

---

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АНИЗОТРОПНЫХ УПУГИХ СРЕДАХ

Афони́на Е. В., Вишне́вский Д. М., Горшка́лев С. Б., Карстен В. В.,  
Лисица В. В., Чеверда В. А.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,  
Новосибирск

---

# Актуальность

Анизотропия в сейсмике:

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

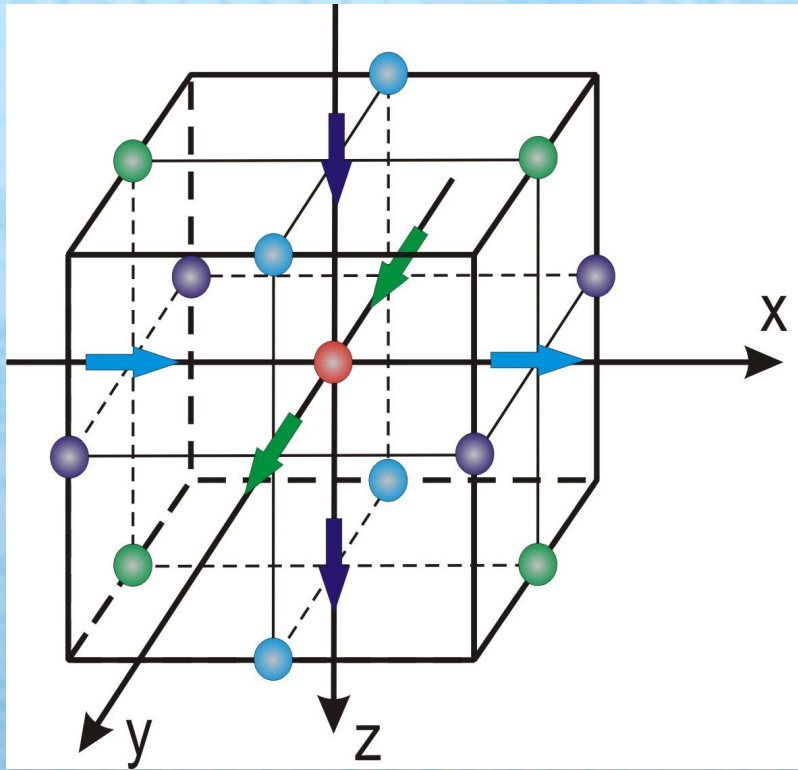
Анизотропия может выступать как косвенный признак:

- 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

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

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

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

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

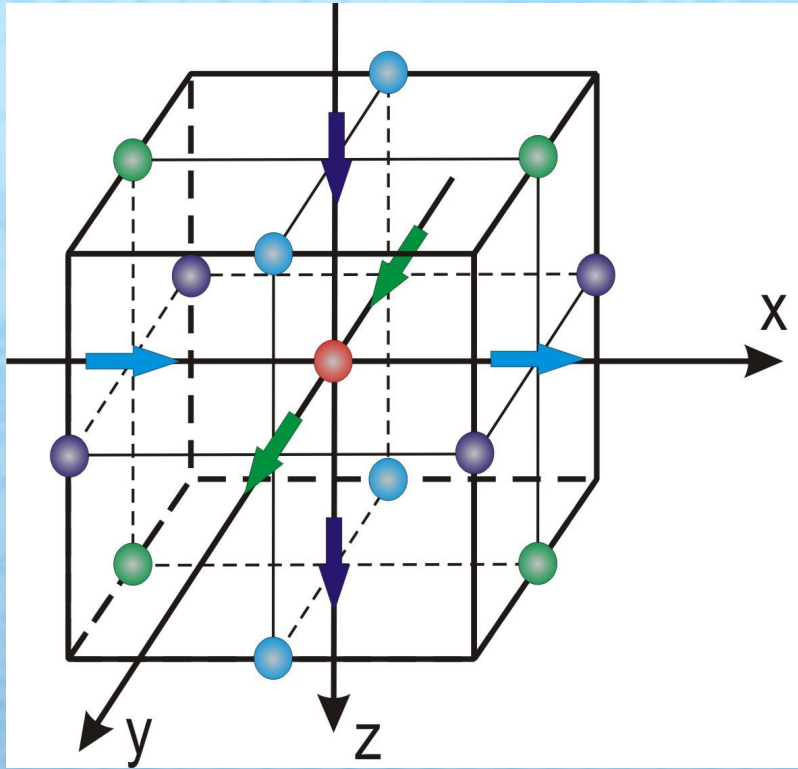
→  $(u_x)_i^n$

↘  $(u_y)_{ij+1/2k}^n$

↓  $(u_z)_{ijk+1/2}^n$

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





ная схема на сдвинутых сетках

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

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

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

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

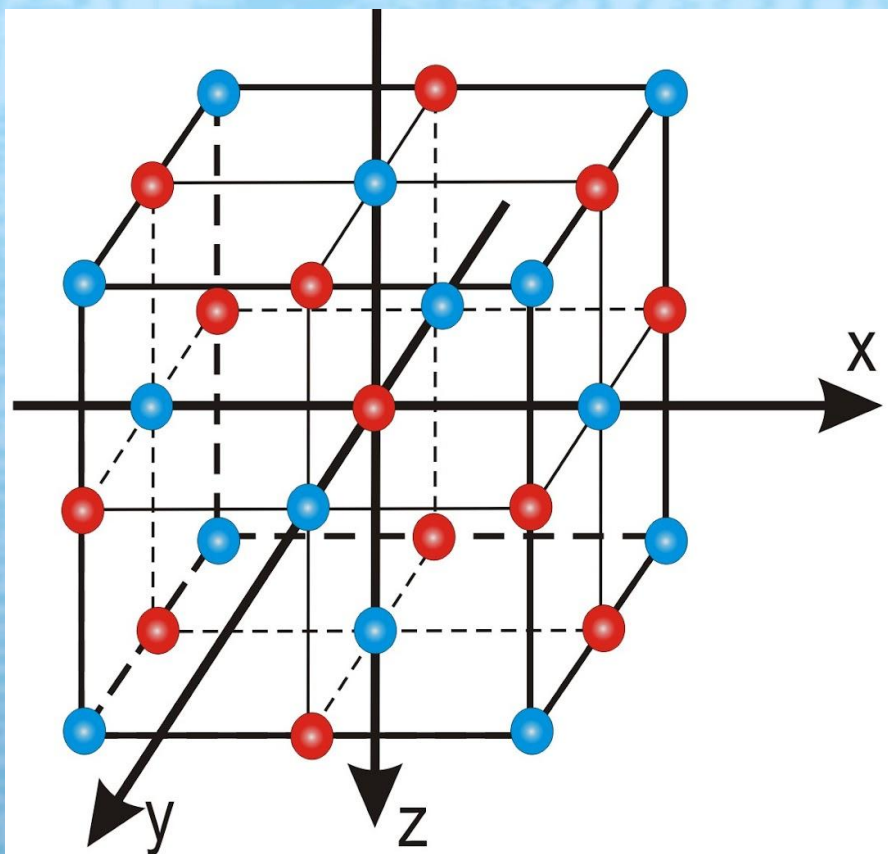
→  $(u_x)_{i+1/2jk}^n$

↙  $(u_y)_{ij+1/2k}^n$

↓  $(u_z)_{ijk+1/2}^n$

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

# Схема Лебедева





## Схема Лебедева и схема на повернутых сетках

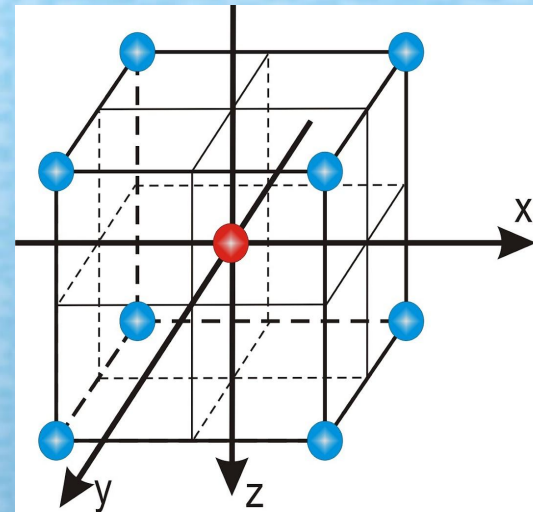
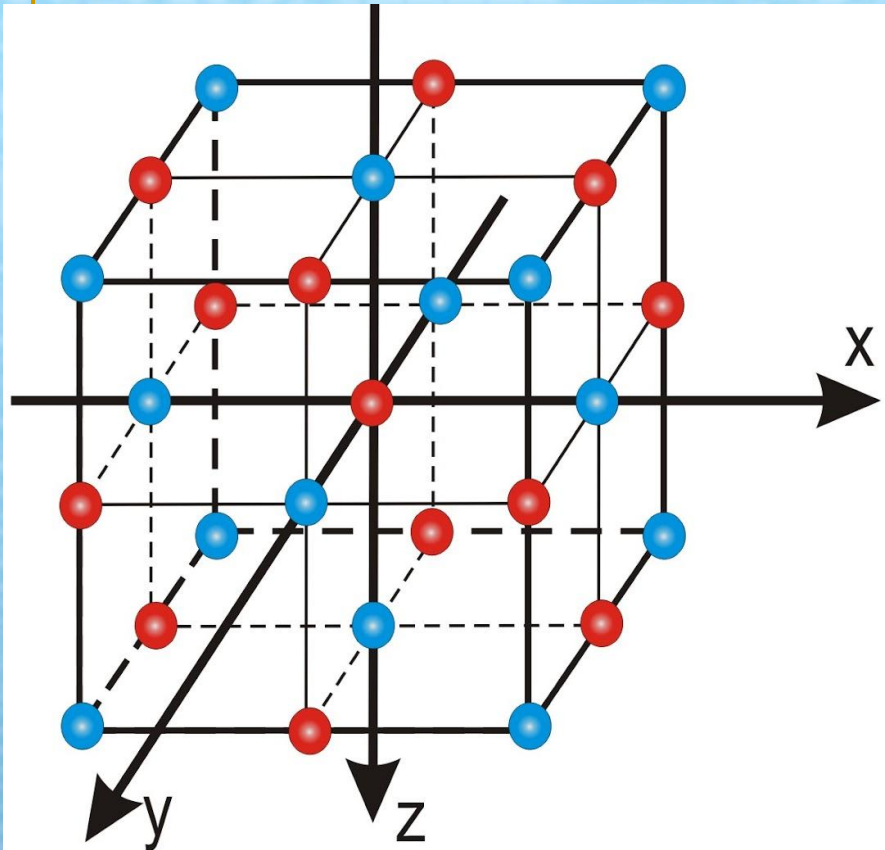
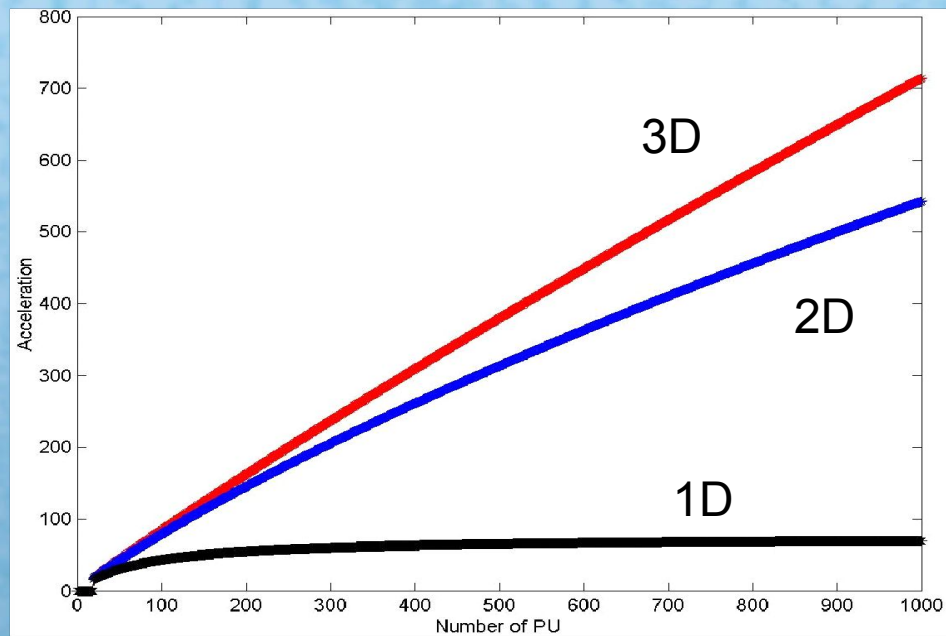


Схема Лебедева, как минимум, на 30% экономичнее схемы на повернутых сетках!

# Параллельная реализация

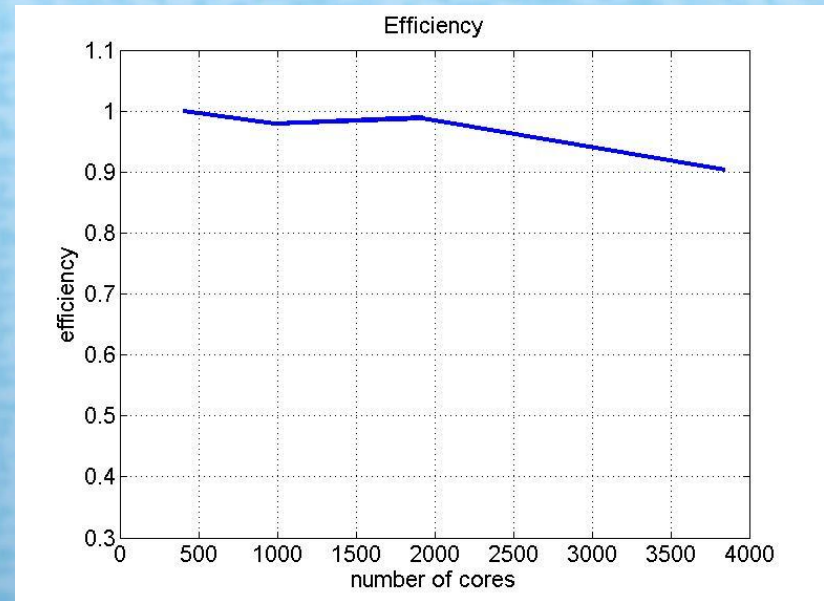
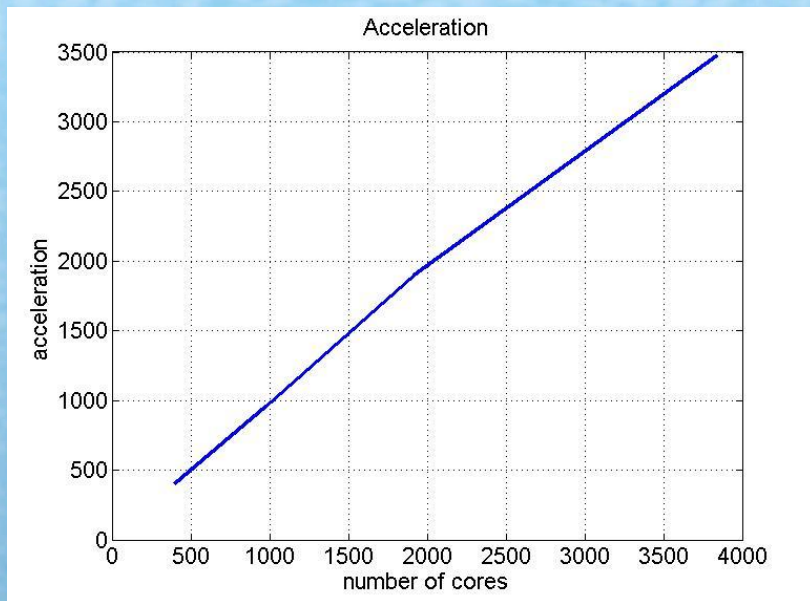


- Трехмерная декомпозиция расчетной области;
- Неблокирующие процедуры обмена: `Irecv`, `Isend`;
- Параллельные I/O процедуры: MPI I/O

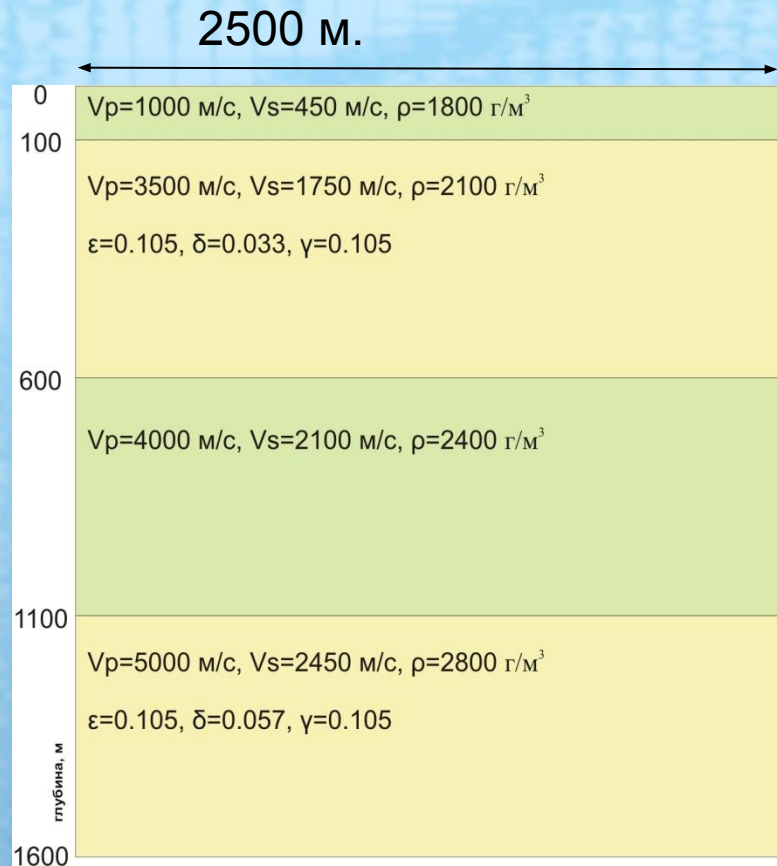




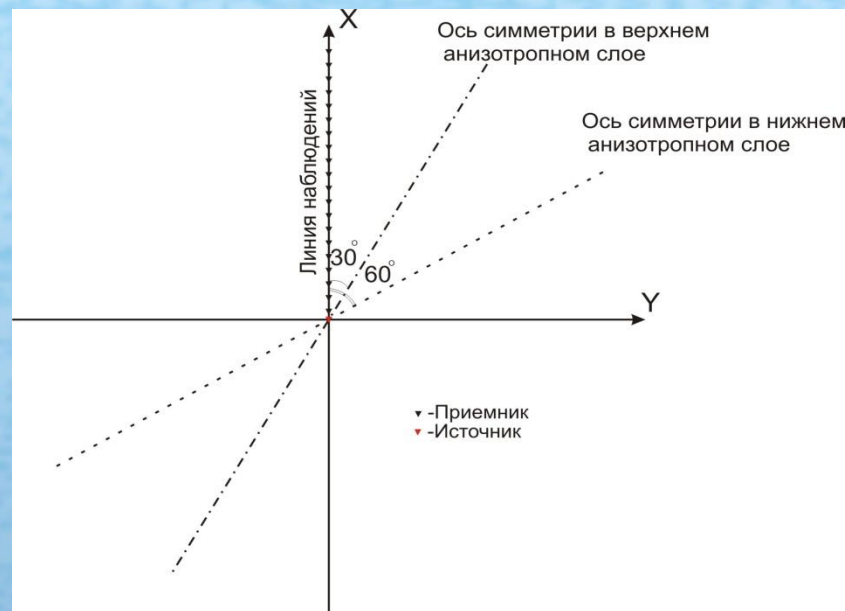
# Эффективность и ускорение



# 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  $30^\circ$  и  $60^\circ$ .

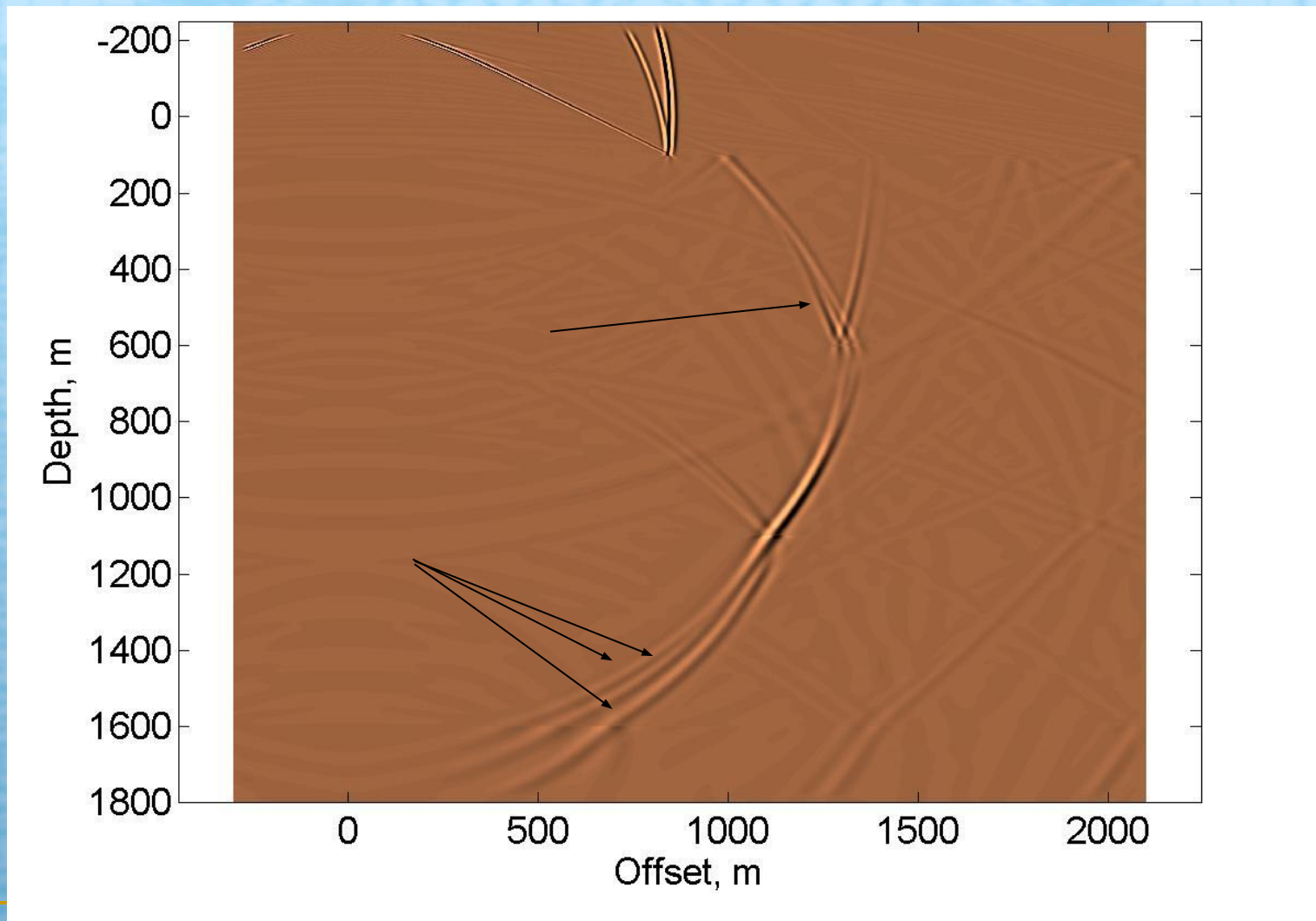


Дискретизация 1 метр (10 точек на длину волны),

Общий объем RAM – 4 Tb!

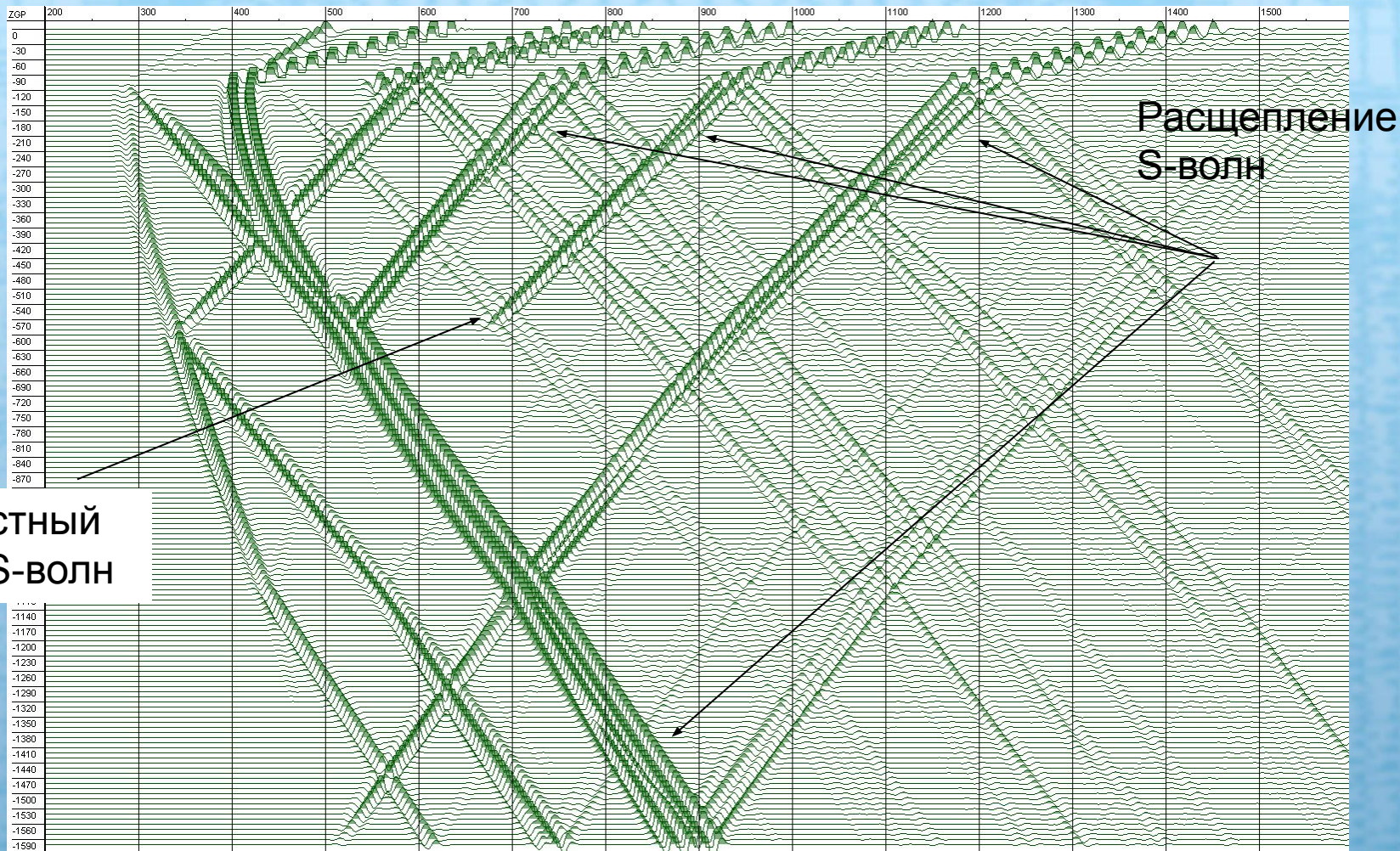


# Упрощенная модель Юрубчено-Тохомской зоны



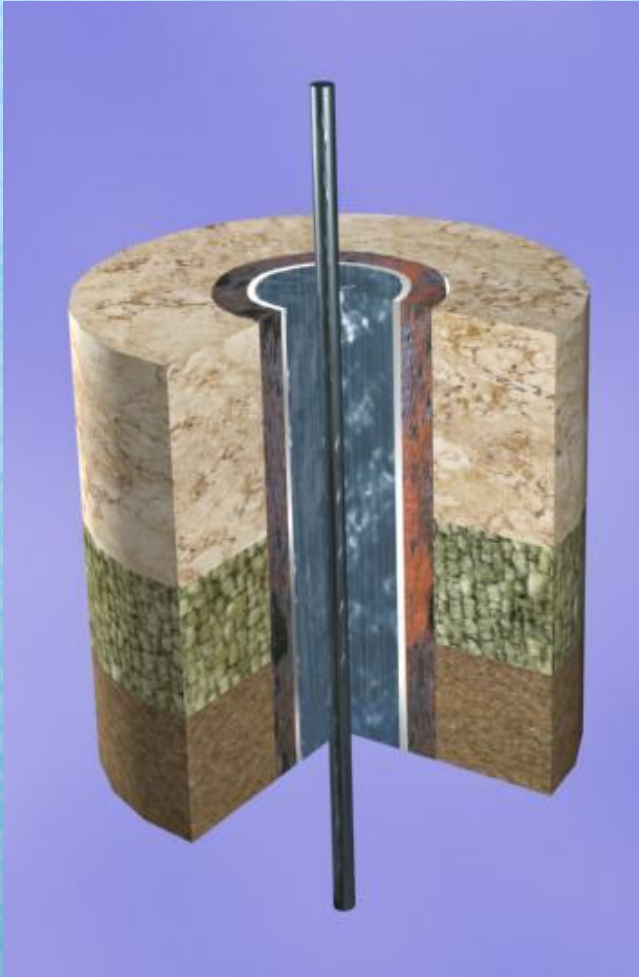


# Упрощенная модель Юрубчено-Тохомской зоны, сейсмограмма VSP





# Акустический каротаж



## Основные особенности:

Анизотропная вмещающая среда;

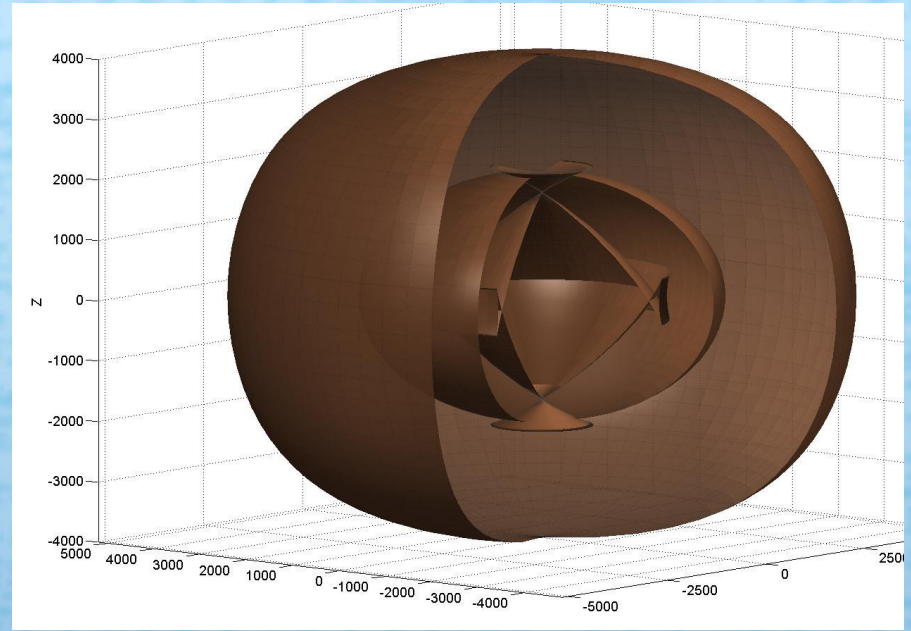
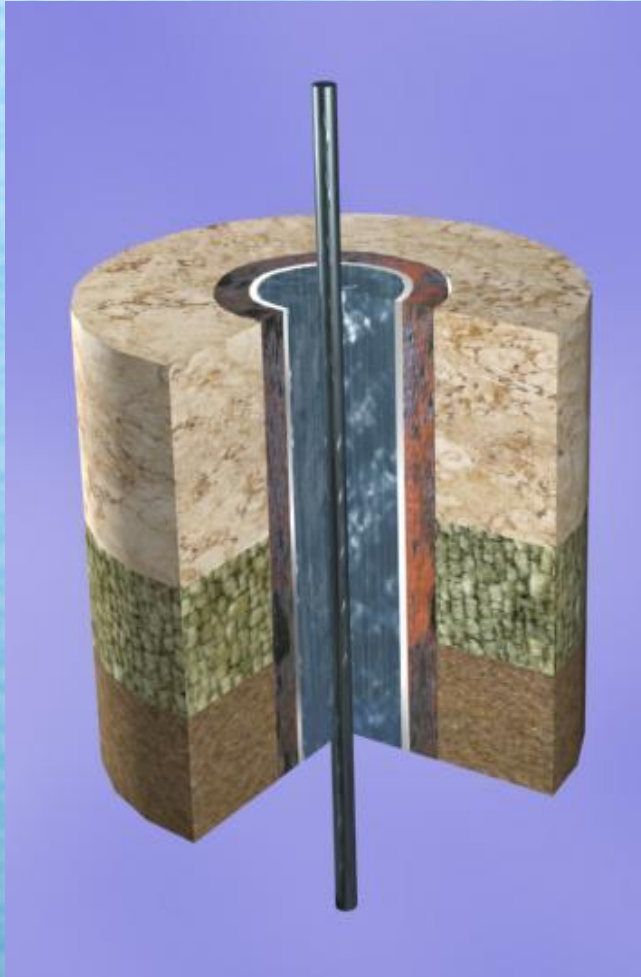
Цилиндрическая система координат;

Применение схемы Лебедева;

Параллельная реализация на основе декомпозиции расчетной области;

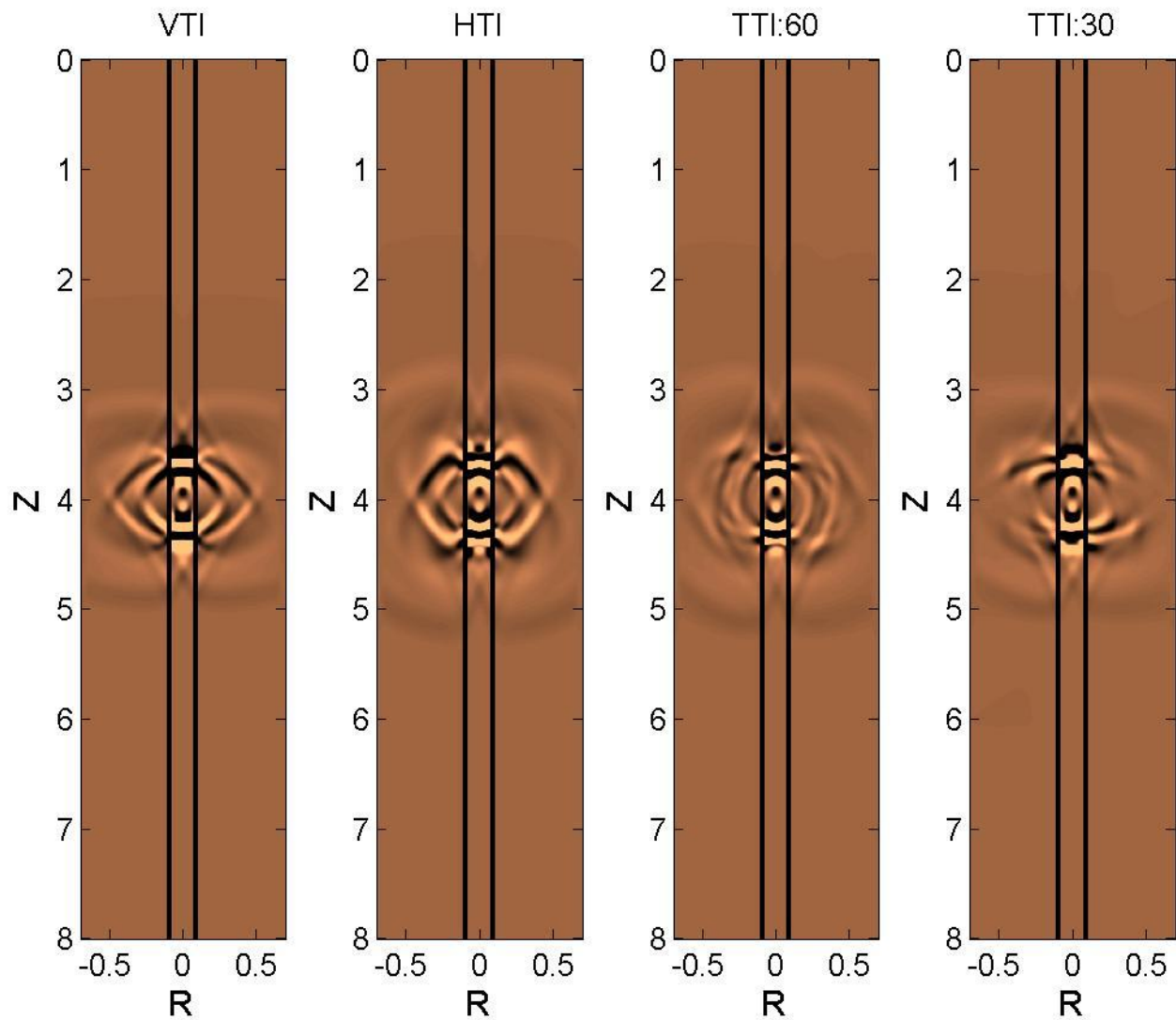
Периодическое азимутальное измельчение сетки для компенсации увеличения шага сетки;

# Акустический каротаж

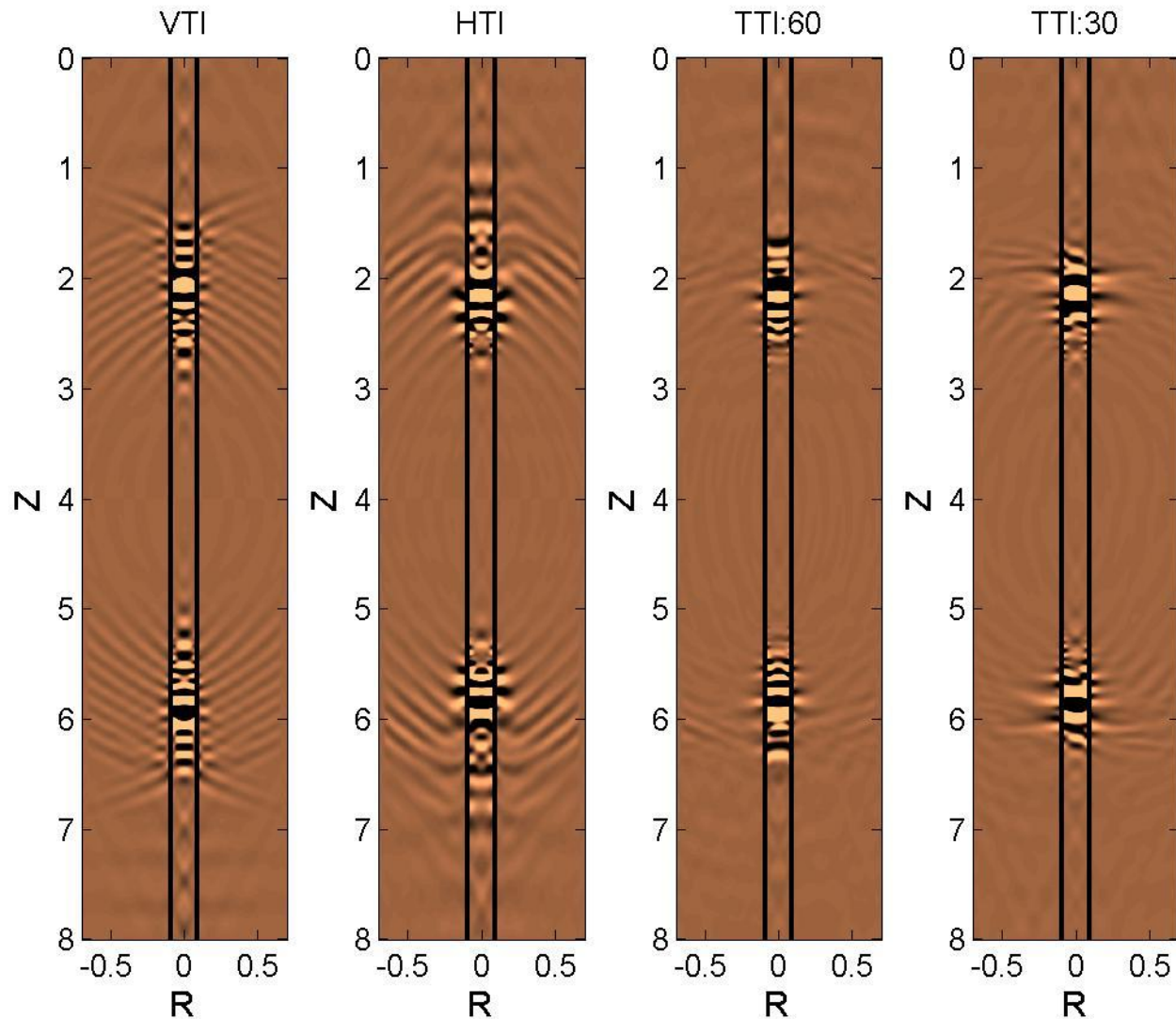




# Акустический каротаж

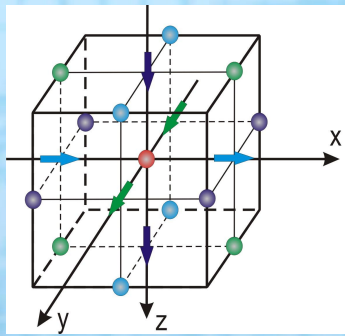


# Акустический каротаж





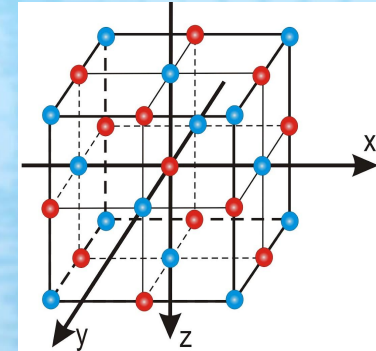
# Гибридный алгоритм



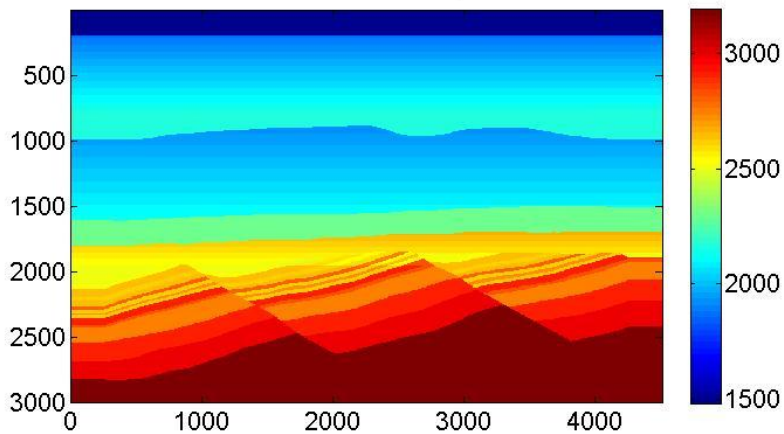
SSGS

Увеличение  
требований на  
вычислительные  
ресурсы в **пять** раз!

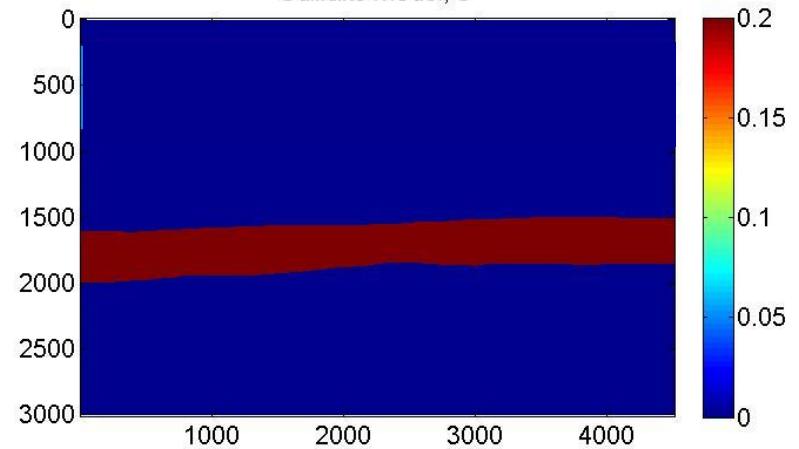
LS



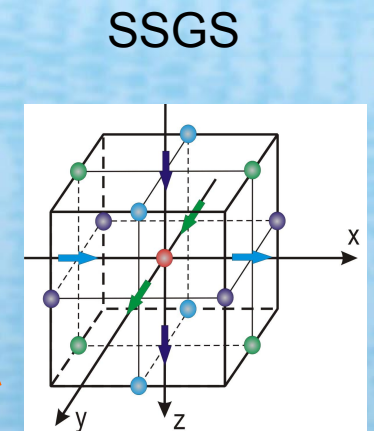
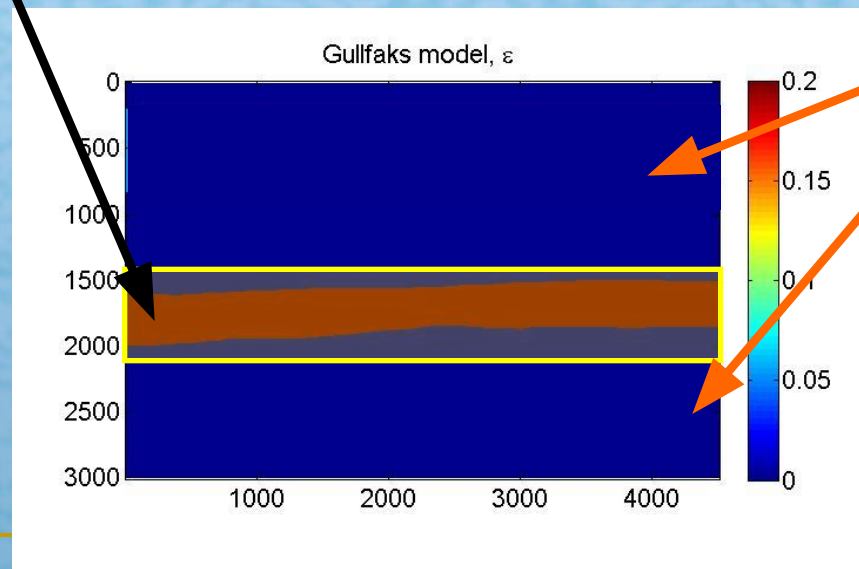
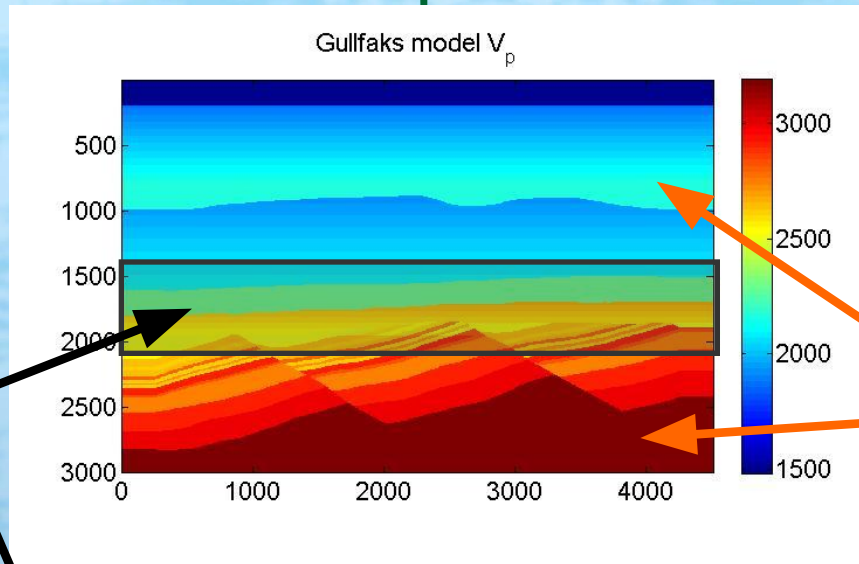
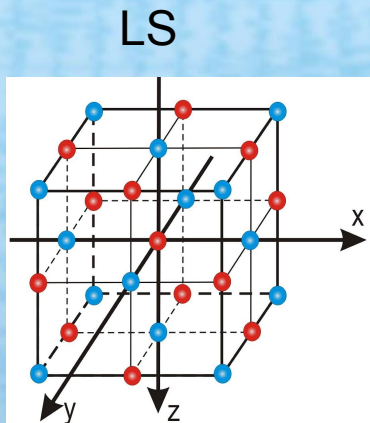
Gullfaks model  $V_p$



Gullfaks model,  $\epsilon$

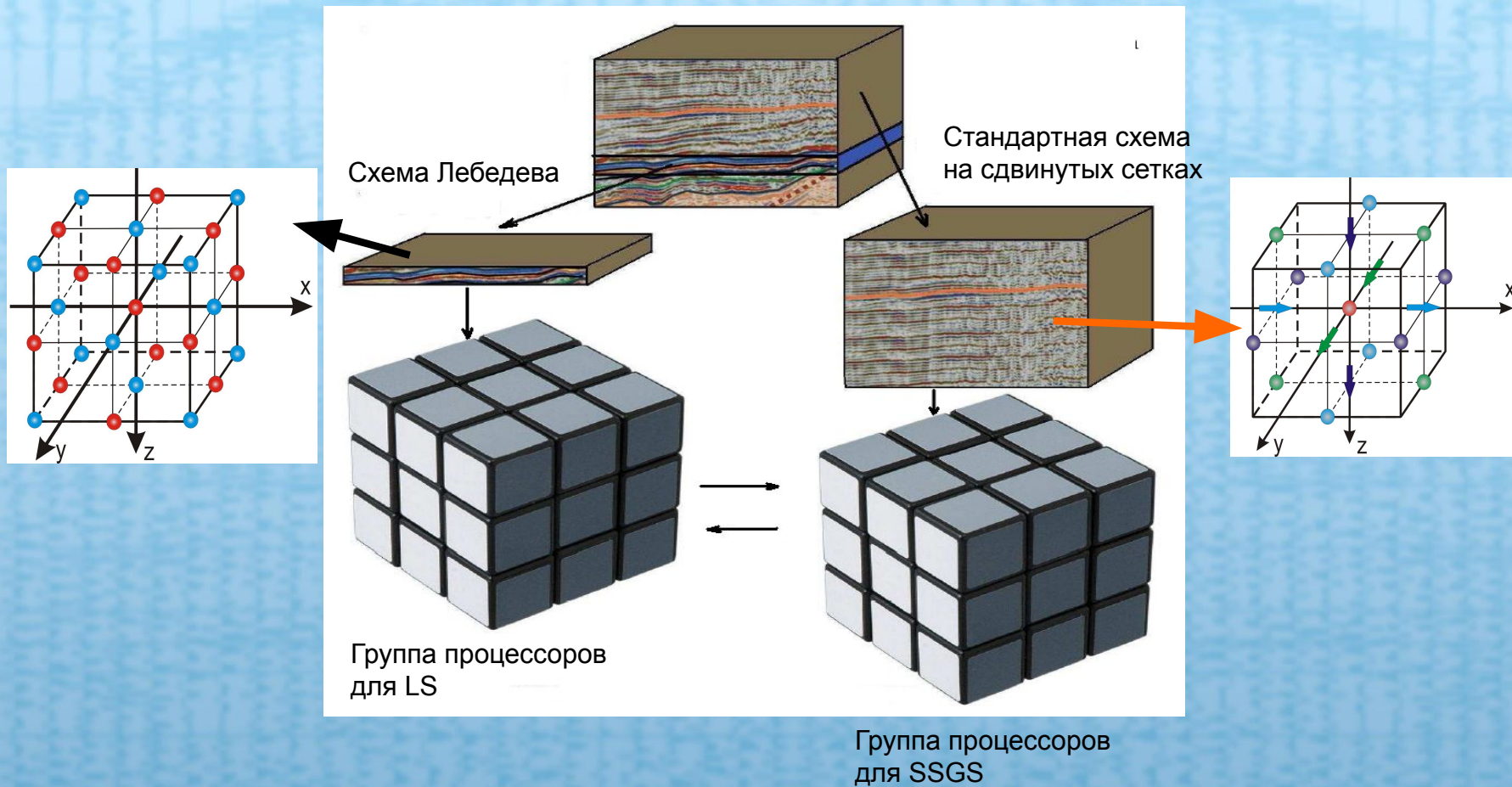


# Гибридный алгоритм



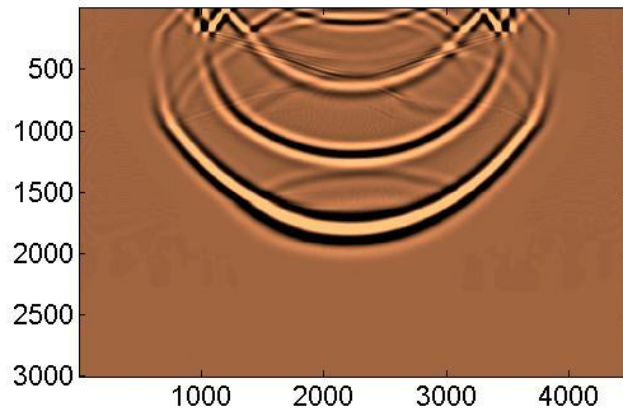


# Гибридный алгоритм

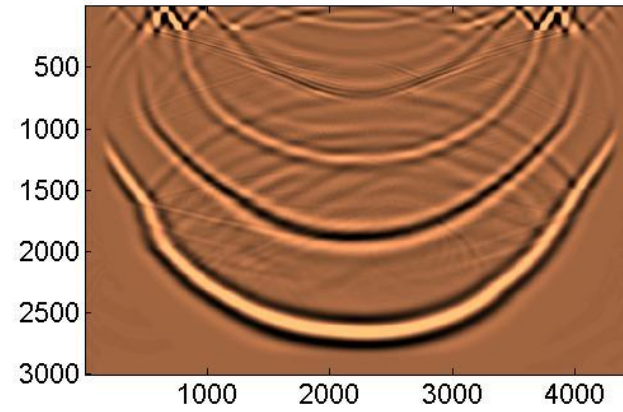


# Гибридный алгоритм

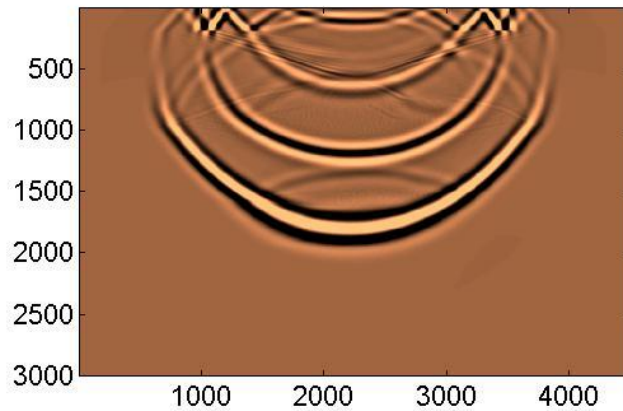
Coupling,  $t=0.9s$



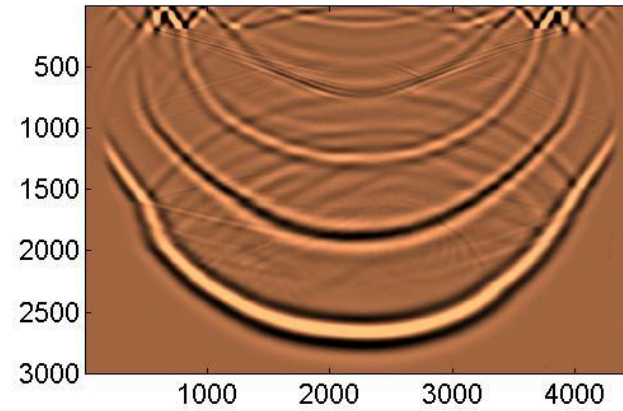
Coupling,  $t=1.2s$



Lebedev,  $t=0.9s$

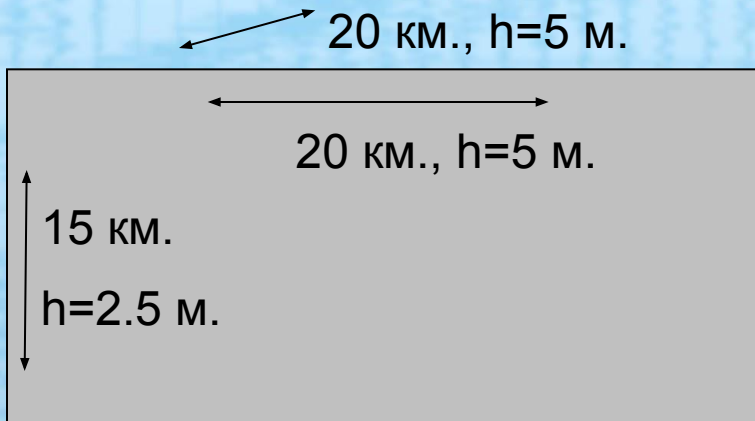


Lebedev,  $t=1.2s$





# Потребности в вычислительных ресурсах



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

# Заключение

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

- параллельная реализация на основе расщепления по пространственным подобластям;
- используются неблокирующие процедуры lsend, lrecv
- 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

---