

**Параллельный алгоритм для восстановления
типа источника методом зеркального
обращения времени
(Parallel algorithm for source type recovering by
the Time Reversal Mirror)**

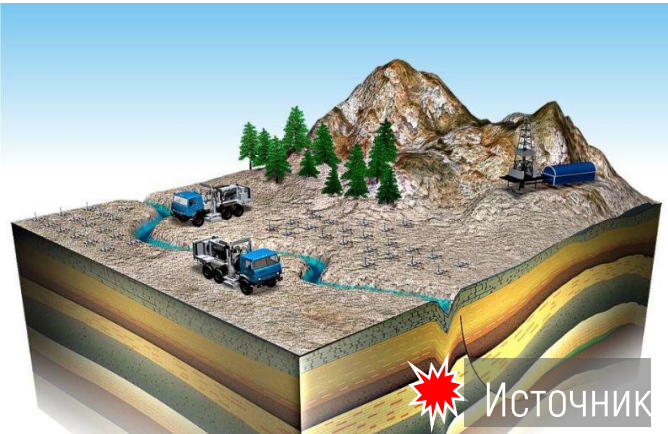
Галактионова Анастасия Андреевна,
д.ф.-м.н. Решетова Галина Витальевна

Москва, 25 - 26 сентября 2023

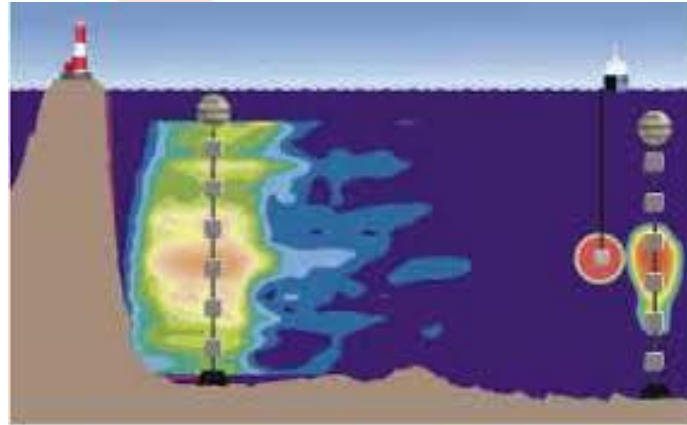
Содержание

- Введение
- Метод решения
- Параллельная реализация
- Заключение

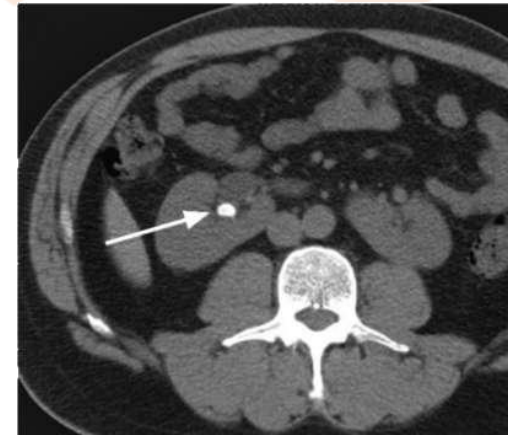
Введение



Геофизика



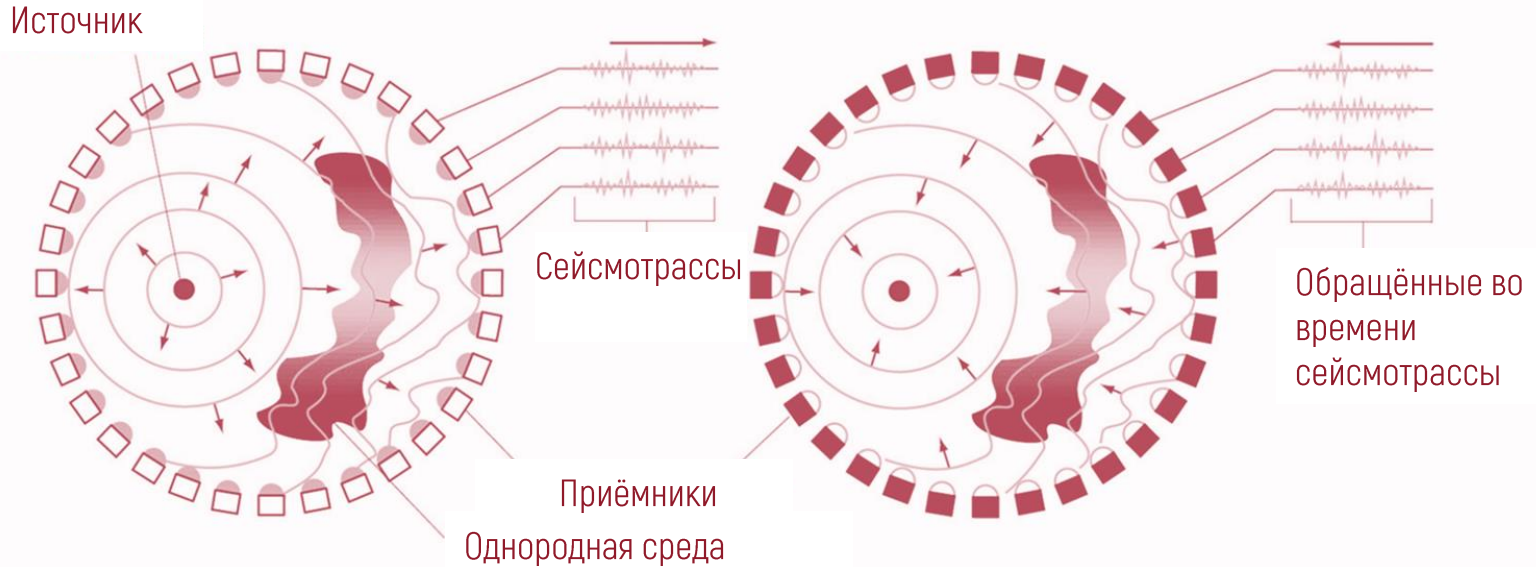
Безопасность



Медицина

Задача: по полученным на свободной поверхности сейсмограмм определить не только расположение сейсмического источника, но и его тип

Метод решения. TRM (Time Reversal Mirror)



Применяется для восстановления источников акустических/сейсмических волн, для генерации виртуальных источников, фокусировки звука, выполнения неразрушающего контроля материалов и инженерных конструкций, локализации неоднородностей

Метод решения. Система уравнений

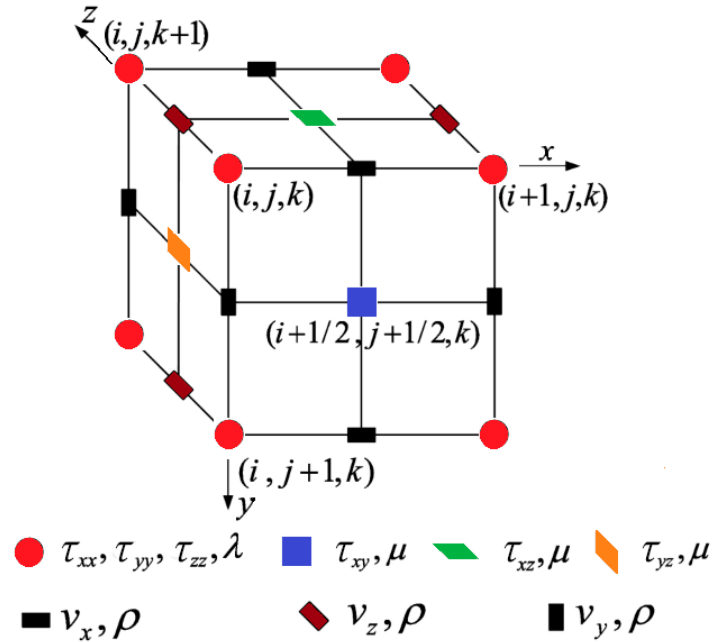
динамической теории упругости в скоростях – напряжениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + F_{xx} \\ \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + F_{yy} \\ \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + F_{zz} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + F_{xy} \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + F_{xz} \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + F_{yz} \end{array} \right.$$

Центр расширения:

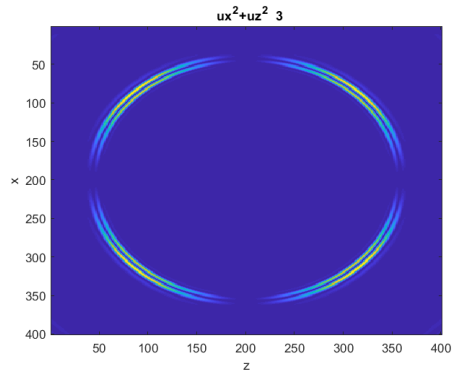
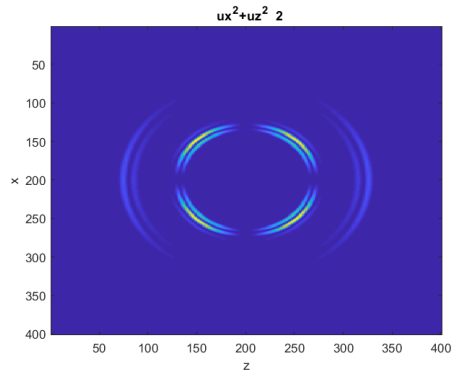
$$F_{xx} = F_{yy} = F_{zz} = f(t) \cdot \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0)$$

Вычислительная схема

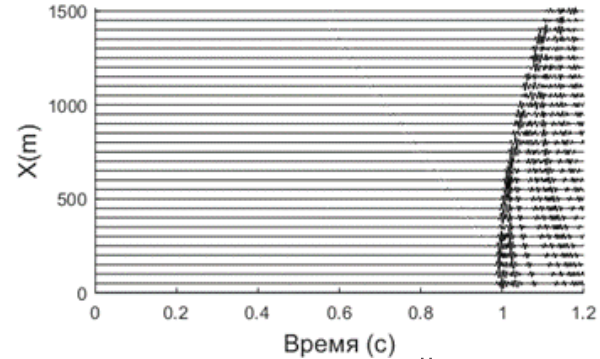


Распространение сейсмических волн

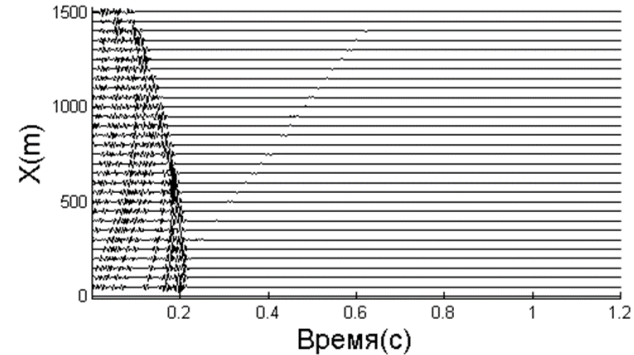
Моментальные снимки
волнового поля $u_x^2 + u_y^2$



Исходная сейсмограмма τ_{zz}

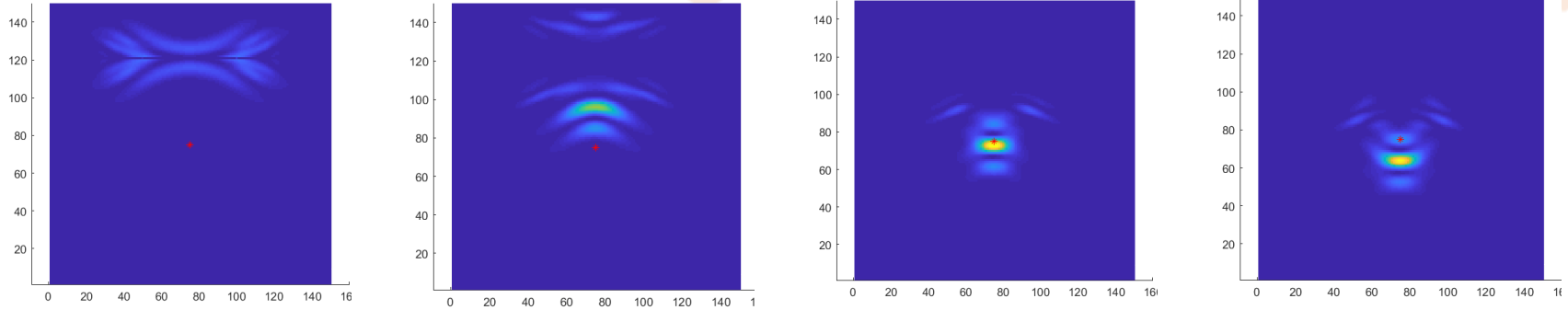


Обращенная во времени сейсмограмма –
входные данные для TRM



Обращение TRM

Моментальные снимки волнового поля $u_x^2 + u_y^2$, полученные методом TRM.



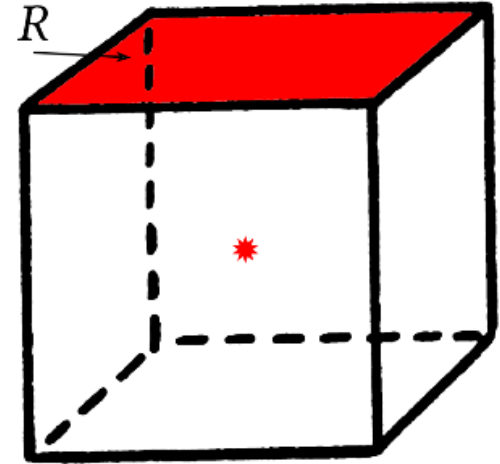
$$E_{sum}(x_i, y_j, z_k, t^m) = \sum_{t^l \leq t^m} E(x_i, y_j, z_k, t^l)$$
$$E(x_i, y_j, z_k, t^l) =$$
$$= \tau_{xx}(x_i, y_j, z_k, t^l) \varepsilon_{xx}(x_i, y_j, z_k, t^l) + \tau_{yy}(x_i, y_j, z_k, t^l) \varepsilon_{yy}(x_i, y_j, z_k, t^l)$$
$$+ \tau_{zz}(x_i, y_j, z_k, t^l) \varepsilon_{zz}(x_i, y_j, z_k, t^l) + 2\tau_{xy}(x_i, y_j, z_k, t^l) \varepsilon_{xy}(x_i, y_j, z_k, t^l)$$
$$+ 2\tau_{xz}(x_i, y_j, z_k, t^l) \varepsilon_{xz}(x_i, y_j, z_k, t^l) + 2\tau_{yz}(x_i, y_j, z_k, t^l) \varepsilon_{yz}(x_i, y_j, z_k, t^l).$$

τ - компоненты напряжения

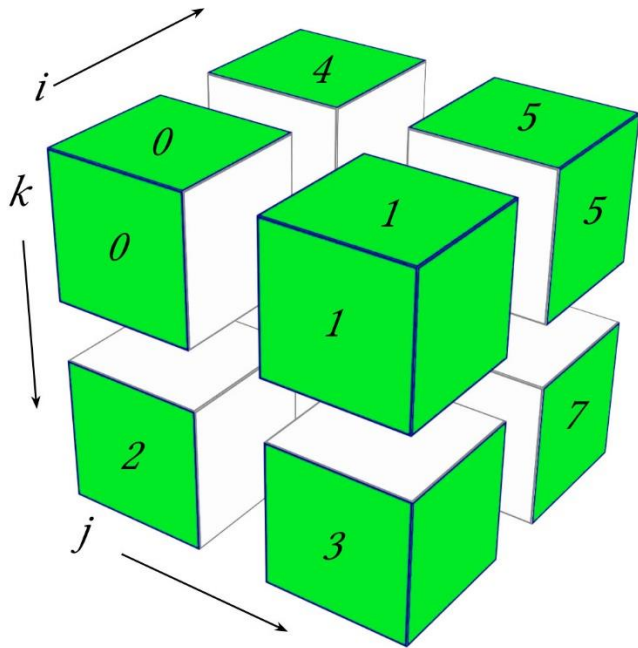
ε - компоненты деформации

Расчётная модель геологической среды

- $3020 \times 3020 \times 3020$ м
- Ширина PML слоя 400 м
- Источник расположен в центре области
- Приемники равномерно распределены по поверхности
- Доминирующая частота импульса в источнике $f_0 = 100$ Гц.
- $v_p = 3000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
- $v_s = \frac{v_p}{\sqrt{3}}$
- $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$
- Синтетические данные рассчитывались до момента времени $T = 1.2$ с с шагом $2 \cdot 10^{-4}$ с

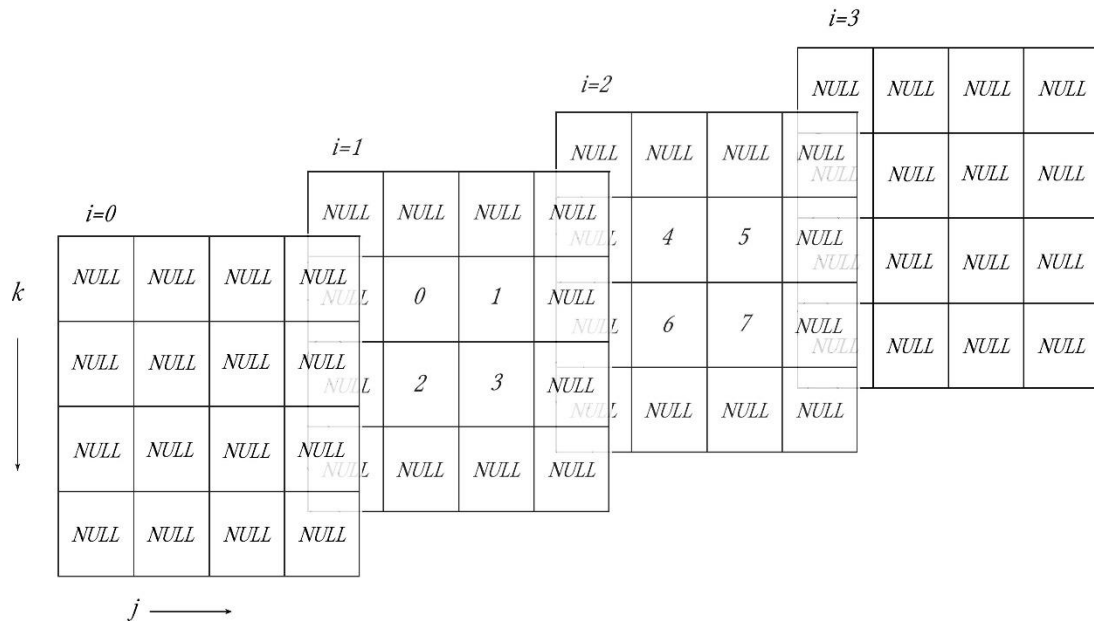


Параллельная реализация расчётов.



- Декомпозиция расчётной области

Параллельная реализация расчётов.



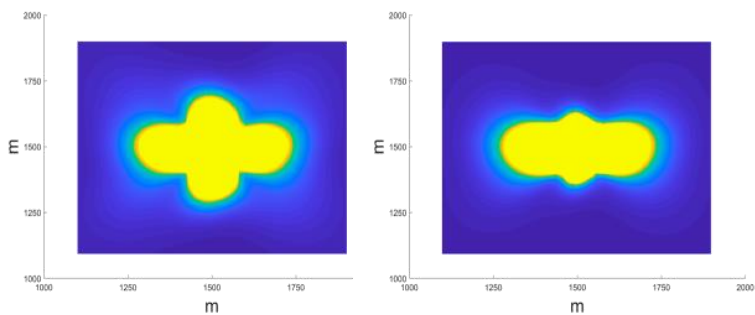
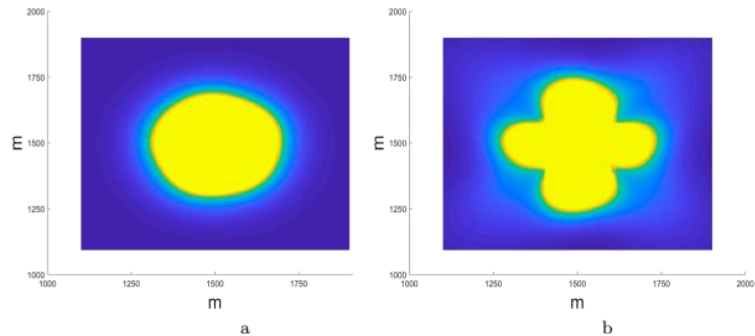
- Технология i_table
- Неблокирующие операции l_send/l_recv

*Intel Xeon X5670, 2.93 GHz
(Westmere)*

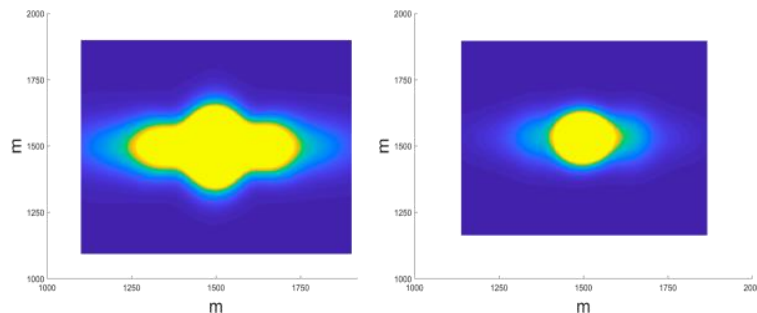
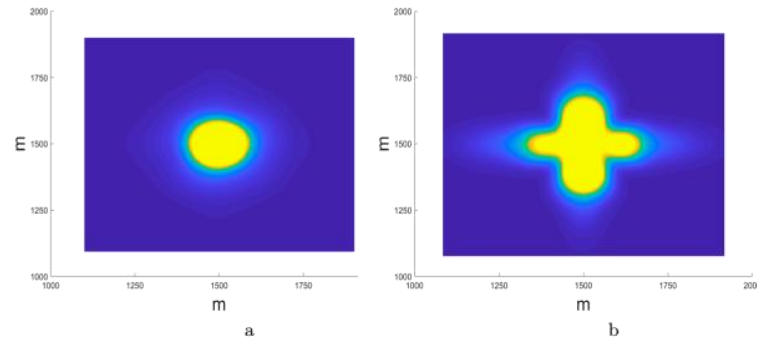
*Сибирский
суперкомпьютерный
центр СО РАН NKS-1P*

Распределение энергии в плоскости $z=\text{const}$ по результатам расчётов с использованием разработанного алгоритма

Прямой ход волны



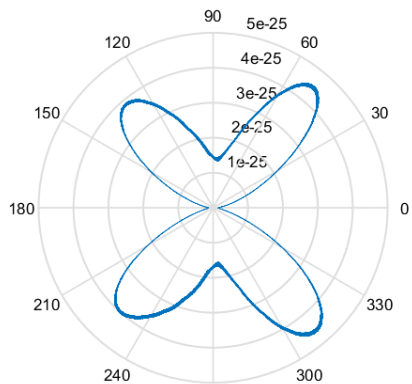
TRM



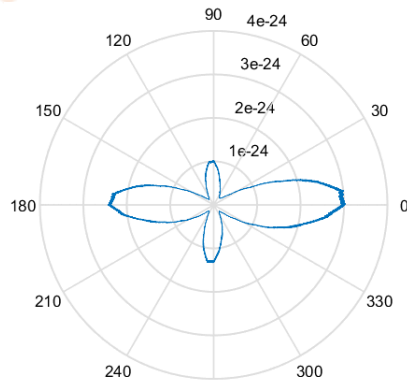
(a) вертикальный источник; (b) 30° ; (c) 45° ; (d) 60°

Диаграмма направленности в плоскости $y=\text{const}$ по результатам расчётов с использованием разработанного алгоритма

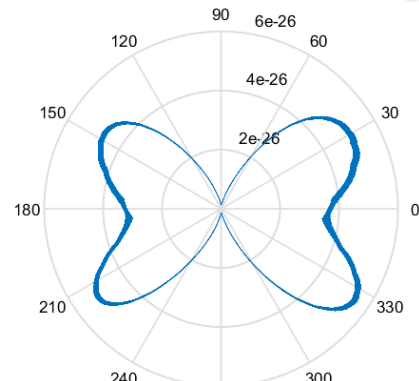
Вертикальный источник



45°

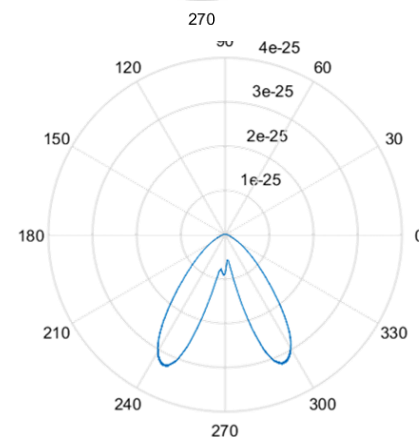
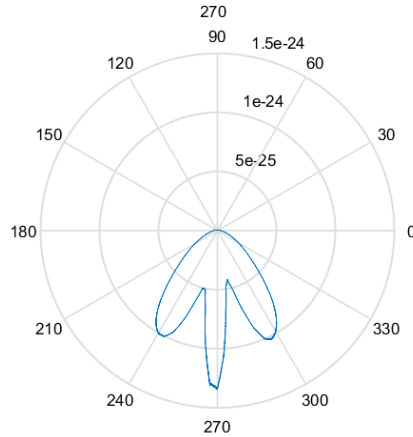
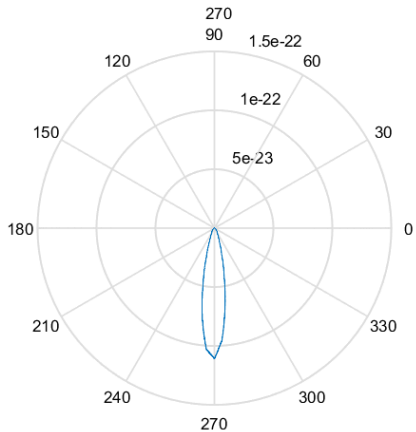


30°



Прямой ход
волны

TRM



Заключение

- разработан алгоритм определения типа источника на основе метода зеркального обращения времени;
- алгоритм реализован в научно-исследовательской версии программного обеспечения для работы на многопроцессорных вычислительных системах;
- выполнены численные эксперименты для различных типов сейсмических источников;
- результаты экспериментов показывают устойчивую корреляцию между распределениями энергии в исходном и восстановленном волновых полях.



Спасибо за внимание!

Разработка алгоритма поддержана Российским Научным Фондом, проект 22-21-00759.