

CF/Geo4: трёхмерное полноволновое моделирование для задач сейсморазведки на нефть и газ

В.Д. Левченко, А.В. Закиров, А.В. Иванов, Т.В.Левченко*,
А.Ю. Перепёлкина, С.А. Хилков*

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва

**ФГУП ВНИИгеосистем, Роснедра Минприроды России, Москва*

Балтийская школа–семинар «Петрофизическое моделирование
осадочных пород»
21 сентября 2012 г.

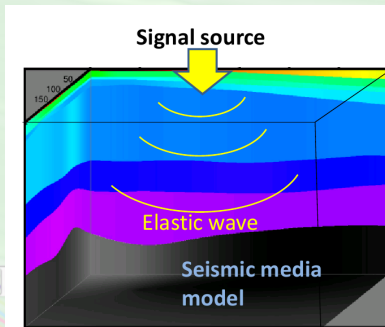
BalticPetroModel
2012

Полноволновое моделирование

Полная динамика: пространственно–временная эволюция поля упругих волн, возбуждаемых источником в гео- среде;

Все составляющие сейсмического сигнала: компоненты, фазы, амплитуды, форма сигналов;

Все типы волн: продольные, поперечные разных поляризаций, поверхностные, обменные, кратные, ..., неклассифицируемые (сейсмический «шум»).



Основные уравнения теории упругости — система эволюционных уравнений в частных производных гиперболического типа

уравнения
Ньютона

$$\rho \frac{\partial v_s}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_s}{\partial x_s} + \frac{\partial \tau_m}{\partial x_p} + \frac{\partial \tau_p}{\partial x_m}, \quad s = 1, 2, 3;$$

связь между
удлинениями
и скоростями
перемещений

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial x_s}, \quad p = 2, 3, 1;$$

$$\frac{\partial \delta_s}{\partial t} = \frac{\partial v_m}{\partial x_p} + \frac{\partial v_p}{\partial x_m}, \quad m = 3, 1, 2.$$

неизвестные — компоненты сейсмического поля:

компоненты тензора
напряжений

$$\mathcal{S} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \tau_3 & \tau_2 \\ \tau_3 & \sigma_2 & \tau_1 \\ \tau_2 & \tau_1 & \sigma_3 \end{pmatrix} (\vec{r}, t)$$

компоненты
удлинения и сдвига

$$\mathcal{E} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & \delta_3 & \delta_2 \\ \delta_3 & \varepsilon_2 & \delta_1 \\ \delta_2 & \delta_1 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} (\vec{r}, t)$$

скорость
перемещений

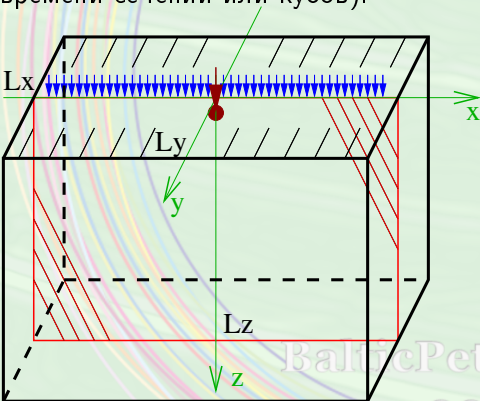
$$\vec{\mathcal{V}} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} (\vec{r}, t)$$

Baltic Petro Model

2012

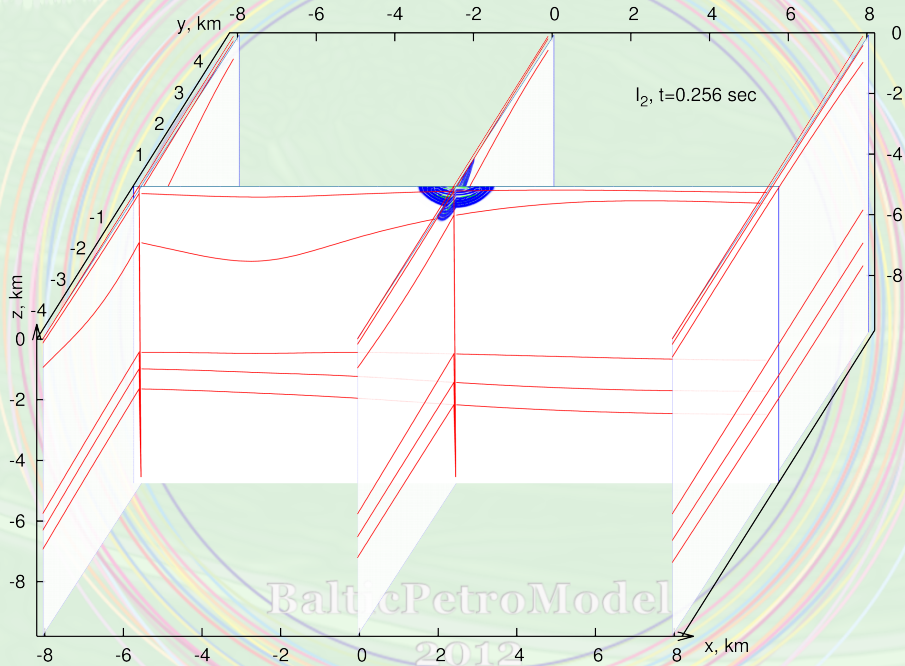
Постановка задачи моделирования — задачи Коши (модиф.):

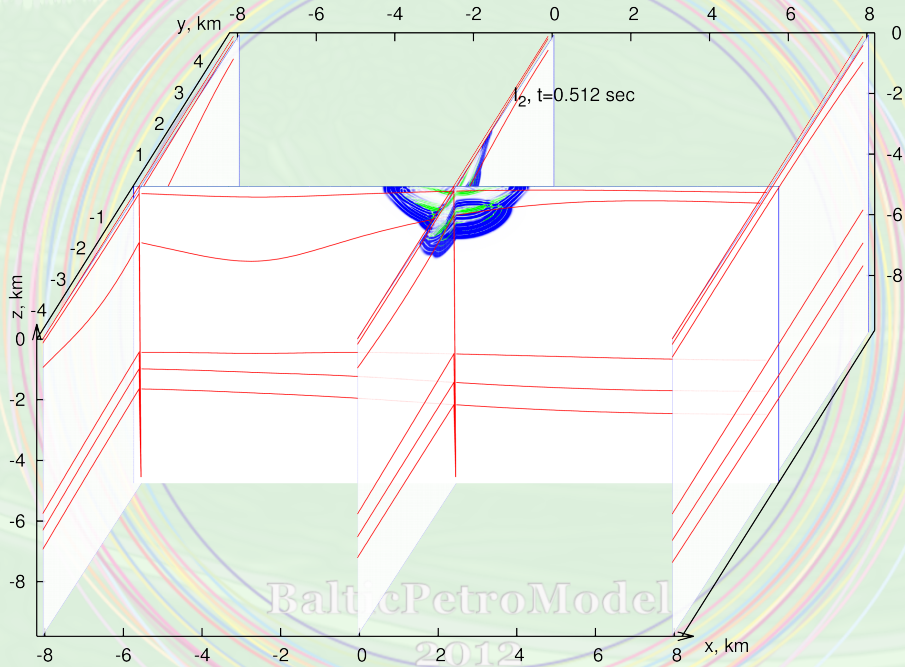
Зная значения сейсмических полей в источнике (начальные $(v_s, \sigma_s, \tau_s)|_{t=0, \vec{r}}$ и граничные на «дневной поверхности» $(v_s, \sigma_s, \tau_s)|_{t=0, y=0}$ **вычислить** их дальнейшую эволюцию внутри области $((v_s, \sigma_s, \tau_s)|_{t>0, \vec{r}})$. **Сохранить** значения полей только: в пунктах наблюдения (синтетические сейсмограммы) и/или в фиксированные моменты времени (срезы по времени сечений или кубов).

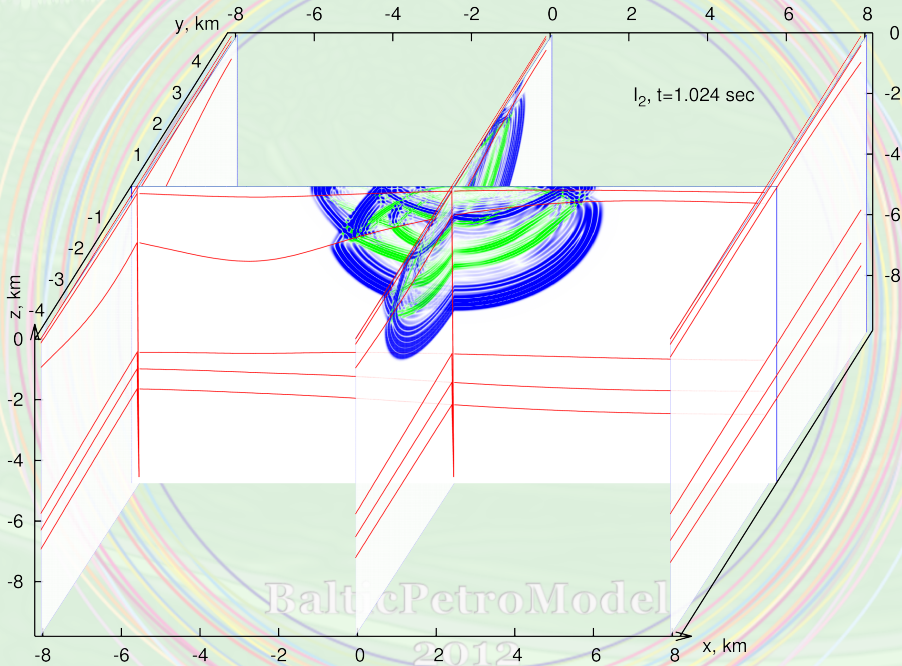


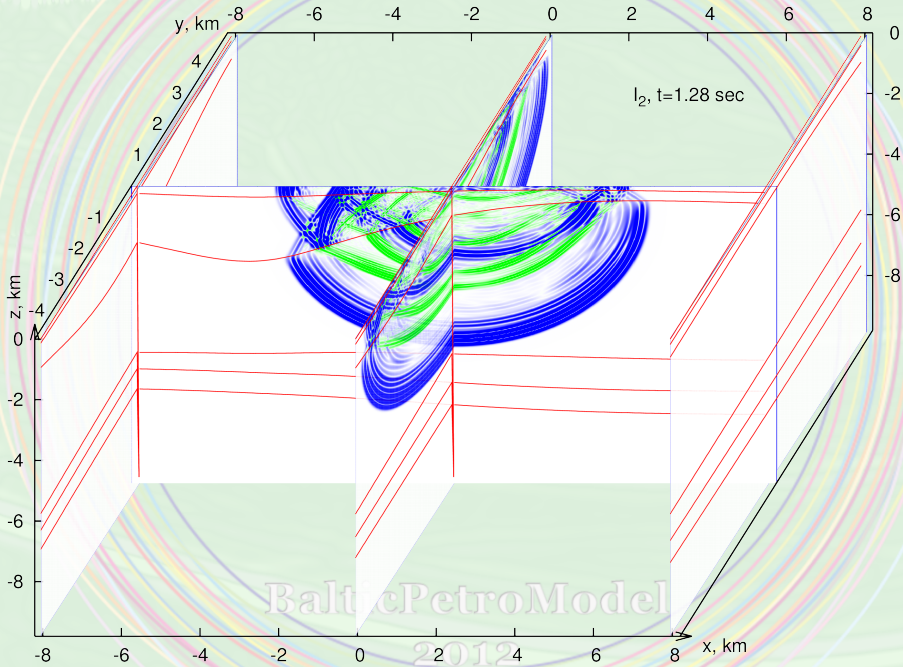
Граничные условия

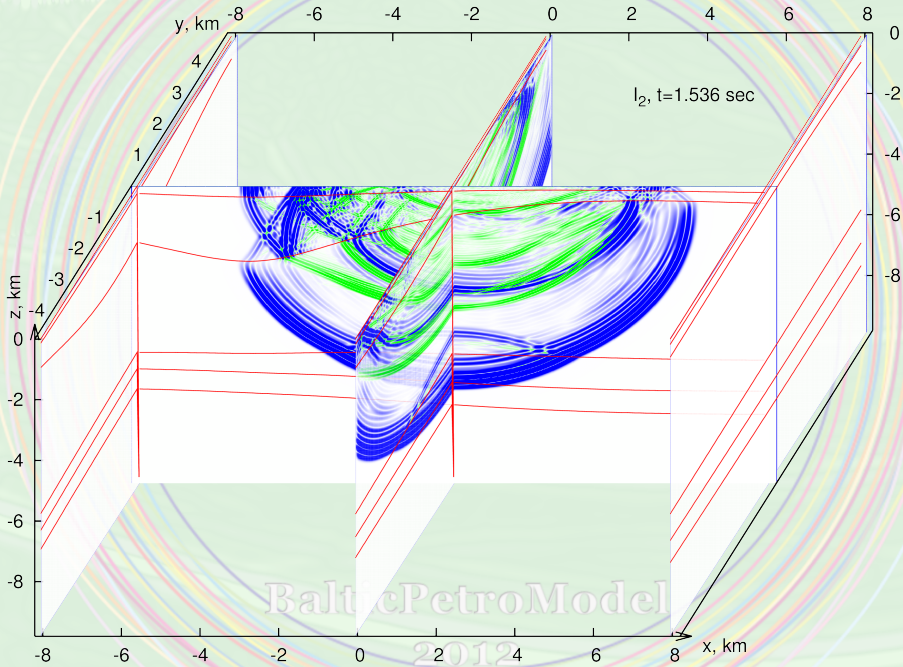
- ▶ специальные условия на «внутренних» границах (PML).
- ▶ распределенный по «дневной» границе дипольный источник сигнала продольных волн с заданными параметрами (частота, амплитуда, форма огибающей)

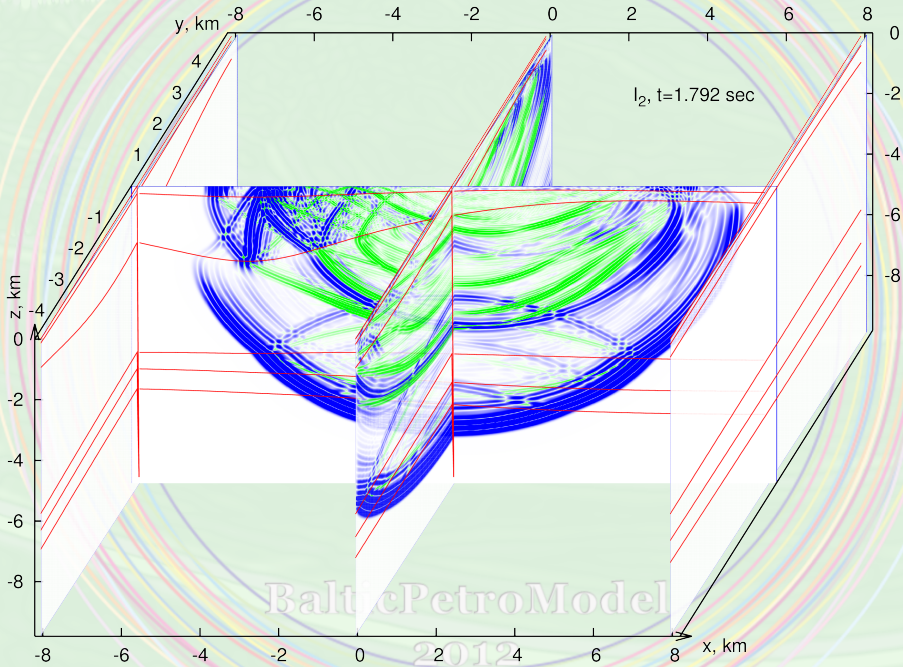


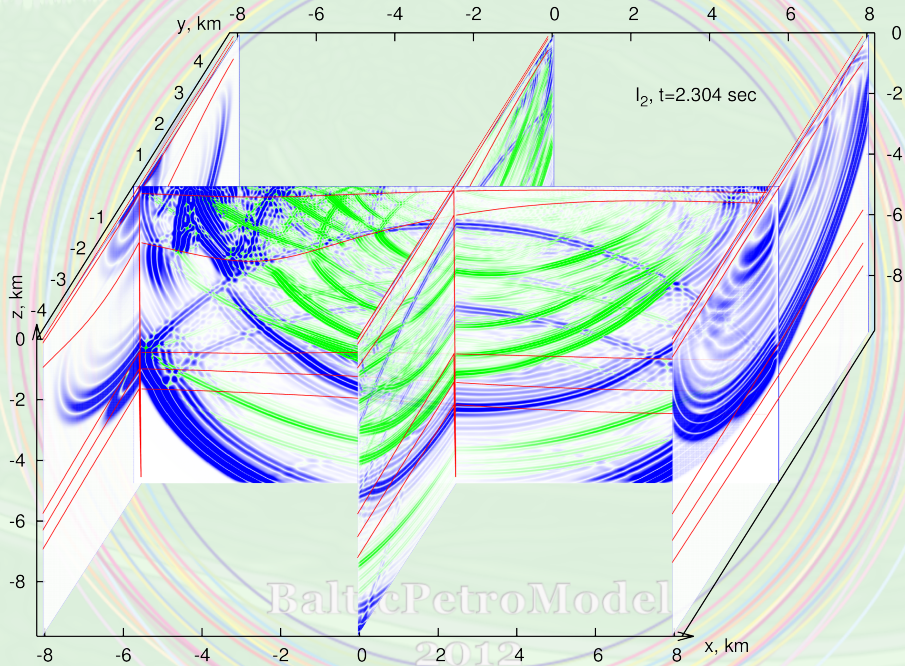


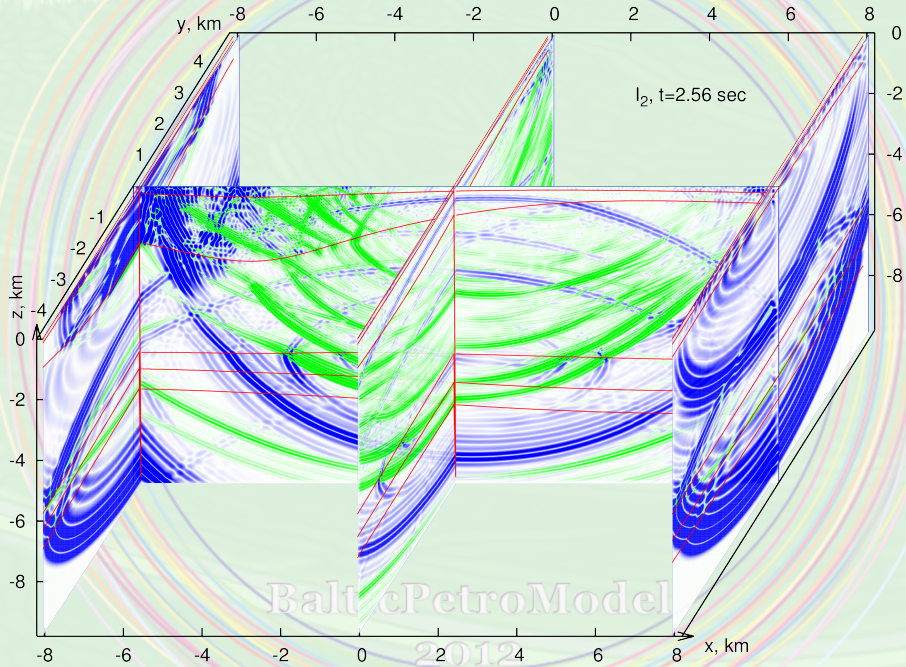


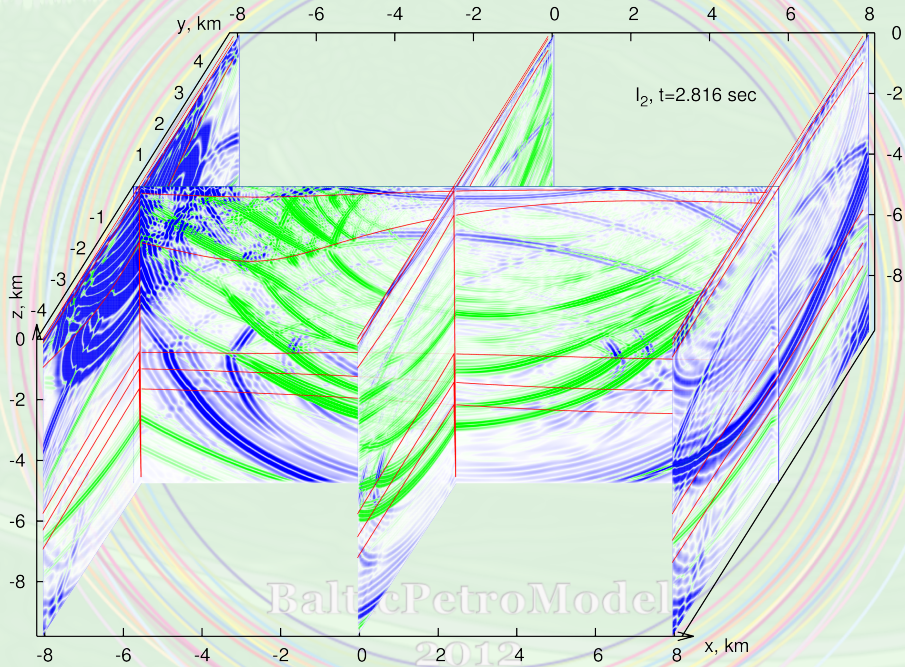


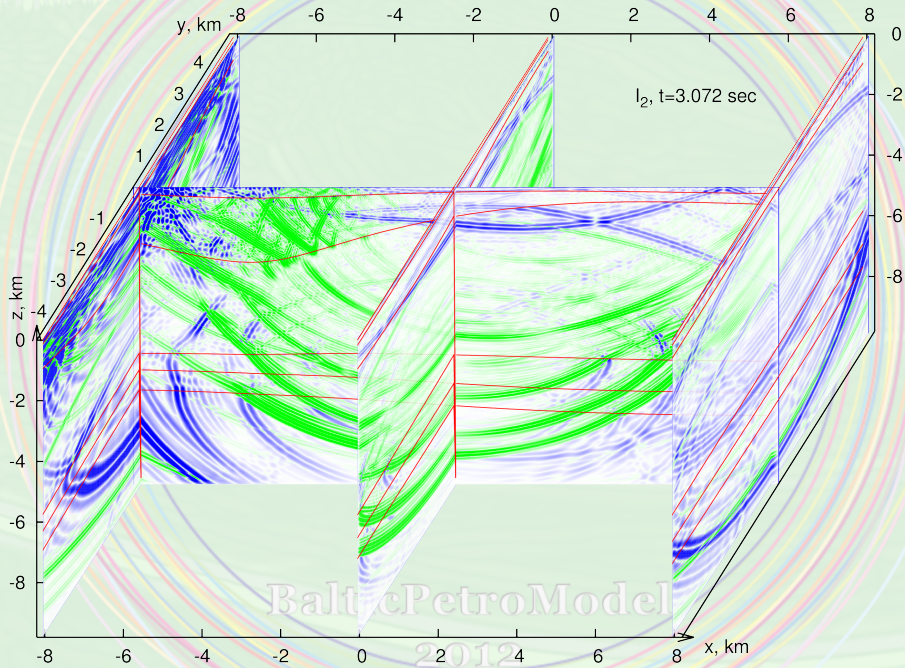


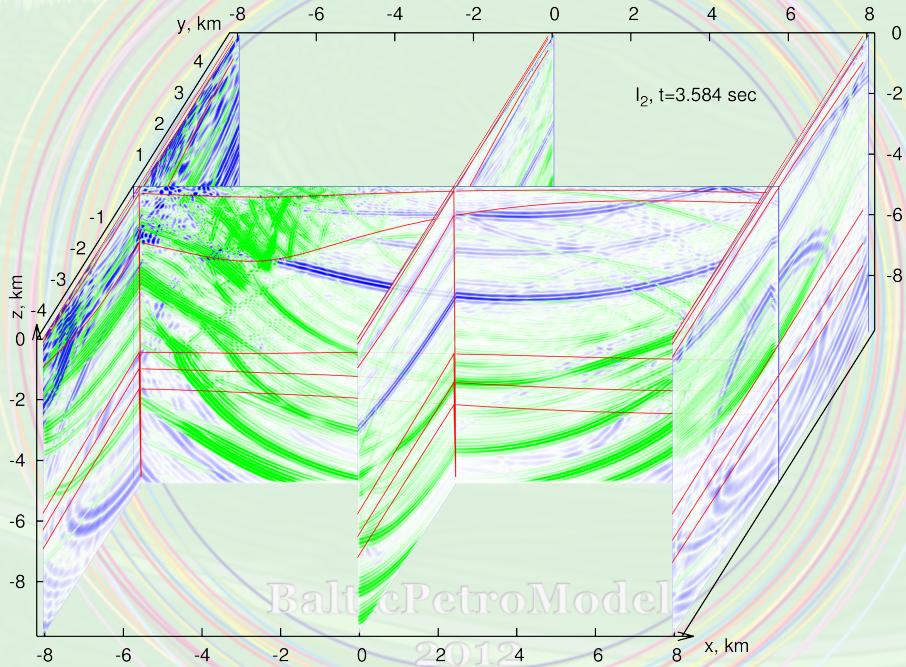


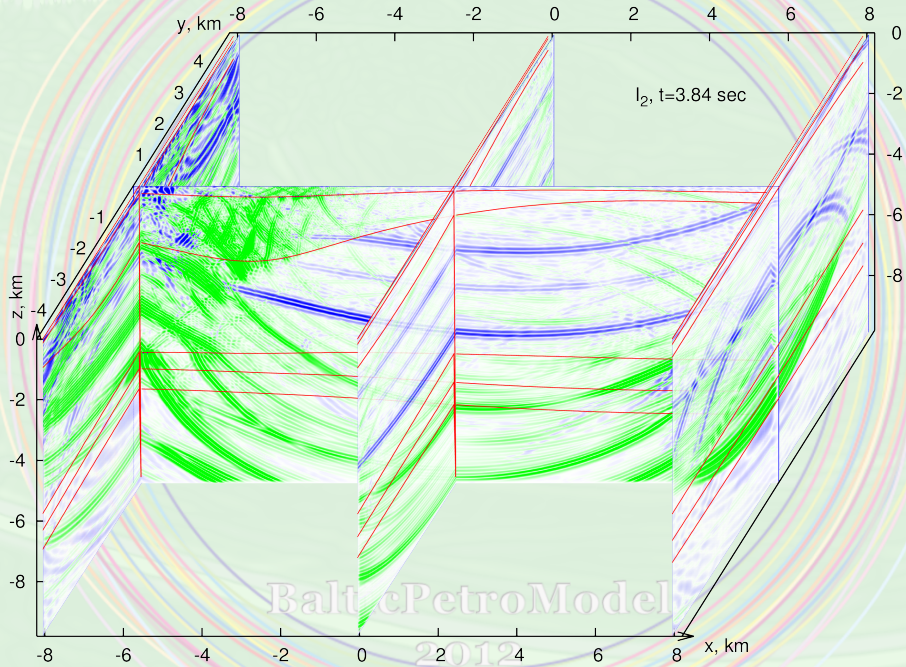


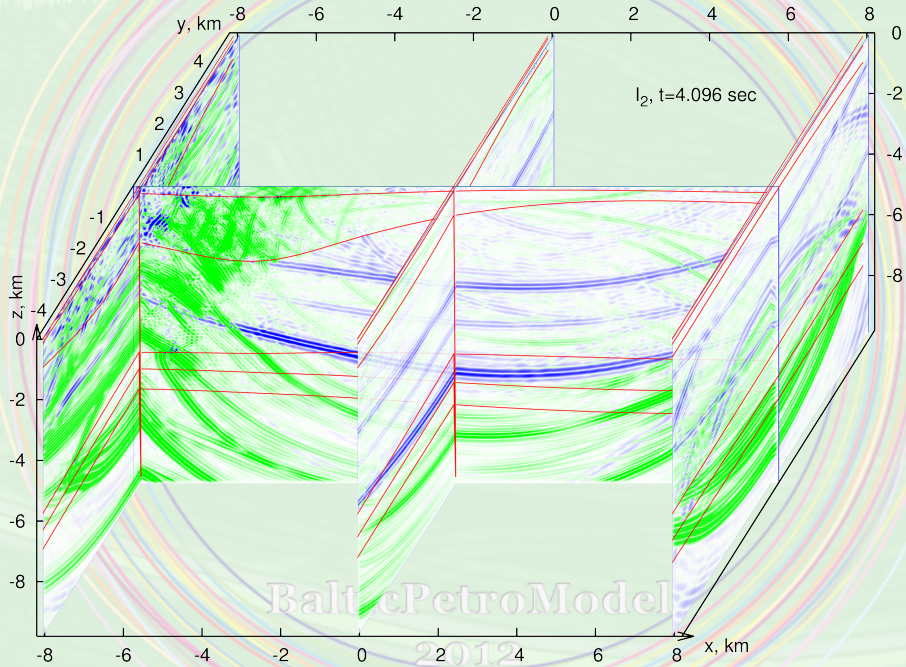


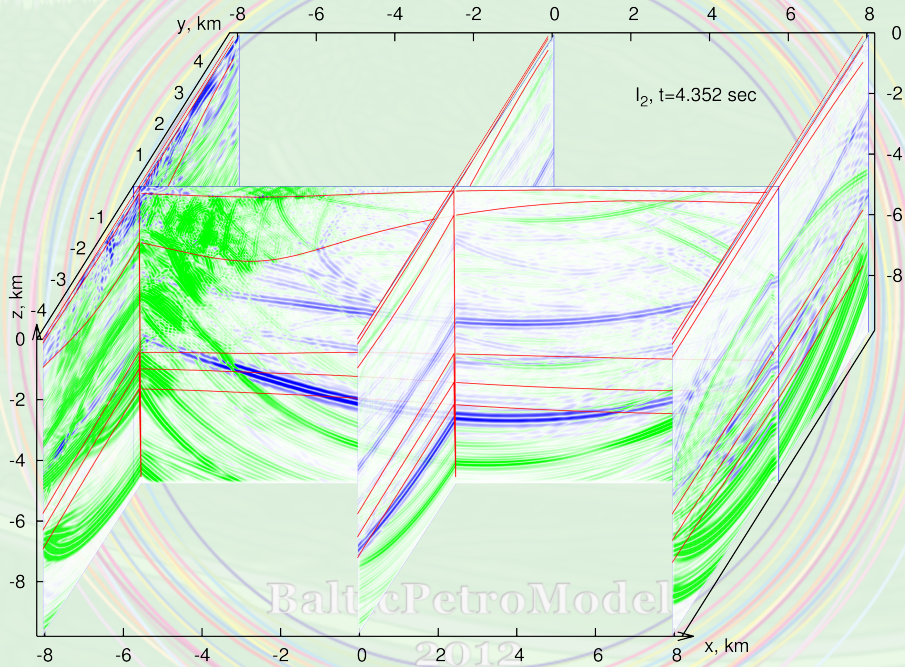


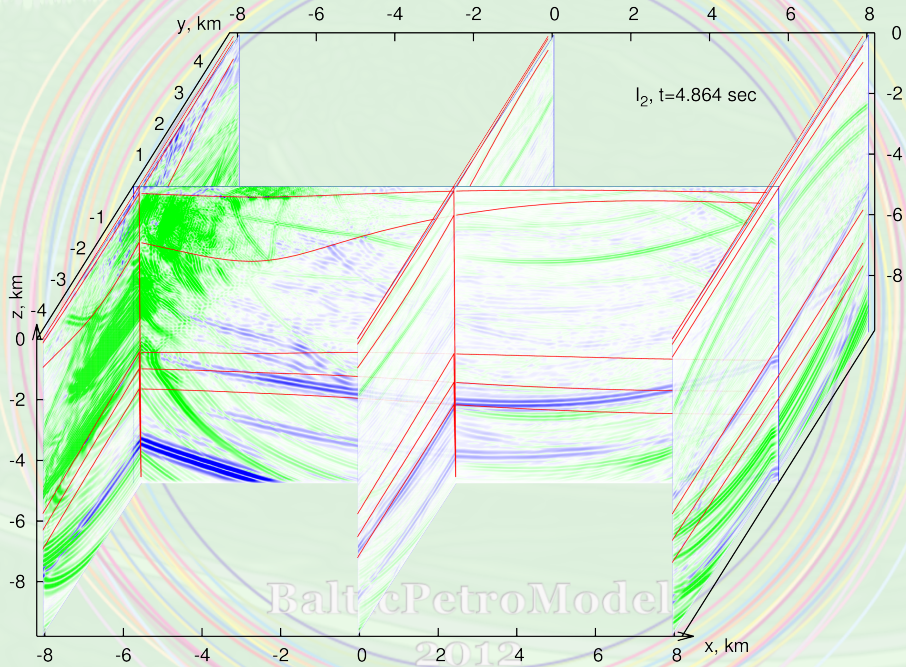


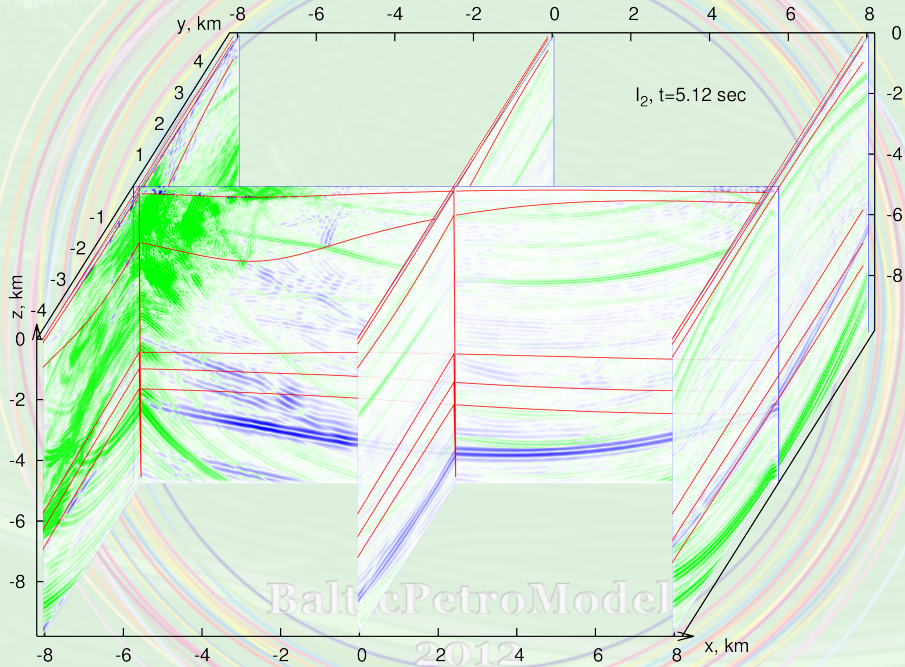


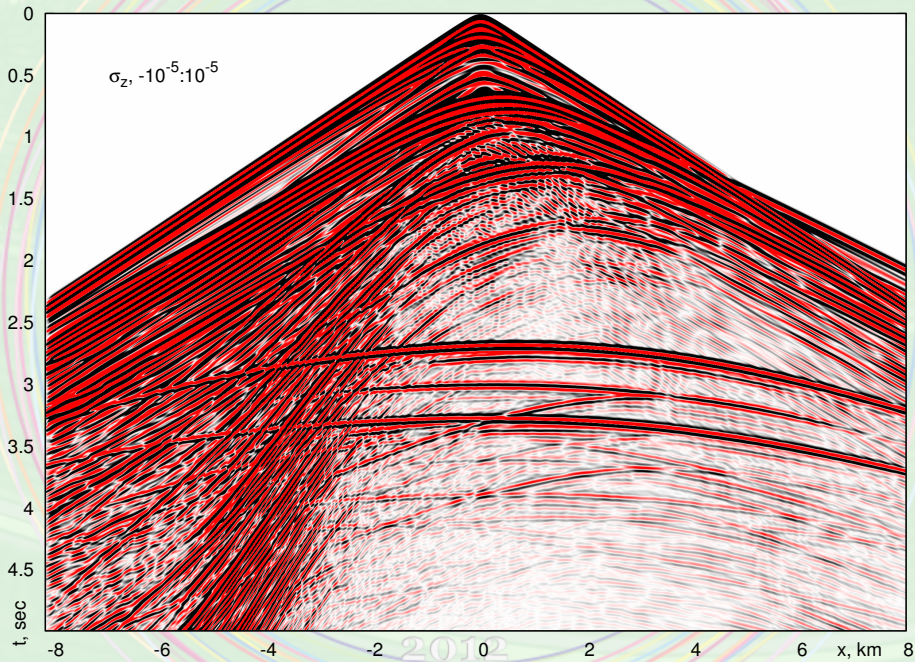












Требования адекватности полномасштабного моделирования

- ▶ Модели геосреды трёхмерны по пространству и имеют необходимый набор сейсмофизических параметров таких как плотность, модули упругости, а также параметры анизотропии и затухания, характеризующих трещиноватость, пористость, флюидонасыщенность и т.д.
- ▶ Полномасштабная пространственно-временная динамика сейсмического поля восстанавливается с возможностью выделения заранее выбранных типов волн и их групп с прослеживанием от источника до итоговых сейсмограмм на уровне амплитуд на порядки меньших уровня сейсмического «шума».
- ▶ Точность расчётов должна обеспечивать совпадение моделируемых синтетических сейсмограмм их реальным (полевым) аналогам по следующим параметрам: времена первых вступлений и максимумов сигнала вдоль всего годографа, а также амплитуды и формы сигналов-откликов от целевых объектов, обычно малоcontrastных.
- ▶ “Себестоимость” моделирования существенно меньше стоимости полевой сейсморазведки.

Основные уравнения теории упругости — система эволюционных уравнений в частных производных гиперболического типа

уравнения
Ньютона

$$\rho \frac{\partial v_s}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_s}{\partial x_s} + \frac{\partial \tau_m}{\partial x_p} + \frac{\partial \tau_p}{\partial x_m}, \quad s = 1, 2, 3;$$

связь между
удлинениями
и скоростями
перемещений

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial x_s}, \quad p = 2, 3, 1;$$

$$\frac{\partial \delta_s}{\partial t} = \frac{\partial v_m}{\partial x_p} + \frac{\partial v_p}{\partial x_m}, \quad m = 3, 1, 2.$$

неизвестные — компоненты сейсмического поля:

компоненты тензора
напряжений

$$\mathcal{S} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \tau_3 & \tau_2 \\ \tau_3 & \sigma_2 & \tau_1 \\ \tau_2 & \tau_1 & \sigma_3 \end{pmatrix} (\vec{r}, t)$$

компоненты
удлинения и сдвига

$$\mathcal{E} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & \delta_3 & \delta_2 \\ \delta_3 & \varepsilon_2 & \delta_1 \\ \delta_2 & \delta_1 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} (\vec{r}, t)$$

скорость
перемещений

$$\vec{\mathcal{V}} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} (\vec{r}, t)$$

Baltic Petro Model

2012

Модель линейно-упругой среды

Система замыкается определяющими уравнениями (обобщённым законом Гука). Конкретный вид зависит от типа локальной анизотропии среды и моделей затухания (+дисперсии). В общем случае можно записать матричное уравнение:

$$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3)^T = \left(C_{ij} + C'_{ij} \frac{\partial}{\partial t} \right) (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3)^T$$

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} l_1 & \lambda_3 & \lambda_2 & \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} \\ \lambda_3 & l_2 & \lambda_1 & \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} \\ \lambda_2 & \lambda_1 & l_3 & \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} \\ \pi_{11} & \pi_{21} & \pi_{31} & \mu_1 & m_3 & m_2 \\ \pi_{12} & \pi_{22} & \pi_{32} & m_3 & \mu_2 & m_1 \\ \pi_{13} & \pi_{23} & \pi_{33} & m_2 & m_1 & \mu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_{ij} & \Pi_{ij} \\ \Pi_{ji} & \mathcal{M}_{ij} \end{pmatrix}$$

$$\Lambda_{ij}(x, y, z), \mathcal{M}_{ij}(x, y, z), \Pi_{ij}(x, y, z)$$

PetroModel

2012

Модели [ан]изотропной среды (локально), Λ_{ij} и M_{ij}

Изотропная среда (2 независимых компоненты, 2 значения скоростей (продольных и поперечных волн)),

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}, \quad V_s = \sqrt{\mu/\rho}$$

Трансверсально-изотропная среда — 5 компонент (плоскопараллельные прослойки осадочных пород или среды с системой параллельных трещин)

Ортотропная среда — 9 компонент (слоистая среда, нарушенная системой поперечных трещин)

$$\Lambda_{ij} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda_3 + \mu_3 & \lambda_3 & \lambda_1 \\ \lambda_3 & \lambda_3 + \mu_3 & \lambda_1 \\ \lambda_1 & \lambda_1 & l_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} l_1 & \lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & l_2 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & \lambda_1 & l_3 \end{pmatrix}$$

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{pmatrix}$$

$\pi_{ij} = 0$. Если оси системы координат совпадают с осями анизотропии:

$$\rho \frac{\partial v_1}{\partial t} = G_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_3}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_2}{\partial x_3}, \quad \text{Уравнения движения (Ньютона)}$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = l_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \lambda_3 \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \lambda_2 \frac{\partial v_3}{\partial x_3}, \quad \text{Определяющие уравнения}$$

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial t} = \mu_1 \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right). \quad \text{(обобщенный закон Гука)}$$

Модель вязко-упругой среды

Обобщенный закон Гука, с учетом вязких потерь можно записать в следующей форме:

$$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3)^T = \left(C_{ij} + C'_{ij} \frac{\partial}{\partial t} \right) (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3)^T$$

$$\lambda' = \zeta - \frac{2}{3}\eta, \quad \mu' = \eta.$$

ζ, η — коэффициенты объемной и сдвиговой вязкости

Пространственный коэффициент затухания продольной волны с частотой ω , волновым числом k и скоростью $c \equiv \omega/k$ можно оценить: $\alpha/k = (\zeta + \frac{4}{3}\eta) \omega / 2\rho c^2$.

$$\rho \frac{\partial v_1}{\partial t} = G_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_3}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_2}{\partial x_3},$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = 2\mu \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \lambda \sum_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + 2\eta \frac{\partial \dot{v}_1}{\partial x_1} + \left(\zeta - \frac{2}{3}\eta \right) \sum_i \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial x_i},$$

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right) + \eta \left(\frac{\partial \dot{v}_3}{\partial x_2} + \frac{\partial \dot{v}_2}{\partial x_3} \right), \quad \dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial t}$$

линейный размер области:

$L \sim 10\text{ км}$,

время $T \sim 10\text{ сек}$,

дискретность:

пространства $\Delta^x \sim 10\text{ м}$

времени $\Delta^t \sim 1\text{ мс}$,

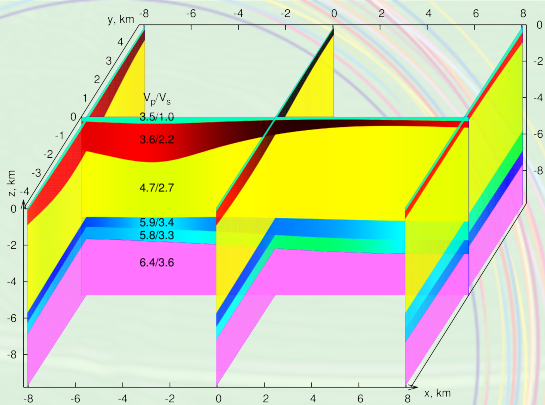
$f_0 \sim 10 \div 100\text{ Гц}$.

Вычислительная

сложность:

$N_T = 10^3 \div 10^5$,

$N_c = 10^9 \div 10^{12}$



Базовая модель: сложнопостроенная толстослоистая ($> 25\text{ м}$), изотропная, глубины границ заданы на сетке по латерали (100 м^2 с интерполяцией 3го порядка), возможны выклинивания/. **Индексация.** Доступные типы слоев: однородные, неоднородные по латерали, градиент по глубине

Дополнения базовой модели: тонкие слои и локальные включения, с анизотропией и затуханием, специальные.

Система наблюдения: 3D система наблюдения площадью до 100 км^2 на сетке с шагом 25 м и длиной годографа до 14.5 км . Фланговая с максимальным выносом до 22.5 км . (либо симметричная с длиной годографа до 25 км .) и параллельными

Явные сеточные методы с локальным шаблоном

$$N_c \simeq 10^9, N_T \simeq 2\sqrt{3}K\sqrt[3]{N_c}.$$

Вычислительная сложность:

$9N_c$ данных, $N_{\text{calc}} \simeq 100 \cdot 2\sqrt{3}KN_c^{4/3}$ операций

Неявные схемы (прямые, плотная матрица):

обращение матрицы $\simeq 2N_c^3$ операций, $\simeq N_c^2$ данных,

Вычисление решения $N_{\text{calc}} \simeq 2N_c^2$ операций.

Точность аппроксимации (погрешность скорости сигналов/волн)

: $O(1/\text{ppw}_t^2)$, $O(1/\text{ppw}_x^4)$, $\text{ppw}_x = V^{\min}/f^{\max}\Delta^x$, $\text{ppw}_t = 1/f^{\max}\Delta^t$.

Устойчивость (условие Куранта) $\Delta_t \leq \Delta_x/V^{\max}k\sqrt{3}$

Параметры: $\lambda^{\min} = V^{\min}/f^{\max}$, $K = \text{ppw}_t/\text{ppw}_x \geq k\sqrt{3}V^{\max}/V^{\min}$.

Оптимальный порядок обработки данных $\rightarrow$ алгоритмы LRnLA.

BalticPetroModel

2012

Точность

$$V^{\max} = 12.5 \text{ км/с}$$

$$f_0 = 40 \text{ Гц}$$

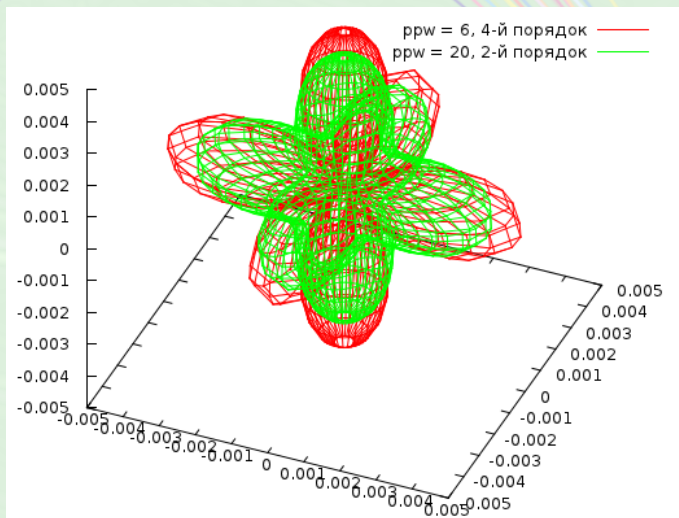
$$V^{\min} =$$

$$3/2/1.5 \text{ км/с}$$

$$f_0 = 20 \text{ Гц}$$

$$V^{\min} =$$

$$1.5/1/0.75 \text{ км/с}$$



Относительная ошибка фазовой скорости (численная дисперсия и анизотропия).

Согласование границ слоёв с порядком аппроксимации

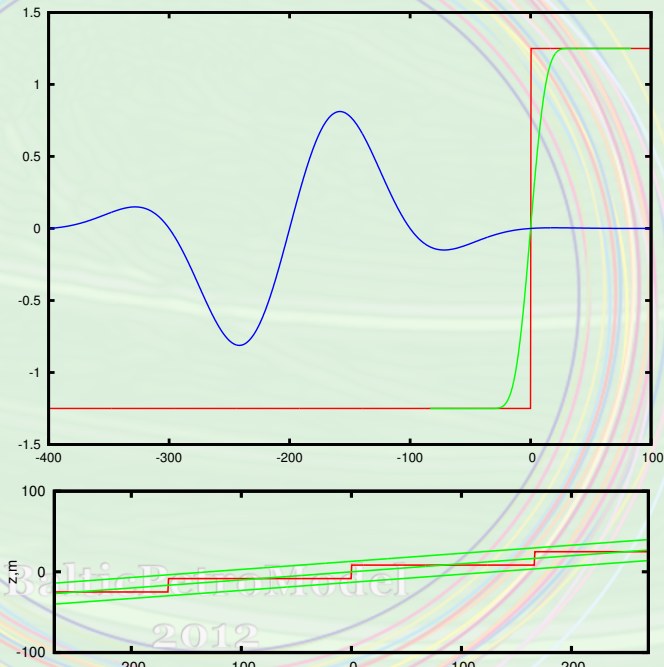
Функция источника
сигнала: P_6 ;

интерполяционная
функция
сглаживания
границы слоев: P_4 ;

интерполяция
упругих
коэффициентов: P_3 ;

PML 24 ячейки ($\simeq$
1/10 производитель-
ности);

Результат:
регистрация сигнала
уровня $10^{-6} A_\lambda$



Применение алгоритмов LRnLA в полномолновом моделировании

Научно-поисковые задачи Нет актуального ограничения на размер модели. Эффективность вычислений близка к предельной (десятки процентов).

Инженерно-поточные задачи Обеспечивается высокий темп проведения расчетов на относительно дешевых вычислительных системах. Легко адаптируется к актуальным вычислительным архитектурам, доступны вычисления как сервис (облачные).

Интерактивные задачи Адекватная оценка времени расчета, исходя из параметров, в том числе и при шкалировании «вниз». Для 2D декомпозиции возможно эффективная реализация на GPU.

BalticPetroModel
2012

вычислительный кластер для массовых расчетов

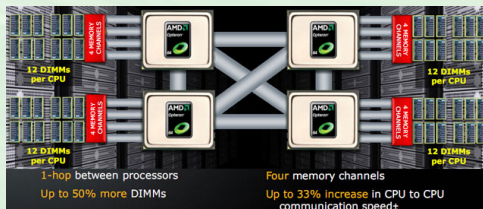


ET technologies

RS560 G4

— 5 узлов, интерконнект: InfiniBand 4GB, 3xEthernet 1Gbit,

— Каждый узел: 2U



— 48xCore/8xNUMA

— 4xOpt6174@2.4GHz/12ядер/L3 2x6MB; RAM: 256GB DDR3@1333GHz;

— 2xPCI-E 8x SSD RAID0

— 6x2TB SATA 7200rpm HDD / 1x40GB SATA SSD;

— производительность узла 0.9TFlops; кластера 4.5TFlops;

— стоимость кластера (2011г) 2,500млн.руб.

CF/Geo4: Особенности реализации полноволнового моделирования

- ▶ Применение локально–рекурсивных нелокально–асинхронных алгоритмов (LRnLA), приближающих эффективность вычислений к предельной. Достижимый темп вычислений (в сек.) более 1млрд ячеек сетки*шагов в расчете на узел кластера с линейным ускорением по числу узлов.
- ▶ Трёхмерная модель слоисто–неоднородной среды с градиентами и включениями, поддерживающая индексацию необходимых физических параметров.
- ▶ Используются конечно–разностные схемы 2 порядка по времени и 4 порядка по пространству, согласованные с источником продольных волн, границами раздела слоёв, а также граничным условием PML на «внутренних» границах расчётной области.

BalticPetroModel

2012