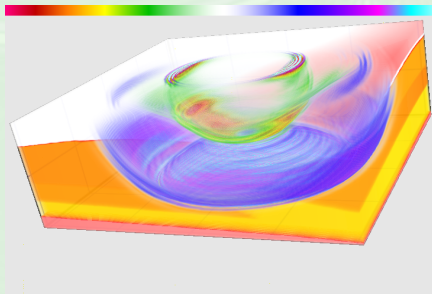
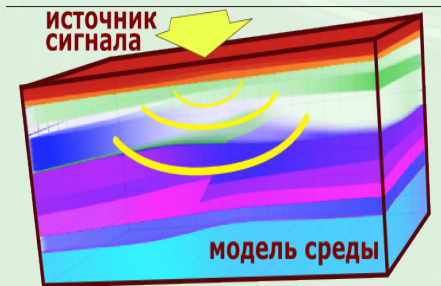


# Трёхмерное полноволновое моделирование в сейсморазведке с использованием графических ускорителей

В.Д. Левченко  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва  
Сейсмические технологии, 21-23 апреля, Москва



## Сейсморазведка с точки зрения численного моделирования

- ▶ Относится к геофизическим методам разведки полезных ископаемых, в основном на нефть и газ. **Математическая модель — система уравнений упругости.** Частота сигналов 20-50Гц, длина волны  $\sim 100$ м.
- ▶ Использует слоистую модель земной коры, толщина целевых пластов 25-5м. Каждый слой (пласт) характеризуется набором сейсмофизических параметров (плотность, скорости сейсмических волн, параметры анизотропии и затухания) с резким изменением свойств на границе пластов. **Требует волнового описания на основе эффективных моделей среды, усреднённых внутри длины волны**
- ▶ Позволяет выделять структурные особенности строения земной коры в районе целевых пластов (глубина 3-5-7км) при помощи усреднения многих сейсмограмм. **Высокопараллельная задача, разбивающаяся на множество независимых подзадач.**
- ▶ Сама по себе не даёт однозначного ответа на вопрос: «Где нефть?», успех сейсморазведки достигается только при учёте комплекса априорной информации, получаемой независимыми методами. **Обратная задача некорректна.**

## Этапы проведения сейсморазведки

1. Планирование полевых работ на основе априорной геологической модели сейсмического объекта (потенциального месторождения).
2. Полевая сейсморазведка: развёртывание источника и системы наблюдения, регистрация откликов, получение набора сейсмограмм.
3. Предобработка: введение поправок, коррекция, фильтрация...
4. Построение изображения геосреды: **миграция**, суммирование, построение сейсмических разрезов (кубов).
5. Интерпретация результатов: **инверсия**, построение модели пласта.
6. Верификация полученной модели.

## Основные параметры сейсморазведки

По системе наблюдения: 2D/3D

По числу регистрируемых компонент поля: 1C/3C

Число каналов в одной сейсмограмме:  $10^3 \div 10^6$

Число сейсмограмм на сейсмический объект:  $10^3 \div 10^5$

Размер данных:  $1 \div 10$  ТВ/объект

+ каротаж, исследование керна, гравика, электроразведка, ...

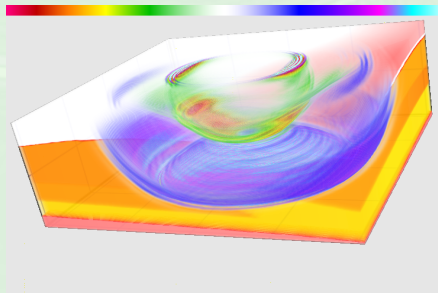
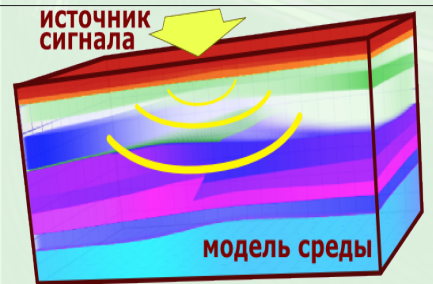
## Полноволновое моделирование

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

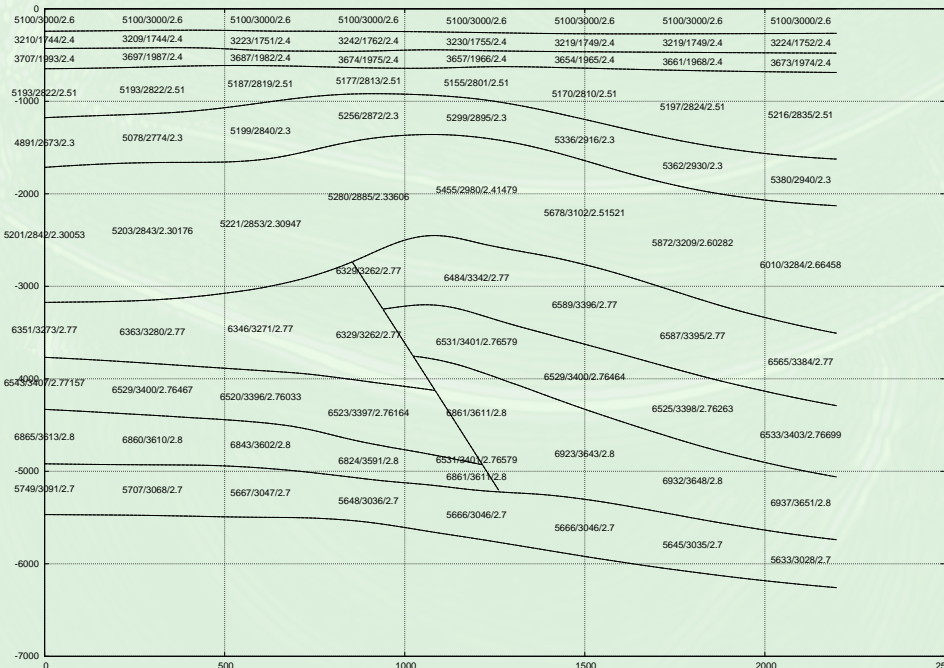
**Все составляющие сейсмического сигнала:**

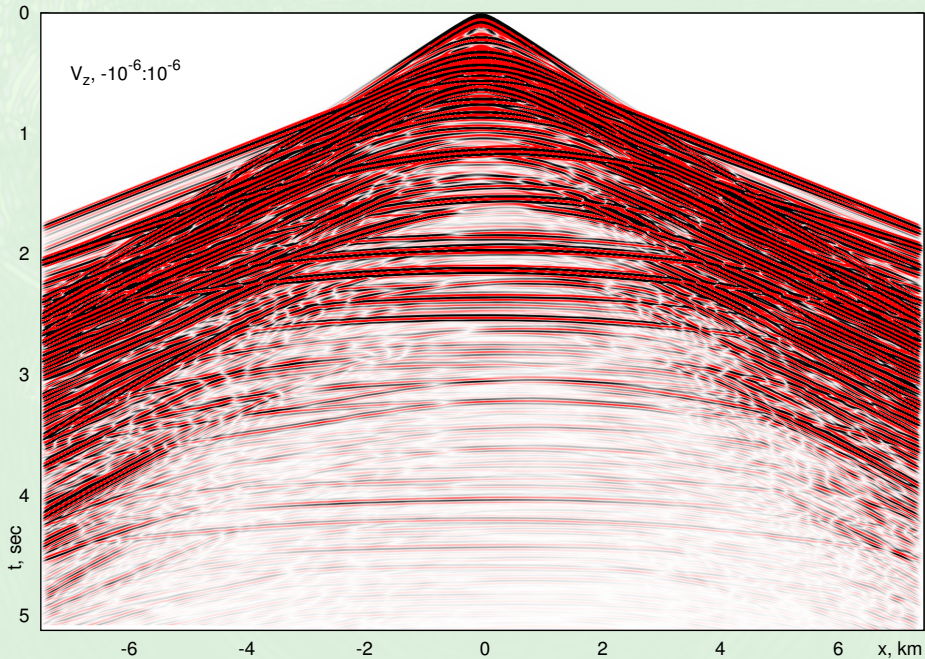
компоненты, фазы, амплитуды, форма сигналов;

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

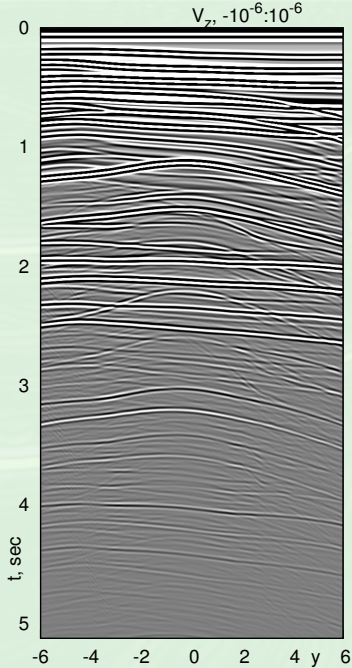
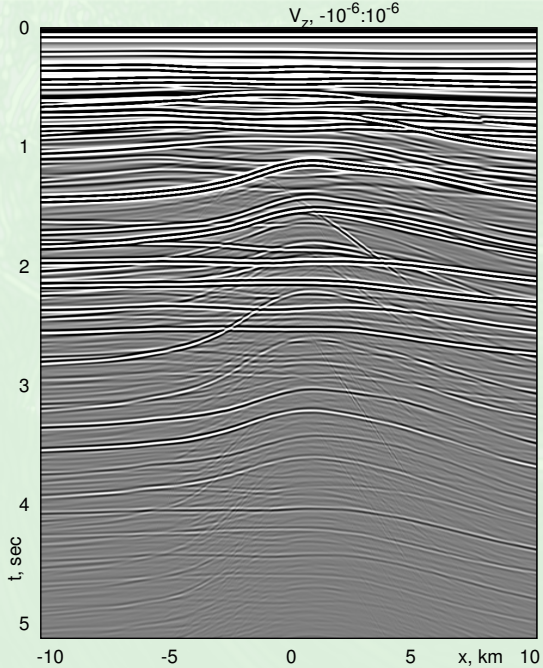


# 3D модель Предуральяского краевого прогиба (сечение x-z)



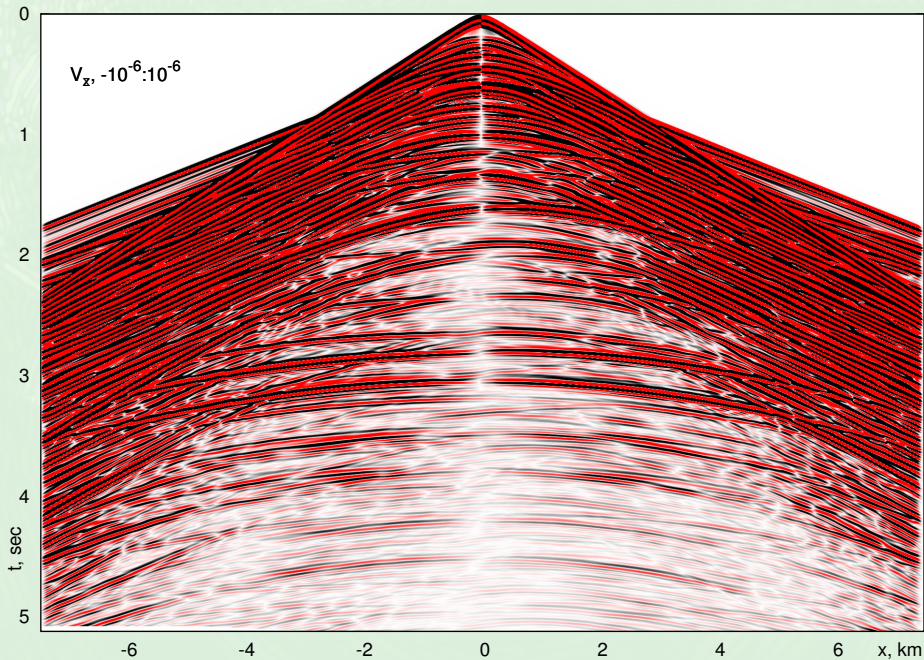


Типичная сейсмограмма (вертикальная компонента)



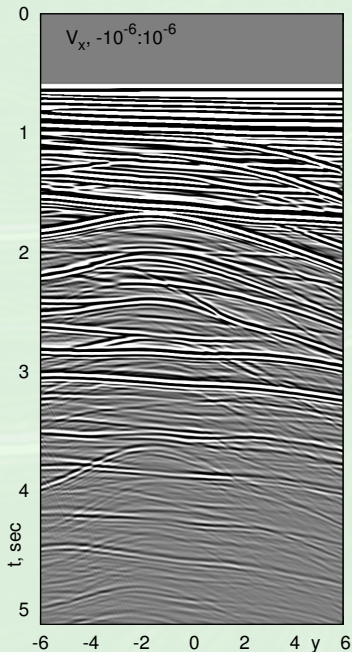
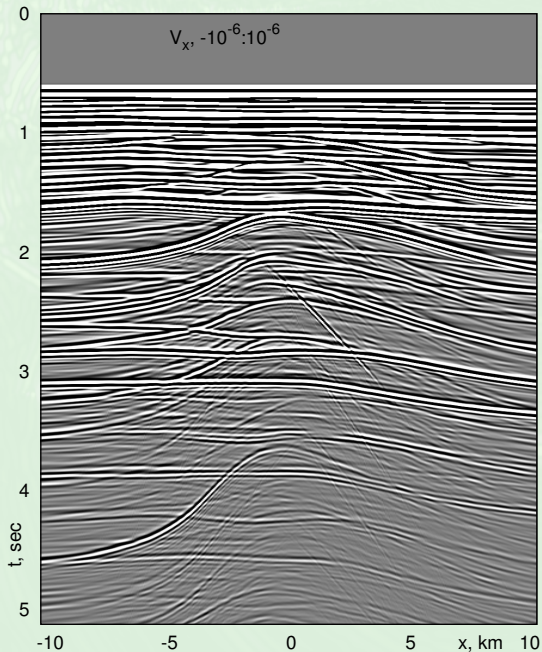
Сейсмический разрез для нулевого смещения ПП относительно ПВ, 656 сейсмограмм





Типичная сейсмограмма (горизонтальная компонента)



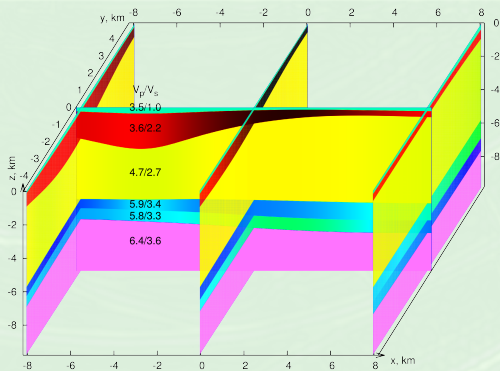


Сейсмический разрез для смещения ПП относительно ПВ на 2км, 656 сейсмограмм

## 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 малоконтрастных.
- ▶ «Себестоимость» моделирования существенно меньше стоимости полевой сейморазведки.

Особенности CFgeo4:  
линейный размер области:  
 $L \sim 10\text{км}$ ,  
время  $T \sim 10\text{сек}$ ,  
дискретность:  
пространства  $\Delta^x \sim 10\text{м}$   
времени  $\Delta^t \sim 1\text{мс}$ ,  
 $f_0 \sim 10 \div 100\text{Гц}$ .



**Базовая модель:** сложнопостроенная толстослоистая ( $> 25\text{м}$ ), изотропная, глубины границ заданы на сетке по латерали ( $100\text{м}^2$  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.

**Система наблюдения:** 3D система наблюдения площадью до  $100\text{ км}^2$  на сетке с шагом  $25\text{ м}$  и длиной годографа до  $14.5\text{ км}$ . Фланговая с максимальным выносом до  $22.5\text{ км}$ . (либо симметричная с длиной годографа до  $25\text{ км}$ .) и параллельными линиями ПП с удалением до  $2.4\text{ км}$  от ПВ, расстояние между ПП  $25\text{ м}$ .

## 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:

$$V^{\max} = 12.5\text{км/с},$$

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

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

Вычислительная сложность:

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

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

Оптимальный порядок обработки данных  $\rightarrow$  алгоритмы L<sup>R</sup>nLA.

Достижимый темп вычислений (в сек.)  $\sim$  1млрд ячеек сетки\*шагов в расчете на узел кластера с линейным ускорением по числу узлов.

# вычислительный кластер для массовых расчетов



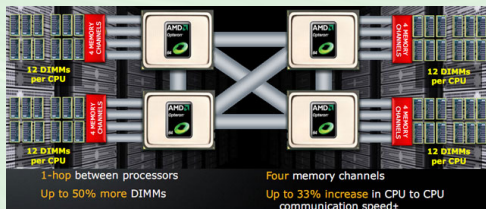
ETeCERO

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;

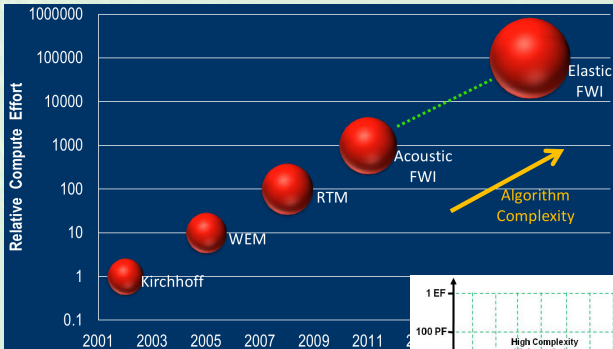
— производительность узла 0.9TFlops; кластера 4.5TFlops;

— стоимость кластера (2011г) 2,5млн.руб.

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

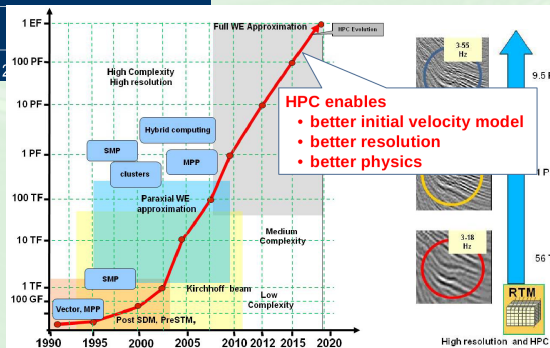
- ▶ Геофизическое обоснование прогноза строения отложений осадочного чехла в районах с проявлением солянокупольной тектоники;
- ▶ Прогноз нефтегазоперспективных объектов с использованием технологии трансформации волновых полей в сейсморазведке МОВ-ОГТ (в районах Восточной Сибири, Предуральяского краевого 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;

# Сейсморазведка и высокопроизводительные вычисления



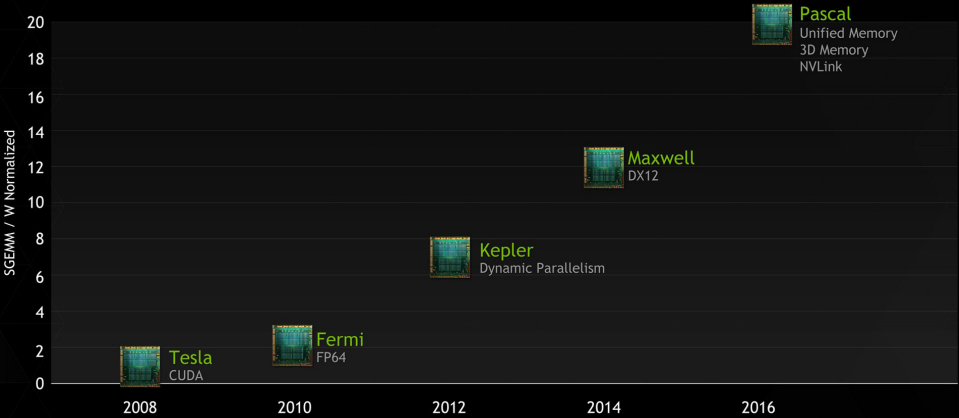
“HPC in Oil and Gas Exploration”  
 Anthony Lichnewsky  
 Schlumberger WesternGeco  
 PRACE 2011 Industry workshop

“Seismic Imaging and HPC- how to preserve our investment and to prepare the future?”,  
 Henri Calandra, Total, EAGE 2010

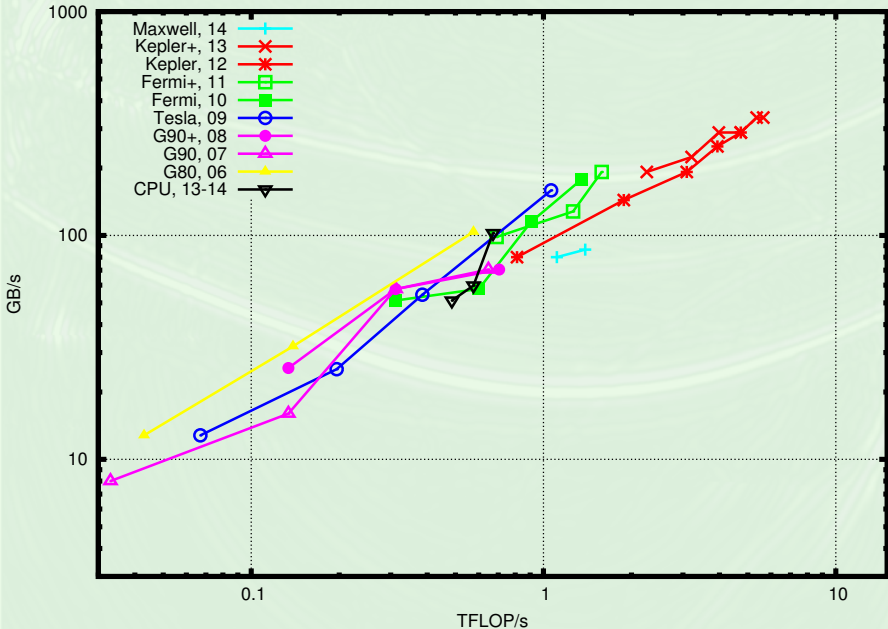




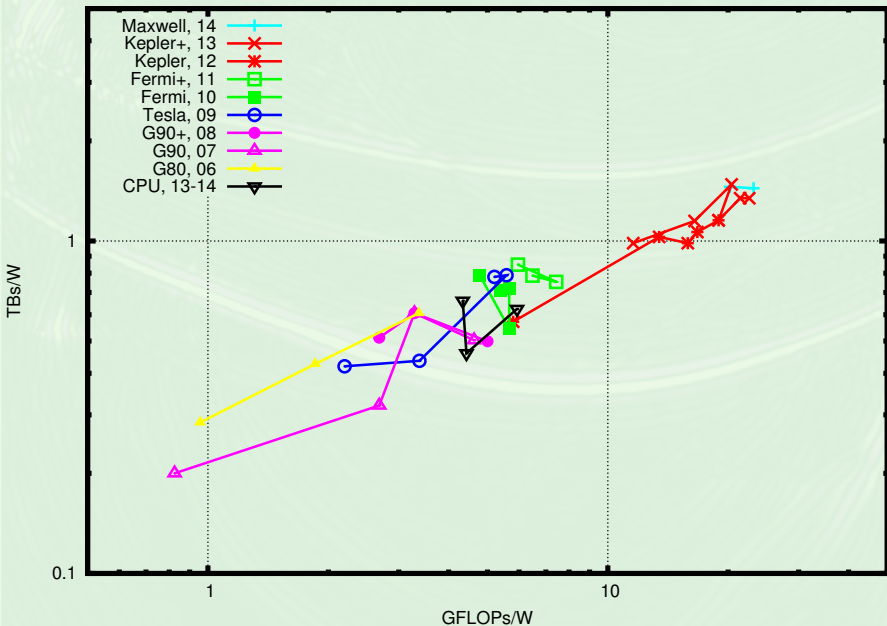
# GPGPU Nvidia



# Рост производительности



# Рост энергоэффективности



# Особенности модели памяти GPGPU

CPU

reg

L1 32K

L2 256K

L3 8MB

DDR3 32GB

HDD 4TB

Kepler

reg 256K

L1 64K

L2 128K

GDDR5 4GB

Maxwell

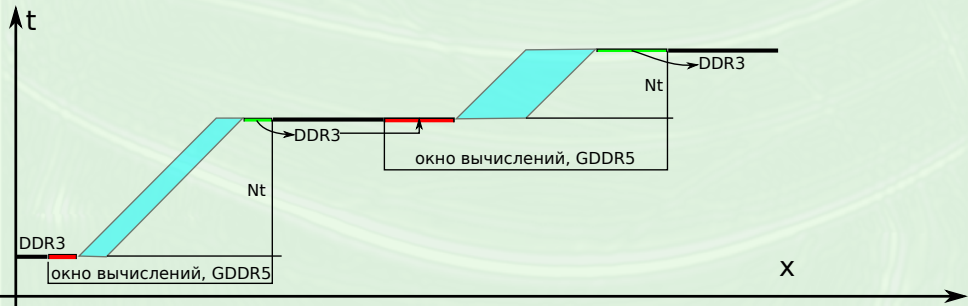
reg 256K

L1 64K

L2 1M

GDDR5 2GB

# Алгоритм DiamondTorre. Окно вычислений



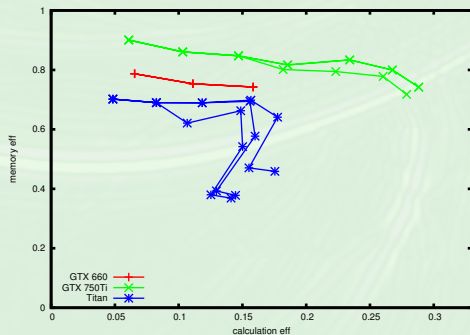
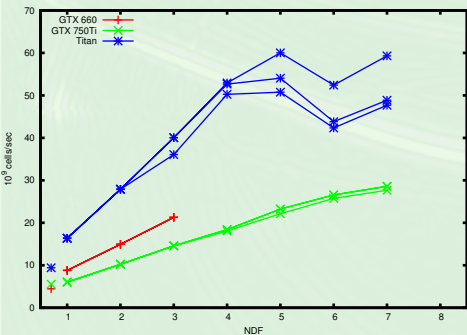
# Зависимость производительности/эффективности от параметра алгоритма DiamondTorre

Достигнутый темп вычислений, акустика, схема 2 порядка (в  $10^9$  ячеек/сек)

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),



коэффициент локальности:

$$K_L = (+)7N_{DF} / (ld\&st) [4 - (1 - 1/N_{\text{cached blk}}) / N_{DF} + 2(2 - 1/N_{DF}) / N_t]$$

## Результаты и перспективы

- ▶ Разработаны новые алгоритмы DiamondTorre семейства LRnLA для численного решения уравнений упругости и акустики, эффективные для модели памяти GPGPU;
- ▶ Достигнута производительность от  $3 \cdot 10^9$  (полная система уравнений упругости, 4й порядок) до  $60 \cdot 10^9$  (акустика, 2й порядок) узлов/сек/GPU.
- ▶ Реализована интерактивная версия кода для моделирования уравнений упругости geo3D (30сек.-10мин. на генерацию синтетической сейсмограммы) с воксель-визуализацией динамики волн в толще.



## Перспективы применения алгоритмов LRnLA в решении прямых и обратных задач сейсморазведки

**Научно–поисковые задачи** Основная цель — разработка новых методик, технологий обработки и интерпретации результатов сейсморазведки. Нет актуального ограничения на размер модели. Эффективность вычислений близка к предельной для высокопроизводительных систем. Полноволновая глубинная миграция в обратном времени до суммирования (FW pre-stack RTM), полноволновая инверсия (FWI).

**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** Основным требованием является быстрота получения результата каждого расчёта от задания параметров геосреды до получения синтетических сейсмограмм с визуальным контролем динамики волн в среде.