамках данной работы, сплошная среда моделируется системой дискретных элементов, в которой вращением пренебрегается. В используемой модели мы учитываем упругое взаимодействие между дискретными элементами и трение (покоя и скольжения) между ними

Метод дискретных элементов: нормальные силы



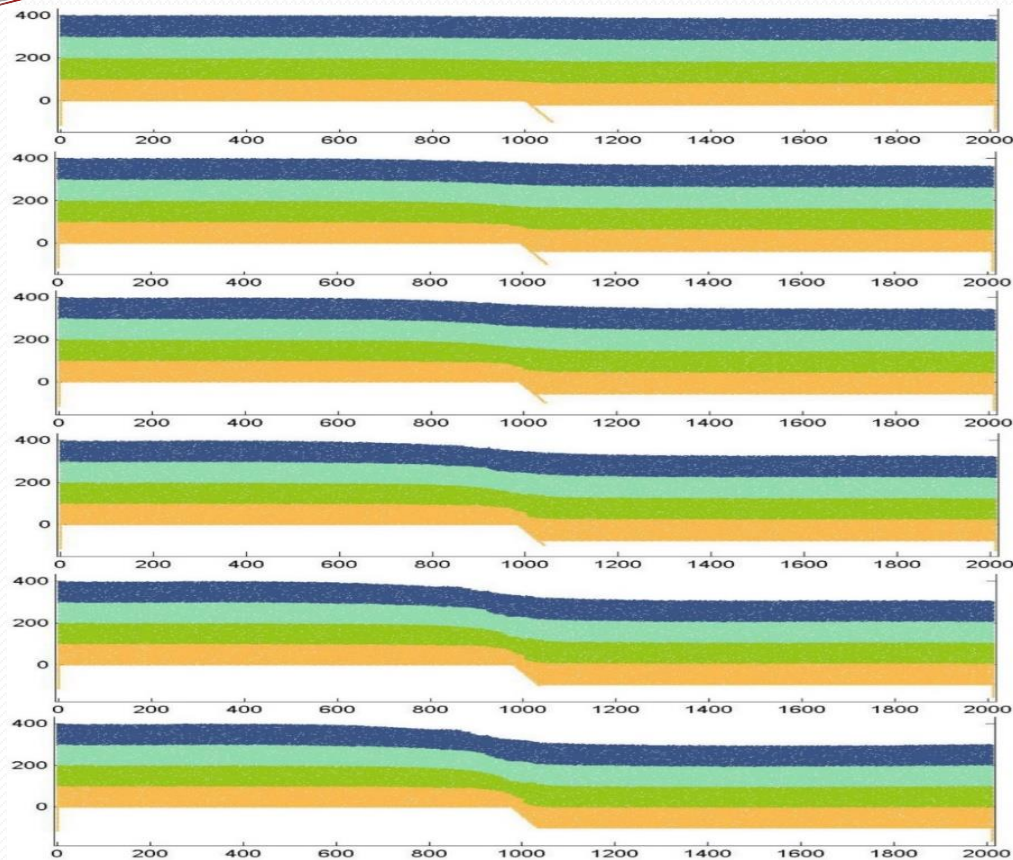
Метод дискретных элементов

Метод дискретных элементов: касательные силы



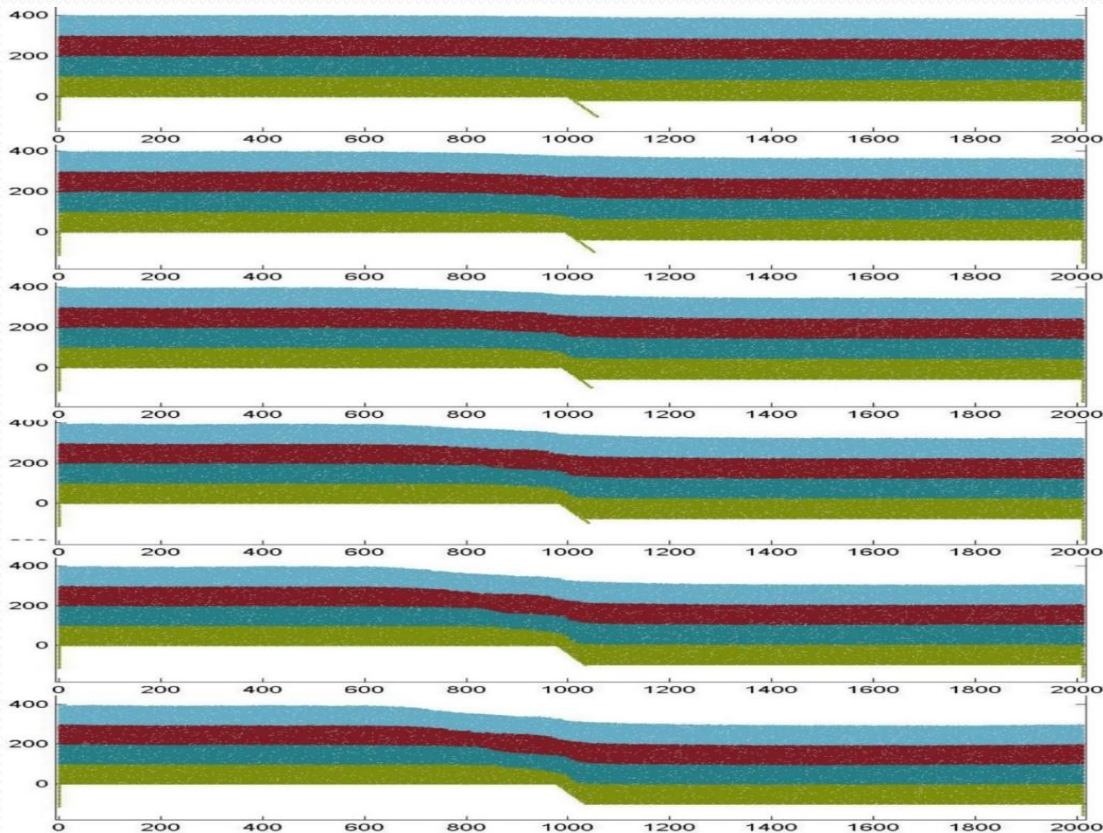
Метод дискретных элементов

Численные эксперименты



Условное деление на слои для иллюстрации смещений. Каждый слой имел мощность 100 метров в невозмущенном состоянии. Модели среды с коэффициентом динамического трения 0.3, для различных вертикальных смещений: 15, 30, 45, 60, 75 и 90 м.

Численные эксперименты

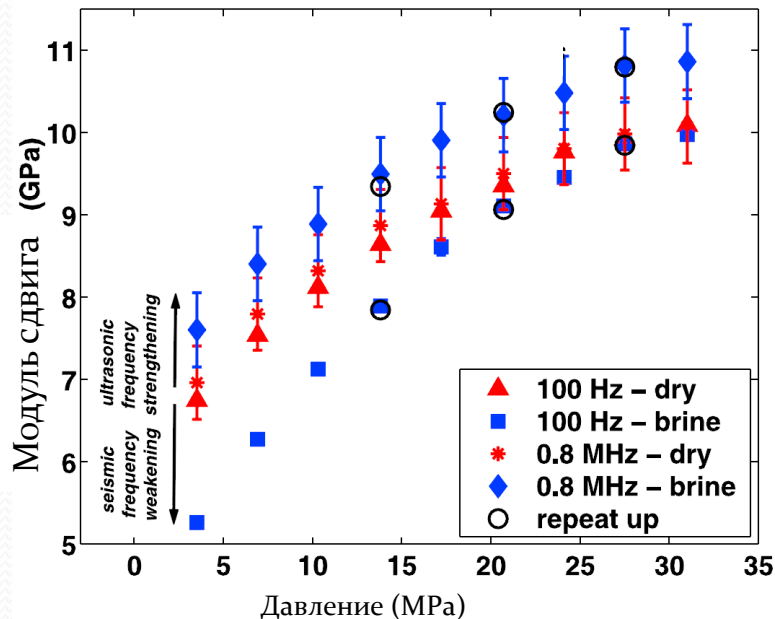


Условное деление на слои для иллюстрации смещений. Каждый слой имел мощность 100 метров в невозмущенном состоянии. Модели среды с коэффициентом динамического трения 0.1, для различных вертикальных смещений: 15, 30, 45, 60, 75 и 90 м

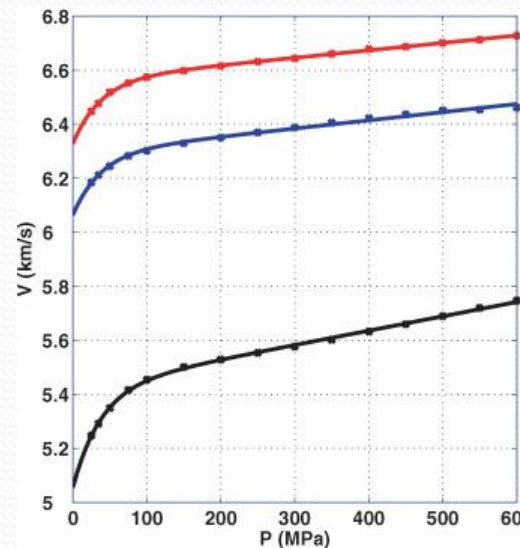
Определение упругих параметров модели – на основе экспериментальных данных

Большие деформации, возникающие в окрестности разломов приводят к необратимым структурными и морфологическим изменениям породы – трещинообразованию, возникновению полос деформаций и пр. Среди работ, посвященных анализу связи больших деформаций с физическими свойствами пород можно выделить: [[Holt et al., 2008](#)] в которой исследуются влияние объемных деформаций на образцы на сантиметровом масштабе, в работе [[Skurtveit et al., 2013](#)] приводится исследование влияния больших объемных деформаций на возникновение локальных зон пониженной пористости и их влияние на скорости сейсмических волн в ультразвуковом диапазоне частот, в работе [[Hatchell, Bourne, 2005](#)] приводится анализ влияние понижения внешних нагрузок на процесс трещинообразования и снижения скоростей сейсмических волн на масштабе резервуара. Несмотря на то, что в приведенных работах рассматриваются процессы на принципиально разных масштабах качественно они достаточно близки – повышение внешних нагрузок, приводящее к отрицательным объемным деформациям (уплотнение), характеризуется понижением пористости, повышением плотности и скоростей сейсмических волн, снижение внешних нагрузок (растяжение), обуславливает положительные деформации и характеризуется трещинообразованием и снижением скоростей сейсмических волн.

Определение упругих параметров модели – на основе экспериментальных данных



Adam L., et al. Seismic wave attenuation in carbonates // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. - 2009. - V. 114. - N. B6. - pp. n/a-n/a.



Shapiro S., and Kaselow A. Porosity and elastic anisotropy of rocks under tectonic stress and pore-pressure changes // Geophysics. - 2005. - V. 70. - N. 5. - pp. N27-N38.

Определение упругих параметров модели – на основе экспериментальных данных

Результатом моделирования методом дискретных элементов являются положения элементов после формирования разлом, как следствие для каждого элемента может быть вычислено смещение, после чего проводится расчет деформаций. В наших исследованиях смещения вычислялись для каждого элемента, после чего они осреднялись внутри ячейки регулярной сетки и по сеточным значениям смещений вычислялись деформации.

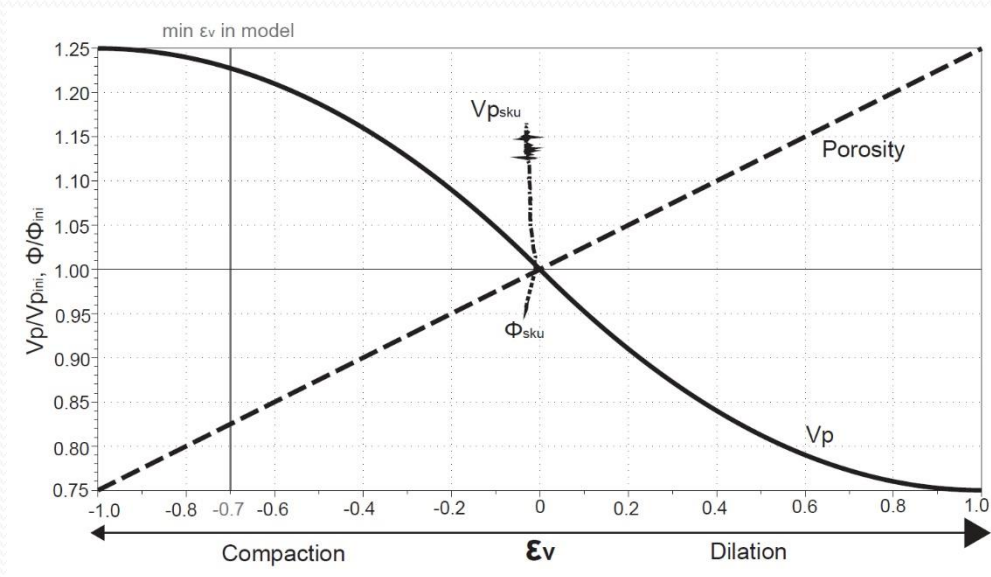
Основной идеей, лежащей в основе, оценок параметров среды лежит изменение пористости в результате больших деформаций среды. Следуя [[Botter et al., 2014](#)] мы рассматриваем следующий закон, описывающий связь пористости с большими деформациями:

$$\rho = \rho_0(0.25\varepsilon + 1)$$

Изменение скорости продольной волны при этом описывается законом:

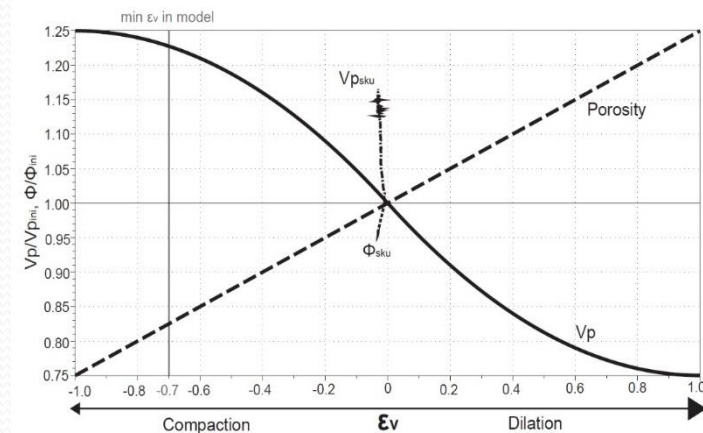
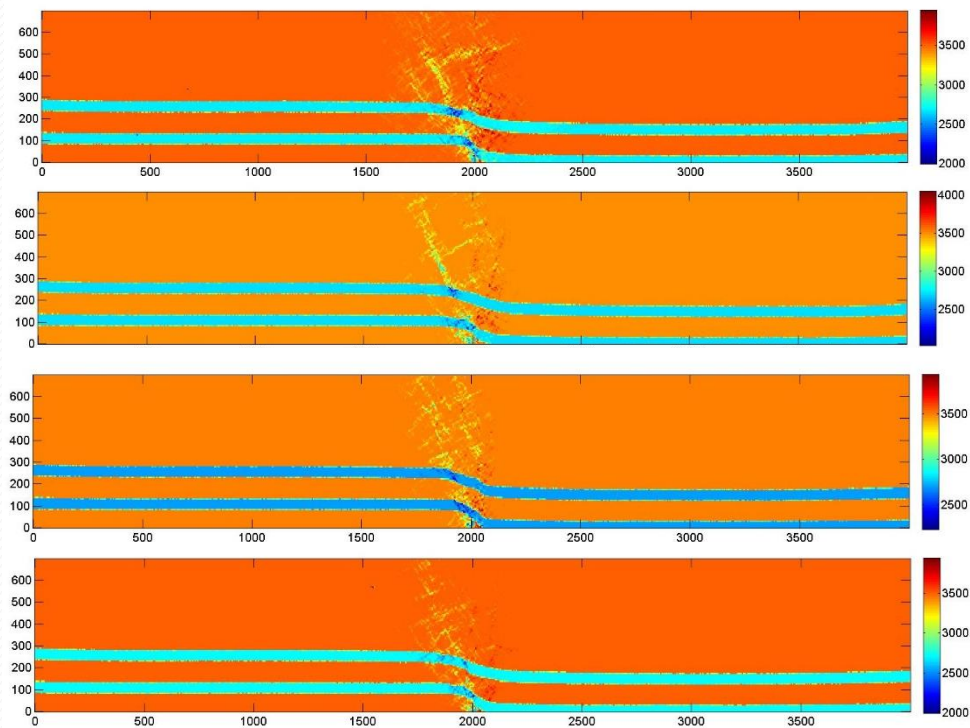
$$V_P = \begin{cases} V_P^0(-0.25\varepsilon^2 - 0.5\varepsilon + 1), & -1 \leq \varepsilon < 0 \\ V_P^0(0.25\varepsilon^2 - 0.5\varepsilon + 1), & 0 \leq \varepsilon \leq 1 \end{cases}$$

Определение упругих параметров модели – на основе экспериментальных данных



Botter C., et al. From mechanical modeling to seismic imaging of faults: A synthetic workflow to study the impact of faults on seismic // Marine and Petroleum Geology. - 2014. - V. 57. - pp. 187-207.

Определение упругих параметров модели – на основе экспериментальных данных



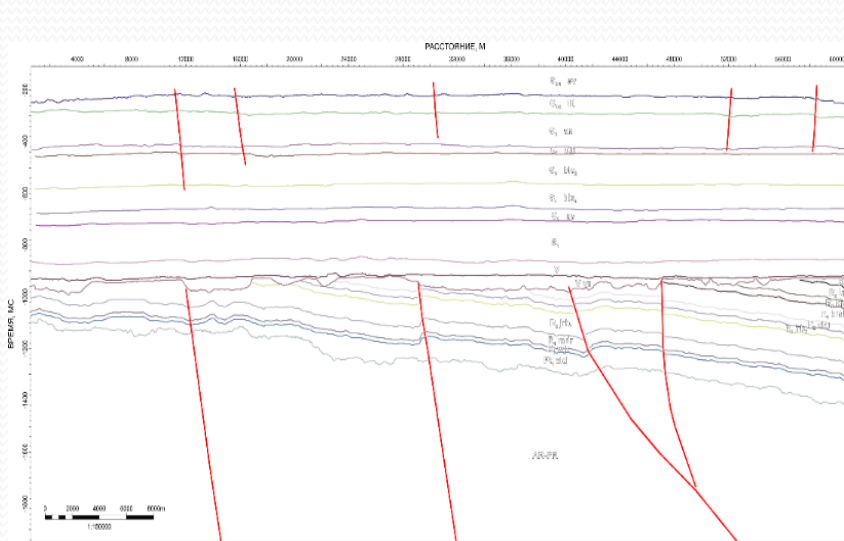
Модель среды

Как уже было отмечено, для верификации разработанного метода реконструкции рассеивающих объектов с использованием Гауссовых пучков на основе переданных нам специалистами ООО «РН КрасноярскНИПИнефть» реальных временных разрезов мы построили двумерную сейсмогеологическую модель. В эту модель помимо слоёв с различной геометрией границ мы включили три разлома:

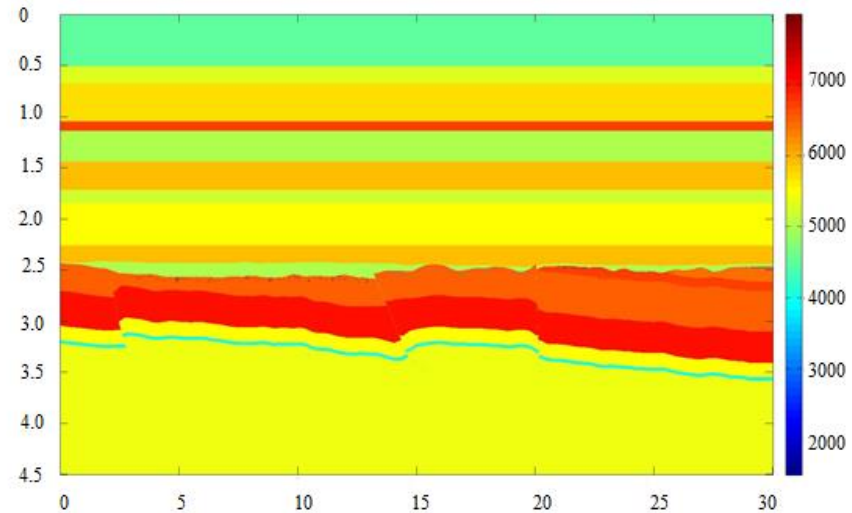
- взброс\надвиг на горизонтальном расстоянии примерно 2.5 км от левого края модели и простирающийся на глубинах примерно 2.5 км – 3.2 км;
- взброс\надвиг на горизонтальном расстоянии примерно 15 км от левого края модели, простирающийся на глубинах примерно 2.5 км до 3.2 км (Рис.3.2.а);
- субвертикальный сброс на горизонтальном расстоянии примерно 20 км от левого края модели (Рис.3.2.б).

Разломы в верхней части разреза было решено не рассматривать, так как мы не обнаружили их подтверждения в структуре границ.

Модель среды



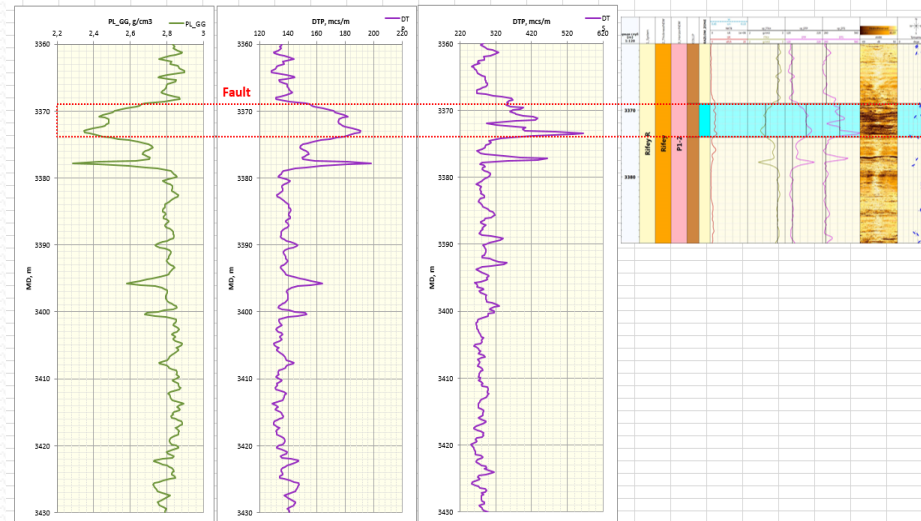
Геометрия границ



Скорость продольных волн

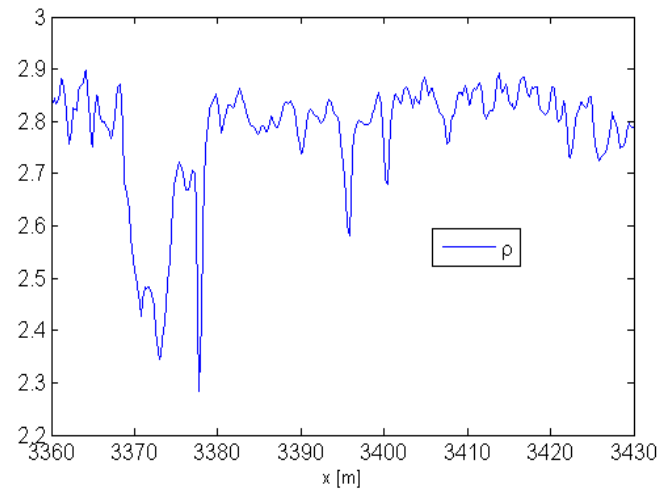
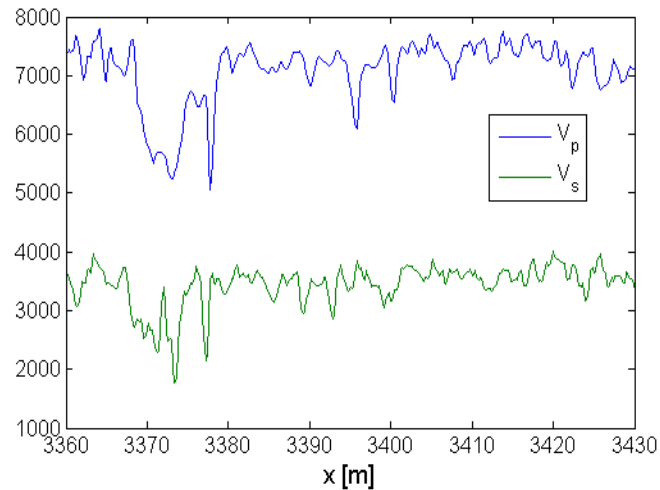
Статистическое моделирование внутренней структуры зоны разлома по данным горизонтального бурения.

Пространство между берегами разлома заполнено мелкомасштабной структурой (тектоническая брекчия), которая образуется при перемещении противоположных сторон разлома друг относительно друга. Для определения статистических параметров этой мелкомасштабной среды мы воспользовались предоставленными нами ООО «РН КрасноярскНИПИнефть» результатами каротажа в горизонтальной скважине, пересекающей аналогичный геологический разлом. Как видно из приведённых результатов каротажа, ширина разлома составляет примерно пять метров и именно это значение было приписано к каждому из разломов, вошедших в целевой интервал исследования (см. Приложение №3).



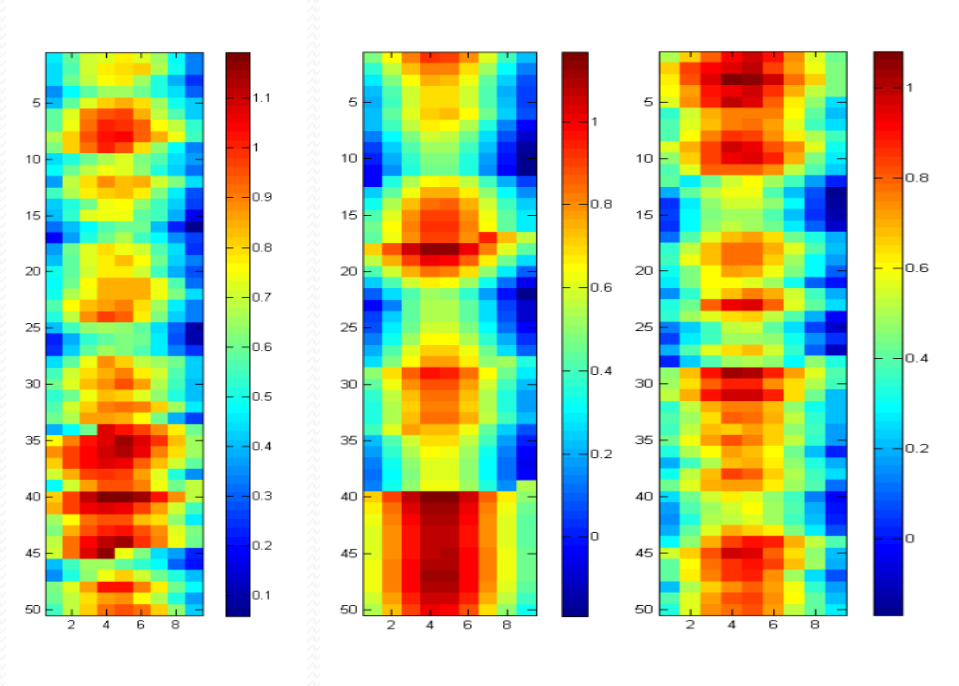
Статистическое моделирование внутренней структуры зон разлома по данным горизонтального бурения.

Для статистического моделирования внутренней структуры разлома использовались результаты статистического анализа данных, измеренных в одной скважине. Измеренные данные для V_p , V_s и ρ показаны на рисунках. Специфика данной задачи заключается в том, что смещение берегов разлома не очень велико, поэтому достаточно было обеспечить корректное слияние свойств разлома со свойствами окружающей среды с одной из сторон, например, левой.



Статистическое моделирование внутренней структуры зон разлома по данным горизонтального бурения.

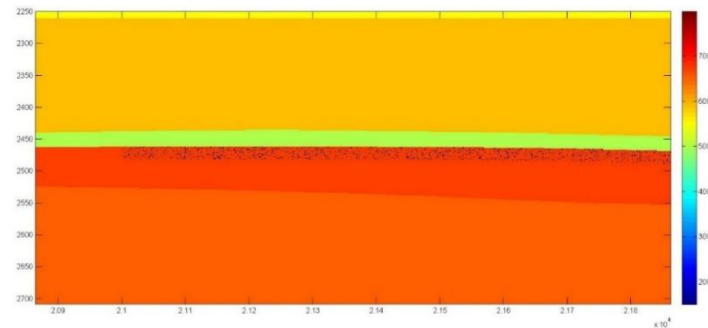
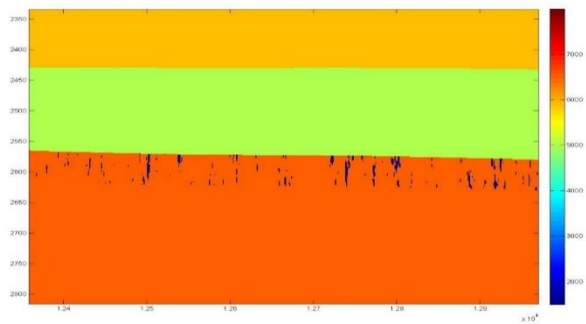
Для моделирования реализаций статистически однородного вещественного случайного поля Y использовался метод, основанный на спектральном разложении случайных полей [Sabelfeld, 1991].



Пример реализации построенной статистической функции для скорости продольных и поперечных волн и плотности среды (слева направо), используемой для заполнения разломов.

Статистическое моделирование кавернозных зон и зон повышенной трещиноватости

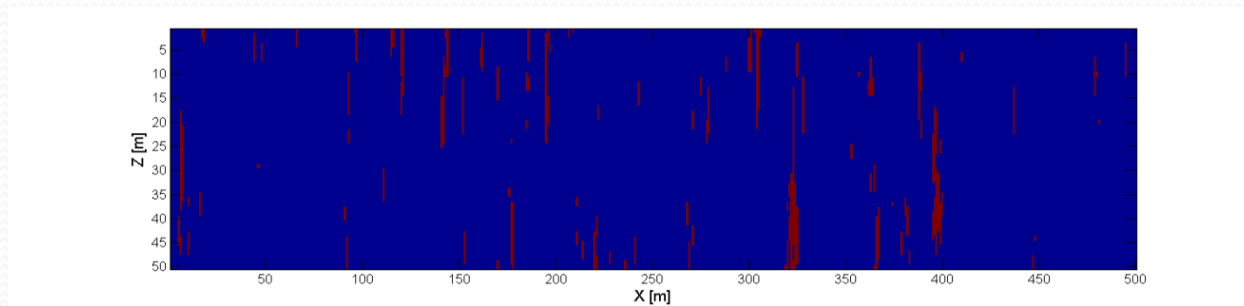
Как уже было отмечено, помимо разломов, в модель были внедрены зоны повышенной трещиноватости и зоны повышенной кавернозности. Все они располагались вдоль верхней границы слоя, начинающегося примерно на глубине 2.5 км.



Для построения статистического ансамбля реализаций индикаторных случайных полей использовался метод усеченного Гауссова распределения, основанный на подходе, предложенном в [[Kyriakidis et al., 1999](#)]

Статистическое моделирование кавернозных зон и зон повышенной трещиноватости

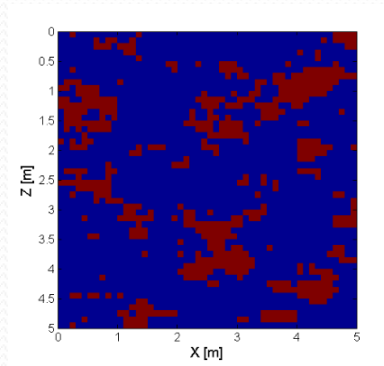
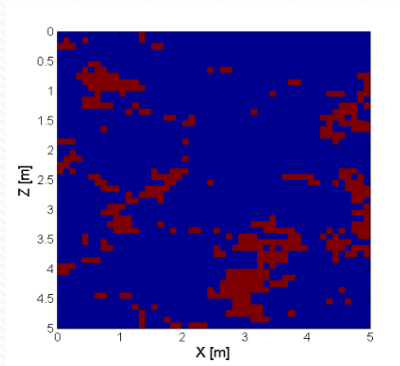
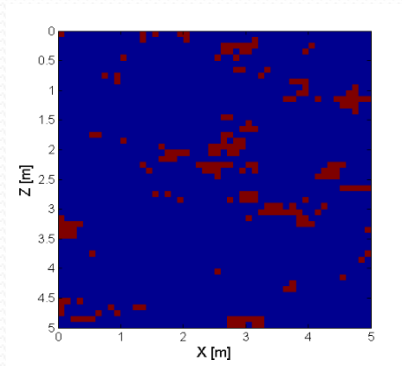
Трещины располагались с левого края модели между первым и третьим разломами. При этом между первым и вторым разломом располагались флюидонасыщенные трещины со скоростями распространения продольных и поперечных волн



Пример фрагмента реализации трещиноватой зоны, КП=5%.

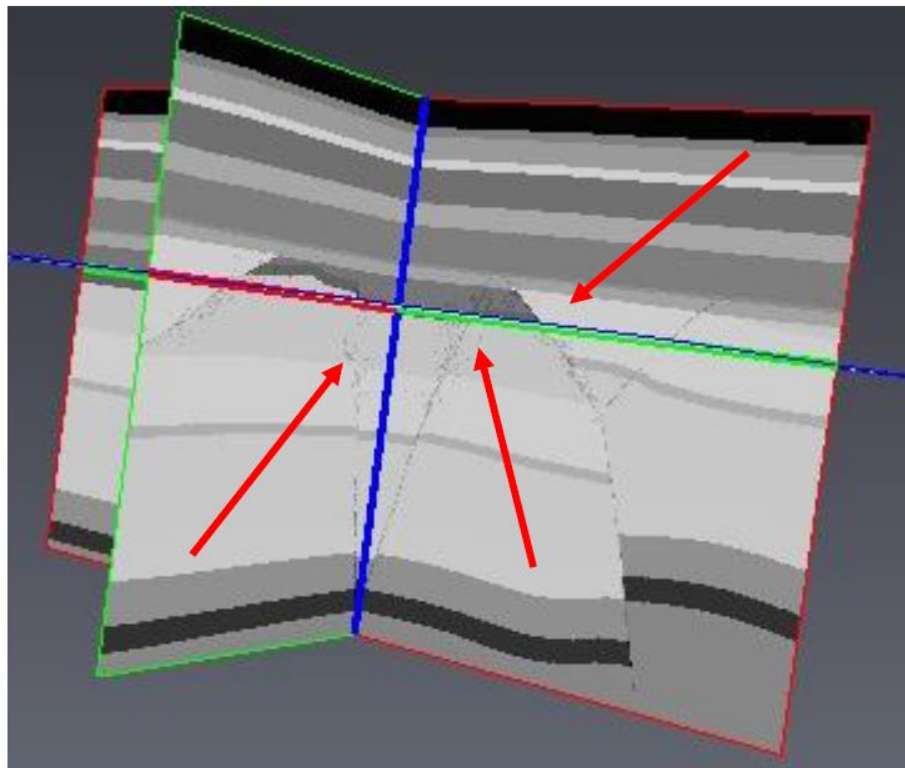
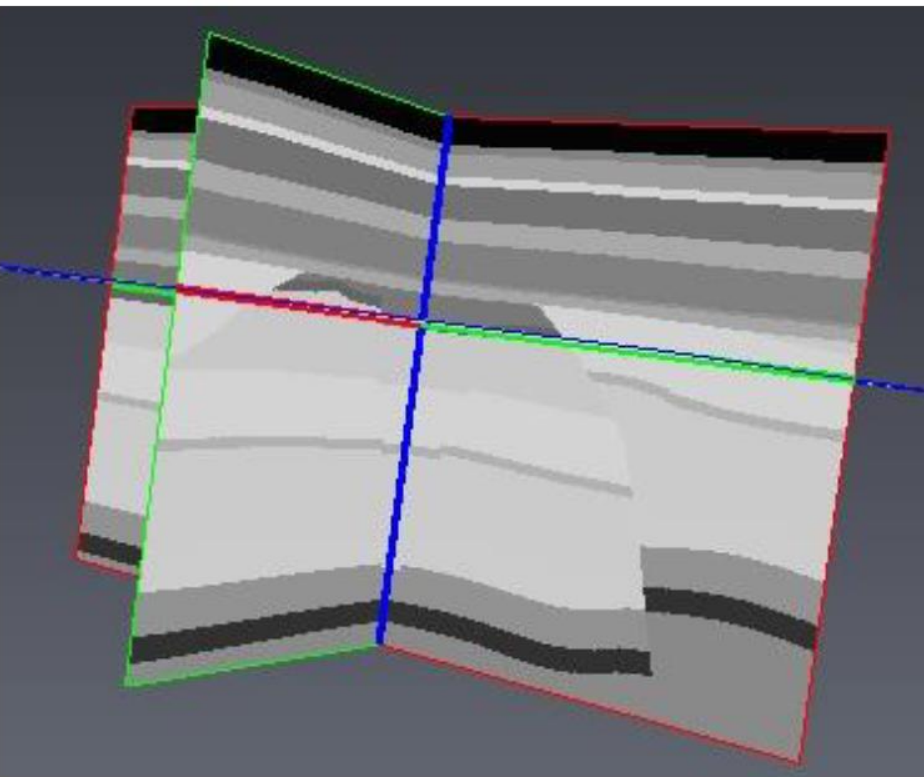
Статистическое моделирование кавернозных зон и зон повышенной трещиноватости

Мы поместили зоны повышенной кавернозности по верхней границе этого слоя, моделирующего рифей, то есть на глубине примерно 2.5 км, и расположили их правее третьего разлома. Они располагаются слева направо с повышением коэффициента пустотности 10%, 15%, 20%.



Пример реализации распределения кавернозности (случайное поле J) внутри квадрата 5м x 5м. Коэффициент пустотности слева направо: 10%, 15%, 20%.

Построение трёхмерной геологической модели: модель со сложной структурой разломов



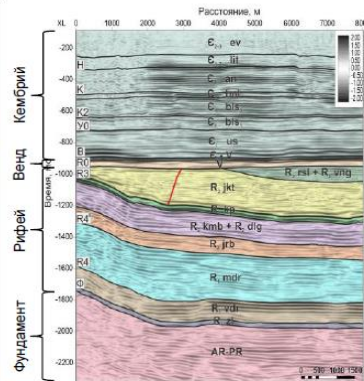
- Создать реалистичную трёхмерную сейсмогеологическую модель, содержащую основные геологические элементы некоторых лицензионных участков;
- Провести полномасштабное численное моделирование 3D сейсморазведки;
- Провести обработку с целью выделения скоплений мелкомасштабных геологических объектов.

3D синтетика

Выкопировка геологической карты предвендской эрозионной поверхности



Сейсмический разрез



Основа моделирования – Куямбинское НГКМ

- В качестве основы для моделирования использовались сейсмогеологические свойства Куямбинского ЛУ.
- На основе выполненной переинтерпретации небольшого участка данных сейсморазведки 3D был построен каркас трехмерной модели.
- Уprungие параметры среды построены исходя из данных ГИС на месторождении.
- Модель была усложнена внедрением неоднородностей в виде зон трещиноватости и кавернозности. Неоднородности располагались вдоль границы соответствующей предвендской эрозионной поверхности.

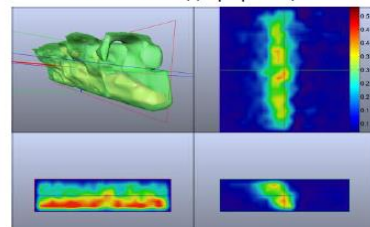
РН-КРАСНОЯРСКИЙ ПИНЕФТЬ

Геомеханическое моделирование

Макромасштаб

- Моделирование в трехмерной постановке проводилось для определения и анализа распределения деформаций в горизонтальном направлении вдоль разлома.

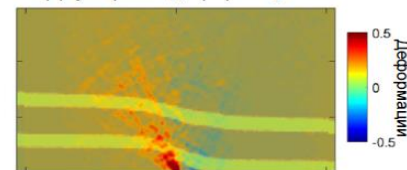
Объемные деформации



Мезомасштаб

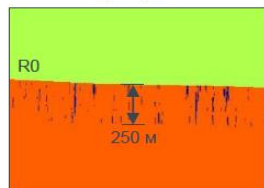
- Моделирования распределения деформаций в зоне, окружающей разлом с разрешением до 2 м проводились серии численных экспериментов в двумерной постановке.

Двумерные деформации

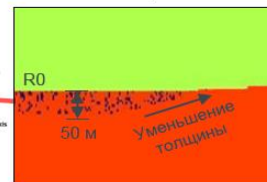


Микронеоднородности

Трещины



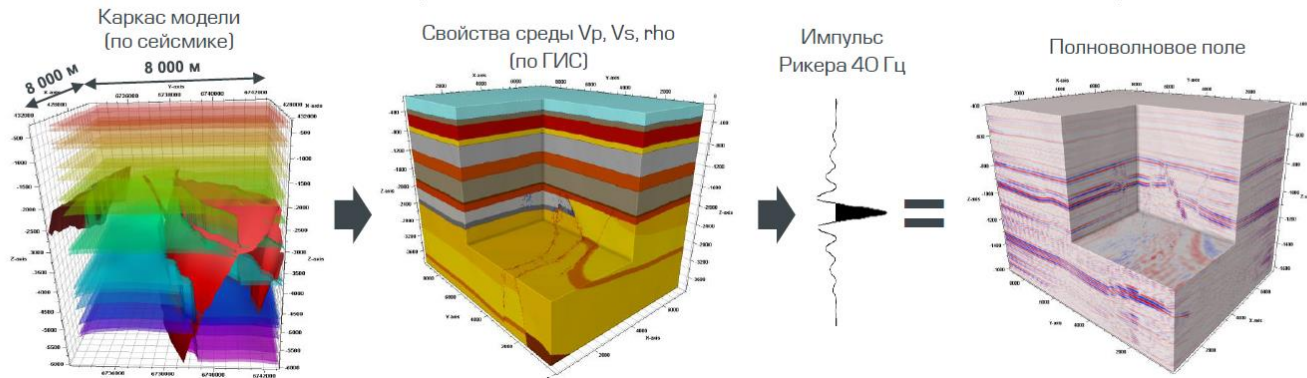
Каверны



Разломы

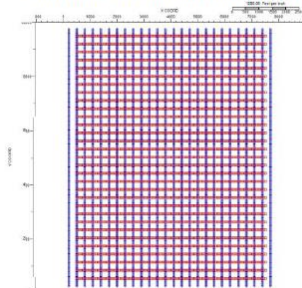
3D синтетика

Технологическая цепочка

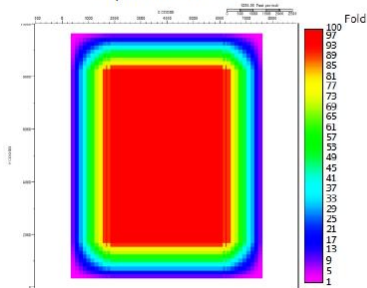


Параметры системы наблюдений

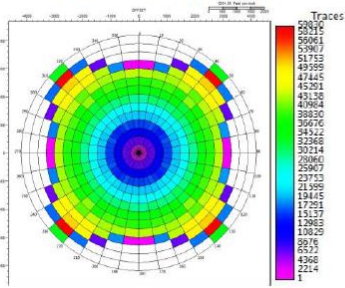
Расположение линий ПВ и ПП



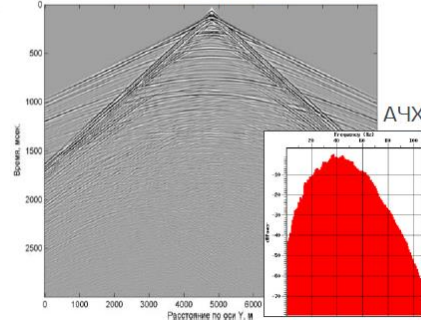
Кратность ОГТ



Роза-диаграмма удалений



Сейсмограмма ОПВ



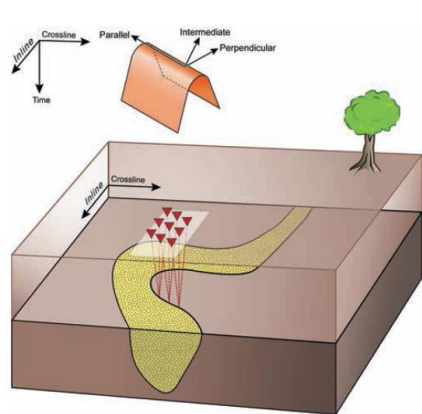
3D синтетика: некоторые параметры

1. Размер апертуры: 8 км x 10 км
2. Глубина модели: 6 км
3. Приёмники: трёхкомпонентные с равномерным шагом 25 м, всего 128 000 приёмников.
4. Источники: вертикальная сила, импульс Рикера 40 Гц, на линиях через 50 м, линии друг от друга на 300 м, всего 5280 источников.
5. Длина записи: 4 сек
6. Шаг дискретизации 2 мс, 2000 отсчётов на трассу.
7. Общий объём: примерно 15 тб

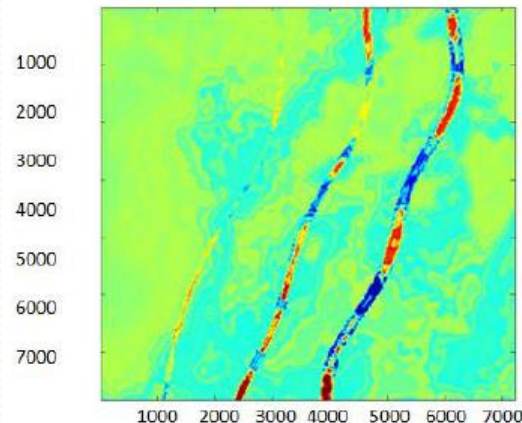
- Создать реалистичную трёхмерную сейсмогеологическую модель, содержащую основные геологические элементы некоторых лицензионных участков;
- Провести полномасштабное численное моделирование 3D сейсморазведки;
- Провести обработку с целью выделения скоплений мелкомасштабных геологических объектов.

Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель

Основное допущение: изучаемая геологическая среда представляется в виде суперпозиции плавной скоростной модели и резко меняющихся локальных включений (дифрагирующих/рассеивающих объектов).

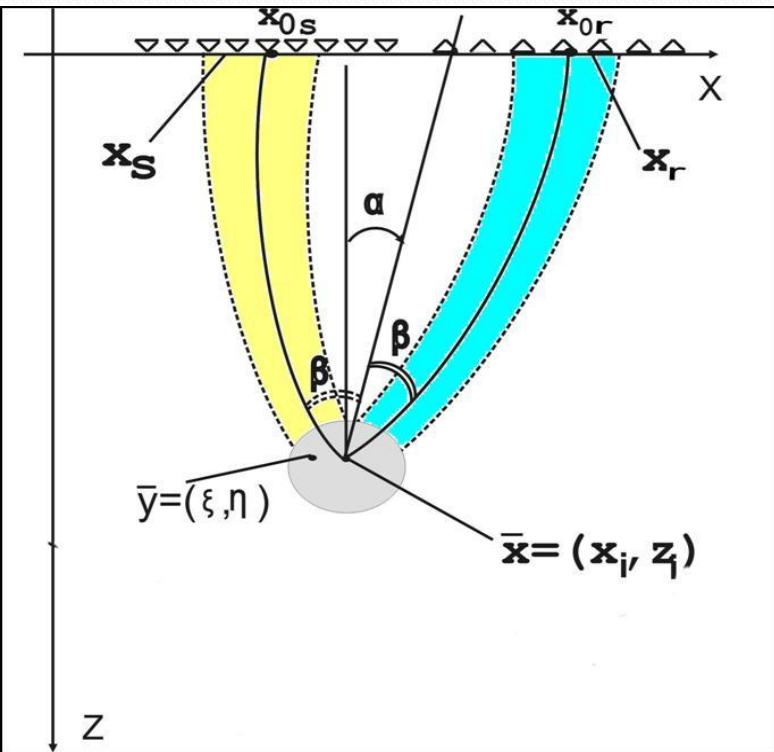


Пример
дифрагирующего
объекта:
погребённое
палерусло



Изображение
дифрагирующего
объекта:
погребённое
палерусло

Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель. Как это работает?



Геометрическая схема
асимметричного суммирования
с использованием следов пары
Гауссовых пучков на системе
наблюдения

Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель. Как это работает?

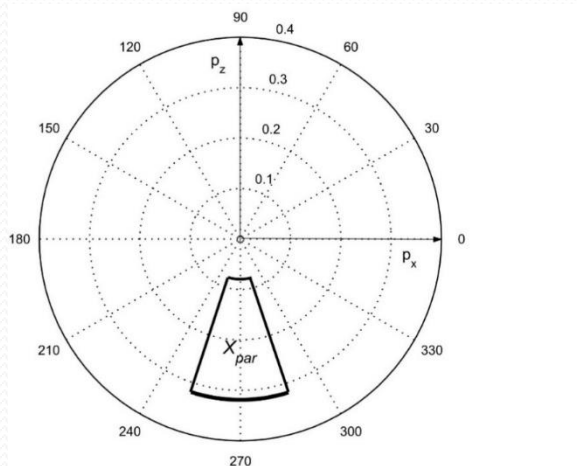
$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} 4 \cos^2 \beta d\alpha \int_{X_s} T_{gb}^s(x_s; \omega; \alpha, \beta) dx_s \int_{X_r} \vec{T}_{gb}^r(x_s; \omega; \alpha, \beta) \vec{\varphi}(x_r, x_s, \omega) dx_r =$$
$$= \iint_{X_{par}(\bar{y})} dp_x dp_z \iint_X \exp\{-i\vec{p} \cdot (\vec{y} - \vec{x})\} f(\vec{x}, \beta) dx dz$$

$$f(\vec{x}, \beta) = 0.5 \left(\lambda_1(\vec{x}) + 2\mu_1(\vec{x}) \cdot \cos^2(2\beta) + (V_P^0)^2 \rho_1(\vec{x}) \right)$$

Почти импеданс. При $\beta=0$ в точности РР-импеданс.

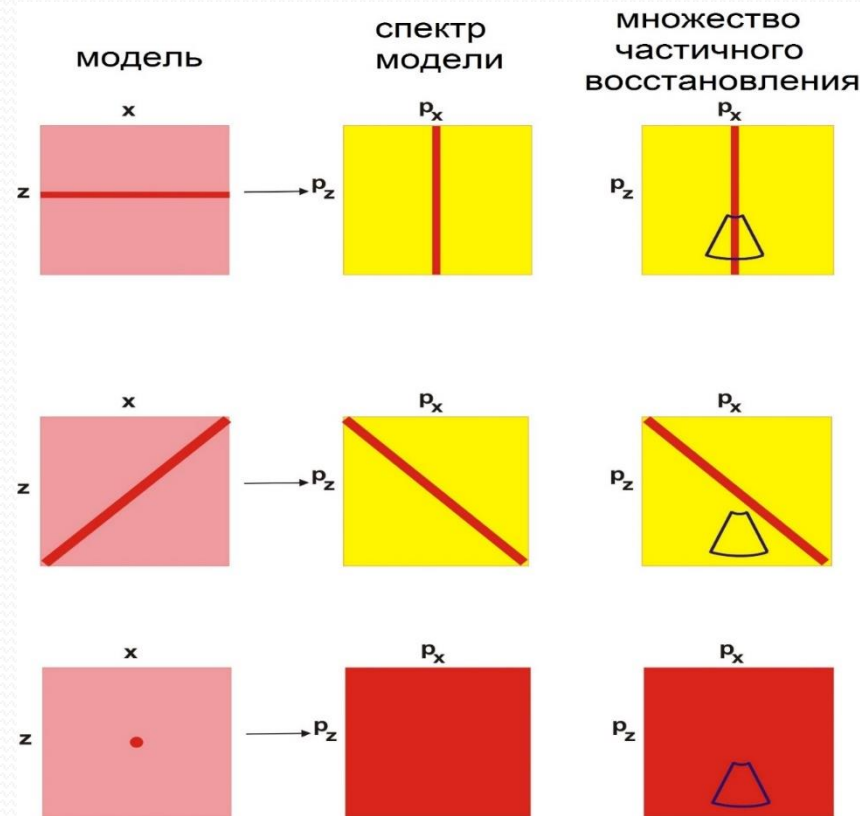
Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель. Как это работает?

$$X_{par}(\bar{y}) = \left\{ (p_x, p_z) : \omega_1 \leq \frac{v_0(\bar{y})\sqrt{p_x^2 + p_z^2}}{2 \cos \beta} \leq \omega_2; \alpha_1 \leq -\arctg \frac{p_x}{p_z} \leq \alpha_2 \right\}$$



Множество частичного восстановления

Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель. Как это работает?

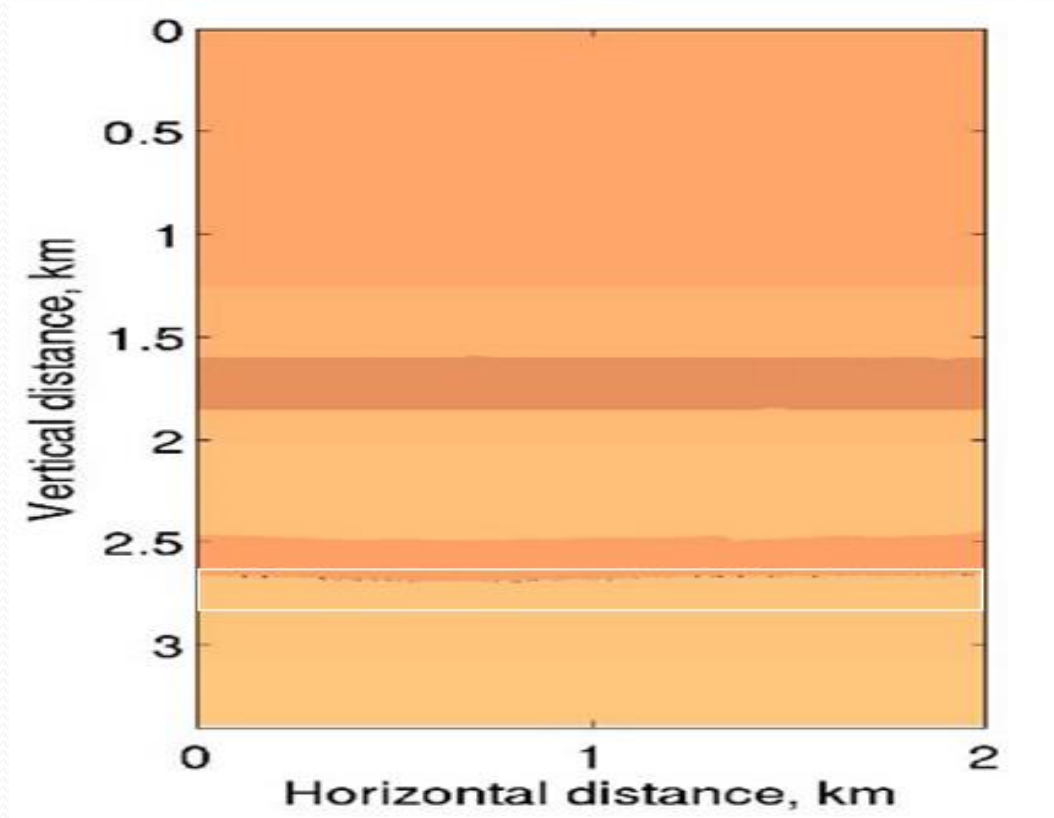


Взаимное расположение пространственного спектра некоторых типичных моделей и множества частичного восстановления.

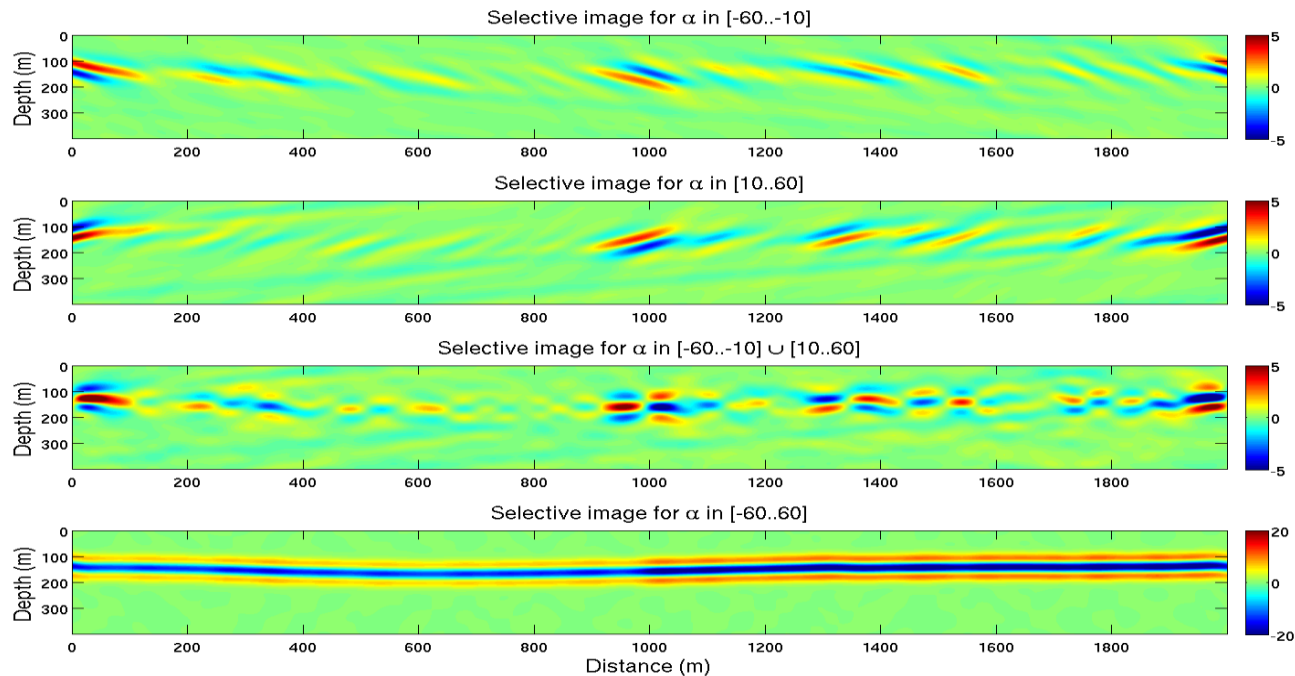
Отсюда делаем вывод:

так как субсейсмические объекты обладают широким пространственным спектром, они будут видны для тех систем наблюдения, для которых регулярные объекты (протяжённые границы) не видны.

Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель. Пример.

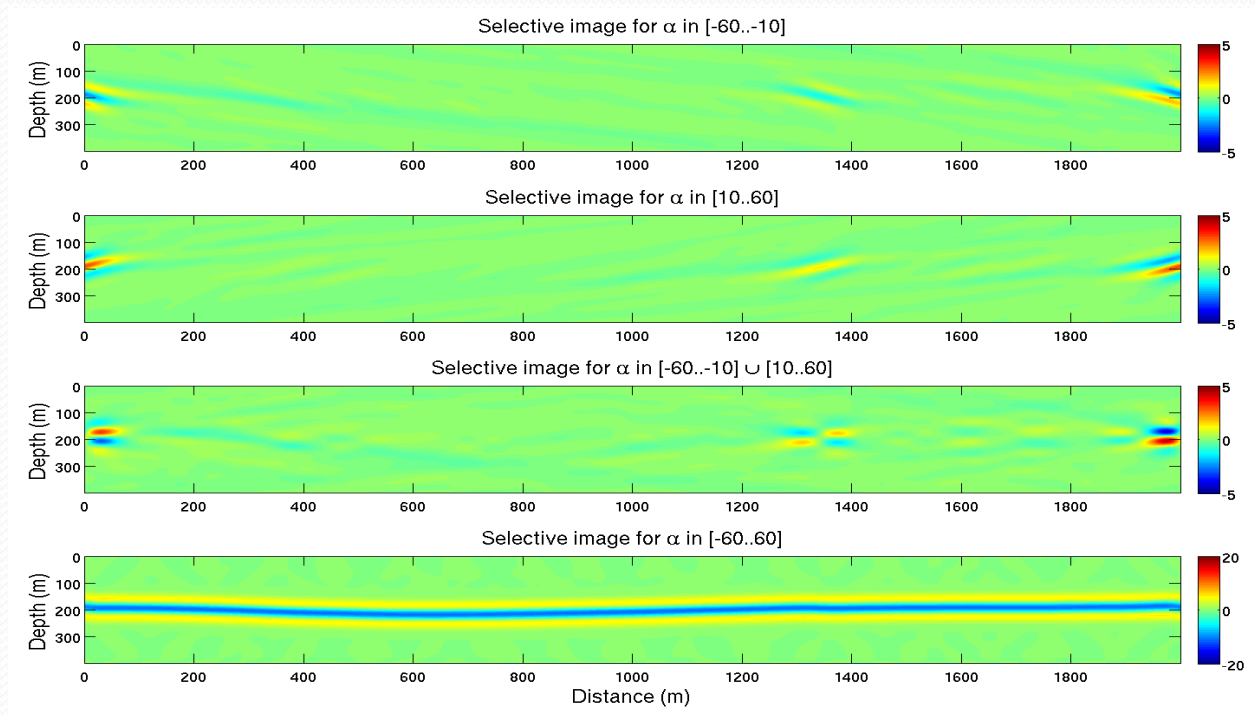


Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель.



Пример: есть микронеоднородности

Алгоритмическая основа метода: заданная глубинная скоростная модель. Пример.



Пример: нет микронеоднородностей

Структура программного обеспечения обработки площадных данных

Входные данные:

1. Сейсмические данные площадной системы наблюдения (3D): файл с данными в формате SEG-Y.
2. Модель средних скоростей (3D): файл со скоростями в формате SEG-Y.
3. Входные параметры для процедуры построения изображений: файл с входными параметрами и их кратким описанием в текстовом формате.

Выходные данные:

1. Изображения в рассеянных волнах для части модели, заданной пользователем: файл с изображением в формате SEG-Y, с заголовками, идентичными заголовкам файла со скоростью.

Интервалы и сетка углов для которых строится изображение.

//-----

a1i=35

минимальный угол наклона, для которого строится изображение (задаётся в градусах)

a2i=50

максимальный угол наклона, для которого строится изображение (задаётся в градусах)

dai=5

шаг по углам наклона, для которых строится изображение (задаётся в градусах)

az1i=0

минимальный структурный азимут, для которого строится изображение (задаётся в градусах)

az2i=315

максимальный структурный азимут, для которого строится изображение (задаётся в градусах)

dazi=45

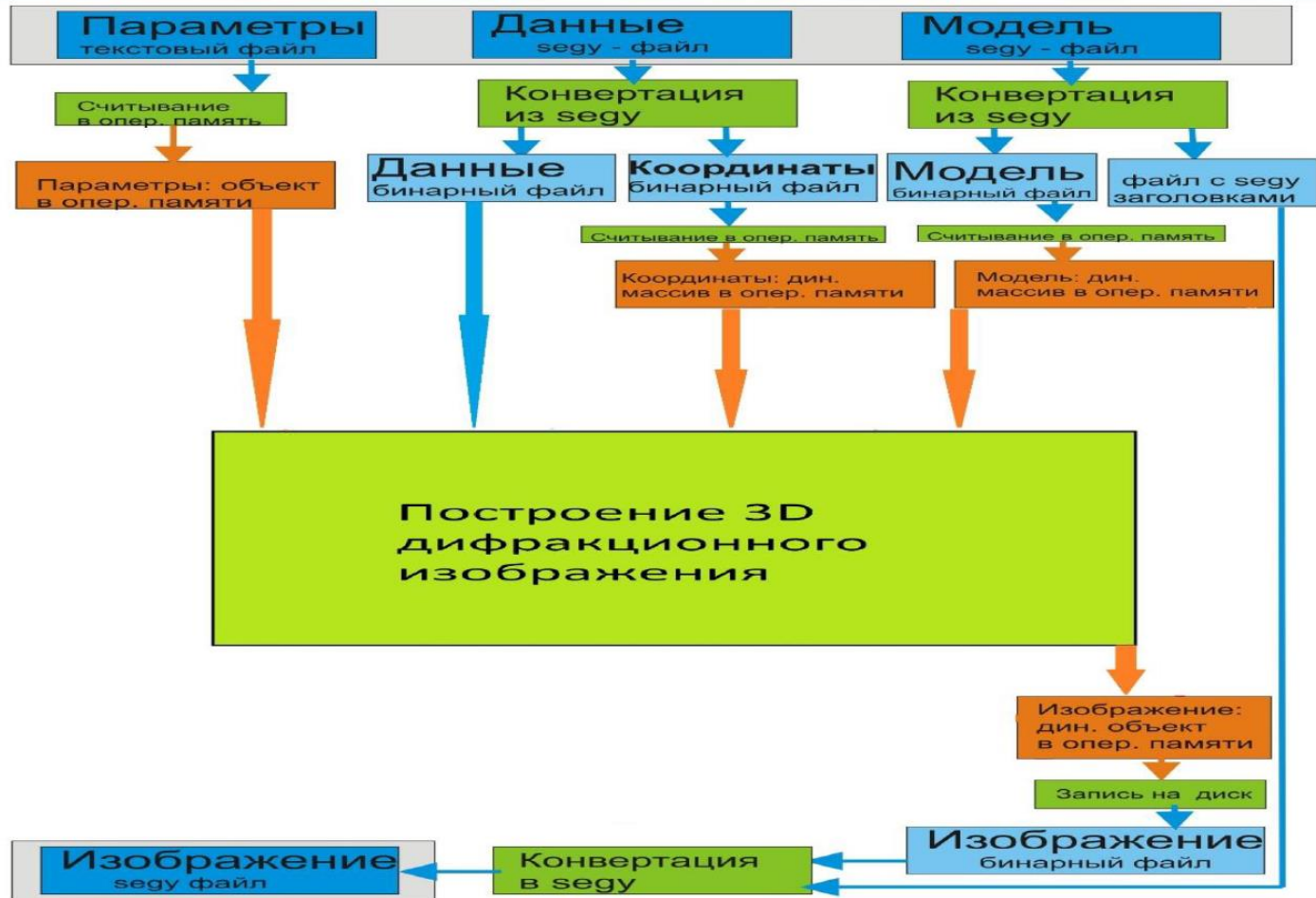
шаг по азимутам, для которых строится изображение (задаётся в градусах)

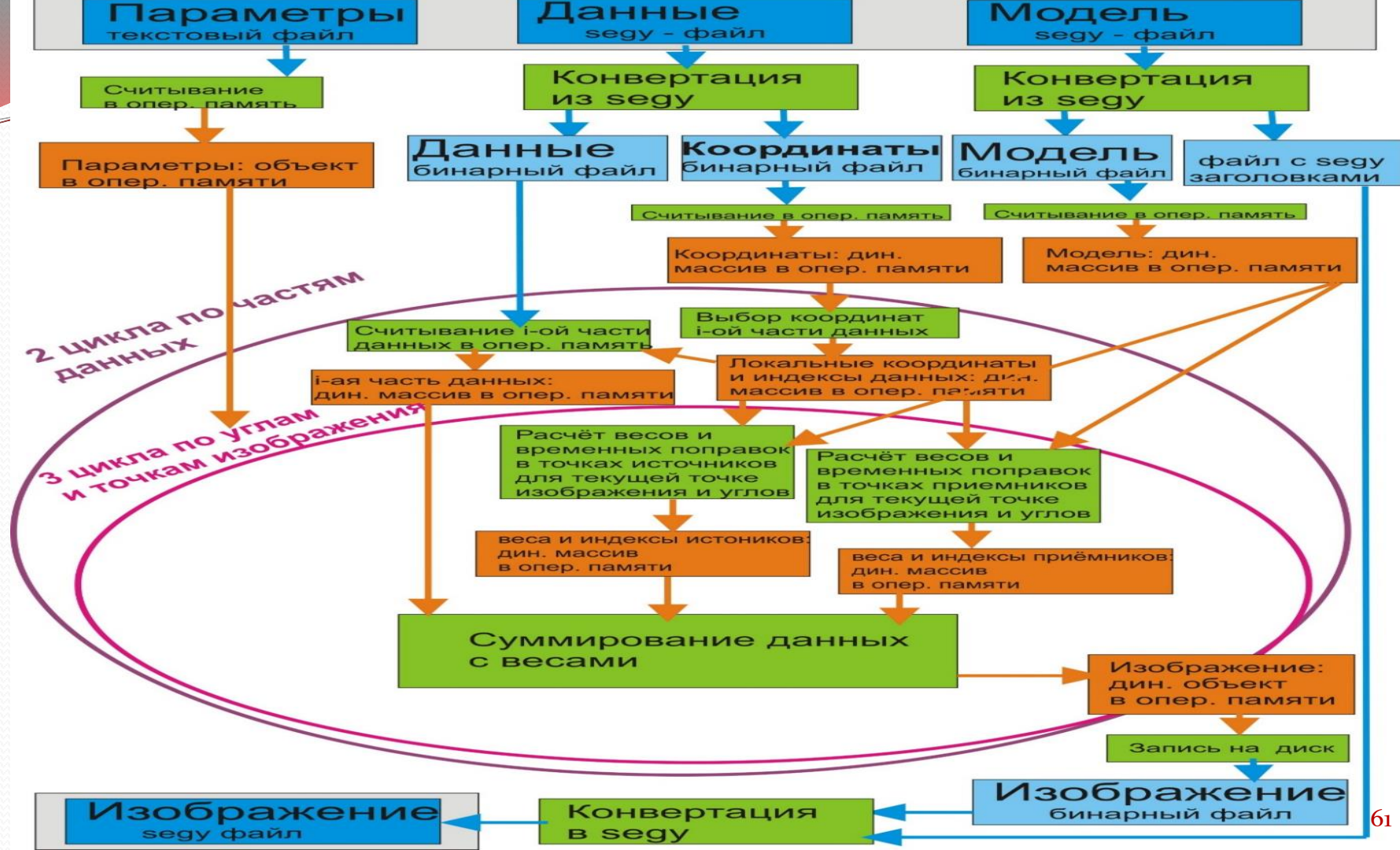
Блок-схема алгоритма

Кратко опишем обозначения:

- в прямоугольниках тёмно-синего цвета обозначены входные и выходные данные, описанные в предыдущем разделе, которые хранятся на диске;
- в прямоугольниках светло-синего цвета обозначены промежуточные данные, необходимые для работы программы, которые тоже хранятся на диске;
- в прямоугольниках светло-коричневого цвета обозначены данные, необходимые для работы программы, которые находятся в оперативной памяти;
- в прямоугольниках зелёного цвета обозначены основные функции, необходимые для работы программы;
- стрелочки синего цвета обозначают передачу данных с диска в оперативную память и наоборот;
- стрелочки светло-коричневого цвета обозначают передачу данных внутри оперативной памяти, либо в кэш процессора из оперативной памяти и обратно.

Блок-схема: верхний уровень

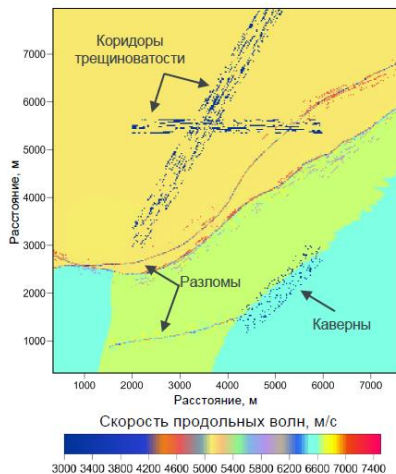




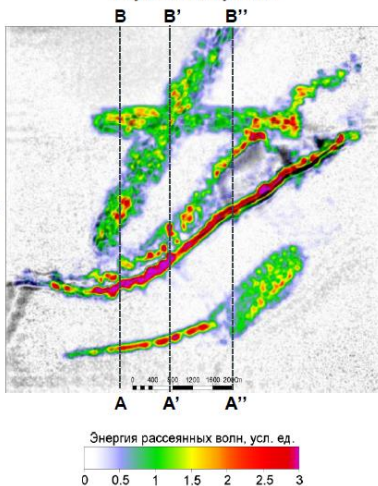
Выделение скоплений мелкомасштабных геологических объектов.

Применение технологии выделения рассеянных волн методом Гауссовых пучков к модельным данным позволило точно локализовать все заложенные разломы и зоны мелкомасштабных неоднородностей (трещины, каверны).

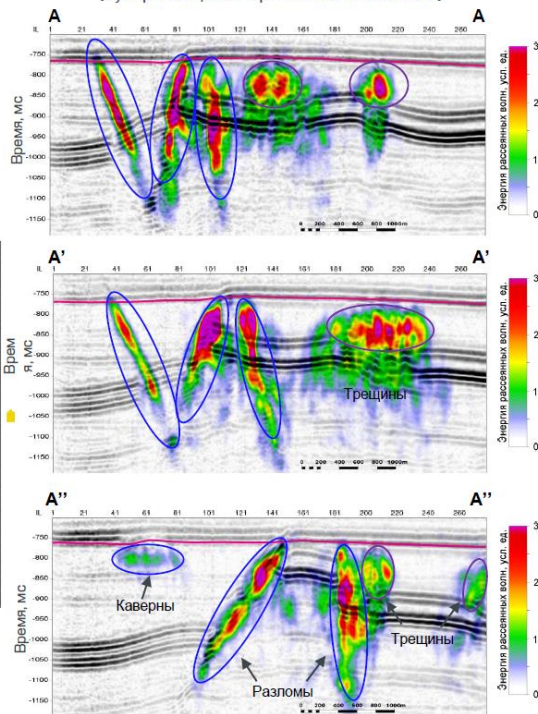
Вертикальный срез исходной модели



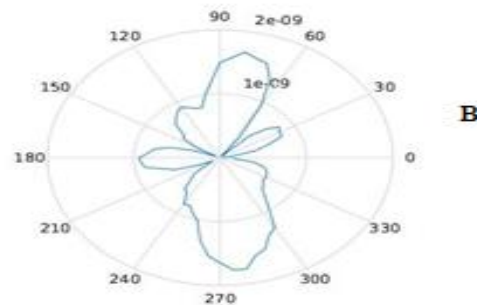
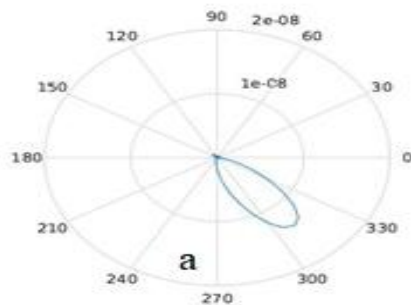
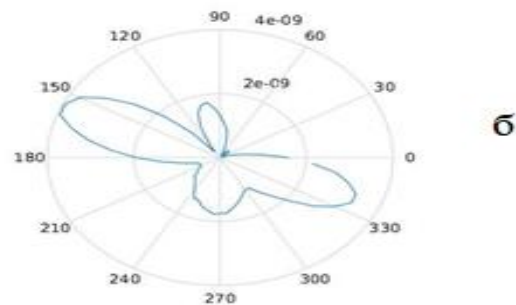
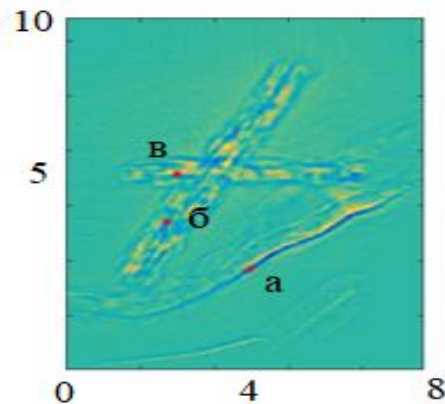
Вертикальный срез рассеянных волн по Гауссовым пучкам



Временные разрезы рассеянных волн по Гауссовым пучкам (суперпозиция с отраженными волнами)



Выделение скоплений мелкомасштабных геологических объектов: индикатрисы рассеяния.



Заключение

1. Построена реалистичная трёхмерная сейсмогеологическая модель, содержащая скопления микронеоднородностей;
2. Впервые в России проведено полномасштабное численное моделирование данных трёхмерной сейсморазведки применительно к реалистичной трёхмерной модели;
3. Разработан надёжный численный метод для построения трёхмерных волновых сейсмических изображений сложных сред, содержащих скопления неоднородностей субсейсмического масштаба.

МАМ, НЕ РУГАЙ



Я НЕФТЬ НАШЁЛ

Спасибо за внимание!



Вопросы есть?