МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АНИЗОТРОПНОЫХ УПУГИХ СРЕДАХ

Афонина Е. В., Вишневский Д. М., Горшкалев С. Б., Карстен В. В., Лисица В. В., Чеверда В. А.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

Актуальность

Анизотропия в сейсмике:

- Трещиноватые кабонатные коллекторы;
- Топкослоистые пачки;
- Предварительные напряжения (в окрестности скважин, вблизи соляных тел и пр.).

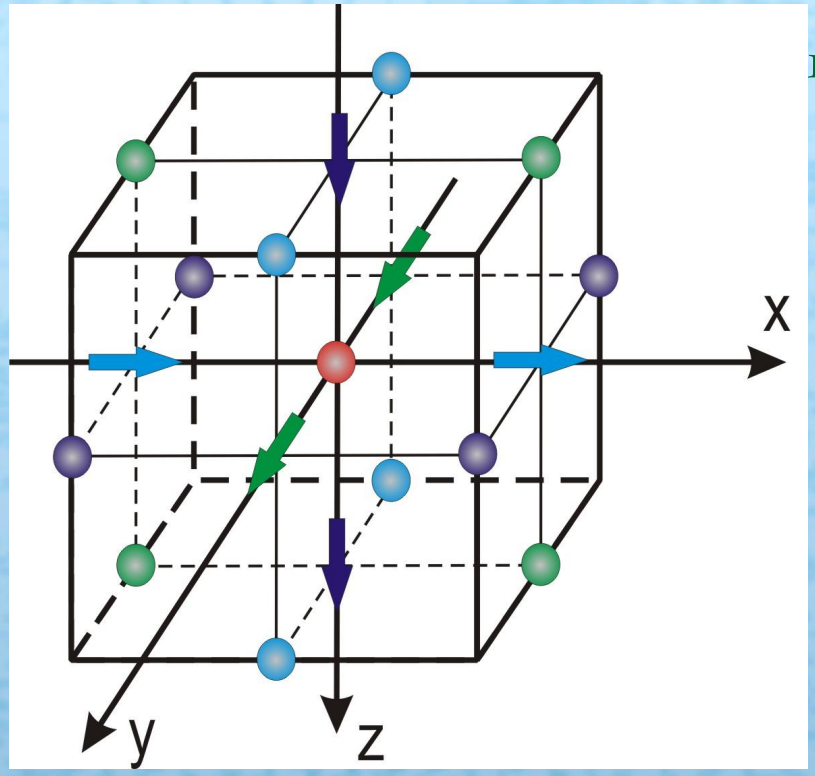
Анизотропия может выступать как косвенный признак:

- Ориентации трещин (AVO, AVA analysis);
- Концентрации трещин;
- Состава флюида в трещиноватом пространстве и пр.

Выбор метода

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

ная схема на сдвинутых сетках



$(\sigma_{xx})_{ijk}^{n+1/2}$, $(\sigma_{yy})_{ijk}^{n+1/2}$, $(\sigma_{zz})_{ijk}^{n+1/2}$,

$(\sigma_{yz})_{ij+1/2k+1/2}^{n+1/2}$

$(\sigma_{xz})_{i+1/2jk+1/2}^{n+1/2}$

$(\sigma_{xy})_{i+1/2j+1/2}^{n+1/2}$

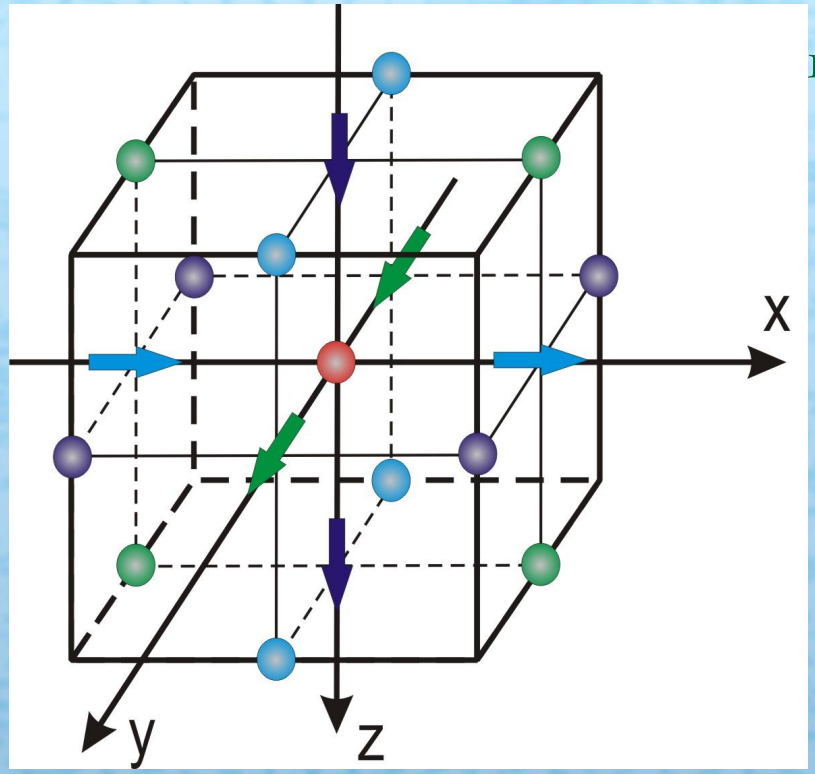
$(u_x)_{i+1/2jk}^{n}$

$(u_y)_{ij+1/2k}^{n}$

$(u_z)_{ijk+1/2}^{n}$

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = c_{11}\frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{12}\frac{\partial u_y}{\partial y} + c_{13}\frac{\partial u_z}{\partial z}$$

ная схема на сдвинутых сетках



$(\sigma_{xx})_{ijk}^{n+1/2}$, $(\sigma_{yy})_{ijk}^{n+1/2}$, $(\sigma_{zz})_{ijk}^{n+1/2}$,

$(\sigma_{yz})_{ij+1/2k+1/2}^{n+1/2}$

$(\sigma_{xz})_{i+1/2jk+1/2}^{n+1/2}$

$(\sigma_{xy})_{i+1/2j+1/2}^{n+1/2}$

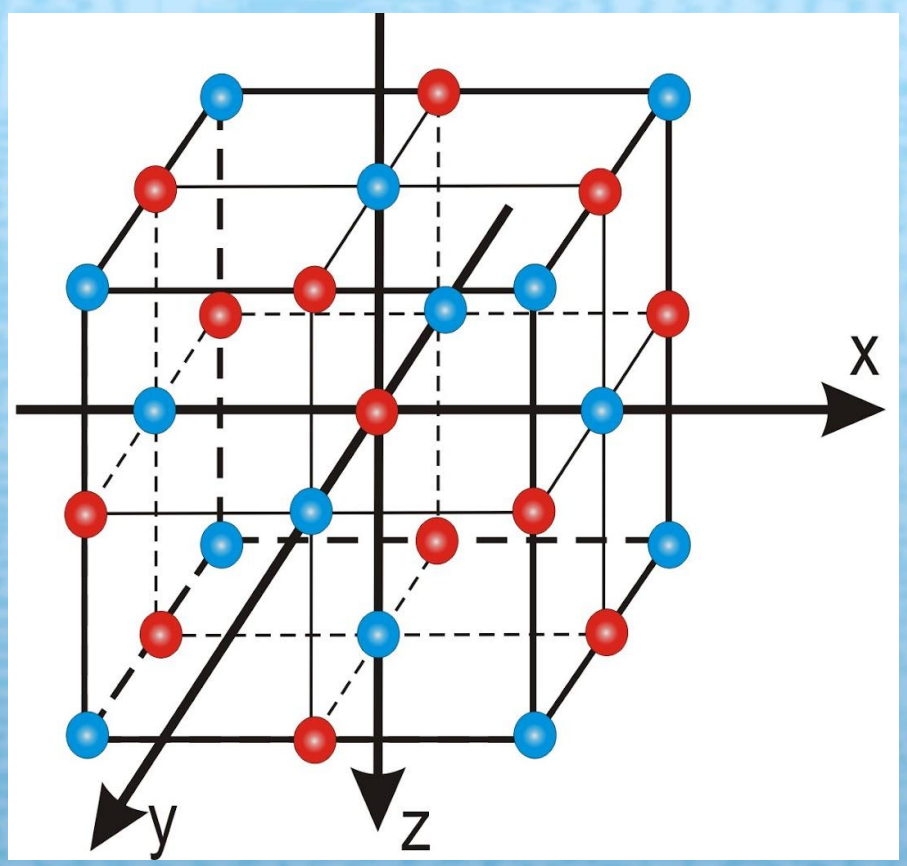
$(u_x)_{i+1/2jk}^{n}$

$(u_y)_{ij+1/2k}^{n}$

$(u_z)_{ijk+1/2}^{n}$

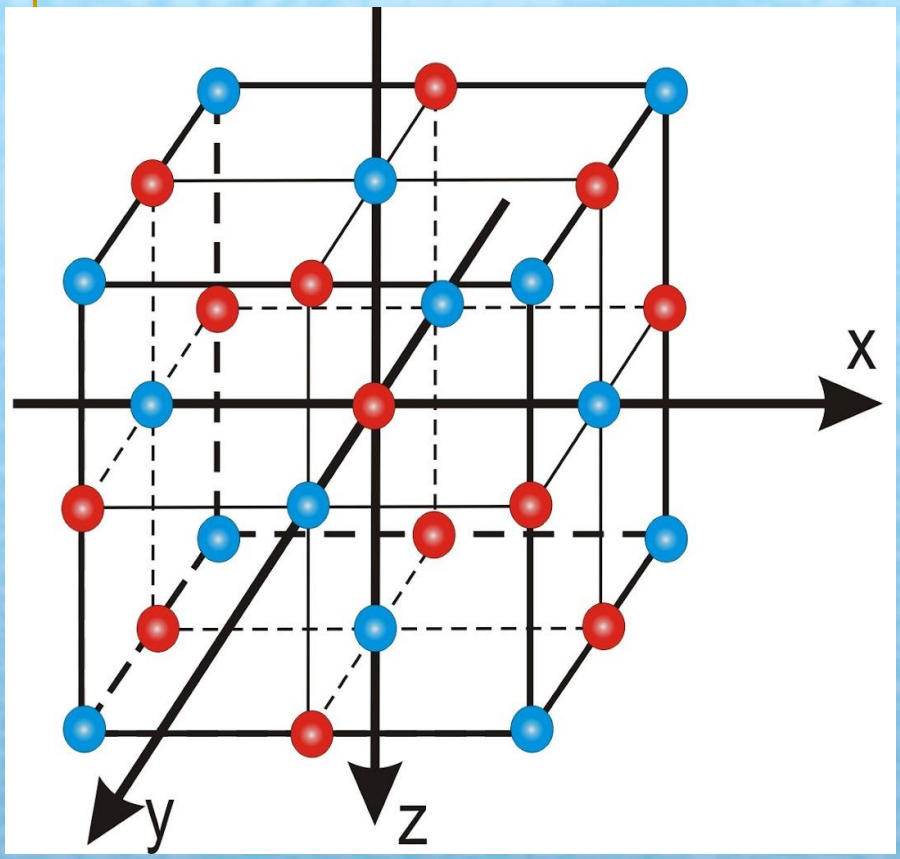
$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = c_{11}\frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{12}\frac{\partial u_y}{\partial y} + c_{13}\frac{\partial u_z}{\partial z} + c_{14}\left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}\right) + c_{15}\left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}\right) + c_{16}\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right)$$

Схема Лебедва



σ u

Схема Лебедева и схема на повернутых сетках



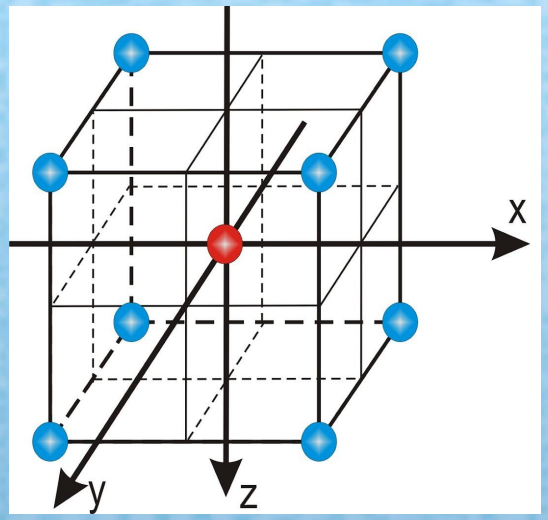
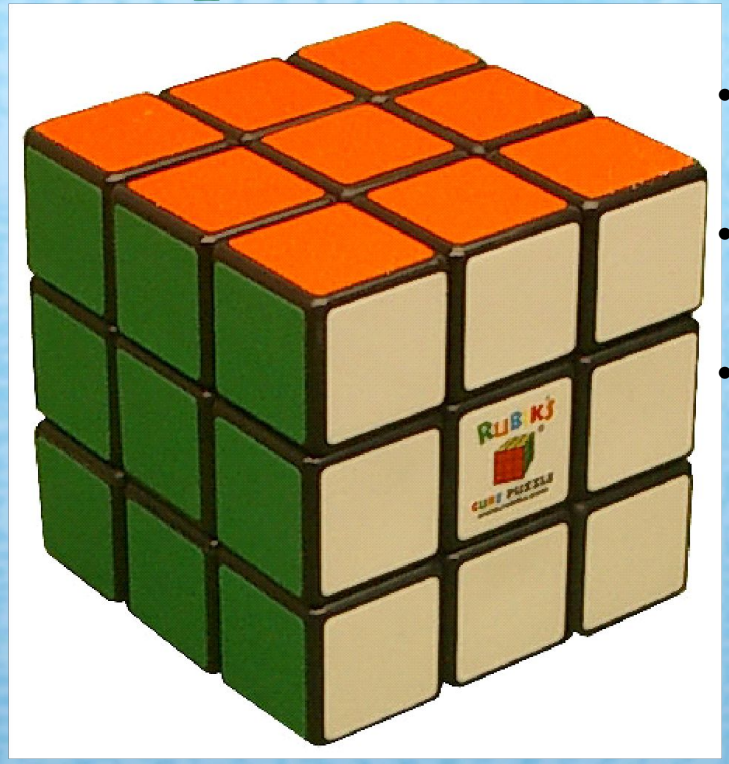
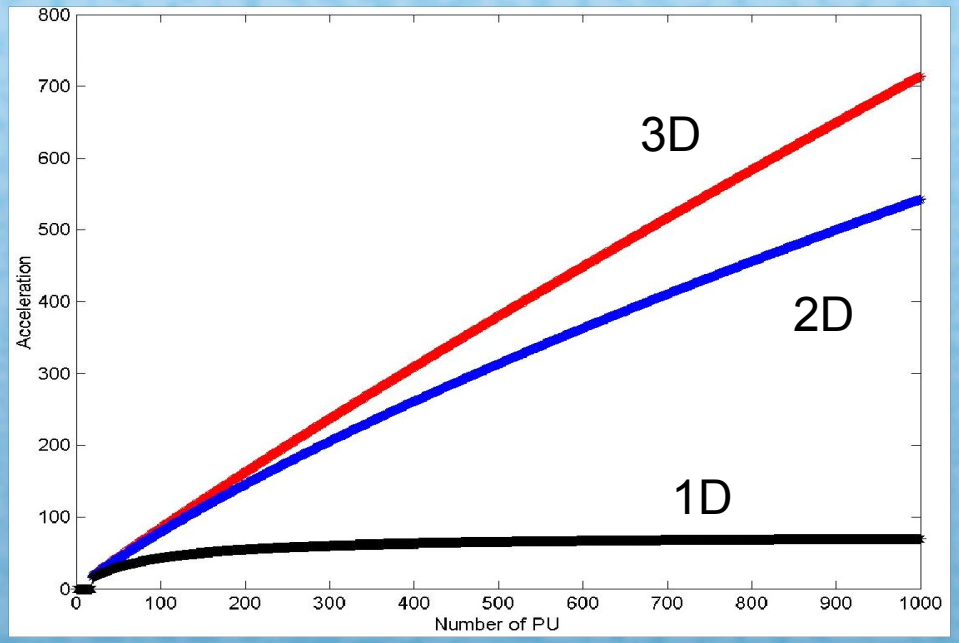


Схема Лебедева, как минимум, на 30% экономичнее схемы на повернутых сетках!

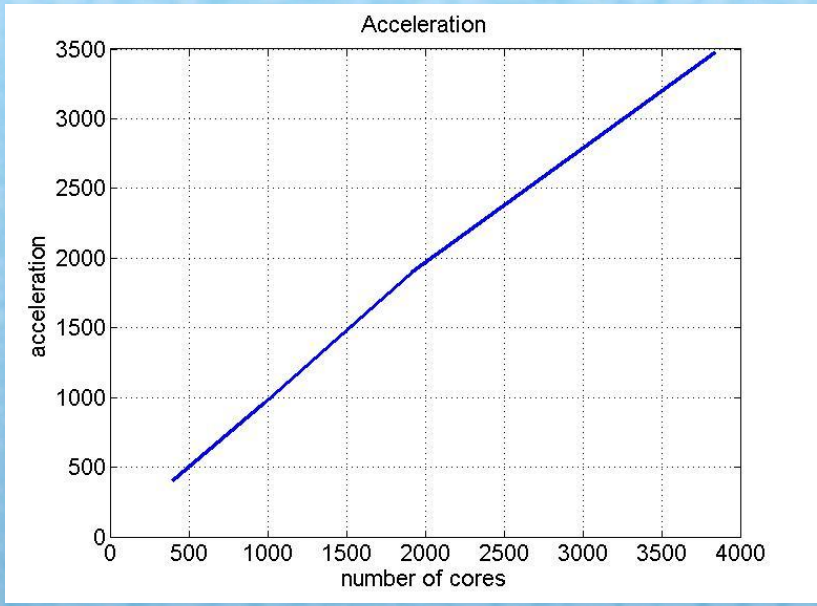
Параллельная реализация

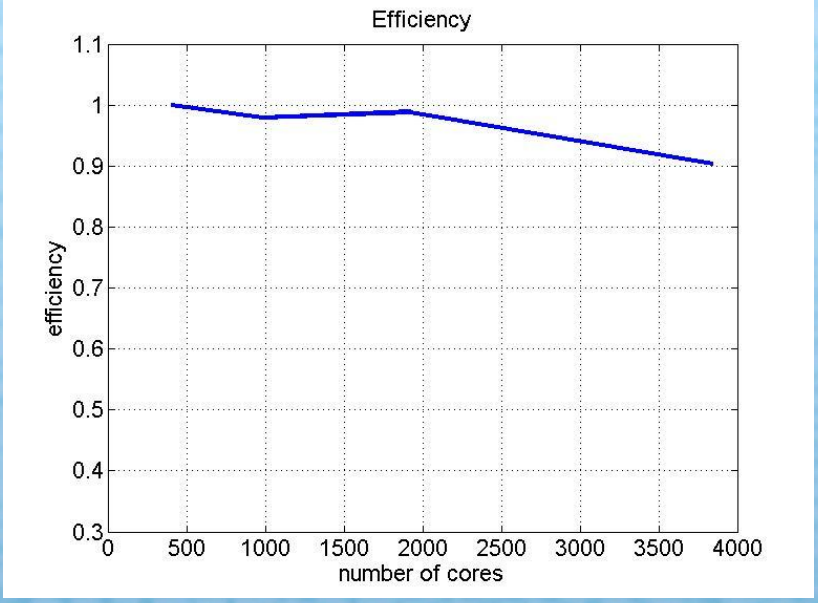


- Трехмерная декомпозиция расчетной области;
- Неблокирующие процедуры обмена: Isend, Irecv;
- Параллельные I/O процедуры: MPI I/O

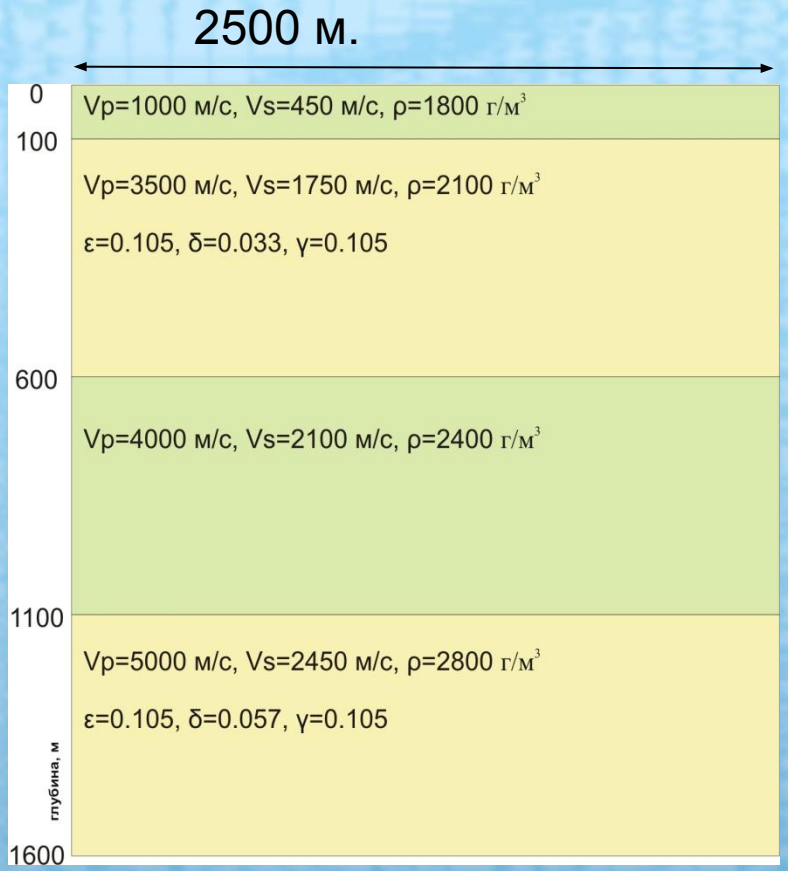


Эффективность и ускорение

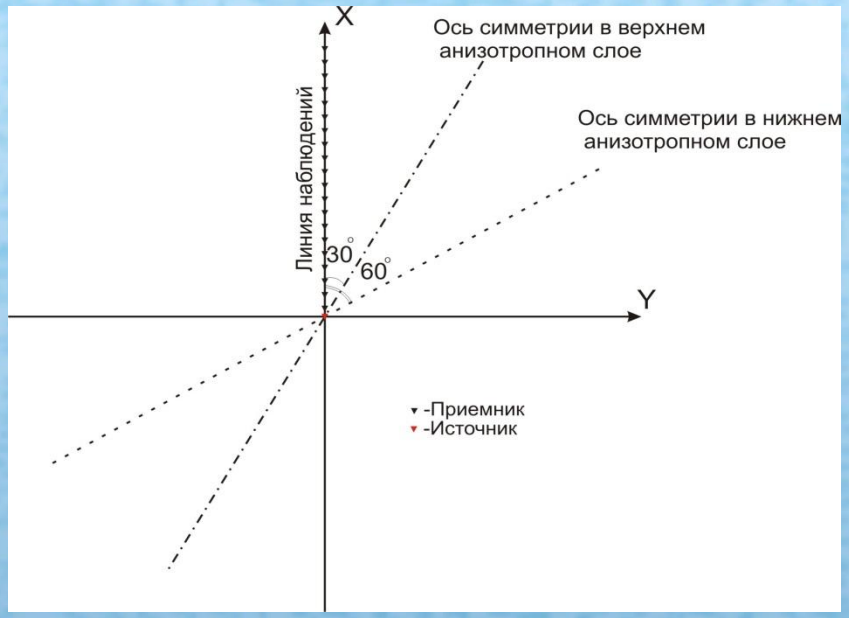




Упрощенная модель Юрубчено-Тохомской зоны



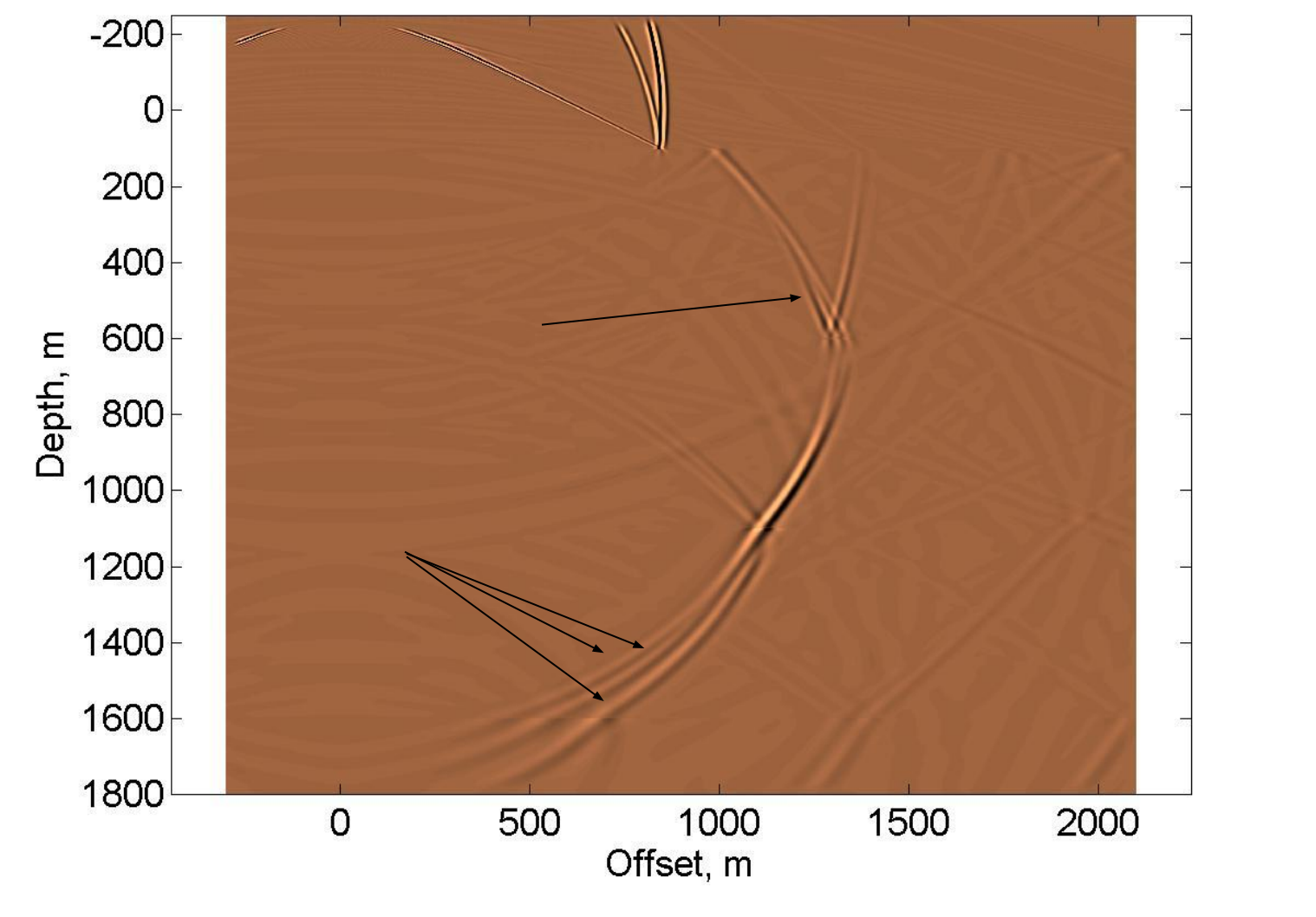
Модель - горизонтально-слоистая среда с двумя трансверсально-изотропными слоями, направления осей симметрии в которых горизонтальны и составляют с осью X углы 30° и 60° .



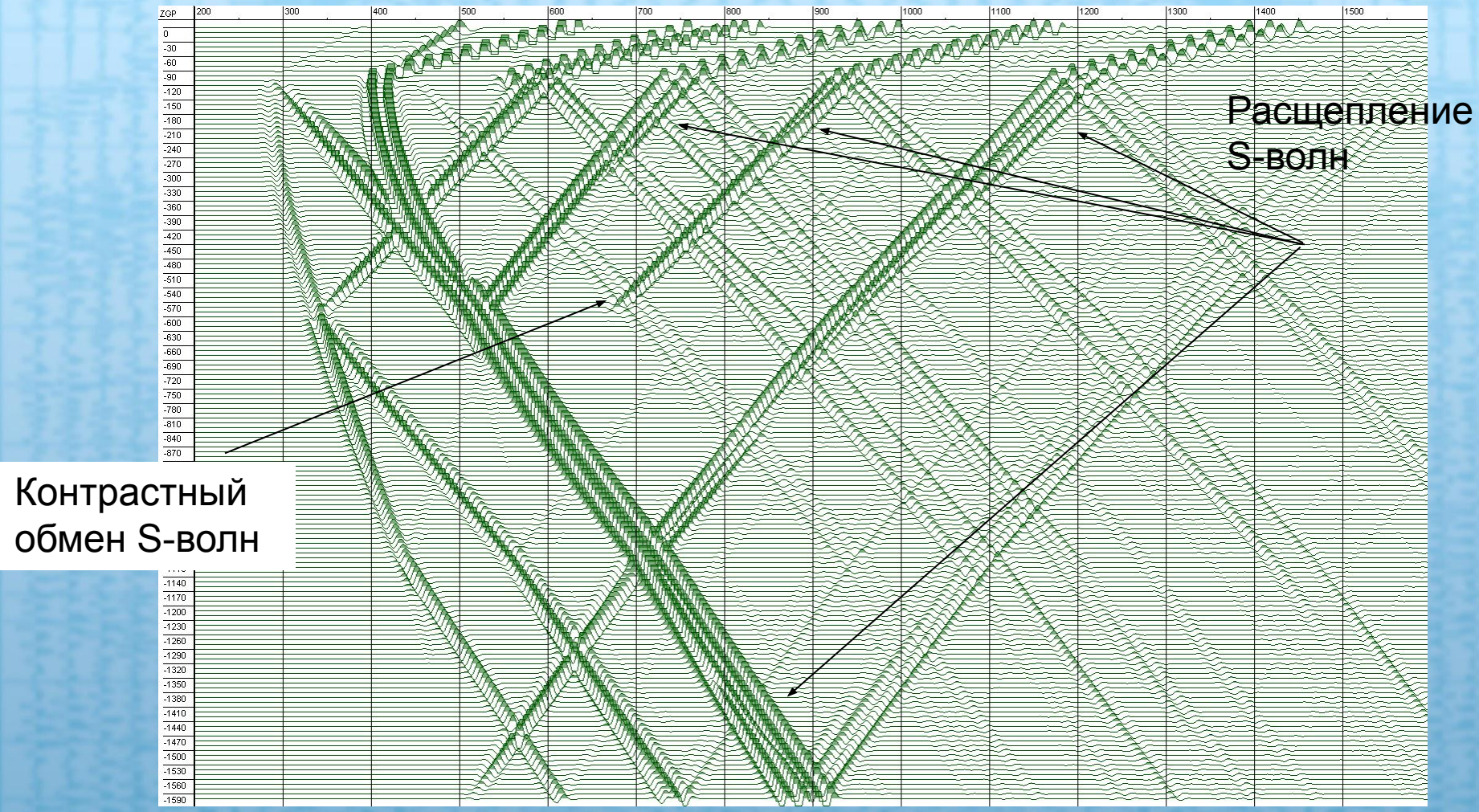
Дискретизация 1 метр (10 точек на длину волны),

Общий объем RAM – 4 Tb!

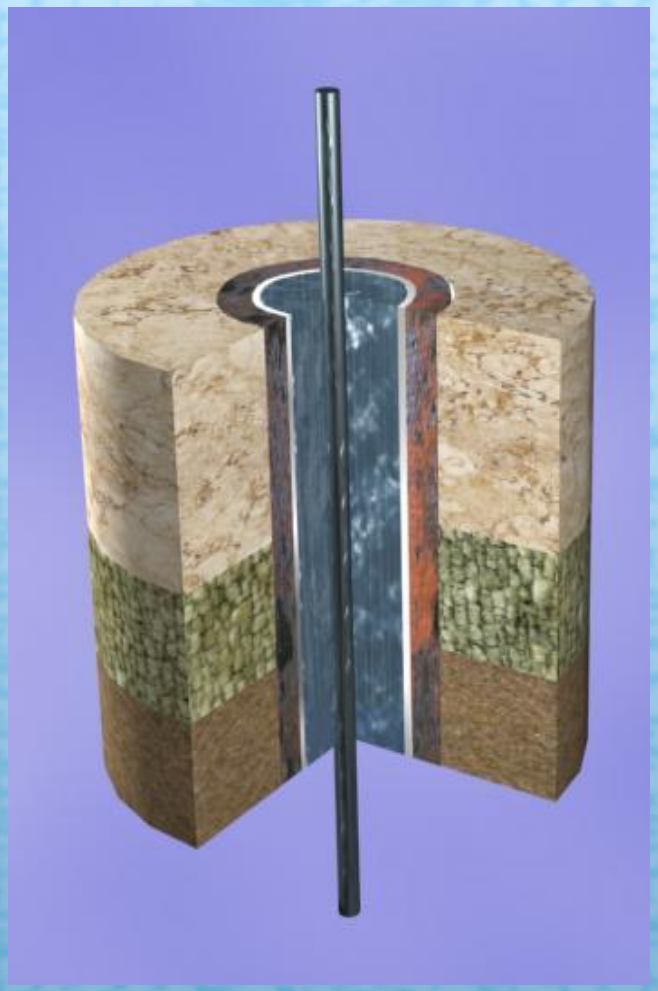
Упрощенная модель Юрубчено-Тохомской зоны



Упрощенная модель Юрубчено-Тохомской зоны, сейсмограмма VSP



Акустический каротаж



Основные особенности:

Анизотропная вмещающая среда;

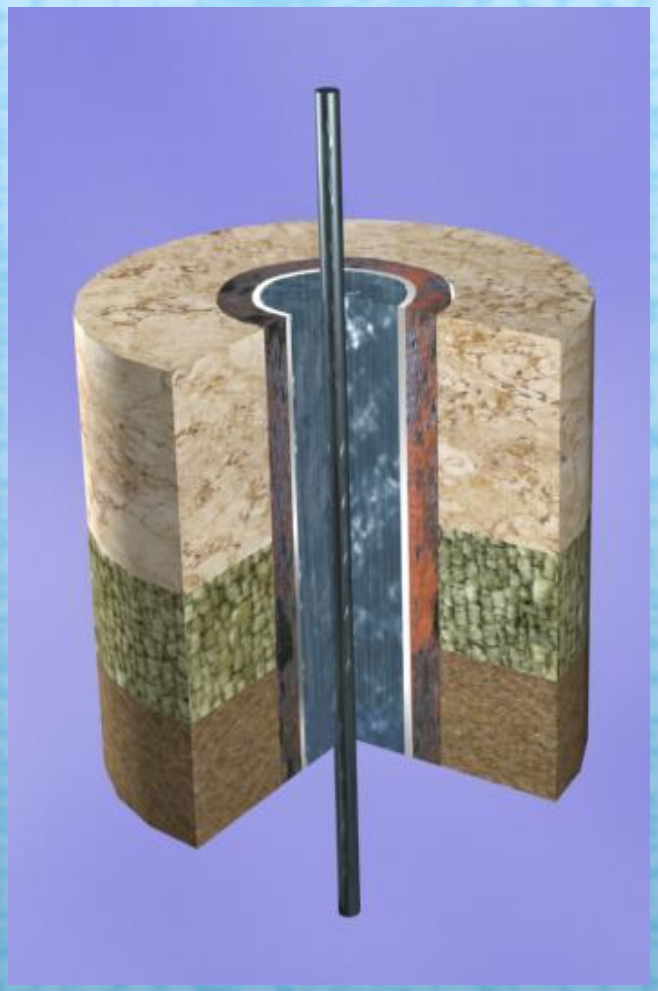
Цилиндрическая система координат;

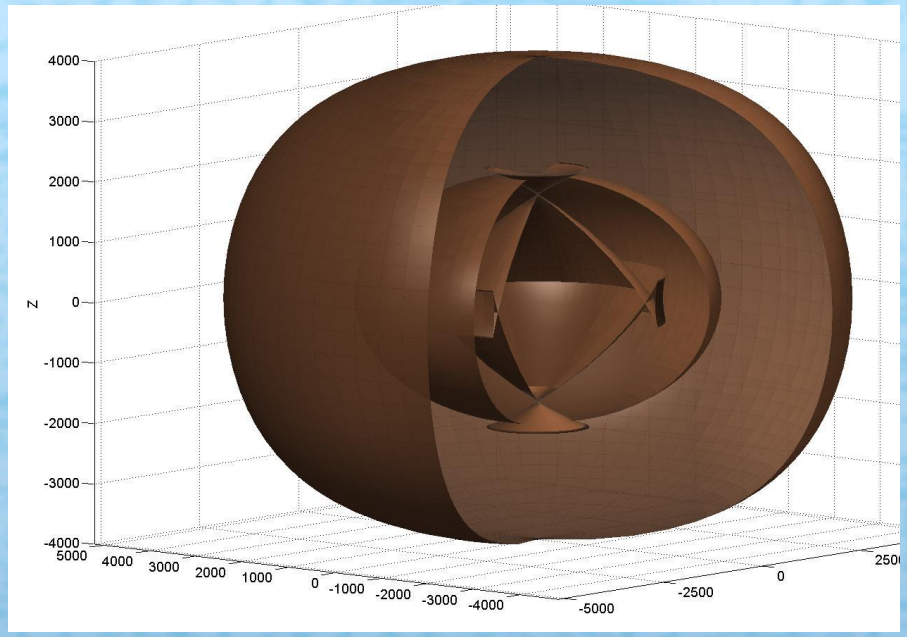
Применение схемы Лебедева;

Параллельная реализация на основе декомпозиции расчетной области;

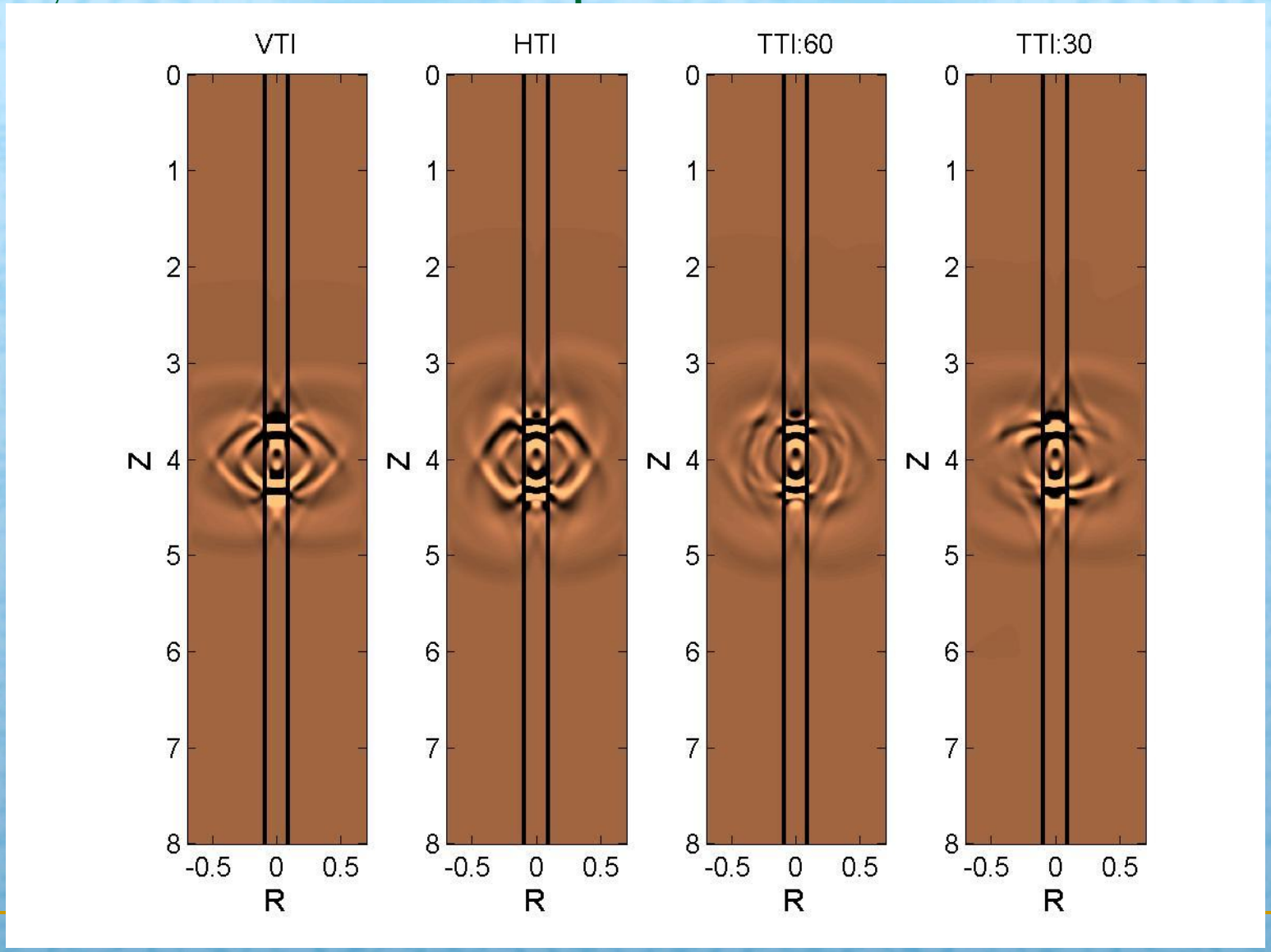
Периодическое азимутальное измельчение сетки для компенсации увеличения шага сетки;

Акустический каротаж

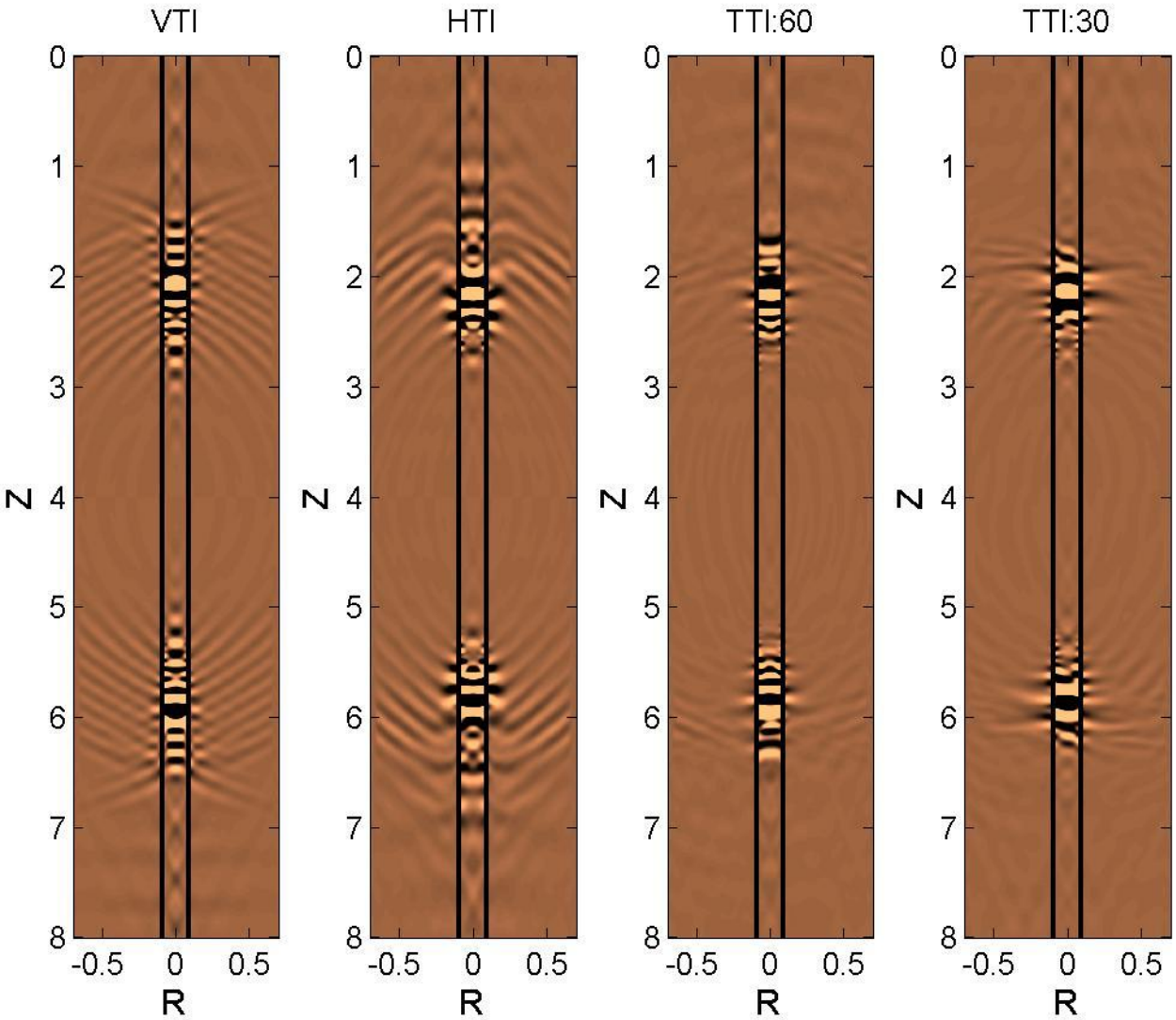




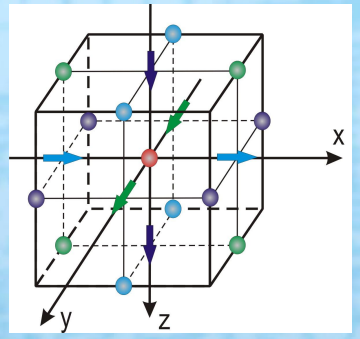
Акустический каротаж



Акустический каротаж

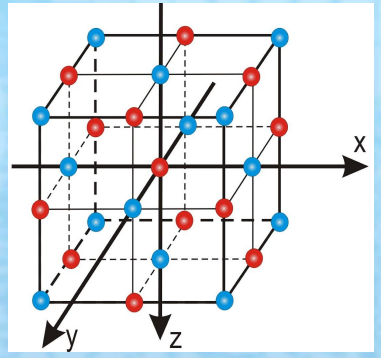


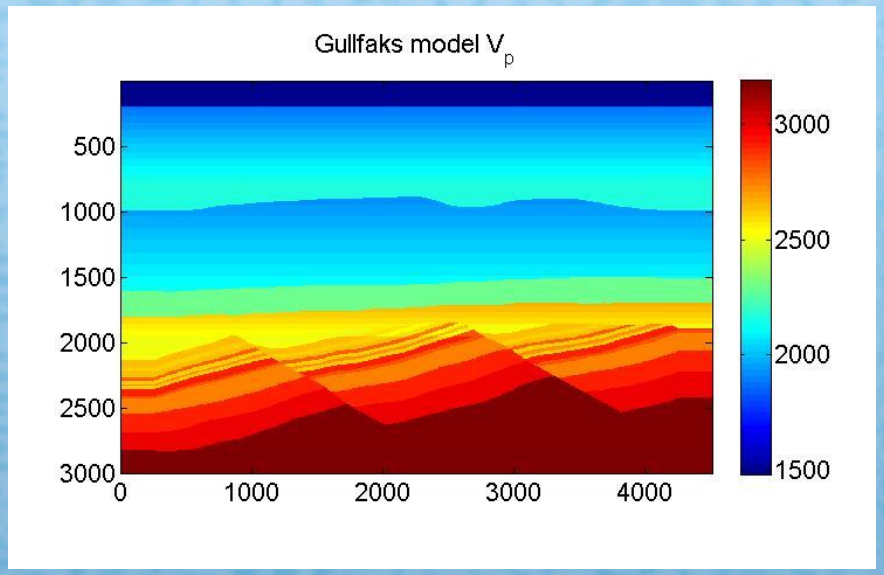
Гибридный алгоритм

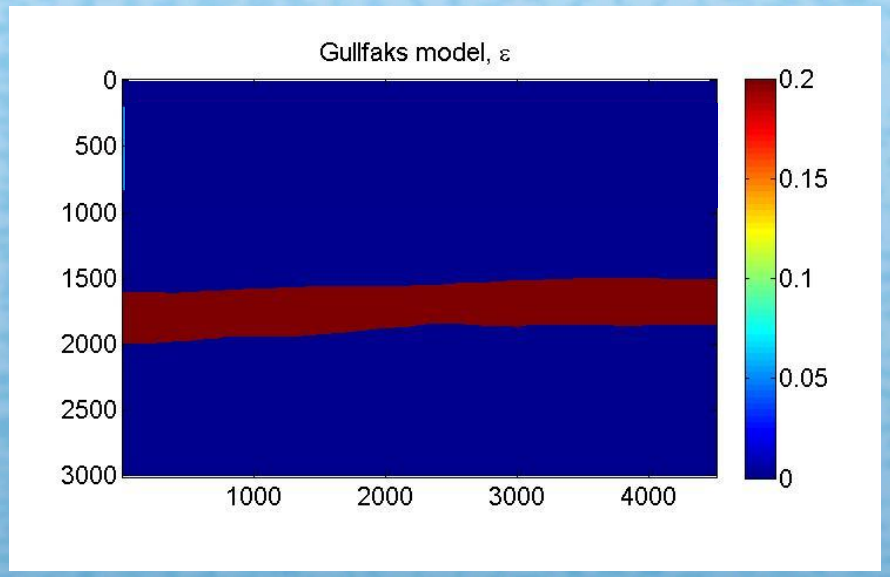


SSGS → LS

Увеличение требований на вычислительные ресурсы в пять раз!

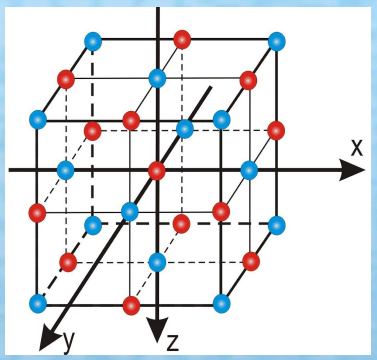


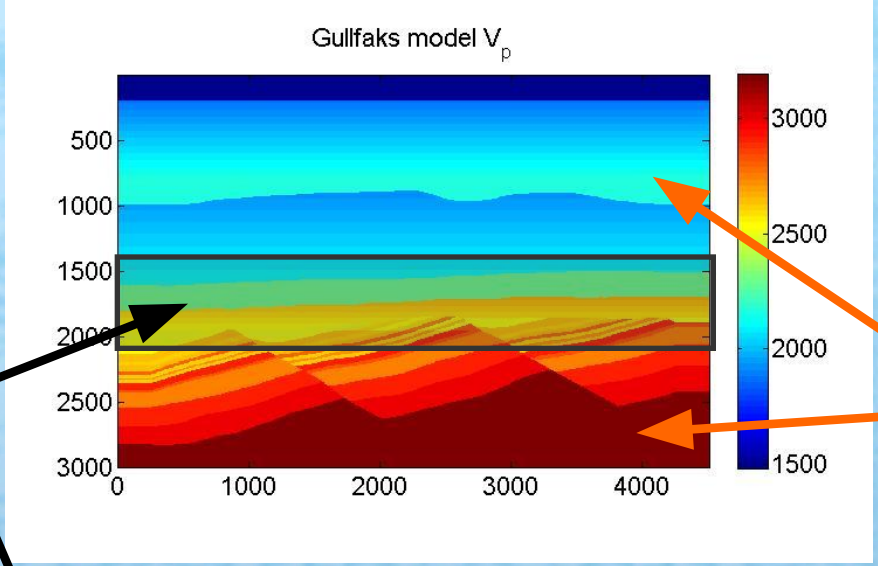


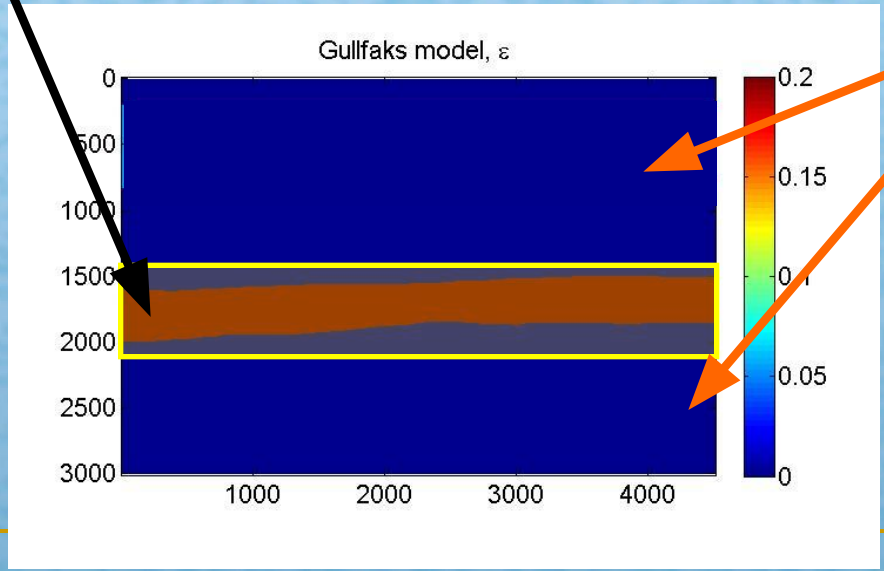


Гибридный алгоритм

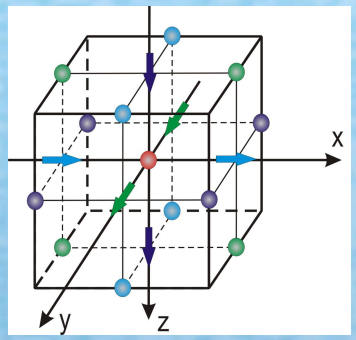
LS



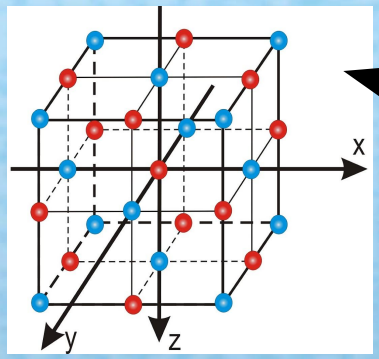


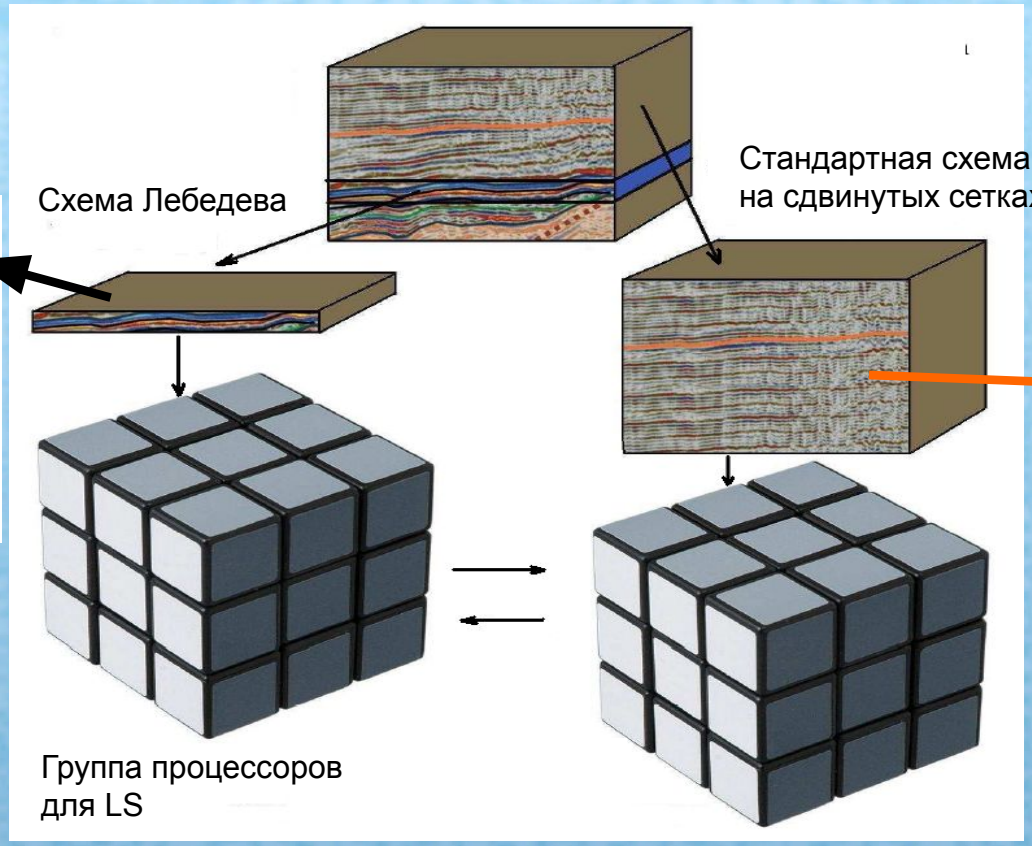


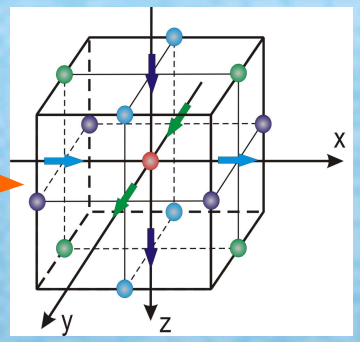
SSGS



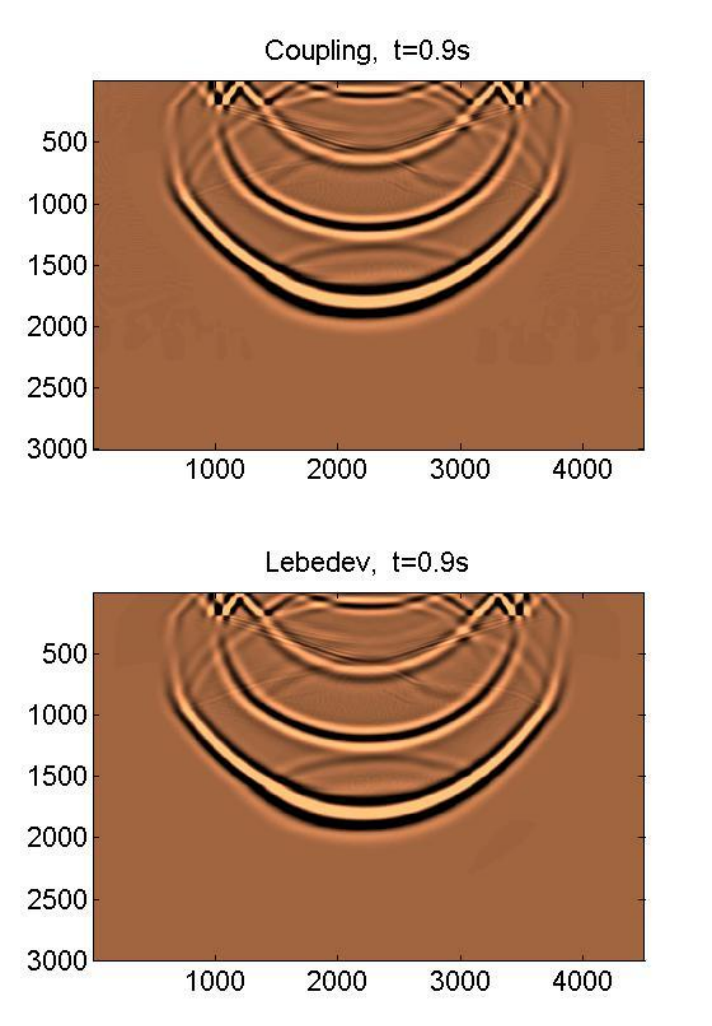
Гибридный алгоритм

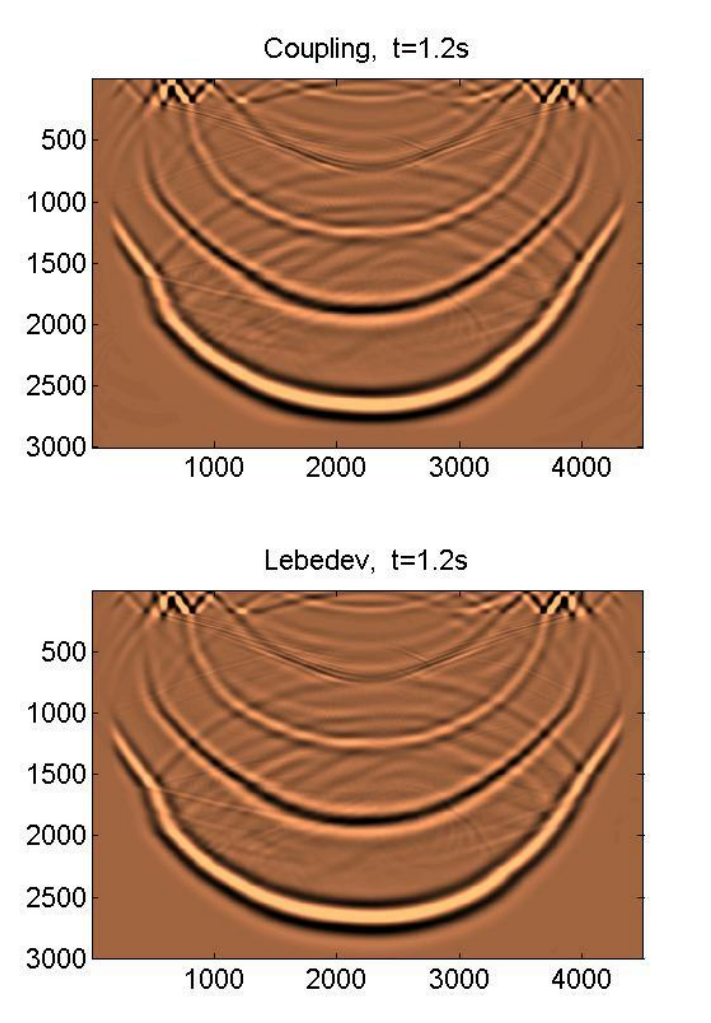




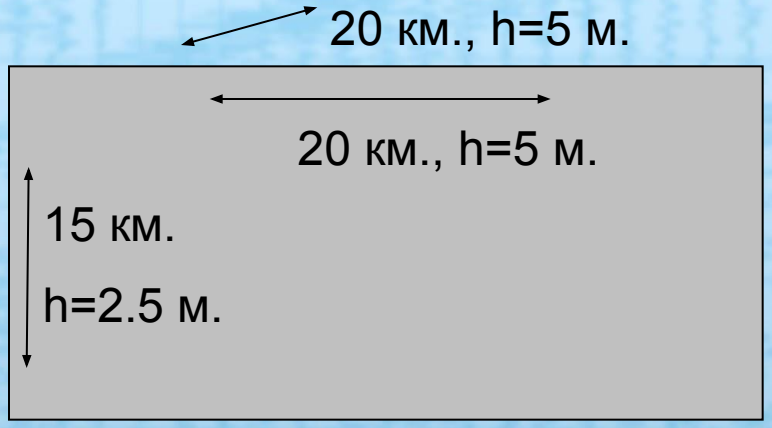


Гибридный алгоритм





Потребности в вычислительных ресурсах



	Число ядер
Изотропная упругая модель (3+9) 12 параметров	4000
Анизотропная упругость (22+36) 58 параметров	15000
Гибридный алгоритм 20% анизотропии	6500
Анизотропная вязкоупругость (64+84) 148 параметров	45000

Заключение

Разработаны и реализованы алгоритмы моделирования волновых процессов в анизотропных средах для задач поверхностной сейсмики, VSP, cross-well, акустического каротажа.

- параллельная реализация на основе расщепления по пространственным подобластям;
- используются неблокирующие процедуры Isend, Irecv
- эффективность порядка 90 %

Разработан гибридный алгоритм моделирования волновых полей в средах, содержащих анизотропные включения, что позволяет экономить до 80% вычислительных ресурсов.

Планы

- Учет рельефа свободной поверхности с применением гибридного алгоритма;
- Разработка гибридного алгоритма для вязкоупругих моделей;
- Построение, верификация и определение границ применимости «эффективных» макроскоростных моделей трещиноватых резервуаров.

Спасибо за внимание