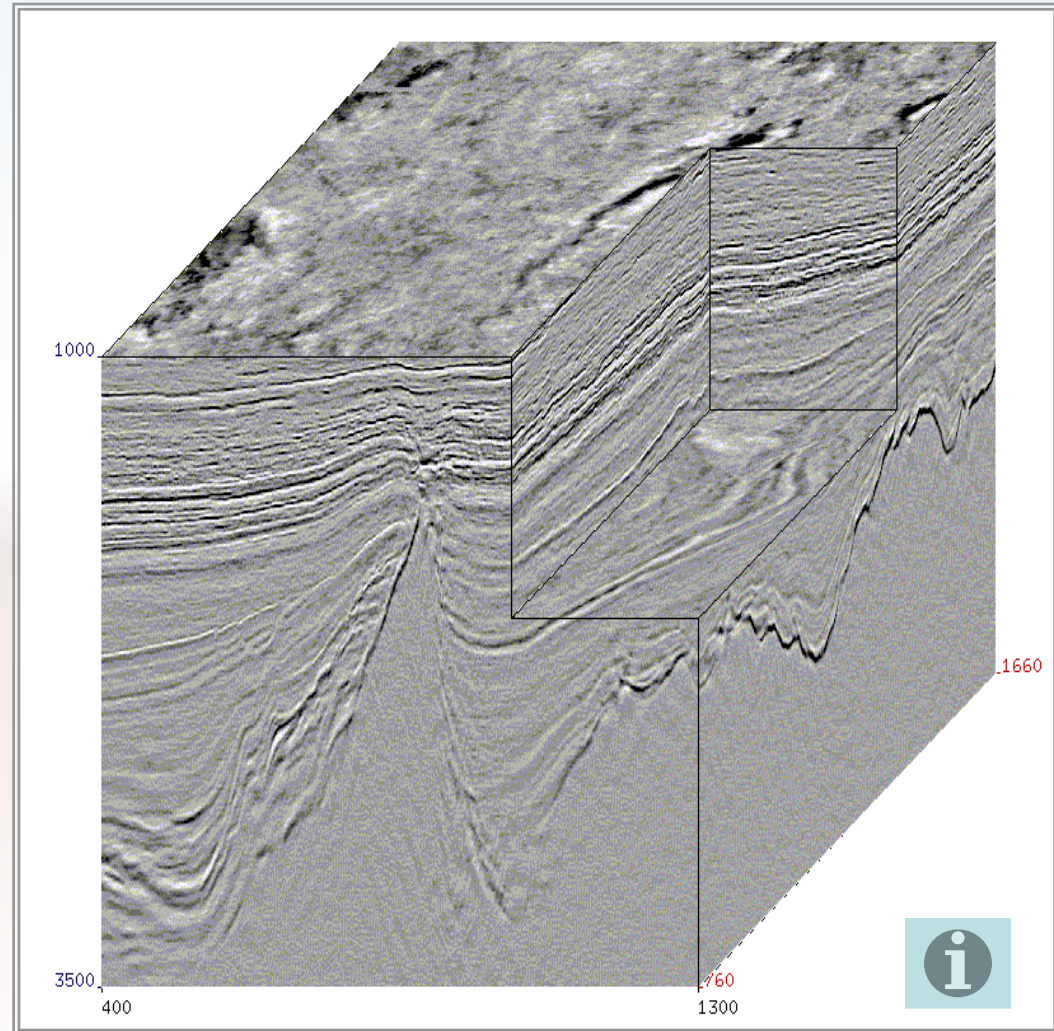


Сейсмическая миграция: алгоритмы и реализации

Успешный опыт производственной
эксплуатации с 2003 года отечественной
программно-алгоритмической разработки
ОАО ЦГЭ и ИПМ им. М.В.Келдыша

Введение в задачу сейсмической миграции

- «Сейсмическая миграция» \equiv
 \equiv реконструкция изображения земной среды по сейсмическим данным - центральная задача сейсмической разведки земных недр при поиске нефти и газа
- **Геологическая интерпретация** куба изображения неоднородной земной среды позволяет построить детальную геологическую модель, оценить запасы нефти и газа, наметить места для бурения
- **Наиболее совершенный метод** реконструкции изображения – «3-мерная глубинная миграция до суммирования»
- **Миграция** реализуется как линейный оператор, фокусирующий каждую рассеянную волну в точку рассеяния



Место миграции в сейсмических исследованиях

Проект

Сбор данных



Обработка

Стандартная обработка

**Построение опорной
скоростной модели среды**

**Миграция
до суммирования**

Сигнальная обработка

Накапливание

Миграция после
суммирования

Интерпретация

Классификация алгоритмов миграции и выполненные реализации



Изображение среды можно свести к обратной задаче рассеяния либо к волновому продолжению.

Асимптотическое решение линеаризованной обратной задачи рассеяния и задачи волнового продолжения сводятся к многократному вычислению двойных интегралов типа Кирхгофа:

$$f(\mathbf{r}_0) = \iint_{S_g} W(\mathbf{s}_0, \mathbf{g}; \mathbf{r}_0) U'_t(\mathbf{s}_0, \mathbf{g}, \tau_\Sigma(\mathbf{s}_0, \mathbf{g}; \mathbf{r}_0)) d\mathbf{g}, \quad (1)$$

где $f(\mathbf{r}_0)$ передает изображение среды в глубинной точке \mathbf{r}_0 (потенциал рассеяния/локальный коэффициент отражения);

$U'_t(\mathbf{s}_0, \mathbf{g}, t)$ - наблюдаемое сейсмическое поле однократно-отраженных и рассеянных волн для источника S_0 и приемников \mathbf{g} на времени t ;

$\tau_\Sigma(\mathbf{s}_0, \mathbf{g}; \mathbf{r}_0)$ - сумма времен пробега волн от источника и приемника до \mathbf{r}_0 ;

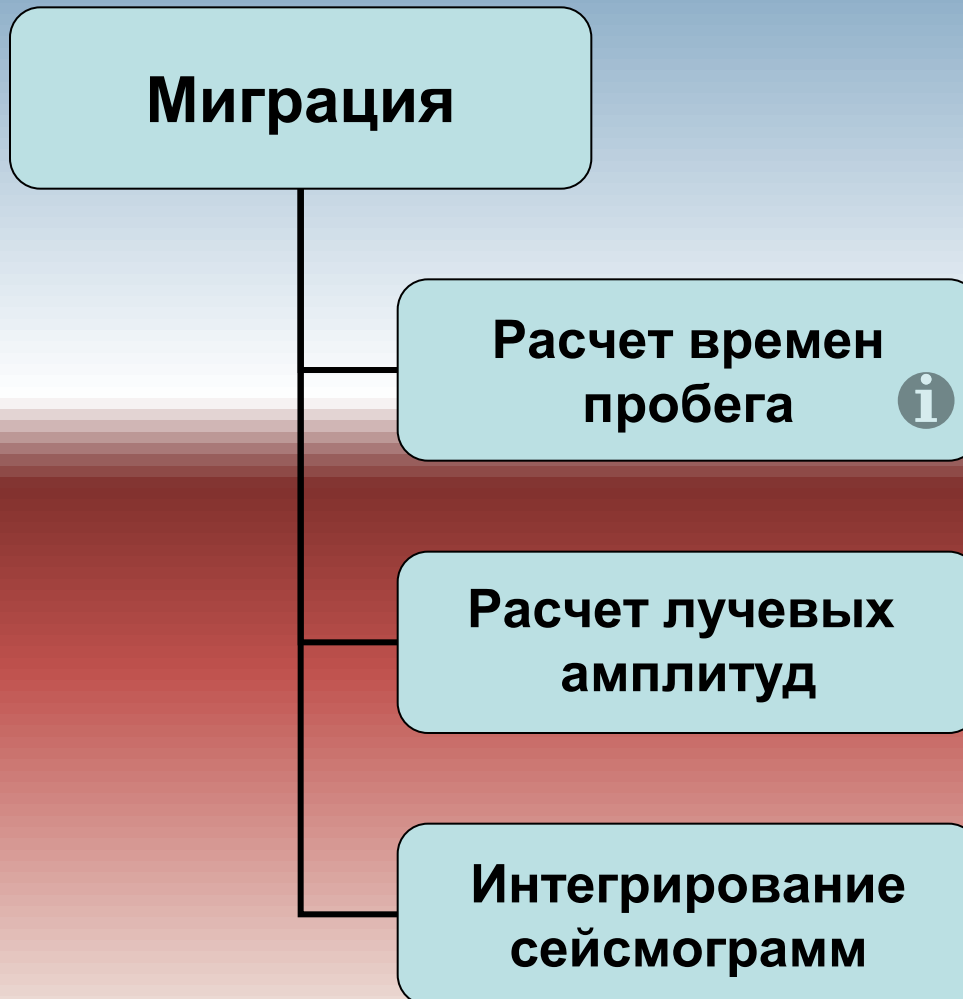
$W(\mathbf{s}_0, \mathbf{g}; \mathbf{r}_0)$ - вес, связанный с геометрическим расхождением.

- Общее число интегралов вида (1) для реконструкции изображения типичного объекта сейсмической разведки составляет: $\sim 10^{10}-10^{11}$;
- Общее число требуемых арифметических операций: $\sim 10^{16}-10^{17}$

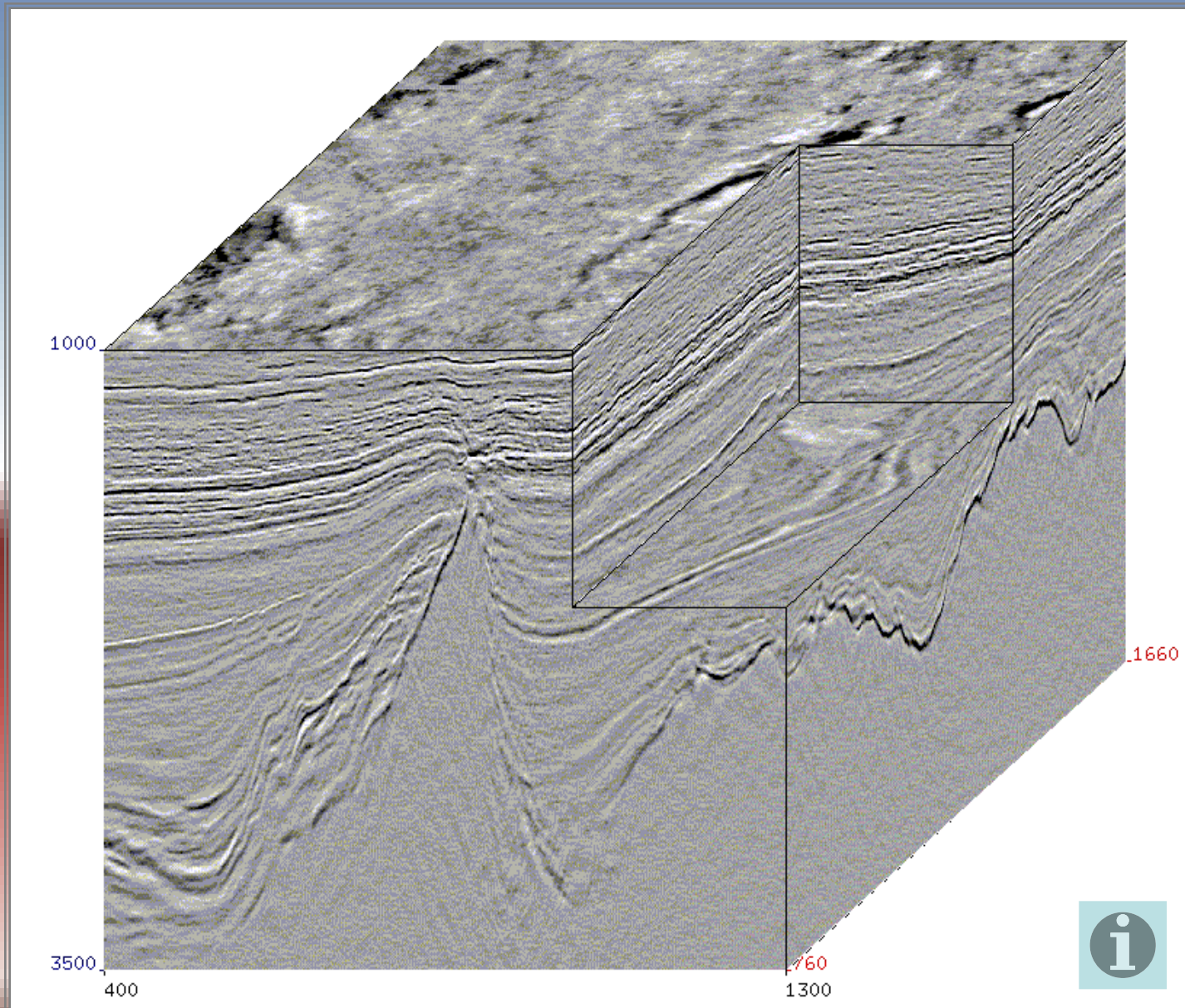
Реализации миграции



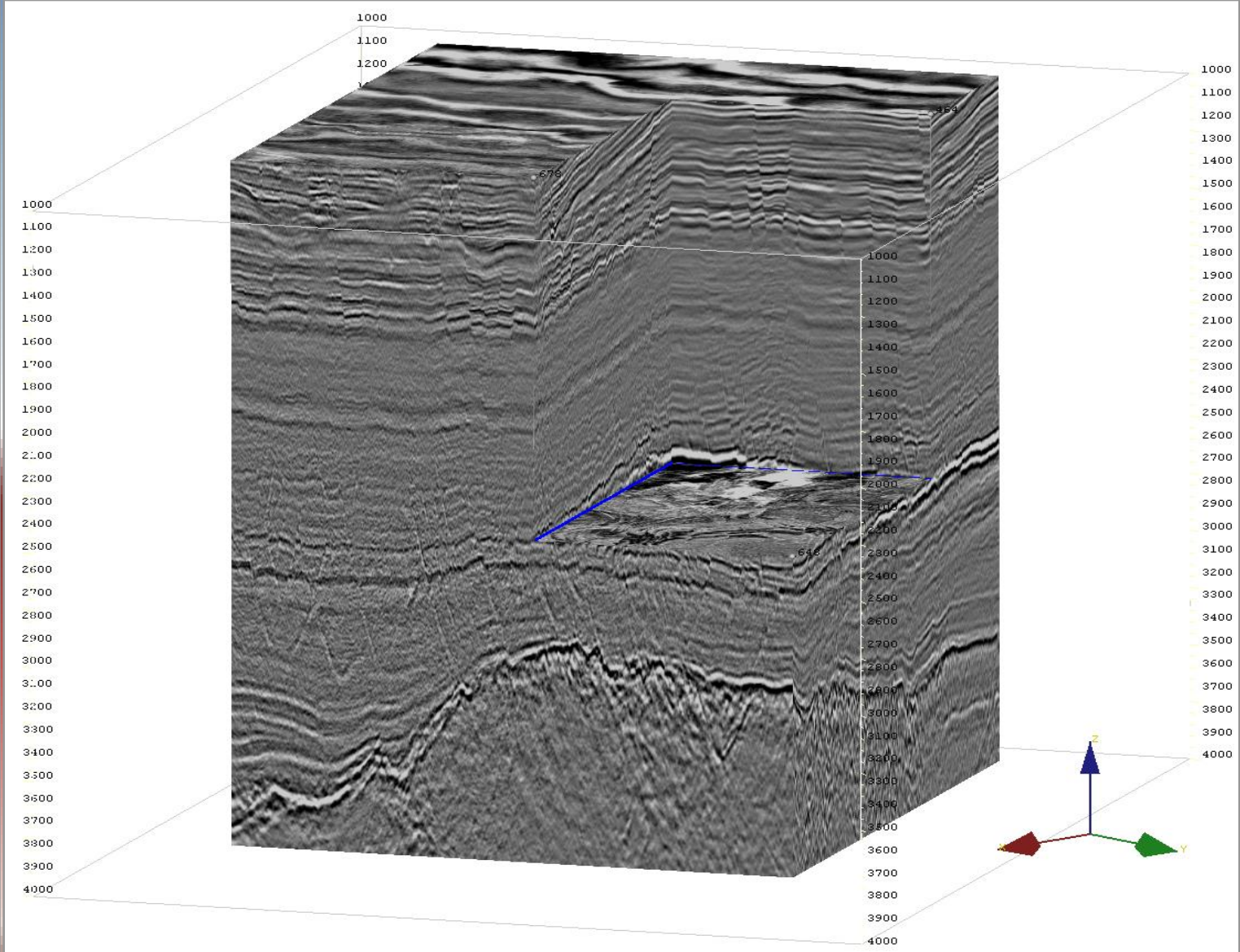
Реализация миграции Кирхгофа



Фрагмент куба изображения: шельф Вьетнама

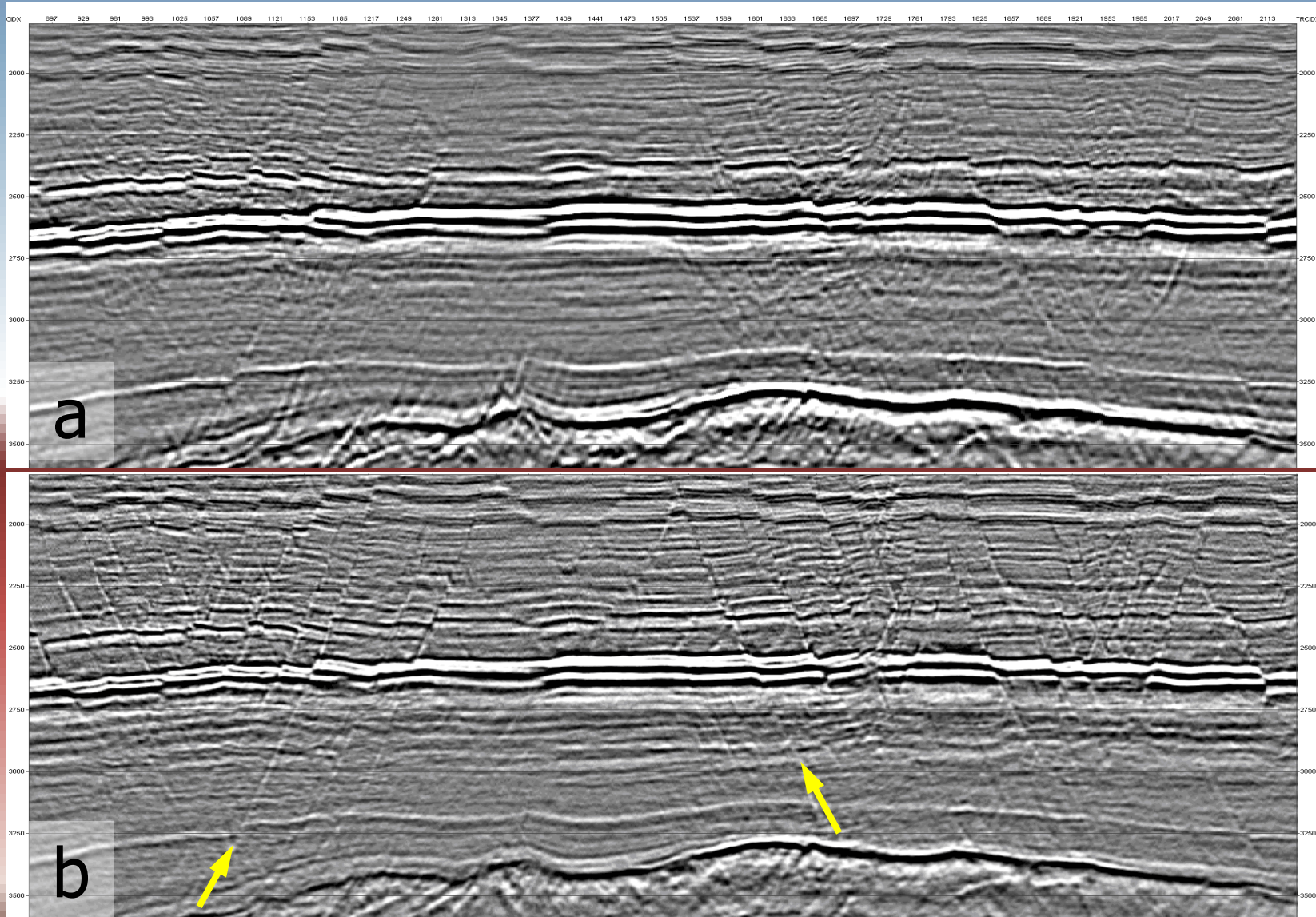


Фрагмент куба изображения: шельф Сахалина



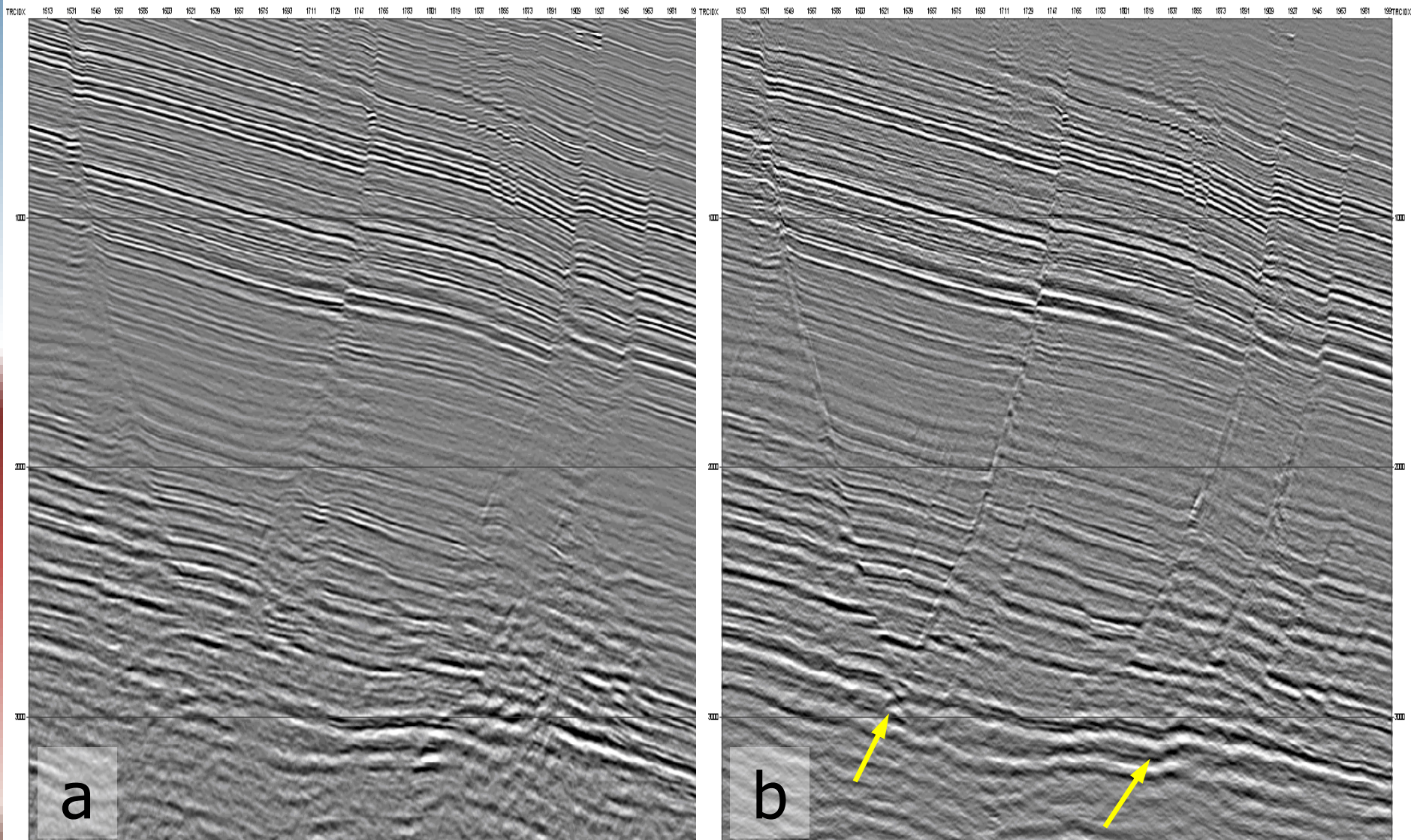
Фрагменты Inline-сечений кубов; Сахалин, данные морских наблюдений

(a) Poststack-миграция; (b) 3-D PSDM;



Фрагменты Inline-сечений кубов; Сахалин, данные морских наблюдений

(a) Poststack-миграция; (b) 3-D PSDM;



Опыт высокопроизводительных вычислений в рамках выполнения 3-D миграции до суммирования



**24-процессорный
кластер “ТКС”
МГТУ
им. Н.Э.Баумана
2001 г.**



**Суперкомпьютер
«МВС-100К»
11 680 процессорных
ядер
МСЦ РАН
2008 г.**



**Суперкомпьютер
«Ломоносов»
35 776 процессорных ядер
НИВЦ МГУ
2010 г.**

Сводка основных параметров расчетов выполненных на СК «Ломоносов» программой миграции «СейсмоСкан»; открыто крупнейшее Киринское месторождение

- Площадь морской сейсмической съемки:
800 кв.км (шельф Сахалина)
 - Номинальная кратность съемки: **54**
 - Объем исходных сейсмических данных:
800 Гбт
 - Предельная глубина изображения среды:
8 км
 - Исходная сетка бинов: **12,5м x 25м**
 - Шаг сетки куба изображения среды:
25м x 25м x 5м
 - Полная апертура миграции: **10км**
 - Число использованных процессорных
ядер для выполнения основных расчетов:
3104
 - Число независимых параллельных задач:
194
 - Общее время основных расчетов: **10 ч**
 - Итого: **31040 процессор x час**
-
- **ВСЕГО: 31142 процессор x час**



**Суперкомпьютер «Ломоносов»
35 776 процессорных ядер
НИВЦ МГУ
2010 г.**

Текущая разработка: асимптотическая 3-D глубинная миграция до суммирования с учетом многолучевого распространения волн и каустик функций Грина

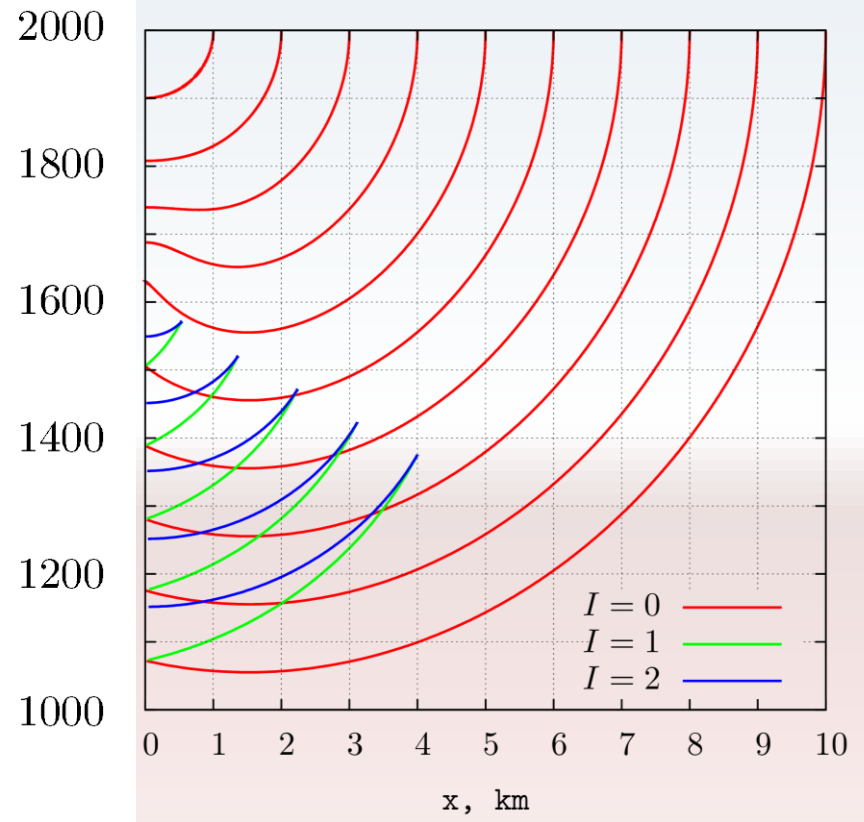
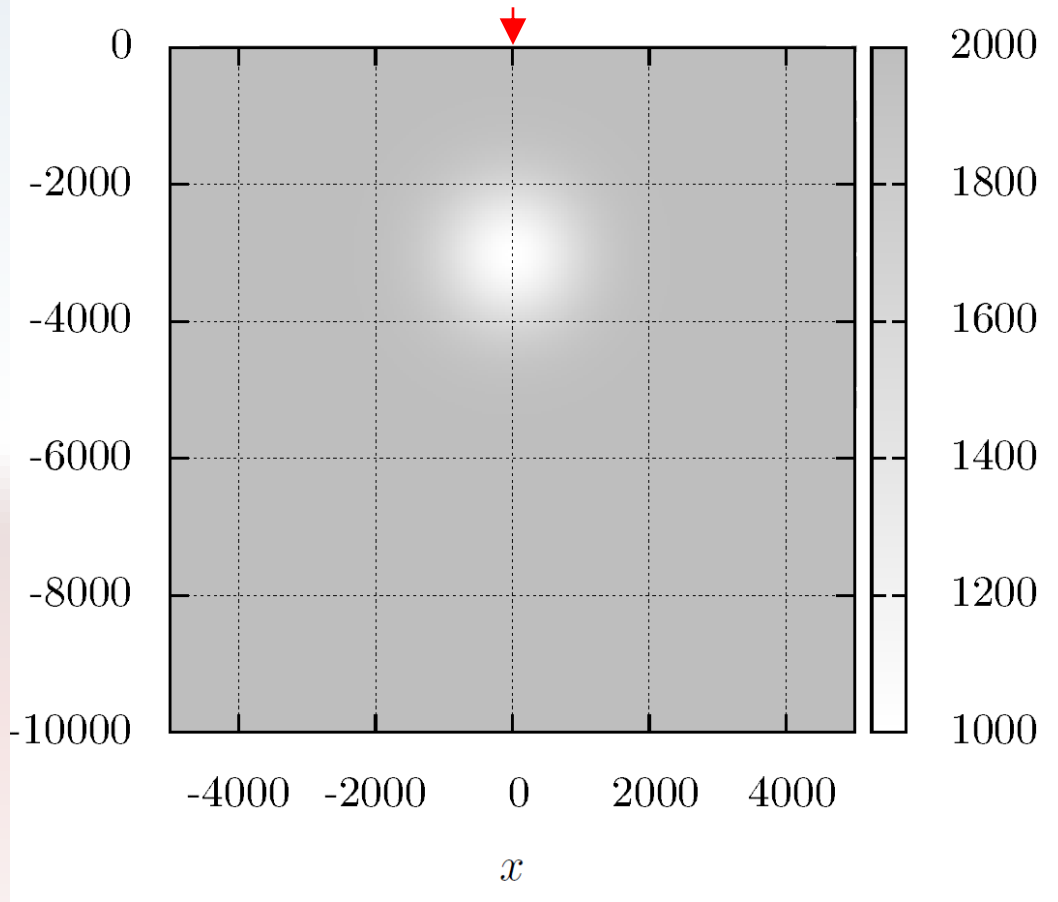
Получена интегральная формула асимптотического решения задачи в лучевой параметрической системе координат. Реализованы лучевая трассировка, основанная на численном решении системы уравнений для бихарактеристик методом Рунге-Кутта и расчет лучевых амплитуд, связанных с величинами якобиана.

$$f(\mathbf{r}) \approx \iint \frac{\cos^{1/2}(\mathbf{k}, \mathbf{n}_g)}{v^{1/2}(\mathbf{g})} \frac{\cos^{1/2}(\mathbf{k}, \mathbf{n}_s)}{v^{1/2}(\mathbf{s})} \times$$
$$\times \left| \frac{J^s(\xi_s, \eta_s; \mathbf{r}) D(x_s, y_s)}{v(\mathbf{r}) D(\xi_s, \eta_s)} \right|^{1/2} \left| \frac{J^g(\xi_g, \eta_g; \mathbf{r}) D(x_g, y_g)}{v(\mathbf{r}) D(\xi_g, \eta_g)} \right|^{1/2} H^{\alpha+\beta} u''(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \tau_\Sigma) d\xi_s d\eta_s d\xi_g d\eta_g$$

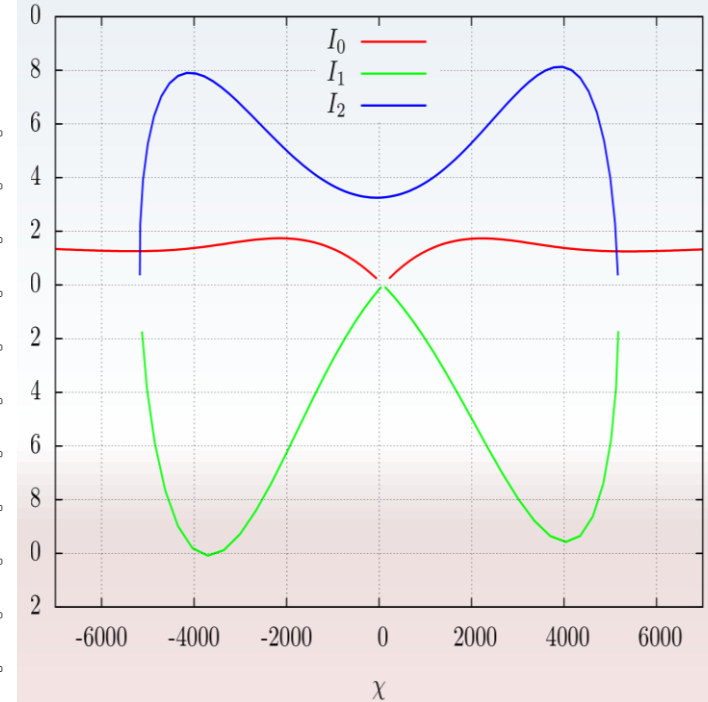
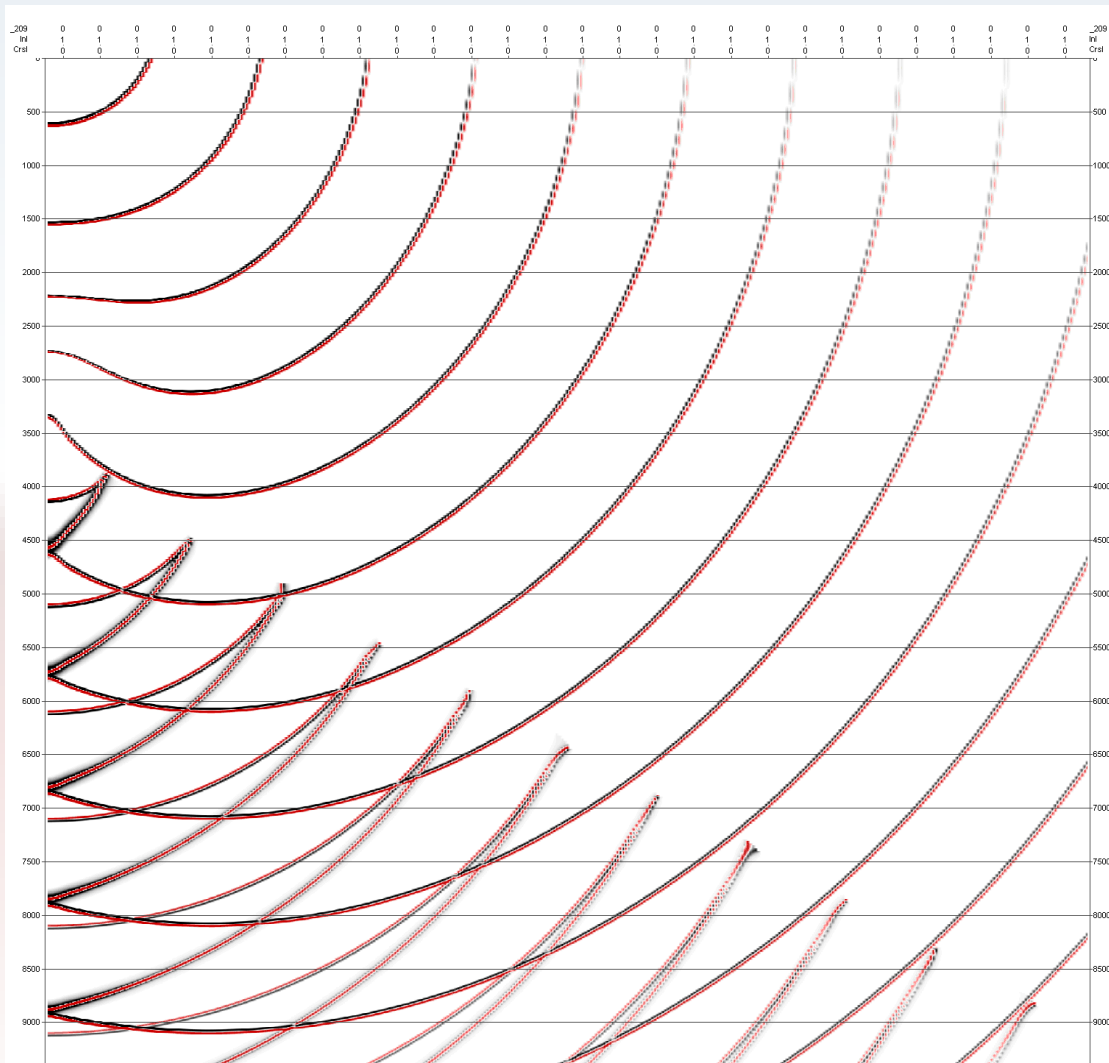
$$Hf(t) = p.v. \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \frac{1}{t - \tau} d\tau \quad - \text{преобразование Гильберта сейсмических трасс;}$$

$(\alpha + \beta)$ - накопленная сумма индексов лучей

Модель среды с низкоскоростным включением и многолистные фронты волн от точечного источника, расположенного на поверхности $Z=0$



Результаты расчета волн от точечного источника для модели среды с низкоскоростным включением по асимптотической интегральной формуле



Профиль $0X$
многолистной
поверхности Якобиана
на дневной поверхности
 $Z=0$

Планы дальнейшей разработки:

реализация «полно-волновой» 3-D глубинной сейсмической миграции до суммирования, основанной псевдо-Фурье методе расчета функций Грина и последующем использовании интегральной формулы решения вида:

$$f(\mathbf{r}) = \int d\omega \iint G^*(\mathbf{g}, \mathbf{r}, \omega) G^*(\mathbf{s}, \mathbf{r}, \omega) u(\mathbf{g}, \mathbf{s}, \omega) dg ds$$

ω - временная частота;

$u(\mathbf{g}, \mathbf{s}, \omega)$ - преобразование Фурье по времени сейсмических записей;

$G^*(\mathbf{g}, \mathbf{r}, \omega) G^*(\mathbf{s}, \mathbf{r}, \omega)$ - произведение функций Грина;

Разработан экономичный псевдо-Фурье метод решения вспомогательной задачи для расчета функций Грина:

$$\frac{\partial G}{\partial z} + \sqrt{-\frac{\omega^2}{v^2} - \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)} G = 0,$$

$$G(\mathbf{r}; \omega) \Big|_{z=0} = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad ,$$

где $\mathbf{r} = (x, y, z)$, $v = v(\mathbf{r})$,

$$G(x, y, z + \Delta z; \omega) \approx \mathbf{F}_{x,y}^{-1\mathbf{k}} \exp \left(i \Delta z \operatorname{sgn}(\omega) \sqrt{\left(\frac{\omega}{v} \right)^2 - |\mathbf{k}|^2} \right) \mathbf{F}_{\mathbf{k}}^{x,y} G(x, y, z; \omega) \quad ,$$

где $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$, $i^2 = -1$, $\mathbf{F}_{\mathbf{k}}^{x,y}$ и $\mathbf{F}_{x,y}^{-1\mathbf{k}}$ - прямое и обратное

преобразования Фурье; реализация предполагает использование графических ускорителей и технологии CUDA