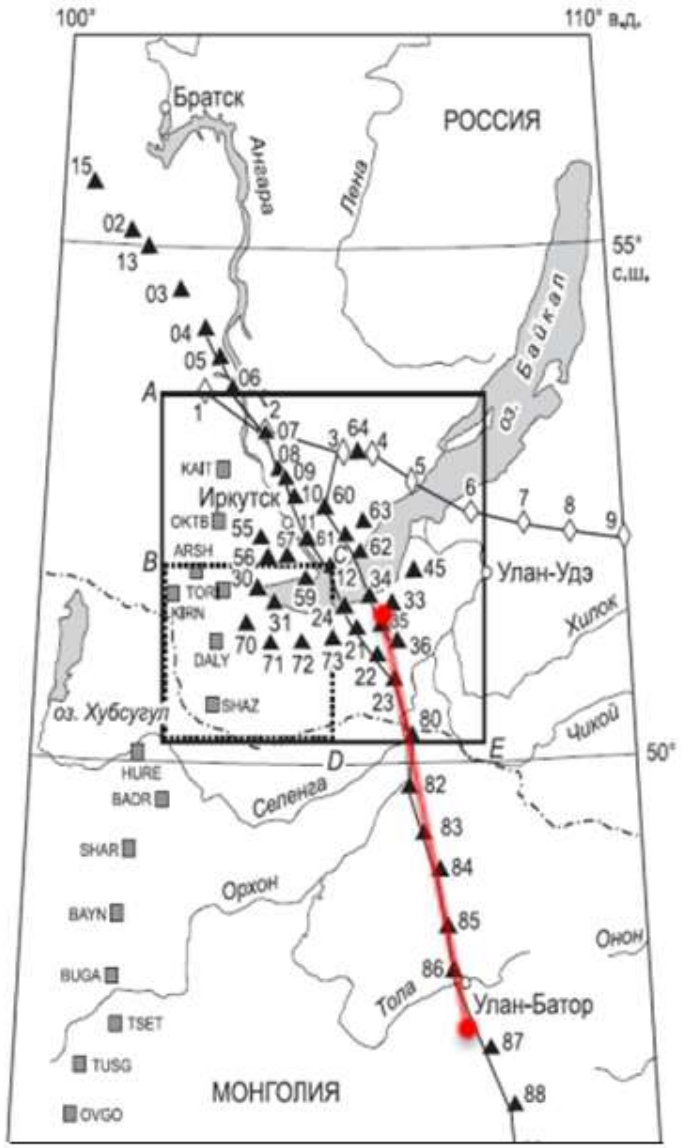
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ РИФТОВОЙ ЗОНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

Караваев Д. А.

2018

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ



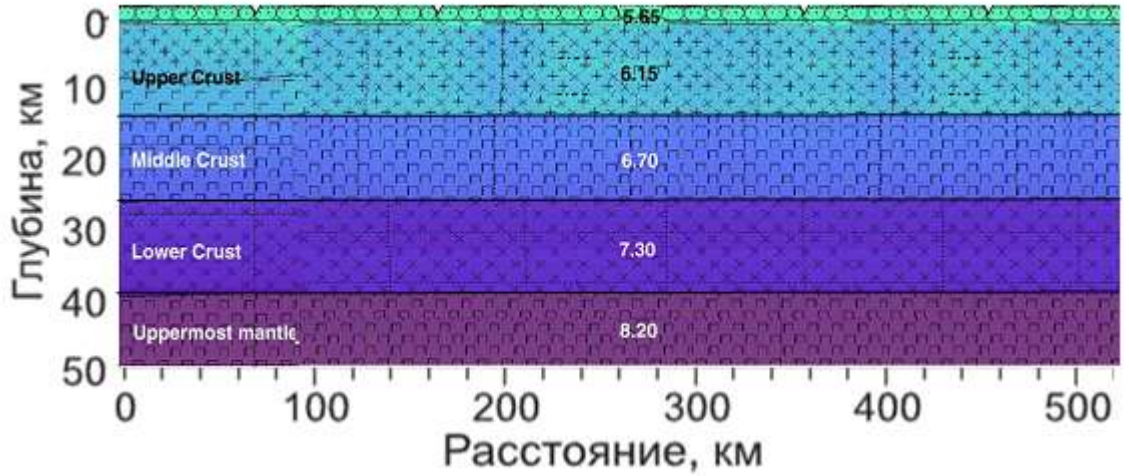
Байкальский профиль

Район проведения экспериментов

Две скоростные модели земной коры, полученных для юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных областей Монголии

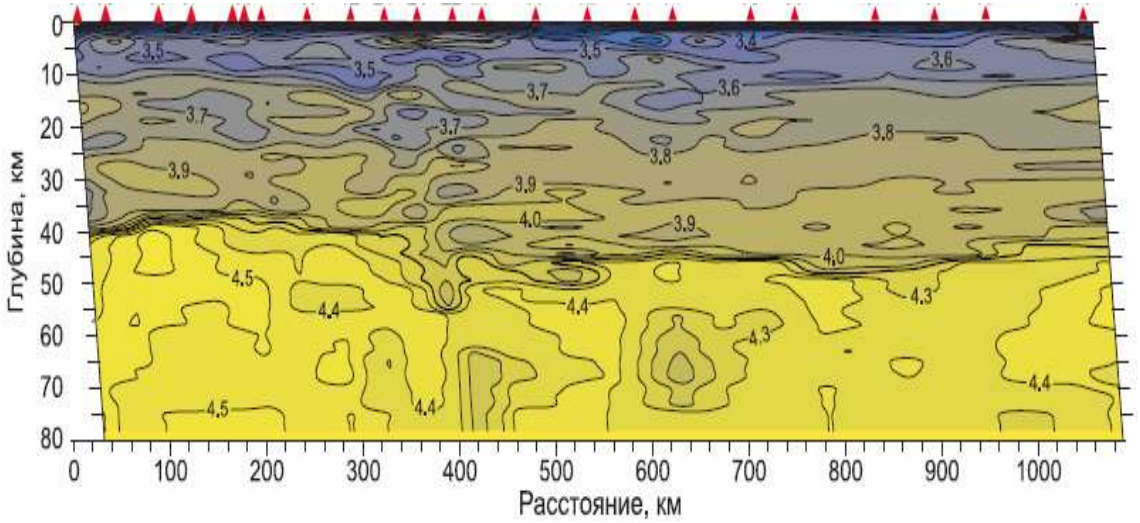
ЭКСПЕРИМЕНТЫ И МОДЕЛИ

BEST (Baikal Explosion Seismic Transect)



Модель получена методом ГСЗ с отраженными и преломленными волнами

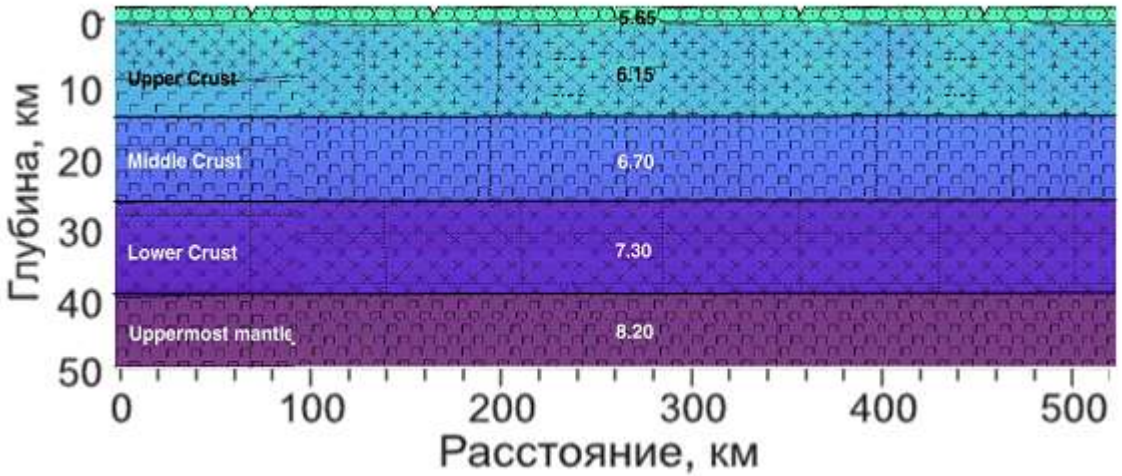
PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere)



Модель получена сейсмологическим методом приемной функции с выделением в коде Р-волны обменных поперечных волн

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ

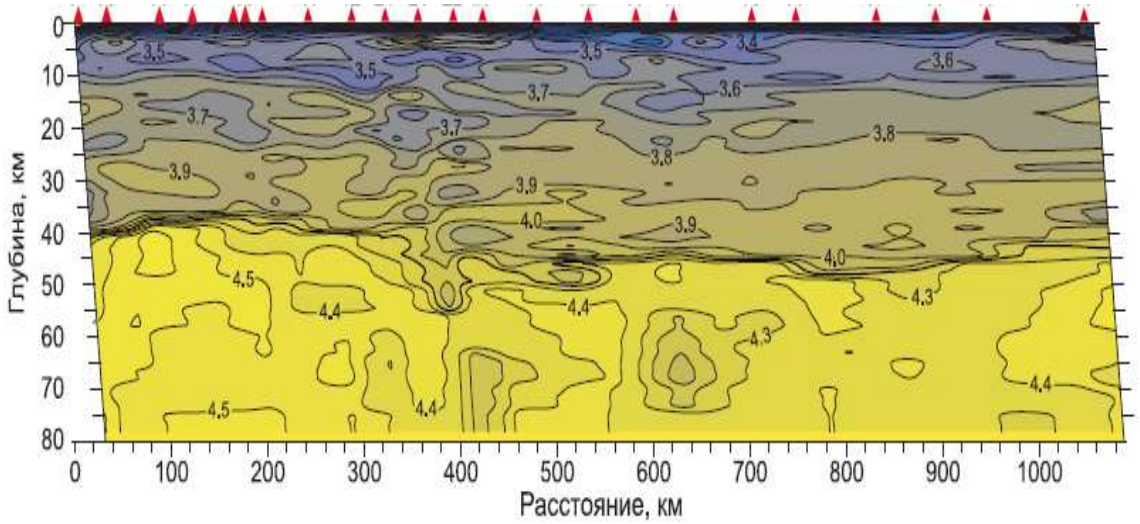
BEST (Baikal Explosion Seismic Transect)



5 слоев

Высокоскоростной слой со скоростью 7.2-7.3 км/с мощностью более 10 км на глубине от 28 км до 42 км

PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere)



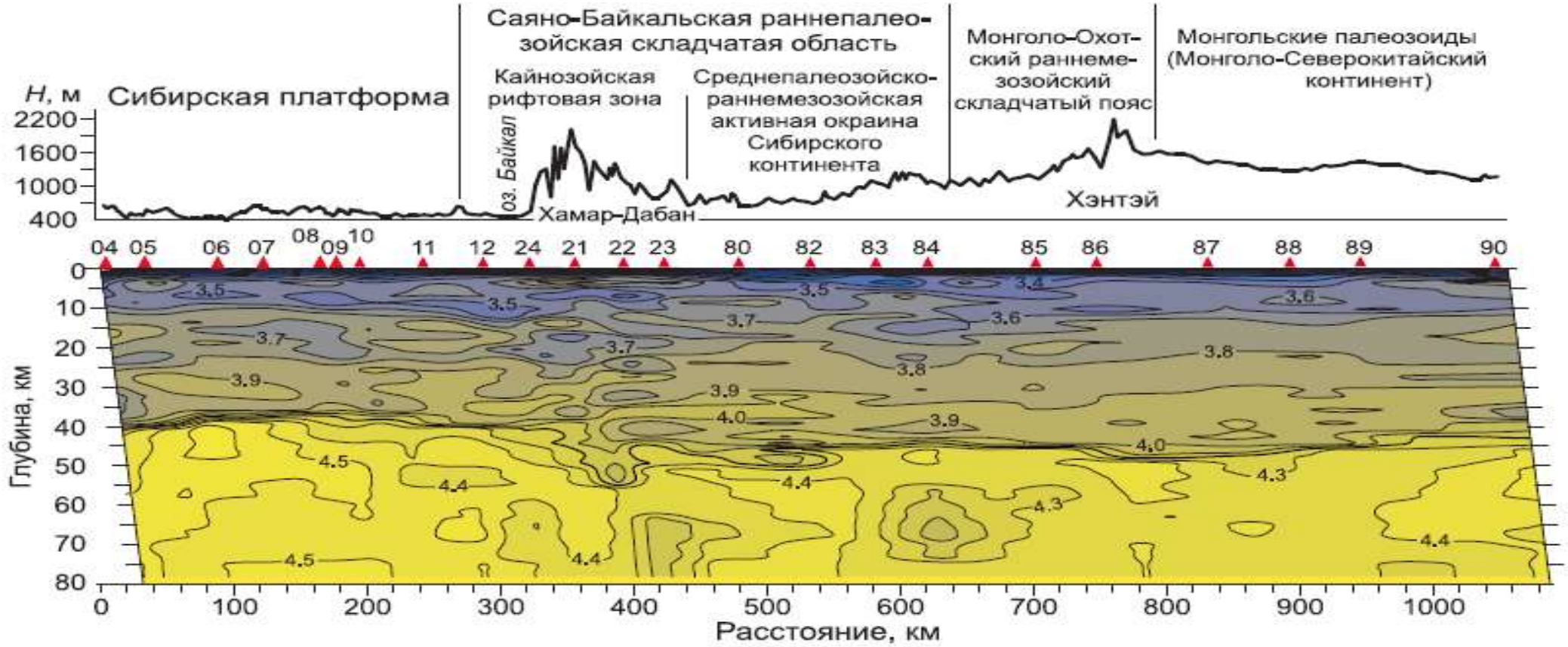
Слабо выраженная слоистая структура

Сильная изменчивость границ слоев

Наличие зон повышенных и пониженных скоростей

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

МОДЕЛЬ ЮГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ



1) Большая протяженность объекта

2) Сложная неоднородная структура

В.В. Мордвинова, А.А. Артемьев ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЮГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ОБМЕННЫМ ВОЛНАМ // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51, № 6

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1) Построить геофизическую модель Байкальской рифтовой зоны

400 км x 73 км на основе 1D вертикальных данных

- Восстановление значений упругих параметров на 2D расчетной сетке на основе 1D данных

2) Разработать вычислительные программы для проведения моделирования сейсмических полей на суперкомпьютерах

3) Получить синтетические результаты расчетов
- картину полного сейсмического поля
- теоретические сейсмограммы

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

- Конечно-разностный метод четвертого порядка точности по пространству

- Применение разностной схемы на смещенных сетках

- Для определения значений упругих параметров на расчетной сетке
  - Алгоритм сплайн интерполяции
  - Принадлежность точки многоугольнику

- Суперкомпьютеры ЦКП ССКЦ СО РАН, http://www.sscc.icmmg.nsc.ru

ОБЛАСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ



2D неоднородная изотропная среда

Прямоугольная область

Свободная поверхность – прямолинейная (рельеф местности не учитывается)

Прямоугольная система координат

Параметры упругой среды

$\rho(x, y)$ - плотность

$V_p(x, y)$ - скорость продольных волн

$V_s(x, y)$ - скорость поперечных волн

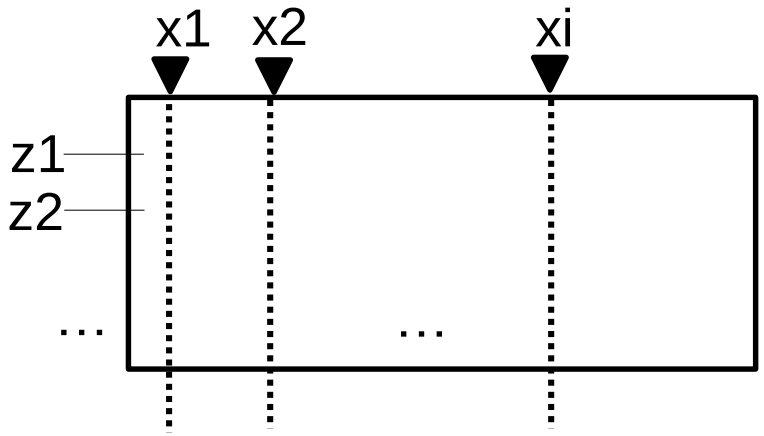
} Определяют неоднородное геометрическое строение упругой среды

Зоны PML (Perfectly Matched Layers) – зоны реализации поглощающих границ

для исключения отражений упругих волн от границ расчетной области

ВОССТАНОВЛЕНИЕ 2D ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При использовании 1D вертикально ориентированных данных
со значениями упругих параметров на выделенных горизонтах по оси Oz

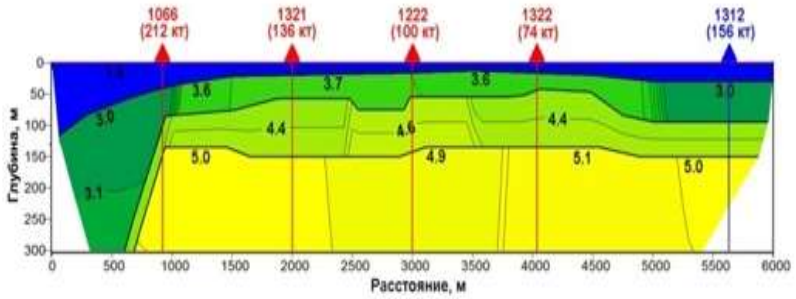


xi

V_p	V_s	ρ	h	
3.4677,	2.4684,	1.9415,	0.0000	z1
5.8756,	2.9138,	2.6444,	0.5000	z2
5.7792,	3.3252,	2.6160,	1.0000	
	…			…

h - набор Z координат точек

▼ - опорные точки



Интерполяция в 2 этапа:

1) Интерполяция по оси Oz
2) Интерполяция по оси Ox



Сглаживание переходов между границами

2D ПРЯМАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ГЕОФИЗИКИ

Система уравнений теории упругости

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu)\frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial w}{\partial z} + f_x$$

$$\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda + 2\mu)\frac{\partial w}{\partial z} + f_z$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \mu\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

u, w - скорости перемещений

$\tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz}$ - напряжения

λ, μ - параметры Ламе

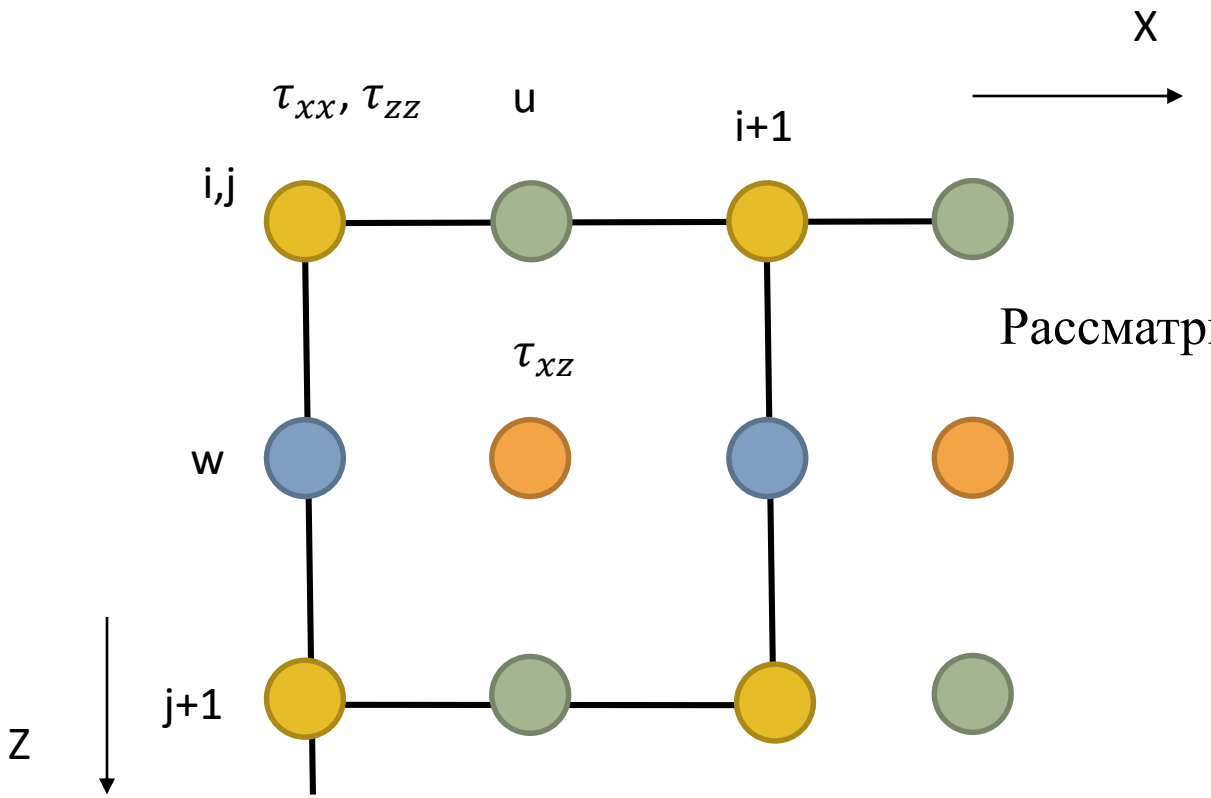
Компоненты внешней силы (источник сейсмических волн)

C-PML метод для реализации поглощающих границ (Convolutional PML)

Нулевые начальные и граничные условия

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Шаблон схемы (расположение компонент)



Рассматриваются только равномерные 2D сетки

$$\Delta x = \Delta z$$

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Конечно-разностная схема 4 порядка точности по пространству (Levander, Moczo)

$$\tau_{xx,i,j}^{n+1} = \tau_{xx,i,j}^{n} + \frac{\Delta t}{\Delta x}((\lambda + 2\mu)_{i,j}[A(u^{n}_{i+\frac{3}{2},j} - u^{n}_{i-\frac{3}{2},j}) + B(u^{n}_{i+\frac{1}{2},j} - u^{n}_{i-\frac{1}{2},j})] +$$

$$\lambda_{i,j}[A(w^{n}_{i+\frac{3}{2},j} - w^{n}_{i-\frac{3}{2},j}) + B(w^{n}_{i+\frac{1}{2},j} - w^{n}_{i-\frac{1}{2},j}) + f_{x}^{n+1}]),$$

$n, n+1$ - временные слои

Δt - шаг по времени

Δx - шаг по пространству

$$A = -\frac{1}{24}, B = \frac{9}{8}$$

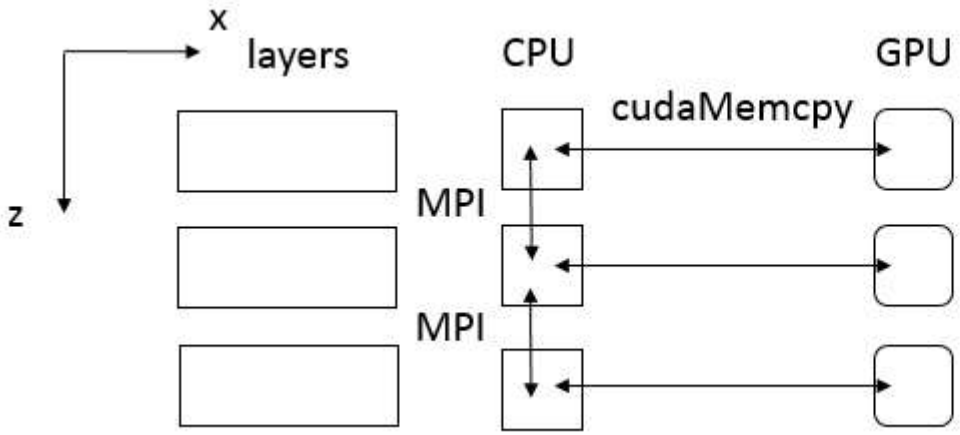
C-PML: $\frac{\partial}{\partial x_j} = \frac{1}{k_j}\frac{\partial}{\partial x_j} + \psi_j \qquad \psi_j^{n+1} = f(\psi_j^{n}, a_j, b_j)$

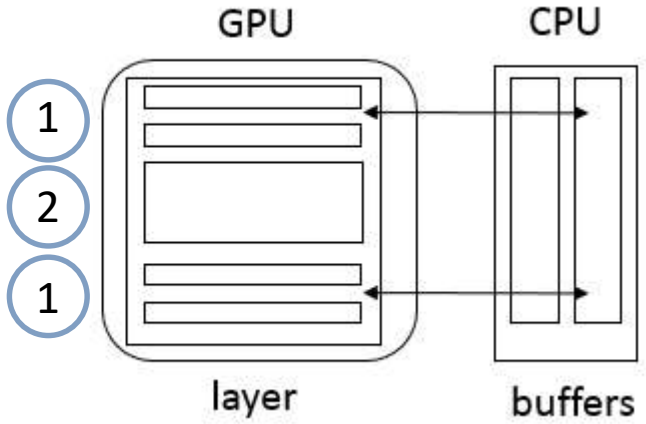
$$b_j = e^{-(\frac{d_j}{k_j} + \alpha_j)\Delta t}, a_j = \frac{d_j}{k_j(d_j + k_j\alpha_j)}(b_j - 1)$$

$$k_j \geq 1, d_j \geq 0, \alpha_j \geq 0$$

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

CPU+GPU с использованием MPI+CUDA





CUDA kernels

1 1d расчеты

2 Копирование в буферы на CPU
cudaMemcpy + MPI_Isend/MPI_Irecv

2 2d расчеты

Проверка выполнения обменов
MPI_Waitall

Копирование из буферов на CPU в массивы на GPU
cudaMemcpy

- Использование только «глобальной памяти» GPU
- Применение буферов для реализации обменов данными
- Обмены между GPU посредством неблокированных обменов MPI_Isend, MPI_Irecv выполняемых на CPU
- Процедуры расчета граничных точек соседних слоев (1d)
- Процедуры расчета внутренних точек для слоев (2d)

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

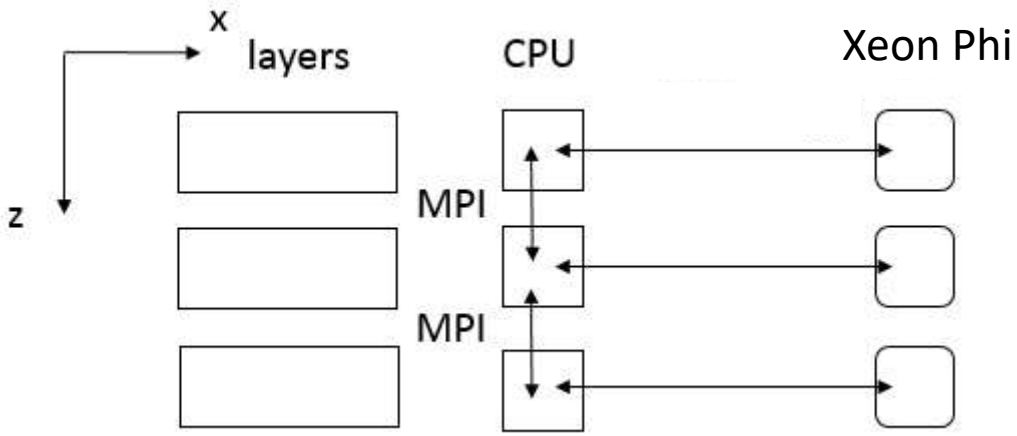
CPU+GPU с использованием MPI+CUDA

	Количество GPU устройств			
Тест	1	3	6	9
Ускорение	882 sec	474 sec	264 sec	211 sec
Масштабирование	-	395 sec	482 sec	482 sec

Размер сеточной модели для 1 устройства 9998 x 2000 точек (5 км x 1км)
Использование «глобальной памяти» GPU

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

CPU+Xeon Phi с использованием MPI+OpenMP



C++ процедуры с OpenMP прагмами

```
#pragma omp parallel
{

#pragma omp for
{
}

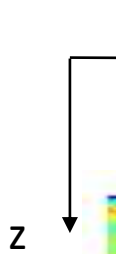
}
```

- Нет необходимости копирования данных
- Легко адаптируемый код C++
- Обмены между Xeon Phi посредством неблокированных обменов MPI_Isend, MPI_Irecv
  Процедуры расчета граничных точек соседних слоев (1d)
- Процедуры расчета внутренних точек для слоев (2d)

Для архитектуры кластера НКС-1П

2D МОДЕЛЬ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

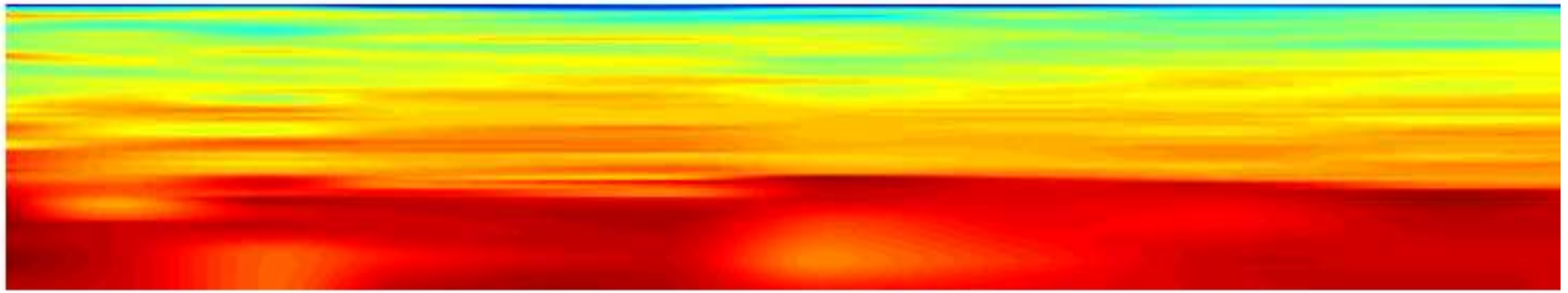
По данным о вертикальном распределении скоростей в точках профиля



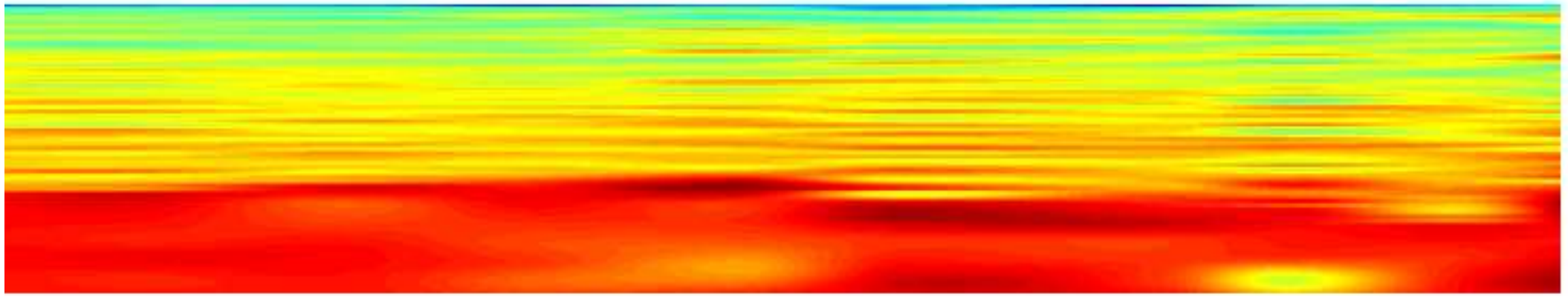
Размеры области моделирования
400 км по оси Ox
73 км по оси Oz

V_p max = 8.3452 км/с

V_s min = 2.4672 км/с



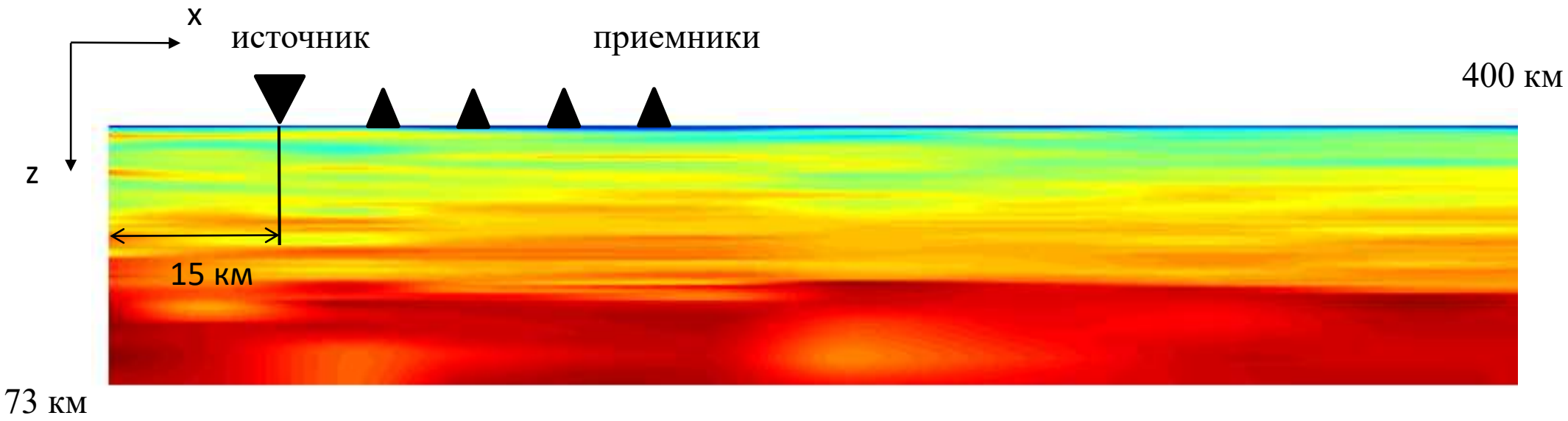
Распределение значений скорости S волн



Распределение значений скорости P волн

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема для проведения модельных расчетов



Время расчета сейсмограммы ~80 сек

Координаты источника (~15 км, 0.0 км)

Частота источника – 7 Гц

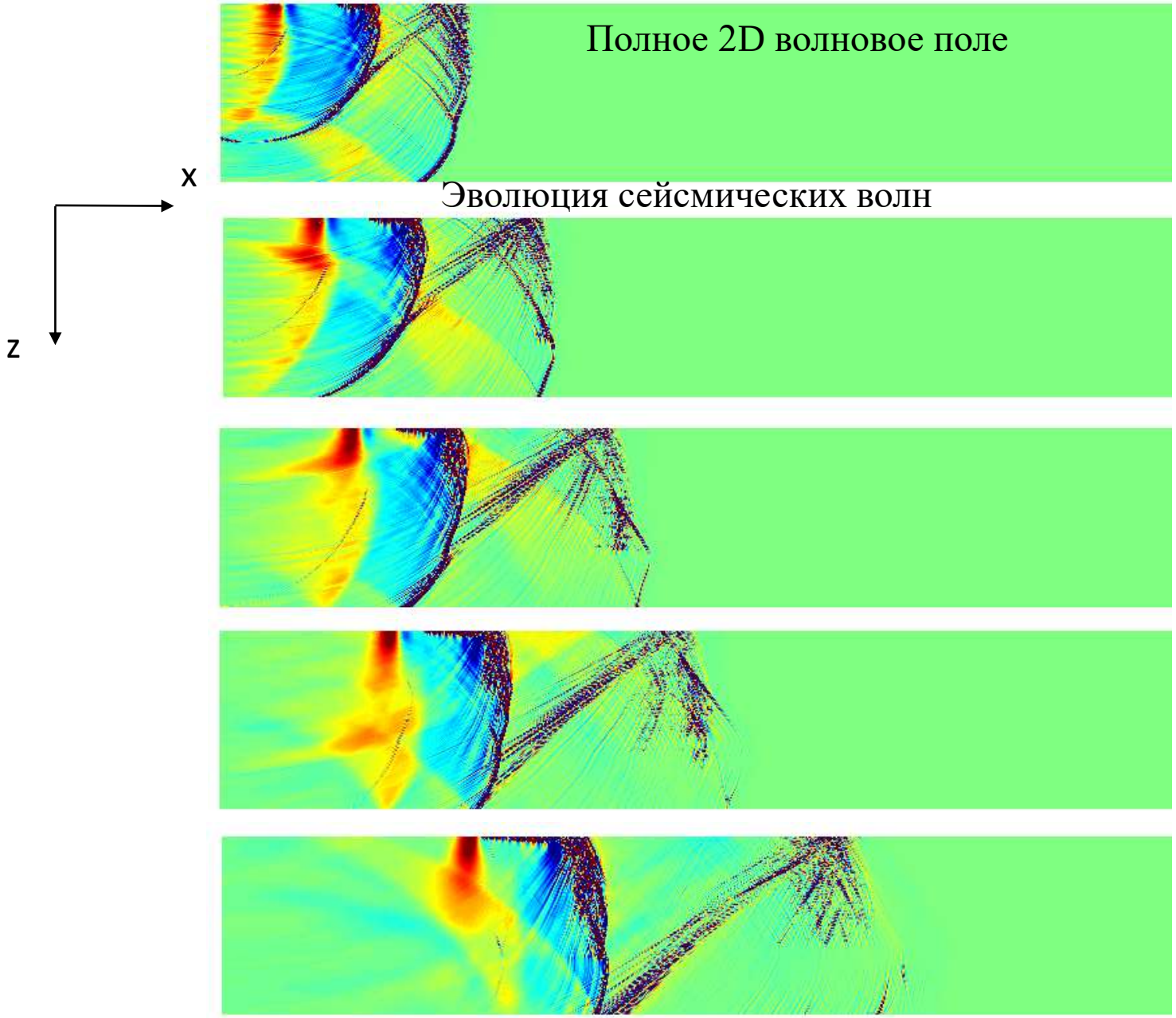
Тип источника – вертикальная сила

Расчётная 2D сетка в плоскости Oxz

Количество точек сеточной модели 56743 x 10356

Итераций по времени более 195326

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



Снимки вертикальной компоненты сейсмического поля для разных времен

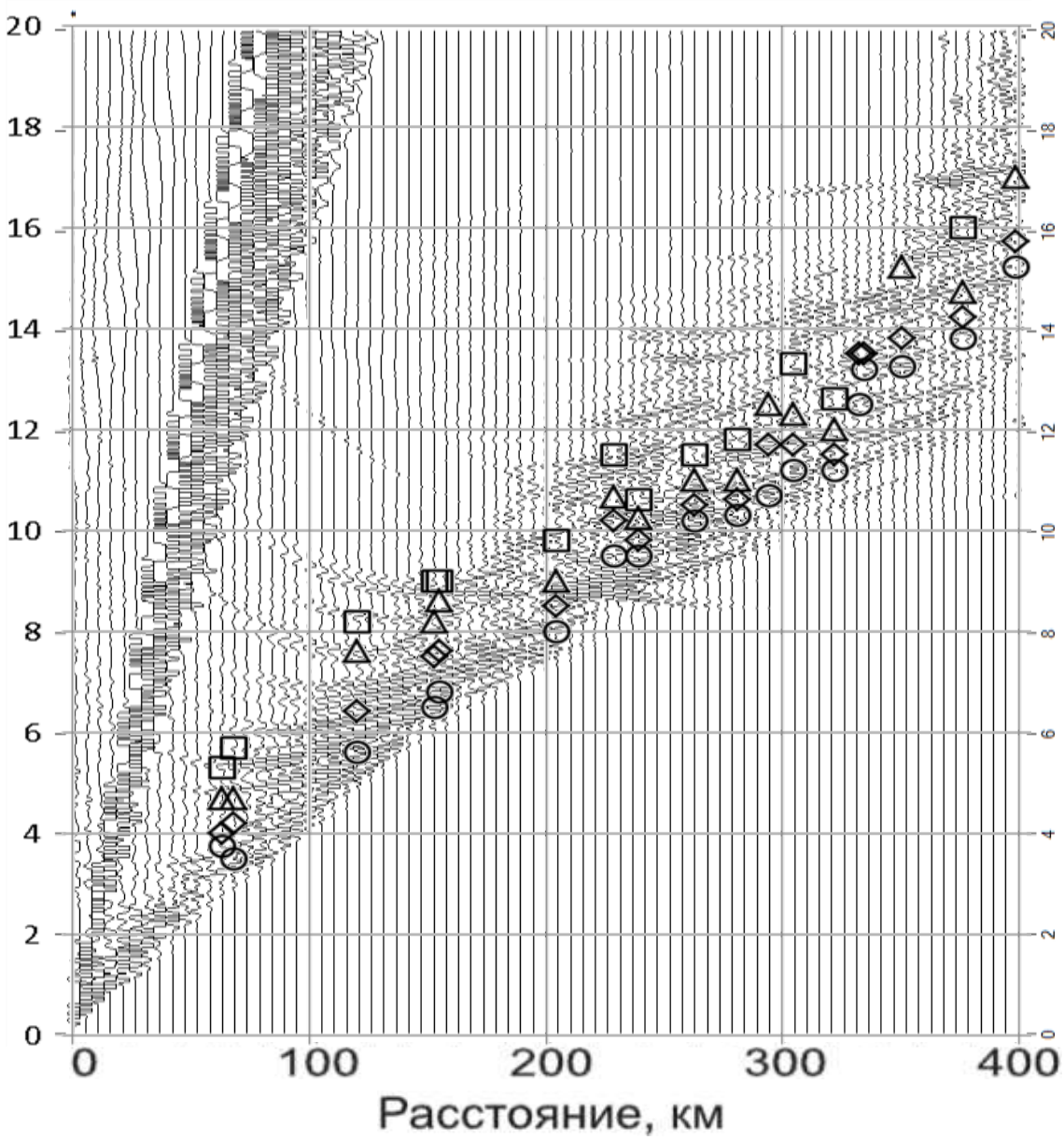
50 точек на длину волны

Размер одного файла с результатами
> 2 Гб
(компонента сейсмического поля)

12 узлов по 12 ядер

Результаты получены на
кластере НКС-30Т ЦКП ССКЦ СО РАН

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



Теоретические и экспериментальные данные

Для модели Байкальской рифтовой зоны

Модель восстановлена по данным эксперимента PASSCAL

Есть соответствие при выделении отдельных волн, групп волн

Не наблюдается контрастных волн от высокоскоростного слоя в эксперименте BEST

Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны программные реализации параллельного алгоритма математического моделирования распространения упругих волн в двухмерно неоднородных средах

- на CPU
- на графических процессорах
- на сопроцессорах Intel Xeon Phi

Разработана программа для создания двухмерных сеточных моделей

Проведено восстановление геофизической модели рифтовой зоны

Проведены расчеты и получены синтетические сейсмограммы и снимки сейсмического поля для модели Байкальской рифтовой зоны

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!