

Численное полноволновое 3D моделировании
сейсмических полей объектов, характерных для районов
с проявлением соляно-купольной тектоники, и
возможные модификации в существующих
вычислительных кодах на примере кода CF/GEO4

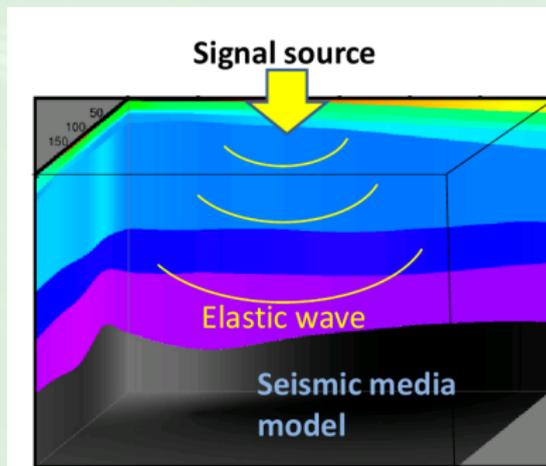
В.Д. Левченко*, С.А. Хилков, Т.В.Левченко, В.Е. Рок
ФГУП ВНИИгеосистем, Роснедра Минприроды России, Москва
* ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва

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

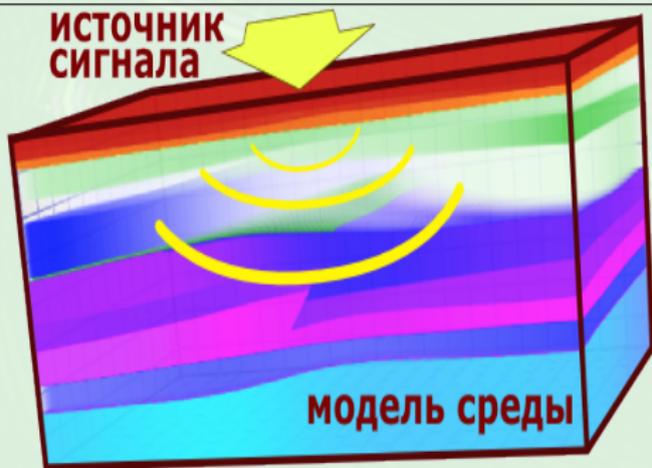
$$\mathcal{E} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & \delta_3 & \delta_2 \\ \delta_3 & \varepsilon_2 & \delta_1 \\ \delta_2 & \delta_1 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} (\vec{r}, t)$$

скорость перемещений

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

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 источник сигнала продольных волн с заданными параметрами (частота, амплитуда, форма огибающей, диаграмма направленности)

Модель линейно-упругой среды

Система замыкается определяющим уравнением. Обобщённый закон Гука:

$$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3)^T = C_{ij} (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3)^T$$

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

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

Конкретный вид зависит от типа локальной анизотропии среды и моделей затухания (+дисперсии).

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

Изотропная: 2 независимых компоненты, 2 значения скоростей (продольных и поперечных волн), $V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, $V_s = \sqrt{\mu/\rho}$

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

Ортотропная: 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:

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

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

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

Уравнения движения (Ньютона)

Определяющие уравнения

(обобщенный закон Гука)

Модель вязко–упругой среды

обобщенный закон Гука, с учетом вязких потерь:

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

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

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:

$L \sim 10\text{км}$,

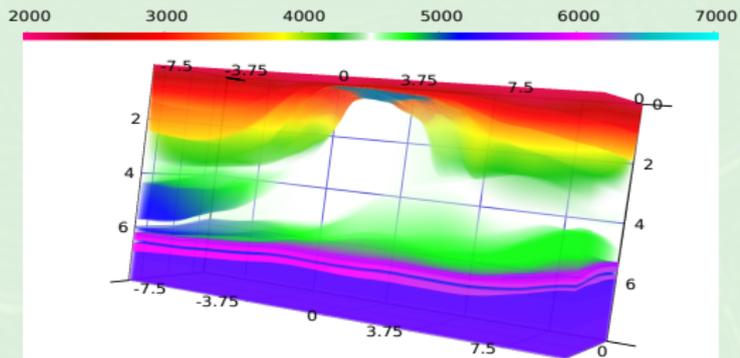
время $T \sim 10\text{сек}$,

дискретность:

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

времени $\Delta^t \sim 1\text{мс}$,

$f_0 \sim 10 \div 100\text{Гц}$.



Система наблюдения 3D: типа «крест» площадью до 100 км^2 на сетке с шагом 25 м и длиной географа до 14.5 км. «линейная»: фланговая с максимальным выносом до 22.5 км., либо симметричная с длиной географа до 25 км. и параллельными ЛПП с удалением до 2.4 км от ЛПВ, расстояние между ПП 25 м.

Пункт возбуждения: центр расширения или сосредоточенная сила.

Базовая модель: сложнопостроенная толстослоистая ($> 25\text{м}$), изотропная, глубины границ заданы на сетке по латерали (50м^2 с интерполяцией 3го порядка), возможны выклинивания, надвиги и т.д. Доступные типы слоев: однородные, неоднородные по латерали, градиент по глубине

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

Согласование границ слоёв с порядком аппроксимации

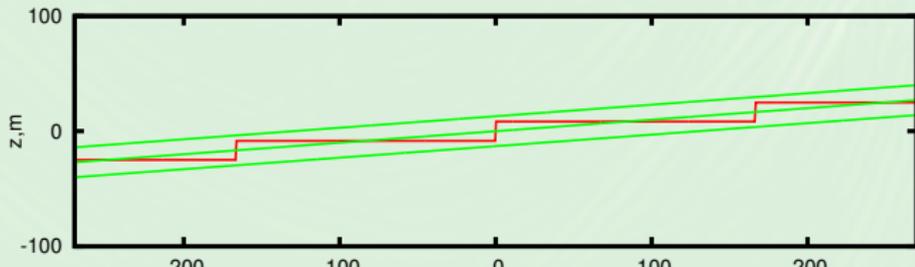
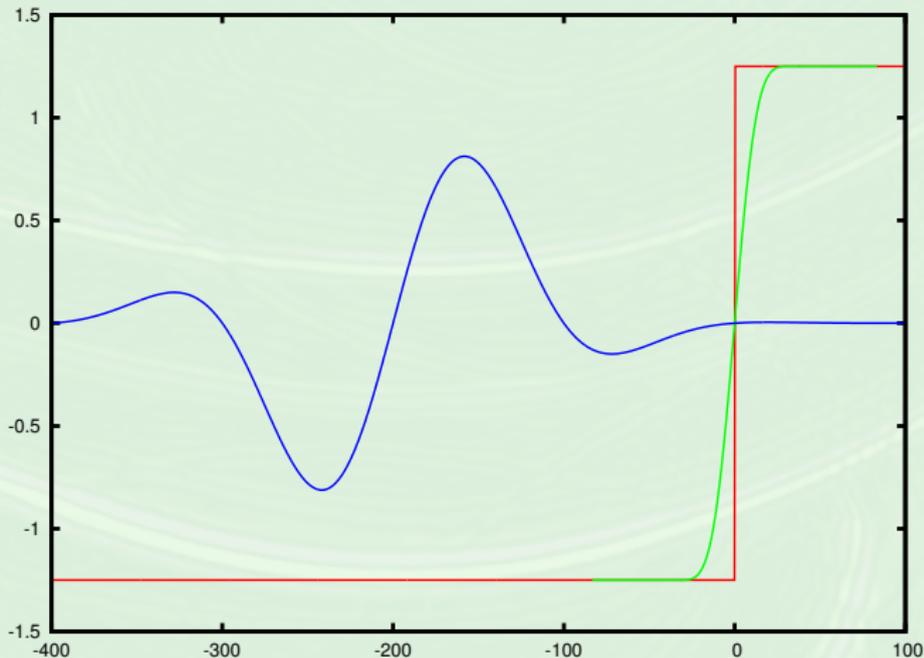
Функция источника
сигнала: P_6 ;

интерполяционная
функция
сглаживания
границы слоев: P_4 ;

интерполяция
упругих
коэффициентов: P_3 ;

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

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



Явные сеточные методы с локальным шаблоном

Точность аппроксимации (погрешность скорости сигналов/волн):

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

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

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

Типовые значения параметров:

$$V^{\max} = 12.5\text{км/с},$$

$$f_0 = 40\text{Гц}, V^{\min} = 3/2/1.5\text{км/с}$$

$$f_0 = 20\text{Гц}, V^{\min} = 1.5/1/0.75\text{км/с}$$

Вычислительная сложность:

$$N_c \simeq 10^9, N_T \simeq 2\sqrt{3}K\sqrt[3]{N_c} \sim 10^5.$$

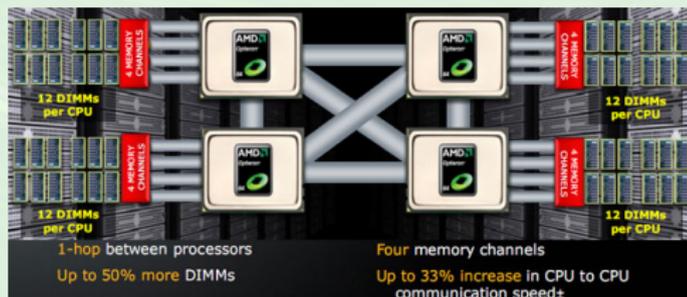
$$9N_c \text{ данных } (\sim 40\text{ГБ}), N_{\text{calc}} \simeq 100 \cdot 2\sqrt{3}KN_c^{4/3} \text{ операций } (\sim 10^{16})$$

Оптимальный порядок обработки данных \rightarrow алгоритмы LRnLA.

— 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 4.5TFlops; кластера 22.5TFlops;

— стоимость кластера (2011г) 2,5млн.руб. + (2014г) 250т.руб

Решённые и решаемые с использованием кода CF/Geo4 задачи (МОГТ 2D/3D 1С/3С, ВНИИГеосистем, Роснедра):

- ▶ Геофизическое обоснование прогноза строения отложений осадочного чехла в районах с проявлением солянокупольной тектоники;
- ▶ Прогноз нефтегазоперспективных объектов с использованием технологии трансформации волновых полей в сейсморазведке МОВ-ОГТ (в районах Восточной Сибири, Предуральяского краевого прогиба, Прикаспийской впадины).
- ▶ Обработка и интерпретация сейсмических материалов, получаемых на опорных геофизических и региональных профилях, предусмотренных «Программой Роснедра по геологическому изучению недр территории России, Арктики и Антарктики»;
- ▶ Разработка методики прогноза по сейсмическим данным зон трещиноватых коллекторов рифейской толщи Восточной Сибири;
- ▶ Обоснование нестандартной системы наблюдения вдоль русла реки Подкаменная Тунгуска;

Особенности солянокупольных структур

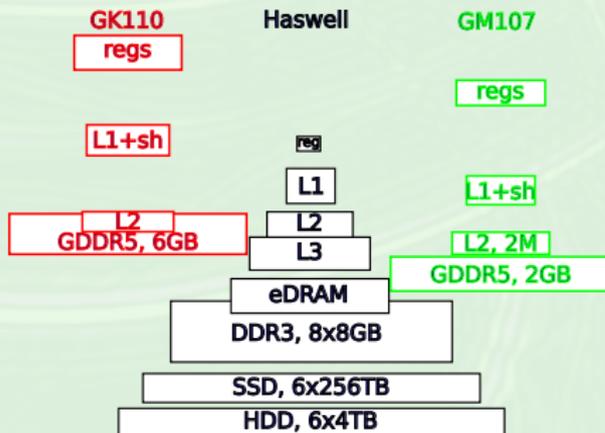
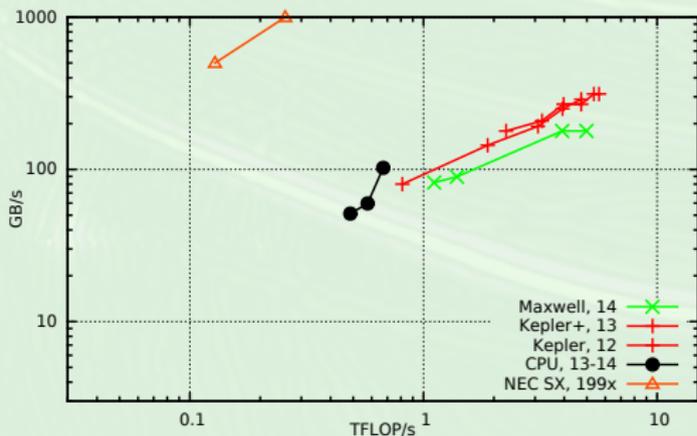
- ▶ Линейные размеры достигают десятков и сотен км;
- ▶ Большие углы наклона высококонтрастных границ;
- ▶ Купол служит дефокусирующей линзой для сигнала;
- ▶ Своды купола часто разбиты сбросами растяжений;
- ▶ Целевой объект находится под солевым слоем.

Требования к численному моделированию

- ▶ большая область моделирования каждого расчёта, включающая удалённые субвертикальные границы;
- ▶ сложнопостроенная модель среды, существенная вариация параметров внутри слоёв;
- ▶ нестандартные годографы, учёт всех видов волн;
- ▶ регистрация отклика целевого слоя в условиях, когда малая доля энергии сигнала доходит до него;
- ▶ учёт анизотропии.

Полноволновое моделирование на GPGPU

Использование в качестве основного вычислителя GPGPU ускорителей потенциально позволяет повысить темп генерации синтетических сейсмограмм на порядок



Высокопараллельная архитектура GPGPU и отличия в иерархии памяти требуют создания новых алгоритмов (DiamondTile)

Достигнутый темп вычислений (в 10^9 ячеек/сек)

В решении задач акустики

50-60 на GeForce GTX Titan (GK110, 14xSMX, 6xCh GDDR5, 288.4 GB/sec),

27-29 на GeForce GTX 750Ti (GM107, 5xSMM, 2xCh GDDR5, 86.4 GB/sec),

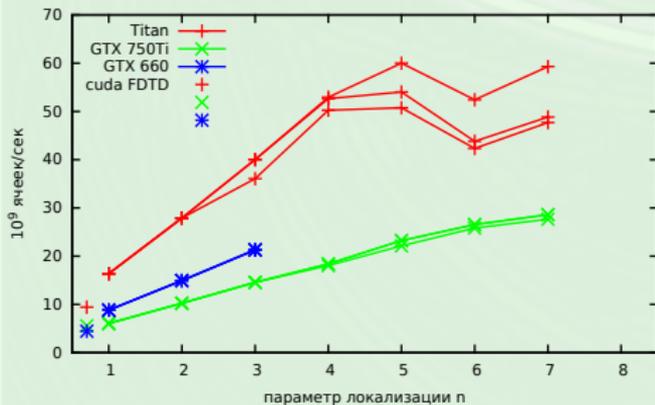
22 на GeForce GTX 660 (GK106, 5xSMX, 3xCh GDDR5, 144.2 GB/sec)

В решении задач упругости

1-2.5 для схем 4го порядка аппроксимации по координатам,

2.5-6 для схем 2го порядка аппроксимации по координатам,

0.4-1 для произвольного направления осей анизотропии



Результаты и перспективы

- ▶ При развитии семейства программно–аппаратных комплексов CFgeo4/DTgeo4 учитываются требования актуальных задач сейсморазведки в сложных геологических ситуациях и новые возможности современных высокопроизводительных вычислительных систем.
- ▶ Разработаны и реализованы новые алгоритмы DiamondTile семейства LRnLA для численного решения полной системы уравнений упругости, эффективные для модели памяти GPGPU;
- ▶ Для схем 4 порядка точности достигнута производительность более млрд. узлов/сек в расчёте на ускоритель GPGPU, что позволяет на порядок повысить темп генерации синтетических сейсмограмм.