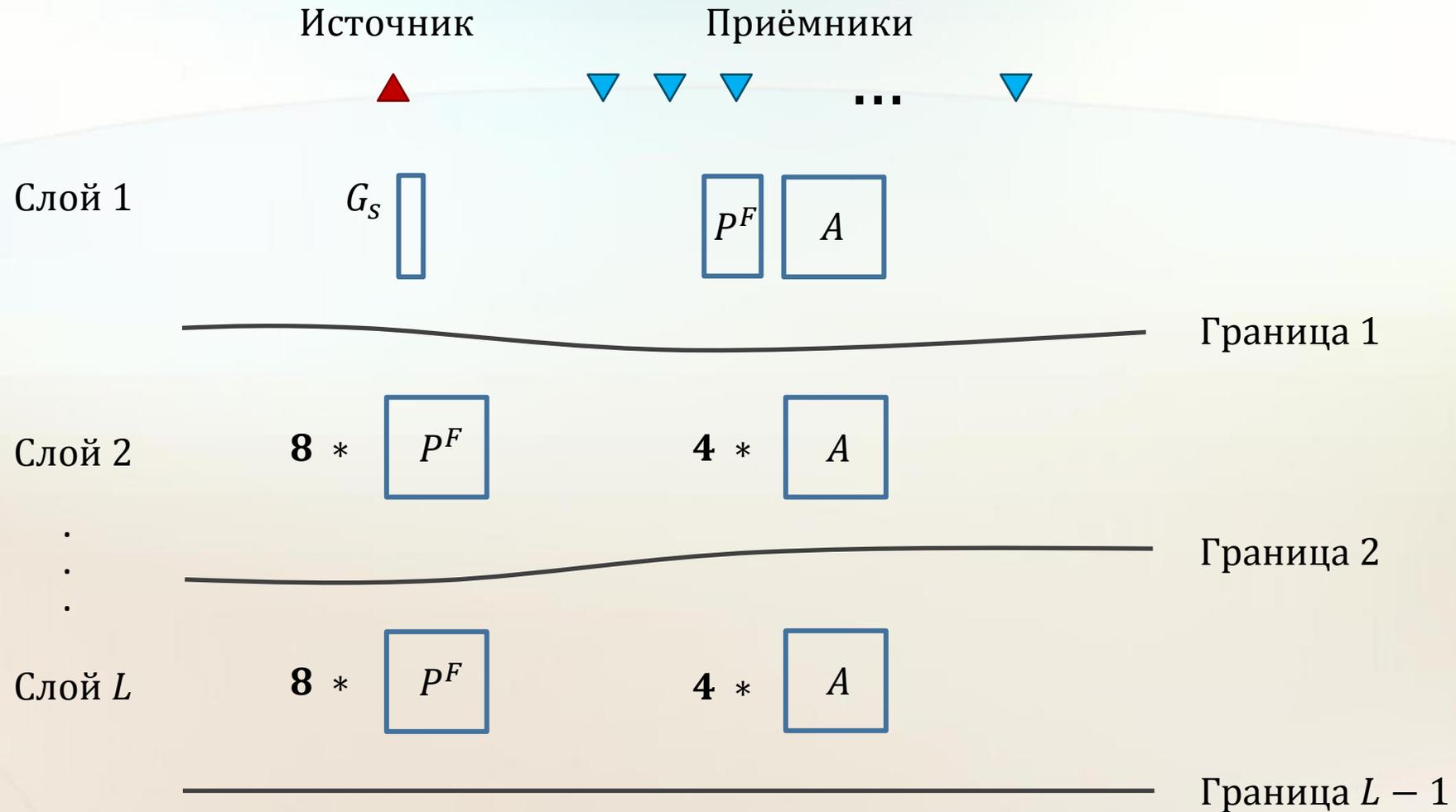


«Разработка высокооптимизированного пакета программ  
дифракционного моделирования сейсмических волновых  
полей в слоисто-блоковых средах»

Магистрант: *Зятьков Н.Ю. гр. 7201*

Научные руководители: *к.ф.-м.н., доцент Айзенберг А.М.  
к.т.н. Романенко А.А.*

# Метод Наложения Концевых Волн (МНКВ)



# Физически реализуемое ядро оператора $P^F$

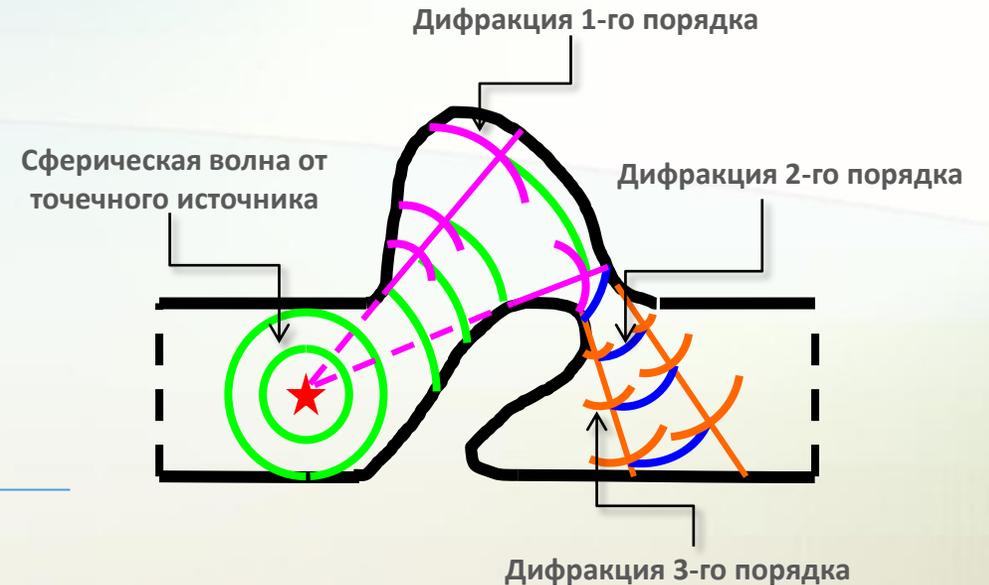
[Айзенберг А.М., Айзенберг А.А., 2008]

Физически реализуемое ядро

$$\tilde{G} = G + \sum_{i=1}^{\infty} D^{(i)}$$

Дифракционная поправка  $i$ -го порядка

$$D^{(i)} = [PA]^i G_S$$



Оператор распространения

$$P(x, s') \langle \dots \rangle = \iint_S G(x, s') N_{s'} \langle \dots \rangle dS(s')$$

Оператор поглощения

$$A(s, s') \langle \dots \rangle = \iint_S h(s, s') G(s, s') N_{s'} \langle \dots \rangle dS(s')$$

# Основные проблемы реализации алгоритма

- При реализации алгоритма используются плотные квадратные матрицы размера  $N \times N$ , где  $N$  – количество треугольников на которые разбита граница.
- При  $N = 150000$  объём необходимой памяти для 1-ой матрицы – **168 Гб**, для 12 матриц в одном слое – **2 Тб**, для L-слоистой среды – **L\*2 Тб**.
- Для формирования выходных данных необходимо **многократно перезаполнять матрицы и умножать их на вектор**.
- Для применения алгоритма в реалистических (прямых и обратных) задачах сейсмологии алгоритму необходима **оптимизация по времени работы и по объёму требуемой памяти**.

# Матрицы распространения-поглощения. Реализация и оптимизация.

*AbsorptionMatrixVectMult()*

$$F_S = \begin{bmatrix} A_1 \\ \text{---} \\ A_2 \\ \text{---} \\ \cdot & A_{ss'} \\ \cdot \\ \cdot \\ \text{---} \\ A_k \end{bmatrix} \times F_{S'}$$

```
for ( $\omega = 1 \dots NSamp$ ) {
```

```
// перезаполнить матрицу  $A/P$  и  
// вектор  $F_{S'}$ 
```

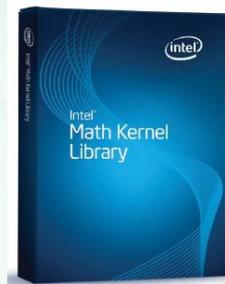
```
 $F_S(\omega) = A_{ss'}(\omega)F_{S'}(\omega)$ 
```

```
}
```

- Матрица  $A/P$  разрезается на полосы;
- Память выделяется только для одной полосы;
- Пакет состоит из набора высокооптимизированных процедур, реализующие перемножения различных типов матриц распространения/поглощения на входной вектор волнового поля для всех частот  $\omega$  из некоторого набора;
- Время работы одной процедуры: **~27 часов** (без оптимизации)

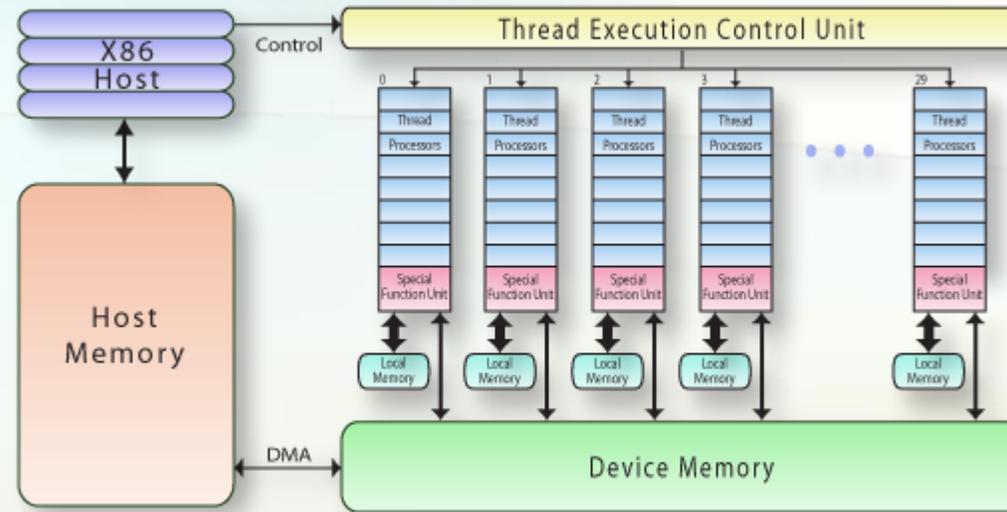
# Матрицы распространения-поглощения. Реализация и оптимизация.

OpenMP™



- Ускорение за счёт оптимизации и распараллеливания в **13,5** раз:
  - Современные технологии позволяют перезаполнять матрицы быстрее, чем считывать их с диска;
  - Изменение реализации алгоритма;
  - пр.
- Время работы параллельной процедуры ~ **2 часа**.
- Программа исполнялась на 2-ух процессорах по 4 ядра каждый:  
Intel(R) Xeon(R) CPU E5630 @2.53GHz

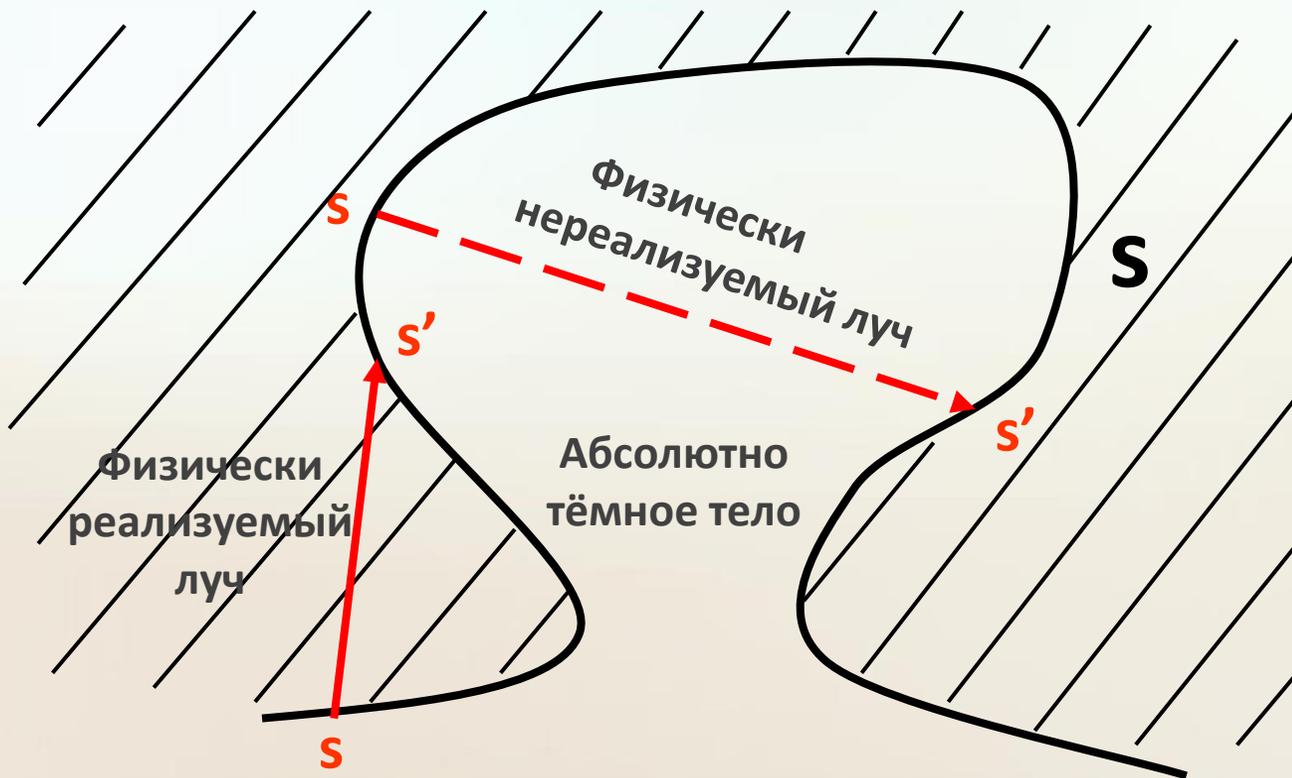
# Матрицы распространения-поглощения. Реализация и оптимизация.



- Ускорение оптимизированной параллельной процедуры более чем в **4 раза**;
- Время исполнения на графическом процессоре NVIDIA Tesla ~ **13 минут**.

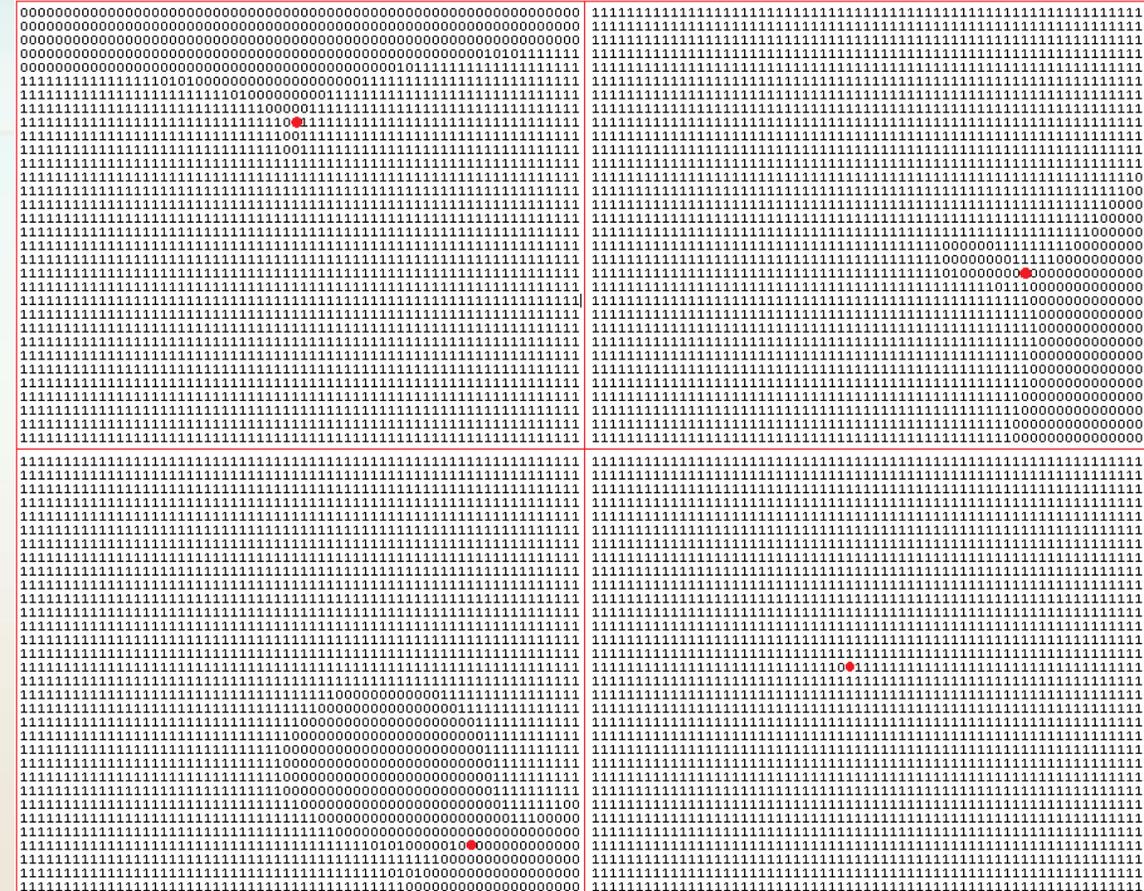
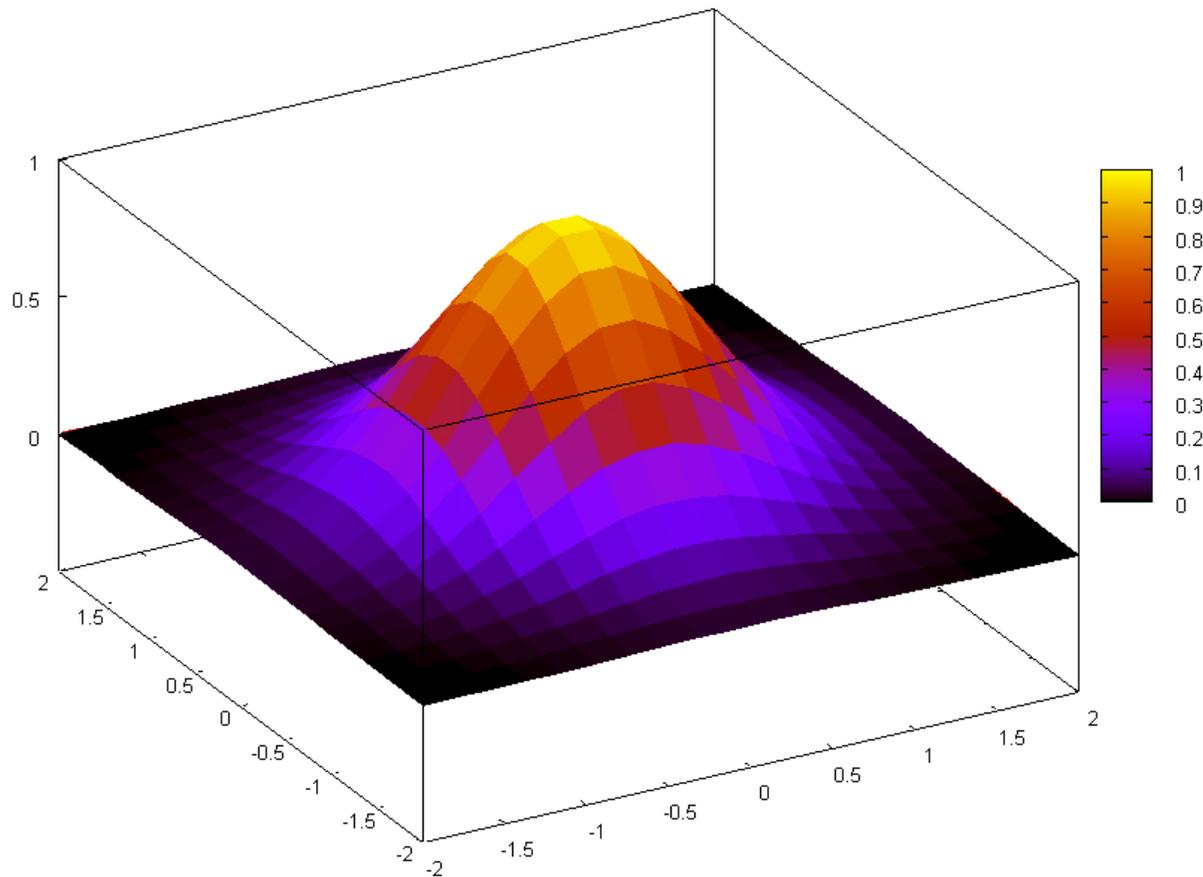
# Матрица тени

$$H[s][s'] = \begin{cases} 0, & [s, s'] \cap S = \emptyset; \\ 1, & [s, s'] \cap S \neq \emptyset. \end{cases}$$



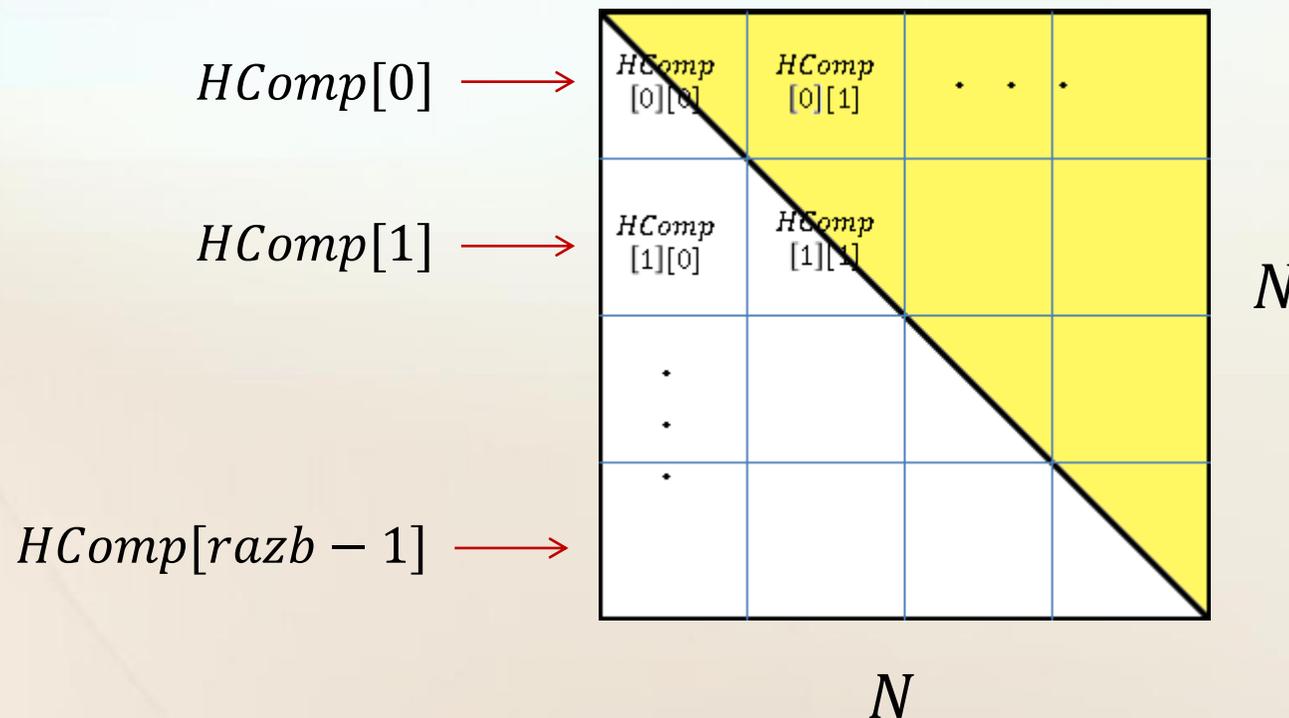
# Матрица тени. Результат работы процедуры.

$$f(x, y) = e^{-x^2} e^{-y^2}, x \in [-2; 2], y \in [-2; 2]$$



# Матрица тени. Алгоритм хранения в памяти.

- Разрезаем матрицу на полосы, каждую полосу разрезаем на квадратные подматрицы;
- Запускаем алгоритм расчёта матрицы тени только для подматриц принадлежащих верхнему треугольнику;
- Каждая подматрица транспонируется и копируется в соответствующую подматрицу из нижнего треугольника;
- Для каждой подматрицы запускаем алгоритм сжатия.

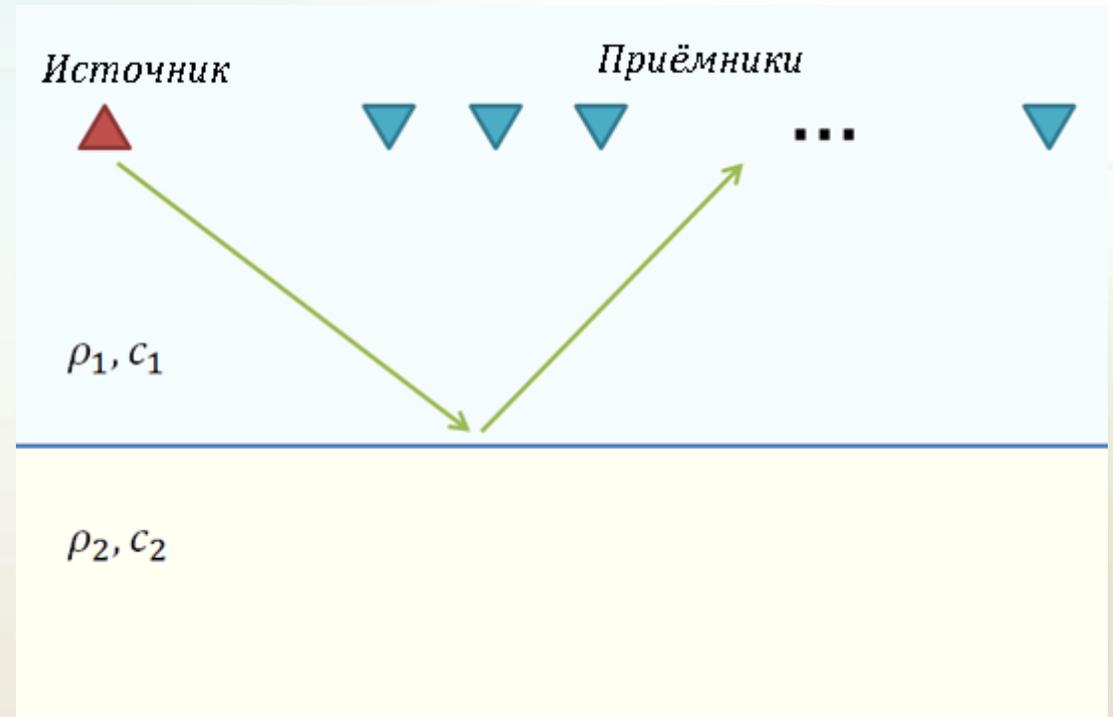


Коэффициент сжатия  
матрицы тени: ~ 10

# Эффективные коэффициенты отражения/преломления (ЭКО/П)

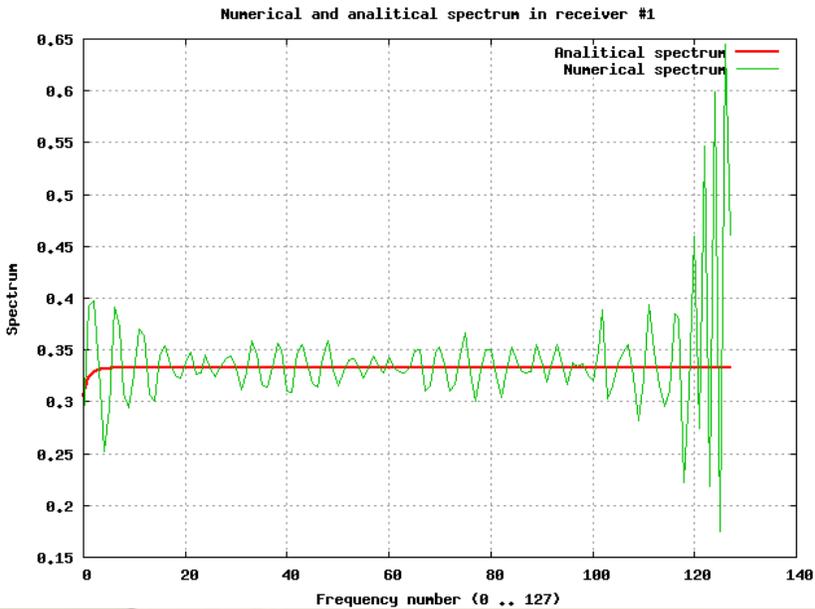
[Ayzenberg M. et al., 2007]

- Осуществлён перенос кода, реализующий ЭКО/П с языка Fortran на язык C;
- С целью проверки корректности работы алгоритма, произведено сравнение с аналитическим подходом [Skopintseva et al., 2011] частотных спектров в приёмниках отражённого от плоской границы поля, полученных посредством МНКВ.



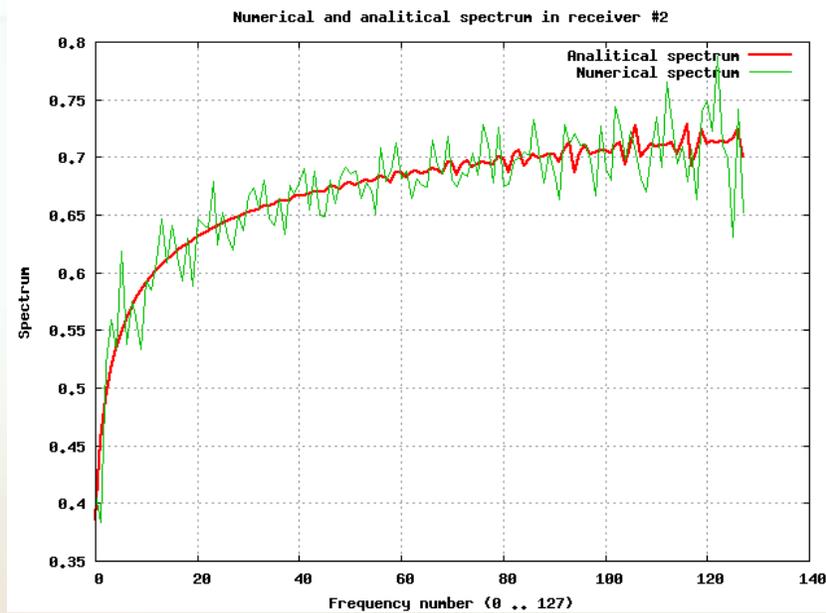
# Плоская граница. Спектры поля в приёмниках (аналитический подход vs МНКВ).

Офсет 0



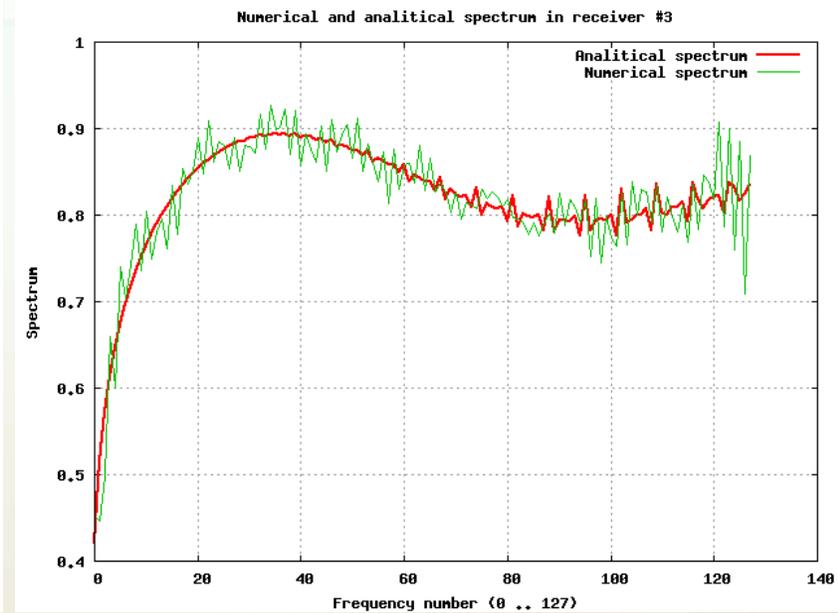
**Error (офсет 0) = 16,05%**

Офсет 1,1547



**Error (офсет 1,1547) = 3,84%**

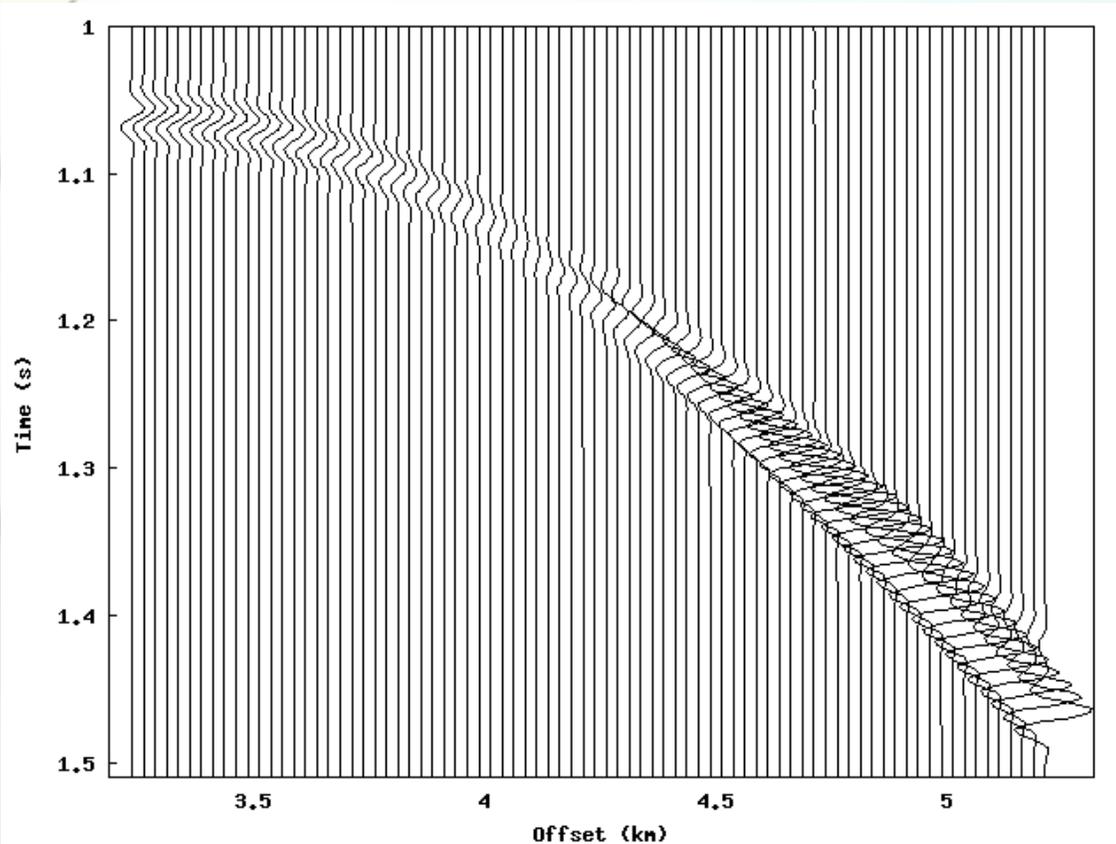
Офсет 1,4



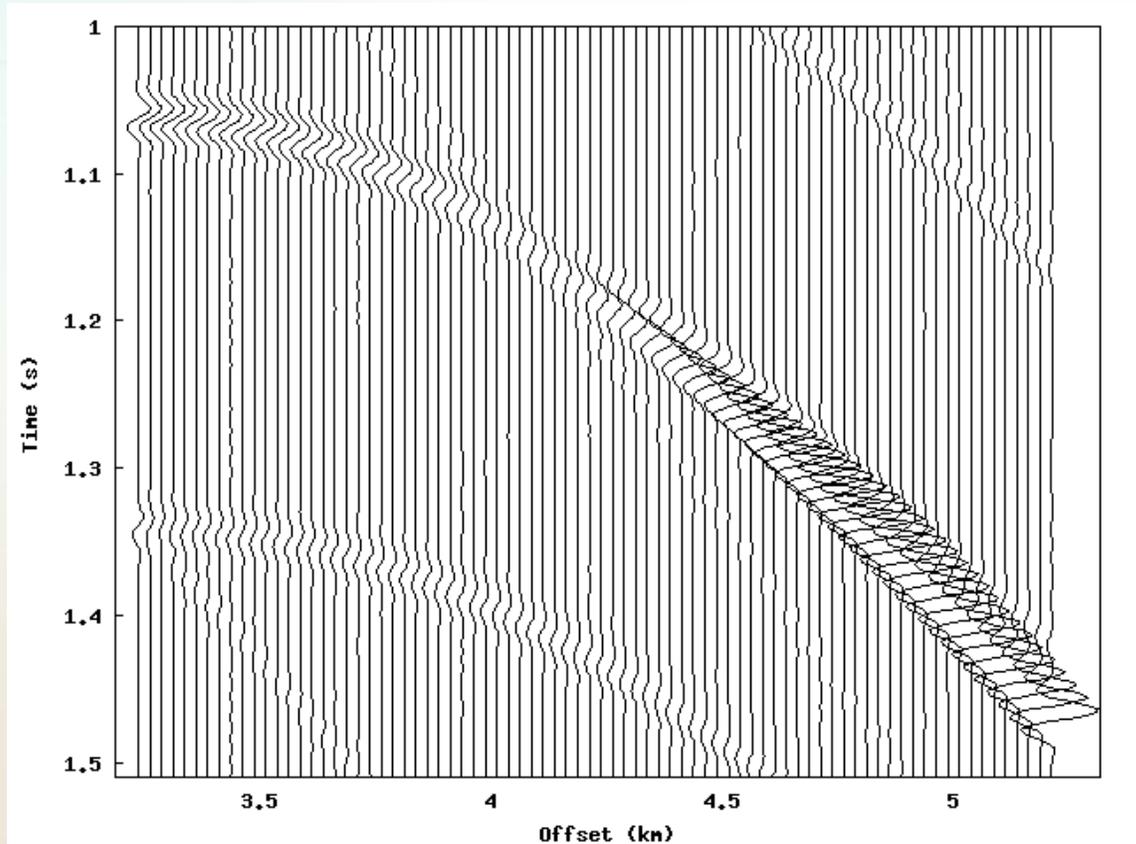
**Error (офсет 1,4) = 3,94%**

# Плоская граница. Сейсмограммы (аналитический подход vs МНКВ).

Аналитический подход

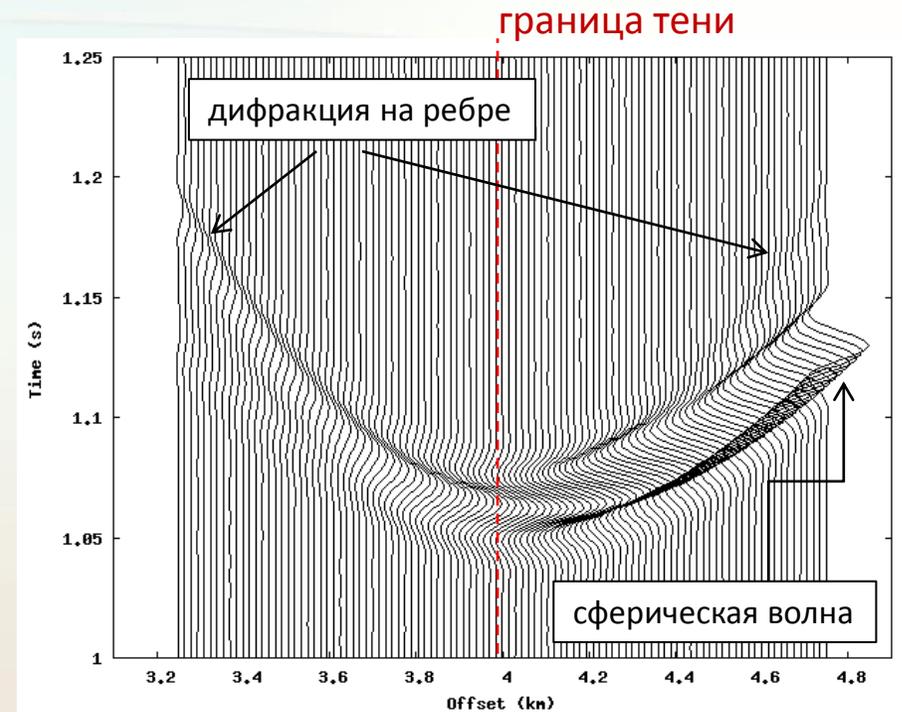
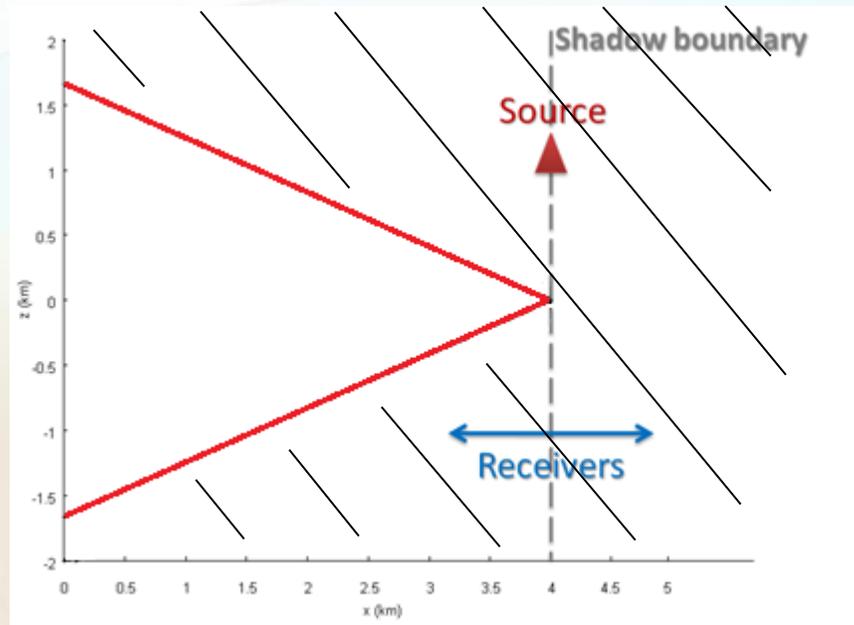


МНКВ

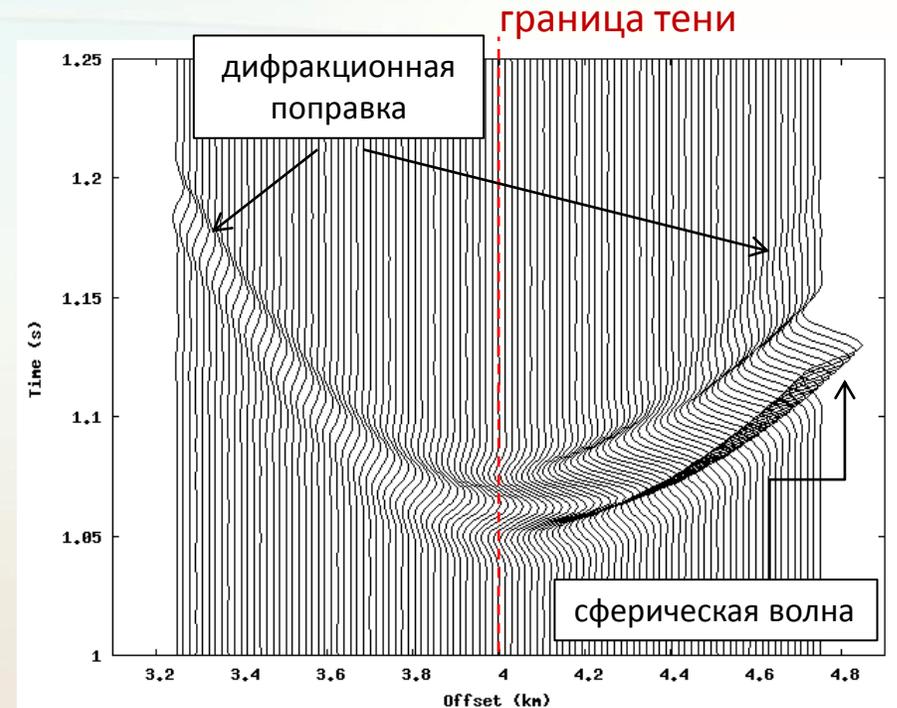
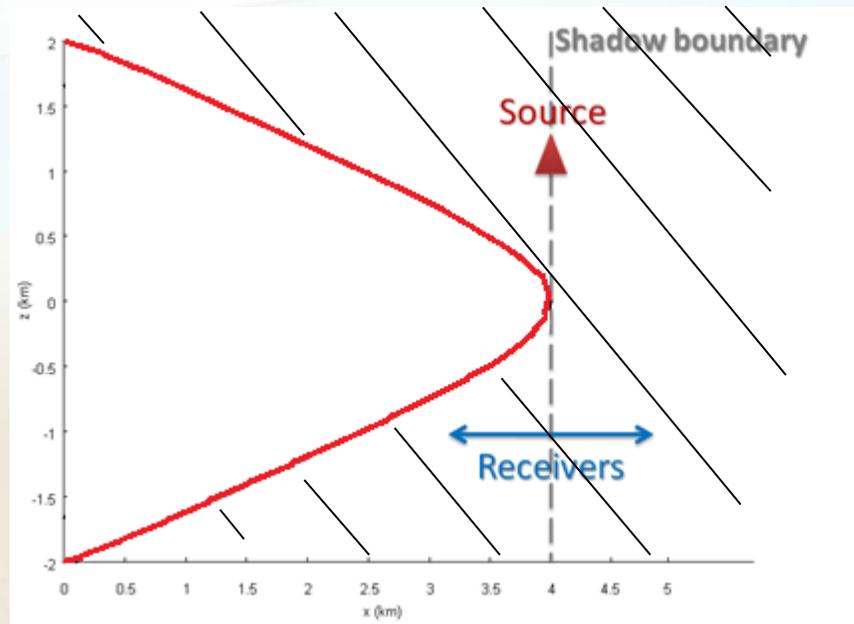


Среднеквадратичная ошибка: менее 1 %

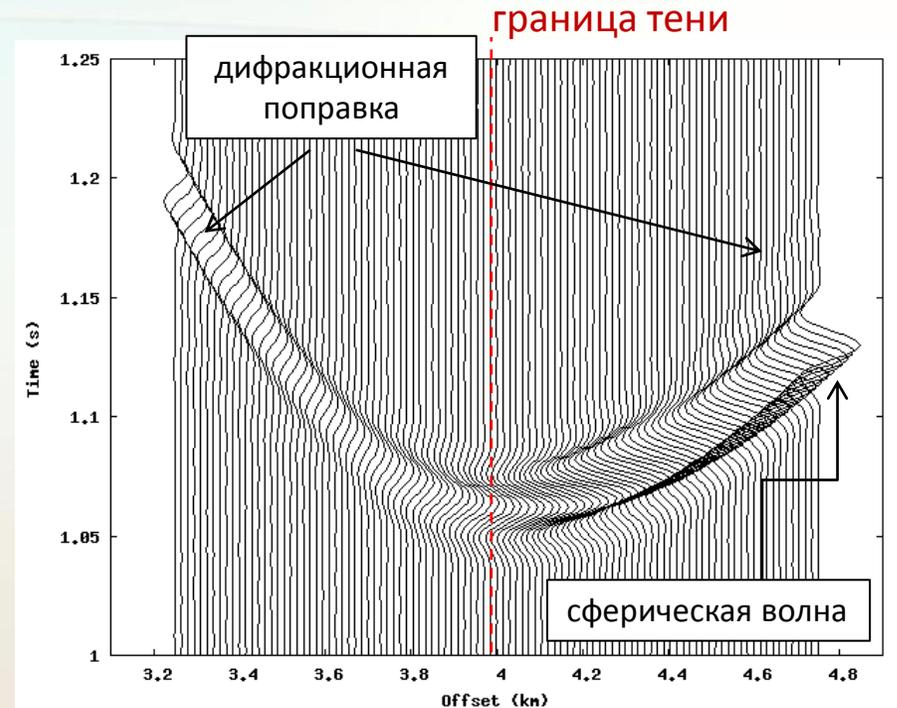
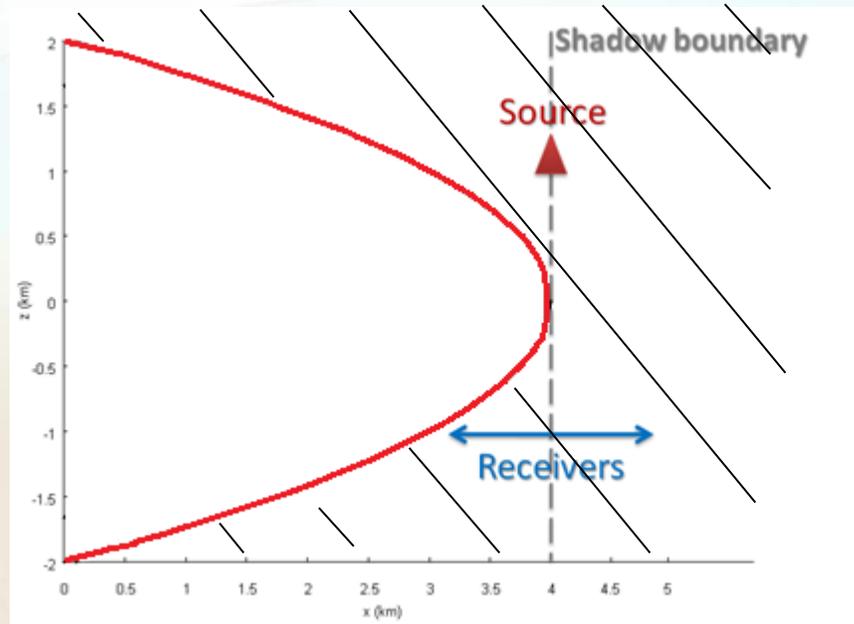
# Тест. Физически реализуемое поле $F = G + D^{(1)}$ в акустическом слое с границей в форме клина.



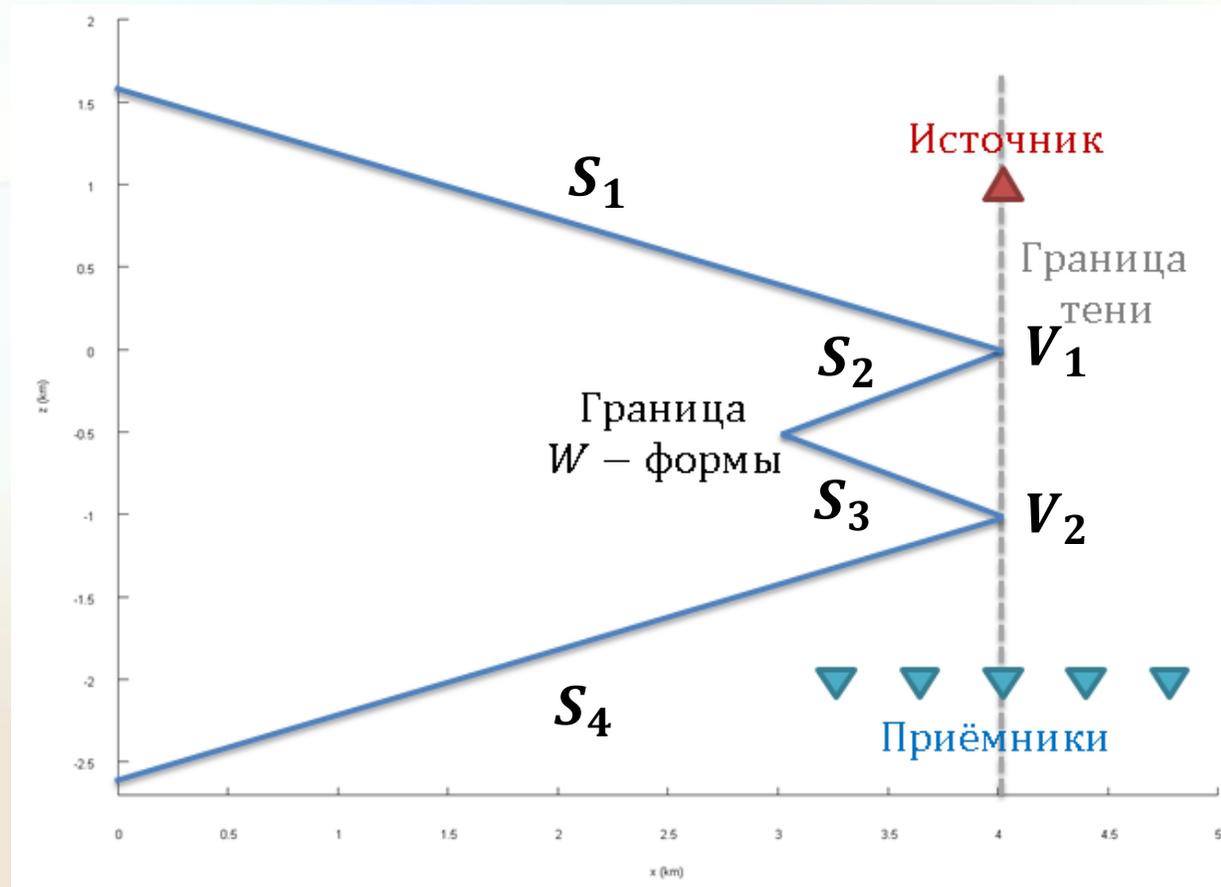
Тест. Физически реализуемое поле  $F = G + D^{(1)}$  в акустическом слое с границей в форме гиперболического цилиндра.



Тест. Физически реализуемое поле  $F = G + D^{(1)}$  в акустическом слое с границей в форме параболического цилиндра.

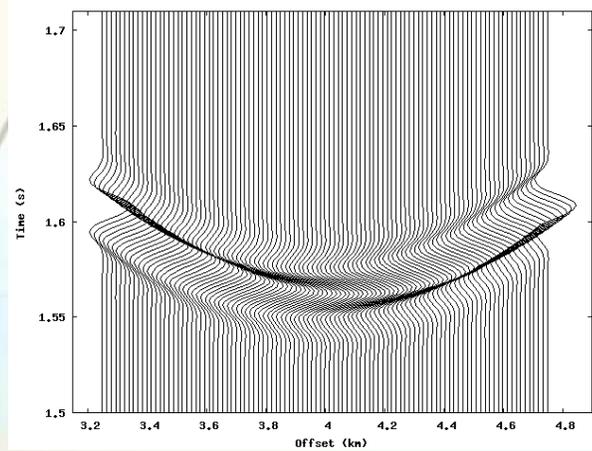


# Тест. Двуклинная модель.

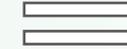
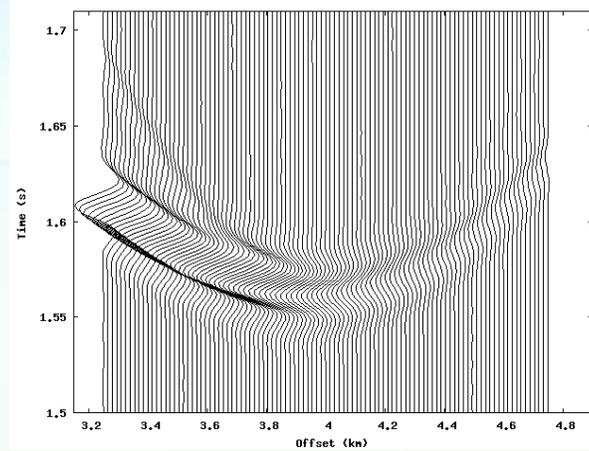


# Тест. Двуклинная модель.

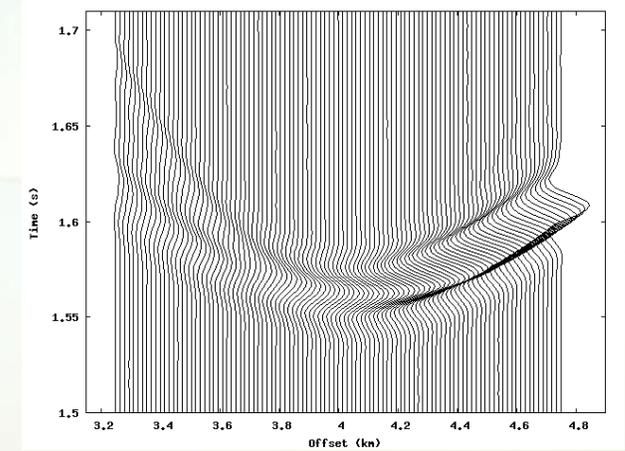
Сферическая волна  $G$  в приёмниках  
(без учёта 2-клиной границы)



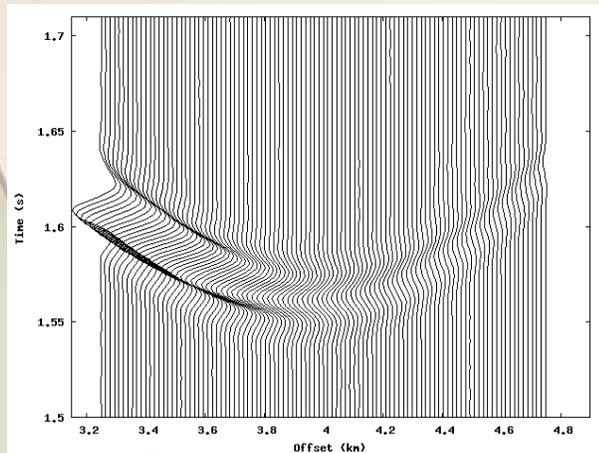
Дифракционная поправка  $D(1)$



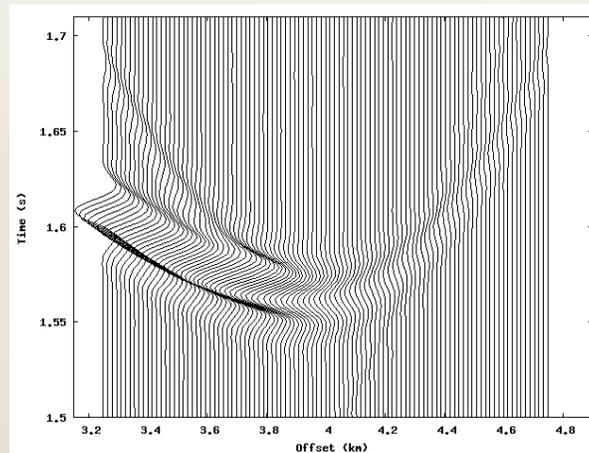
Результирующее поле в приёмниках  
 $G_F = G + D(1)$



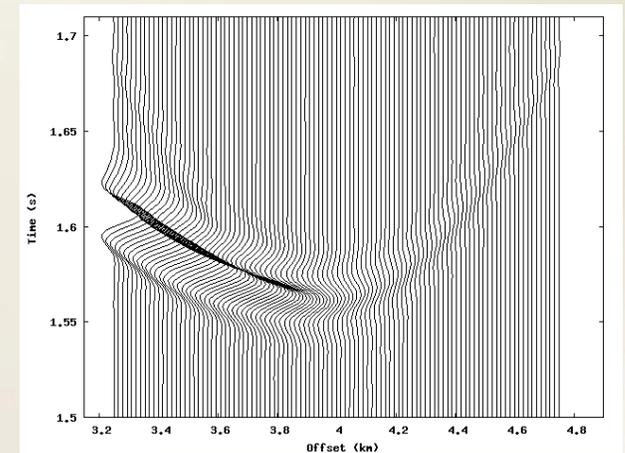
Дифракционная поправка от верхнего клина  $V1$



Дифракционная поправка от нижнего клина  $V2$



Дифракционная поправка от полуэкранов  $S2$  и  $S4$



# Основные результаты

1. Операторы распространения волн в слое отображены в виде передаточных матриц слоя, что позволило заменить экспоненциальную зависимость числа операций от числа слоёв на линейную.
2. Был доработан исходный прототип пакета программ:
  - Перенесён код с языка Fortran на язык C;
  - Реализован и встроен в алгоритм расчёт дифракционной поправки 1-го порядка, с целью моделирования каскадной дифракции;
  - Достигнуты приемлемые объёмы памяти, требуемые алгоритму для нормальной работы;
  - Осуществлён перенос кода на параллельные архитектуры для CPU и части кода для GPU.
3. Произведена алгоритмическая и численная реализация процедуры построения семейства зон виртуальной тени на границах слоя. Достигнуты приемлемые объёмы памяти, требуемые для хранения матрицы виртуальной тени.
4. Проверена численными примерами для акустического полупространства с границей сложной формы точность, стабильность и эффективность алгоритма.
5. Численные тесты показали, что учёт дифракционной поправки 1-го порядка представляет волновое поле в тени в приближении однократной и двукратной дифракции.

# Список публикаций

2011

**Н. Ю. Зятков**, А. А. Айзенберг, А. М. Айзенберг, А. А. Романенко, Ф. Андерссон Описание сейсмических волн в слоях с «затеняющими» границами в терминах операторов распространения-поглощения. Третья международная молодёжная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач», 10-15 октября 2011 года, Новосибирск, Россия, с. 20-22.

2012

**Zyatkov N.**, Romanenko A., Ayzenberg A.A., Aizenberg A.M., and Andersson F. Modeling of seismic waves in layers with shadow boundaries in terms of unspase propagation-absorption matrices: realization and optimization. The Join International Conference on Human-Centered Computer Environments, March 8-13, 2012, Aizu-Wakamatsu & Hamamatsu, Japan, pp. 101-105.

**Зятков Н.** Моделирование сейсмических волн в слоях с затеняющими границами в терминах матричных операторов распространения-поглощения: реализация и оптимизация для GPU. 50-я юбилейная Международная научная конференция «Студент и научно-технический прогресс» 13-19 апреля 2012 г. Новосибирск, Россия, с. 152. **Диплом 1 степени.**

**Zyatkov N.**, Ayzenberg A., Aizenberg A.M., Romanenko A., and Andersson F. Modeling of cascade diffraction in terms of unspase propagation-absorption matrices – realization and optimization for GPU. Extended Abstracts, 74th Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012, P288.

Ayzenberg A.A., Aizenberg A.M., **Zyatkov N.Y.**, and Andersson F. Single-diffraction approximation of the feasible Green's function in geometrical shadow zones. Extended Abstracts, 74th Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012, P287.

**Н. Ю. Зятков**, А. А. Айзенберг, А. М. Айзенберг, А. А. Романенко, Ф. Андерссон Моделирование каскадной дифракции в слоях с «затеняющими» границами в терминах матричных операторов распространения-поглощения. Четвёртая международная молодёжная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач», 5-15 августа 2012 года, Новосибирск, Россия, с. 60.

2013

**Зятков Н.** Разработка высокооптимизированного пакета программ дифракционного моделирования сейсмических волновых полей. 50-я международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» 12-18 апреля 2013 г. Новосибирск, Россия, с. 134. **Диплом 2 степени.**

**Zyatkov N.**, Ayzenberg A., Aizenberg A.M., and Romanenko A. Highly-optimized TWSM Algorithm for Modeling Cascade Diffraction in Terms of Propagation-absorption Matrices. Extended Abstracts, 75th Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, London, England, 10-13 June 2013, Th-P02-11.

A. Ayzenberg, **N. Zyatkov**, A. Stovas, and A.M. Aizenberg. Double-diffraction Approximation of the Feasible Green's Function in Geometrical Shadow Zones. Extended Abstracts, 75th Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, London, England, 10-13 June 2013, Th-P02-10.

# Заключение

**Результаты численных тестов подтверждают математическую теорию волн и показывают, что новый алгоритм имеет перспективу развития для применения в моделировании волновых полей для более сложных моделей среды.**

Автор выражает благодарность научным руководителям А. М. Айзенбергу (ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия) и А. А. Романенко (НГУ, Россия) за возможность работать в новой интересной тематике.

Автор благодарит Шведский фонд по международному сотрудничеству в науке и высшем образовании, Университет Лунда (Лунд, Швеция) и куратора проекта фонда доктора Ф. Андерссона за поддержку при выполнении исследования.

Автор выражает благодарность А. А. Айзенберг (NTNU, Тронхейм, Норвегия), М. А. Айзенберг (Statoil, Берген, Норвегия) и А. А. Дучкова (ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия) за помощь при выполнении работы.

Спасибо за внимание!