

Параллельное численное моделирование акустического каротажа в трёхмерно- неоднородных ТТI анизотропных средах

В.А. Чеверда, В.И. Костин, В.В.Лисица, Г.В.Решетова

Институт математики СО РАН, гор. Новосибирск

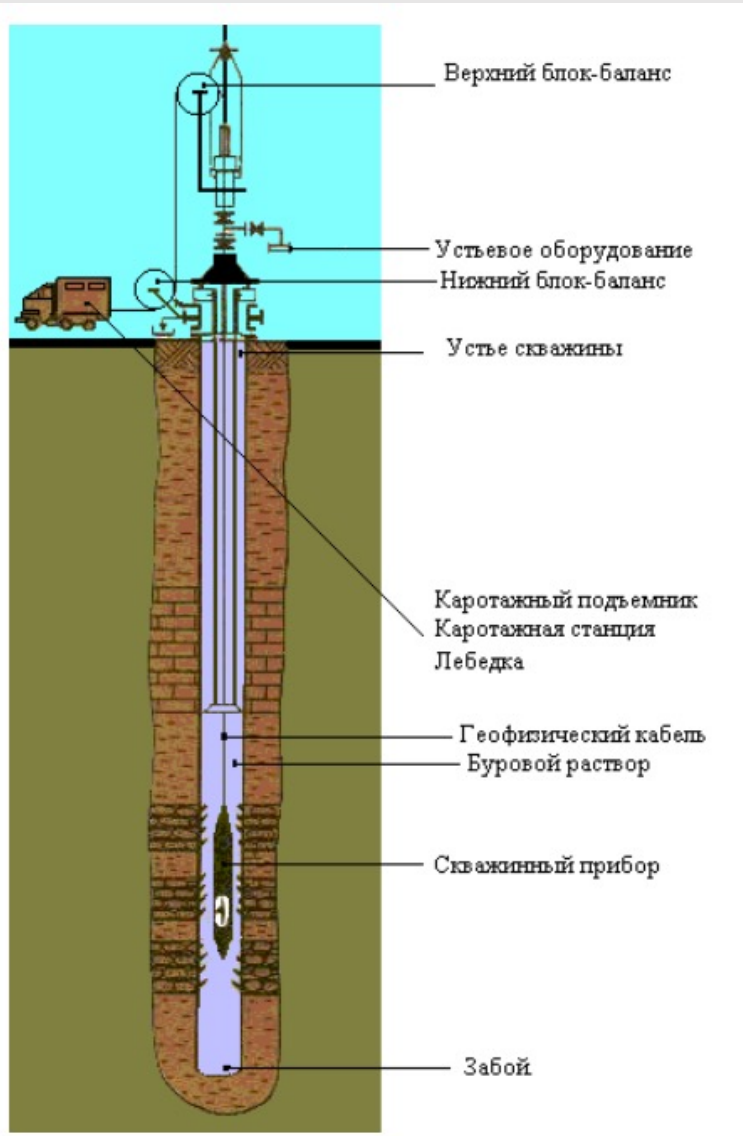
Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. Постановка задачи.
4. Особенности численного алгоритма и его программной реализации.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. Результаты численных экспериментов.
7. План дальнейших исследований.

Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. Постановка задачи.
4. Особенности численного алгоритма и его программной реализации.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. Результаты численных экспериментов.
7. План дальнейших исследований.

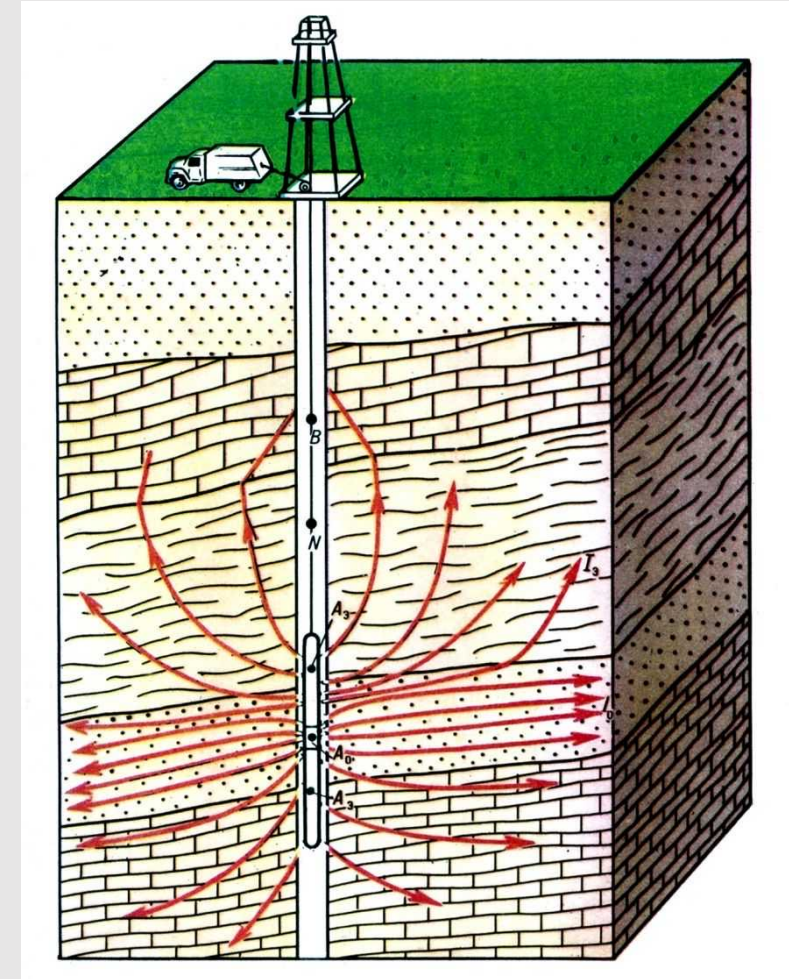
Акустический каротаж



Акустический каротаж основан на изучении изменчивости скорости сейсмических волн вдоль ствола скважины.

С его помощью определяют:

- Литологию;
- Зоны трещиноватости;
- Интервалы коллекторов;
- Пористость



Акустический каротаж: некоторые особенности

Акустический каротаж является разномасштабной задачей:

- Длина скважины составляет от сотен до первых тысяч метров;
- Расстояние от источника до приёмников первые метры;
- Диаметр скважины первые десятки сантиметров;
- Толщина обсадной трубы первые сантиметры.

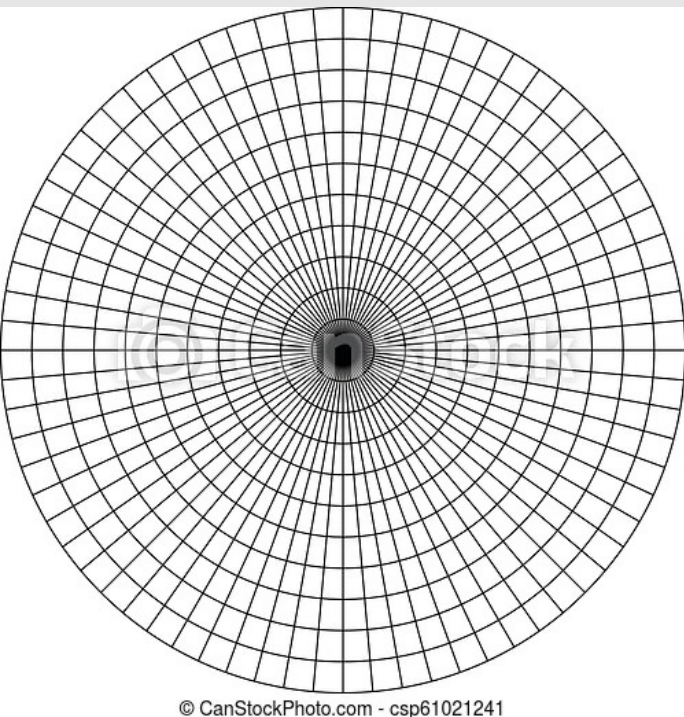
Самая контрастная граница между скважиной (буровой раствор) и окружающей упругой средой:

- Буровой раствор примерно 1500 – 1800 м/сек;
- Вмещающая упругая среда 2500 – 4000 м/сек.

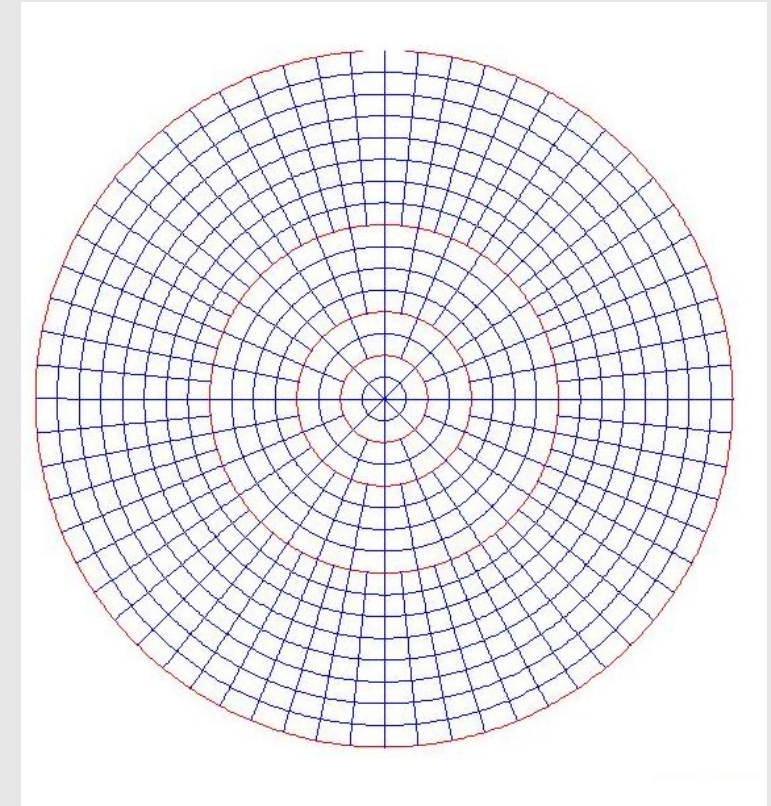
Для её максимально точного описания все рассмотрения проводятся в цилиндрической системе координат.

Некоторые особенности цилиндрической системы координат

При удалении от центра происходит «разбухание» ячеек по азимуту, что в трёхмерно неоднородной среде ведёт к потере точности решения.



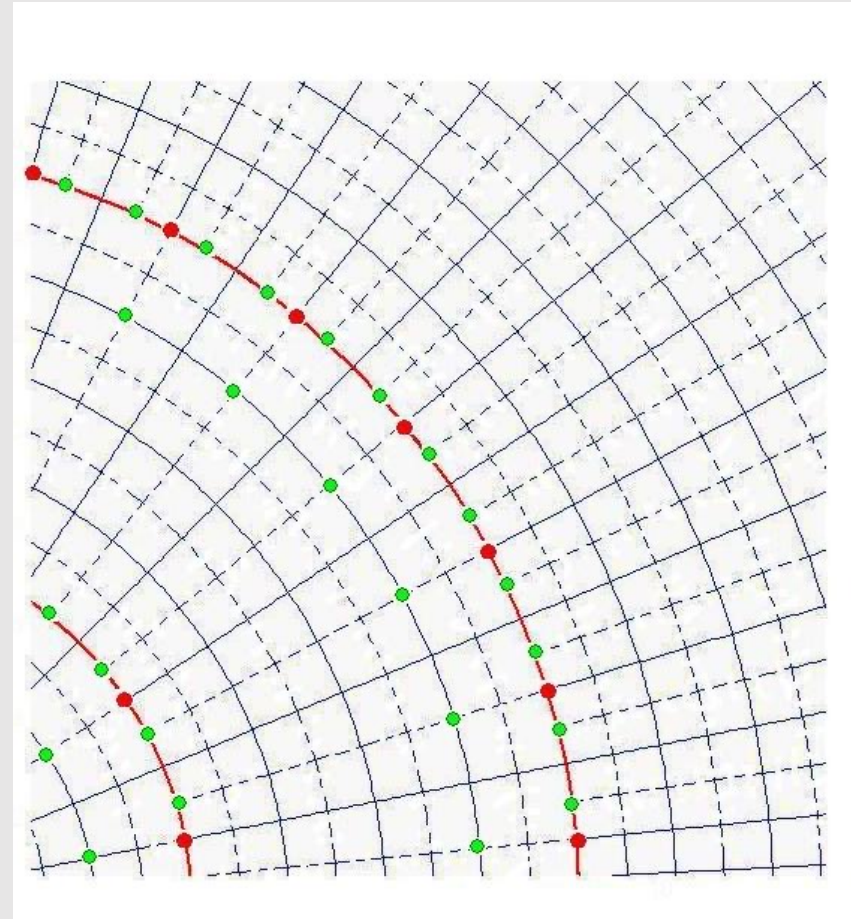
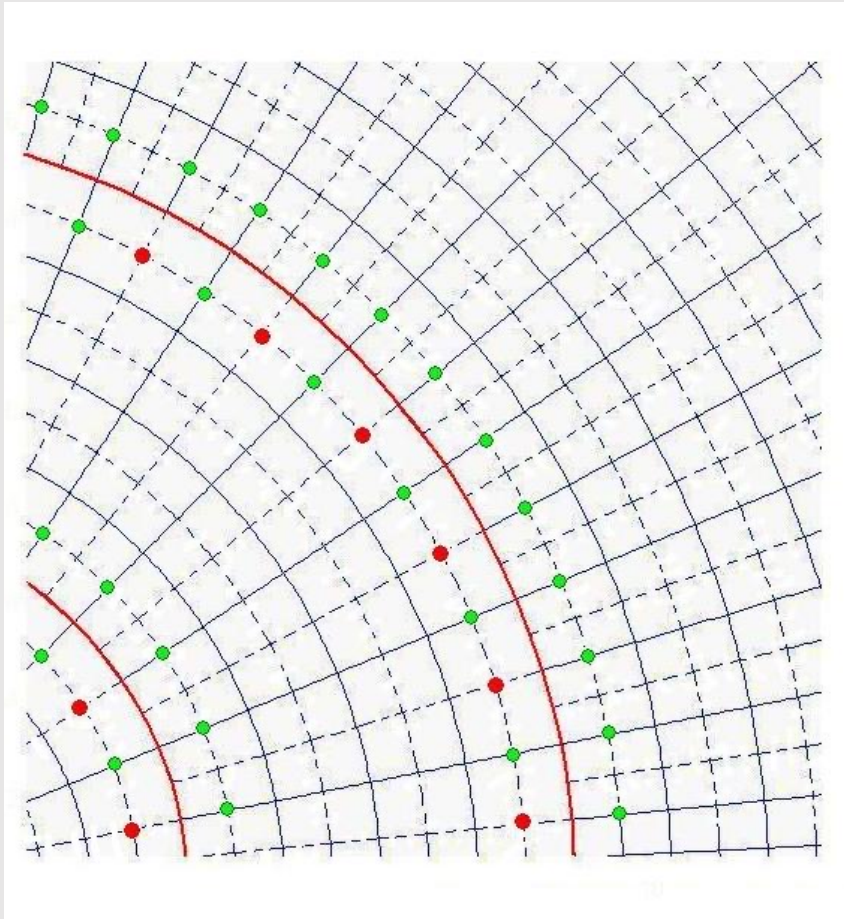
Слева — увеличение азимутального размера ячеек при удалении от центра.
Справа — периодическое измельчение шага по азимуту



Периодическое измельчение шага по азимуту в два раза с использованием интерполяционных процедур на основе FFT

● Known values

● Values to be interpolated

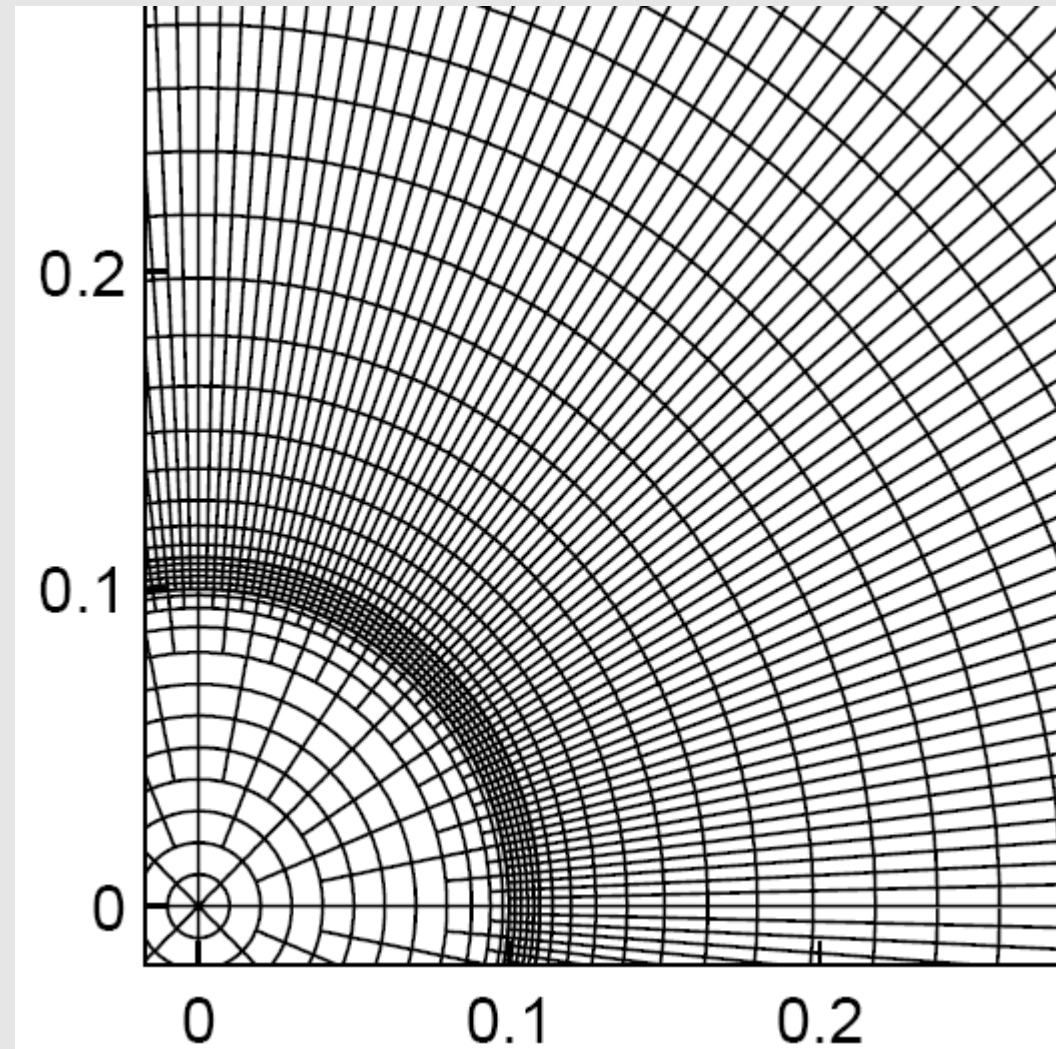


$\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, u_z$

u_φ, σ_{rz}

$\sigma_{r\varphi}$

Адаптация сетки для учёта наличия стальной трубы

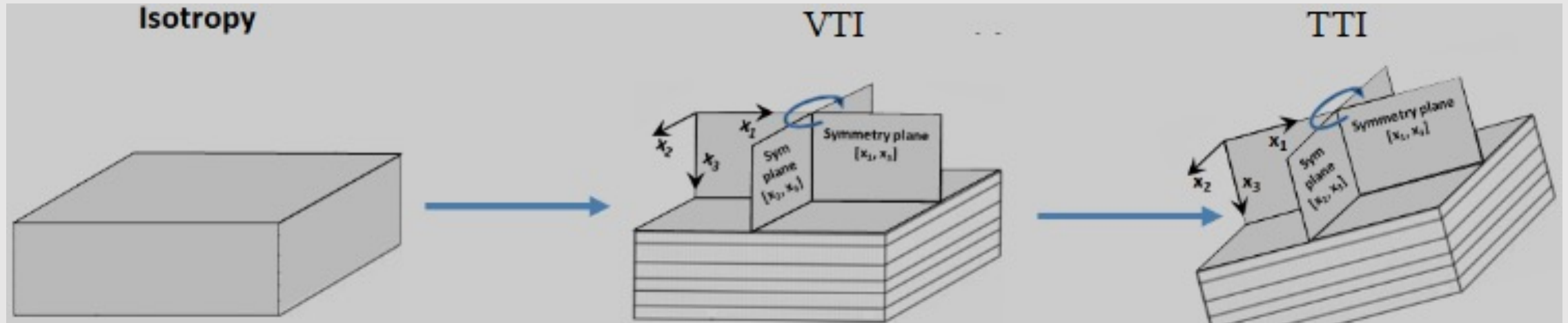


Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. Постановка задачи.
4. Особенности численного алгоритма и его программной реализации.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. Результаты численных экспериментов.
7. План дальнейших исследований.

Некоторые типы анизотропии

TTI – Tilted Transverse Isotropic, трансверсально-изотропная среда с наклонной осью симметрии



Среда TTI с осью симметрии, ортогональной вертикальному направлению, называется HTI.

Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. **Постановка задачи.**
4. Особенности численного алгоритма и его программной реализации.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. Результаты численных экспериментов.
7. План дальнейших исследований.

Акустический каротаж: постановка задачи

Для описания волнового процесса используется система уравнений динамической теории упругости в цилиндрической системе координат:

- Уравнения равновесия:

$$\rho \frac{\partial u_r}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \sigma_{rr} - \frac{1}{r} \sigma_{\theta\theta}$$

$$\rho \frac{\partial u_\theta}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2}{r} \sigma_{r\theta}$$

$$\rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \sigma_{rz}$$

Акустический каротаж: постановка задачи

- Закон Гука:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{pmatrix} = C_{ij} \begin{pmatrix} \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \frac{1}{r} u_r + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \\ \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} u_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \end{pmatrix} + \mathbf{f}(t) \delta(r - r_0, \theta - \theta_0, z)$$

Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. Постановка задачи.
4. Особенности численного алгоритма и его программная реализация.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. Результаты численных экспериментов.
7. План дальнейших исследований.

Конечно-разностные схемы, используемые при численном моделировании сейсмических волн в анизотропных средах

Структура тензора упругих параметров, входящего в закон Гука для изотропной упругой среды в постановке в скоростях/напряжениях позволяет использовать весьма простую и высокопроизводительную схему на сдвинутых сетках, известную как схема Virieux (*Virieux J. 1986. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity – stress finite-difference method. Geophysics 51, 889–901*).

Однако в средах с анизотропией выше, чем VTI, а в нашем случае это TTI, тензор жёсткости, входящий в закон Гука, уже не обладает необходимой для применения такой схемы симметрией.

Схема Лебедева

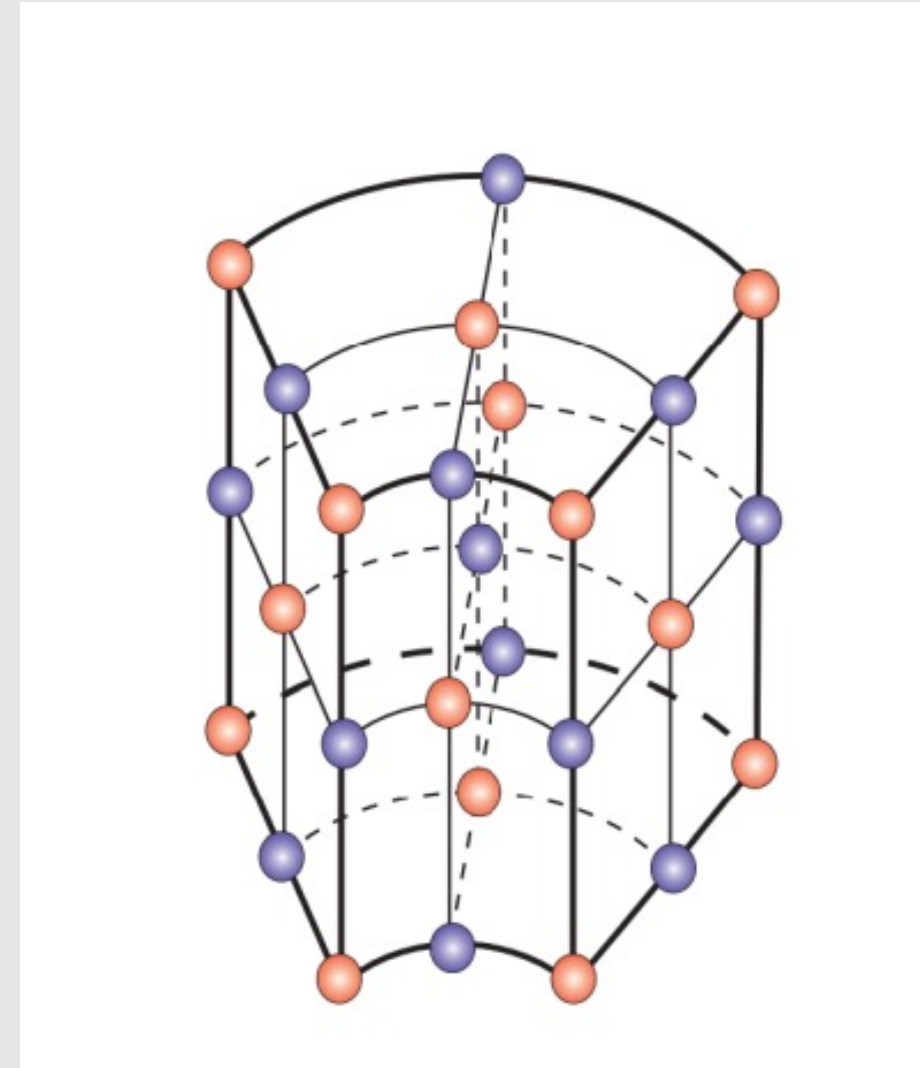
Основное отличие схемы на основе сеток Лебедева заключается в том, что

в ней вектор смещения и тензор напряжения приписываются к одной и той же группе узлов:

- Все напряжения приписаны к голубым узлам;
- Все смещения – к розовым.

Подробнее о схеме Лебедева применительно к сейсмическим волнам в трёхмерных анизотропных средах

Vadim Lisitsa and Dmitry Vishnevsky.: Lebedev scheme for the numerical simulation of wave propagation in 3D anisotropic elasticity. *Geophysical prospecting*, 58, 619 - 635 (2010)



Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. Постановка задачи.
4. Особенности численного алгоритма и его программная реализация.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. Результаты численных экспериментов.
7. План дальнейших исследований.

Параллельные вычисления

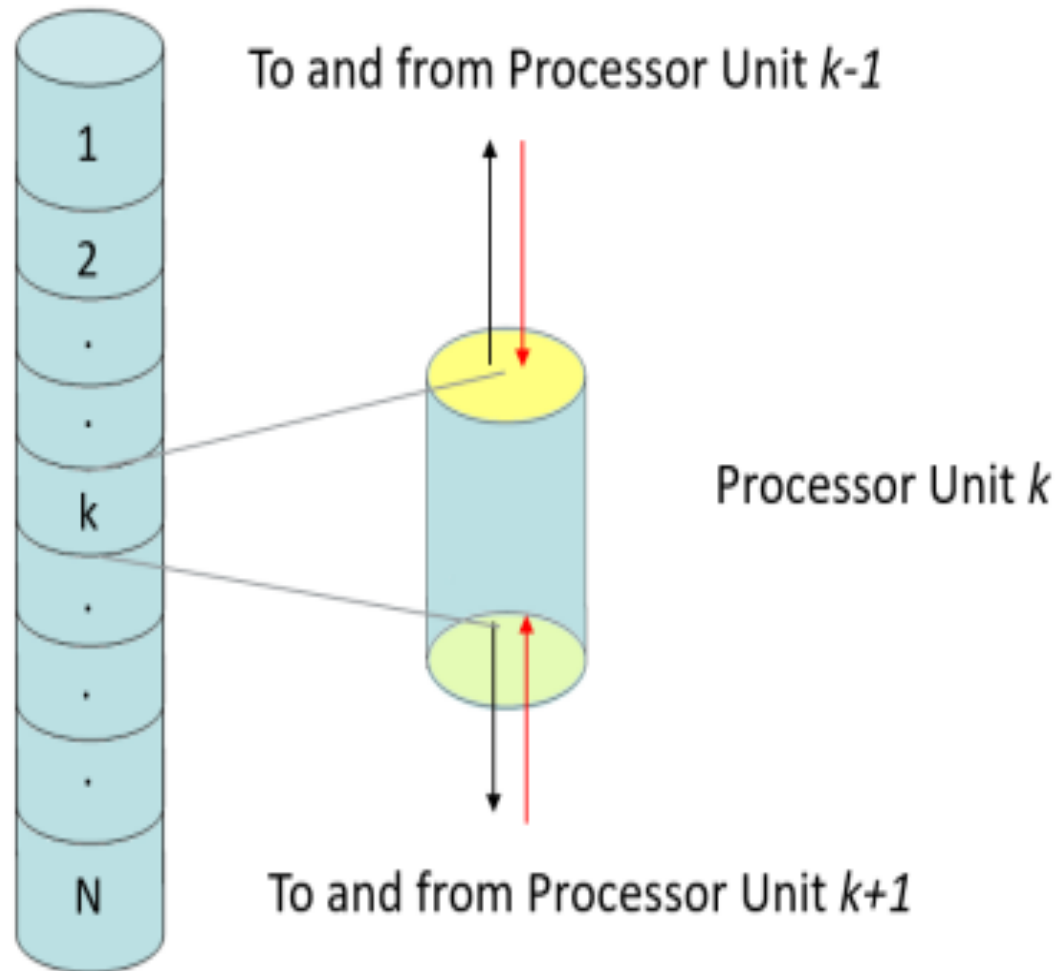
Для организации параллельных вычислений мы используем процедуры MPI на основе метода декомпозиции расчётной области.

Специфика данной задачи состоит в заметном преимуществе одного из масштабов – длины скважины – над остальными.

Поэтому декомпозицию расчётной области мы выполняем разрезая её на совокупность непересекающихся дисков.

Метод декомпозиции области

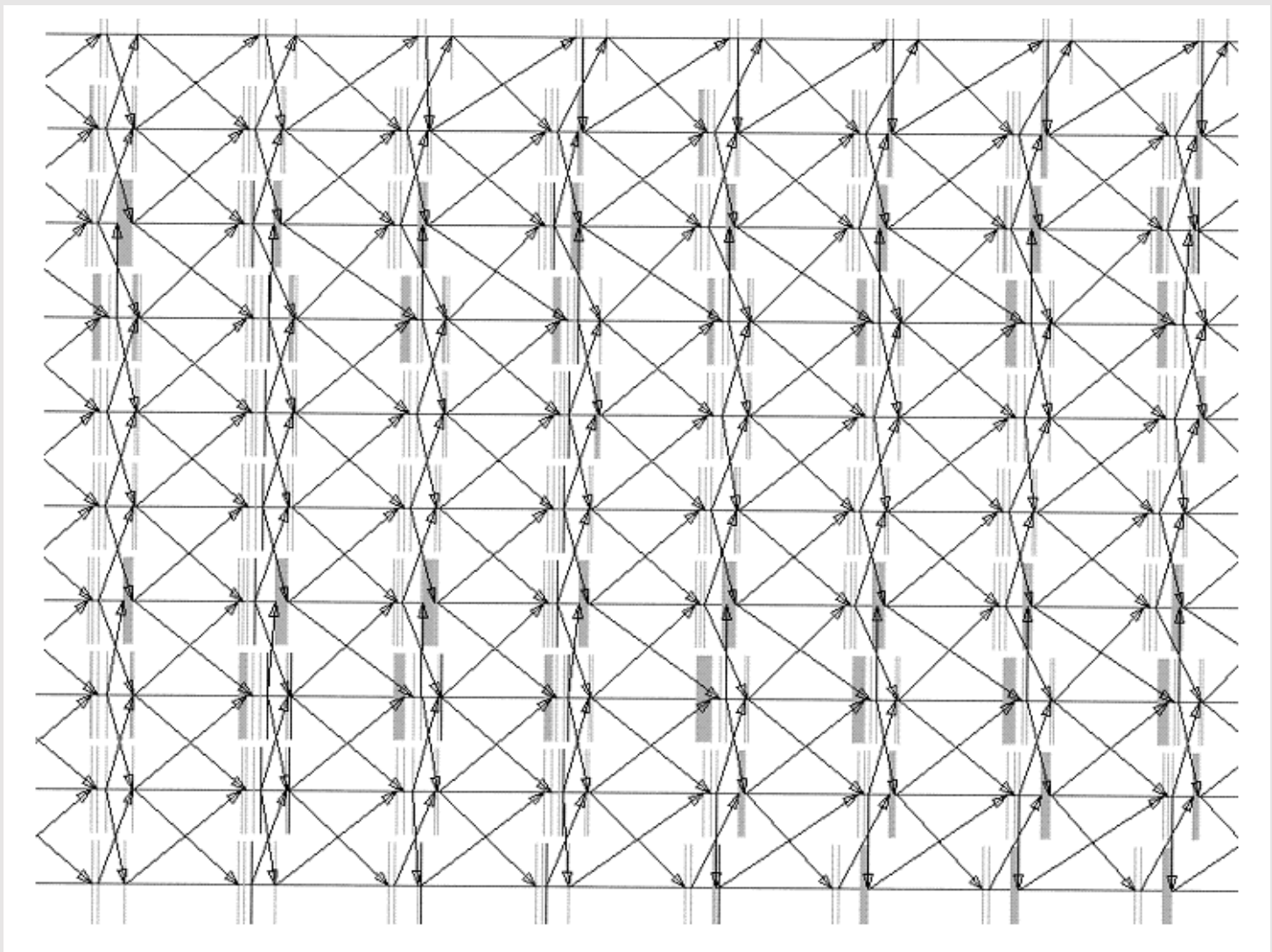
Computational area is sliced for a series of disk-like subdomains. Each subdomain is assigned to a single processor unit.



Пересылки данных между процессорными элементами

Обмен данными между процессорными элементами вносит дополнительные накладные расходы и замедляет вычисления. Для предварительной оценки качества организации параллельных вычислений мы выполнили визуализацию потоков для десяти процессорных элементов. Стрелки здесь обозначают направления передачи данных между элементами, которым соответствуют вертикальные столбцы. Их толщина пропорциональна времени ожидания следующей посылки.

Используемой ПО показало, что суммарное время ожидания не превосходит 5% от общего времени решения задачи и связано, в основном, с различной производительностью отдельных процессорных элементов.



Российские суперкомпьютерные дни, 25 - 27 сентября 2023,
гор. Москва

Параллельные вычисления

Явная конечно разностная схема требует обмен данными между соседними процессорными элементами.

Для минимизации накладных расходов, связанными с такими пересылками мы:

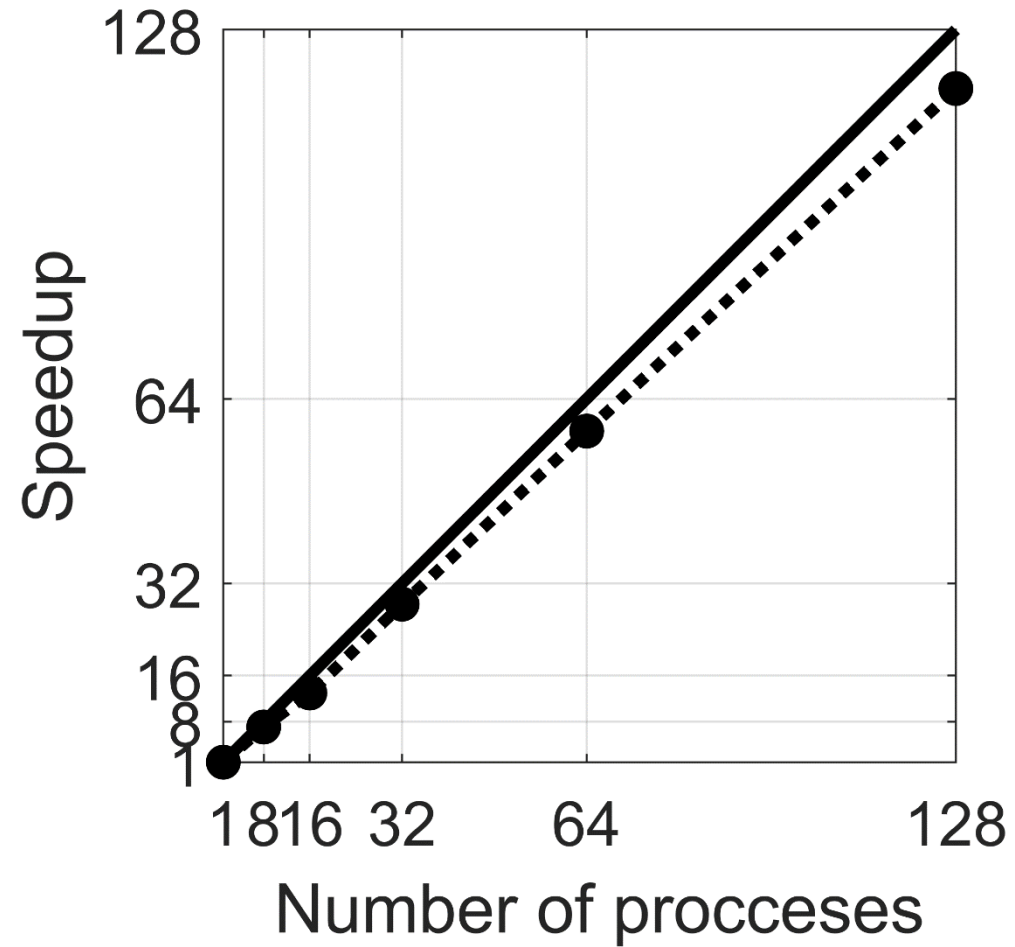
1. Начинаем расчёт из наиболее удалённой от границ точки текущей расчётной области таким образом, чтобы по мере приближения к её границам полученный на предыдущем этапе пакет данных был бы уже отослан соседям;
2. Для пересылки данных используем неблокирующие процедуры MPI iSend, iRecieve.

Оценка масштабируемости

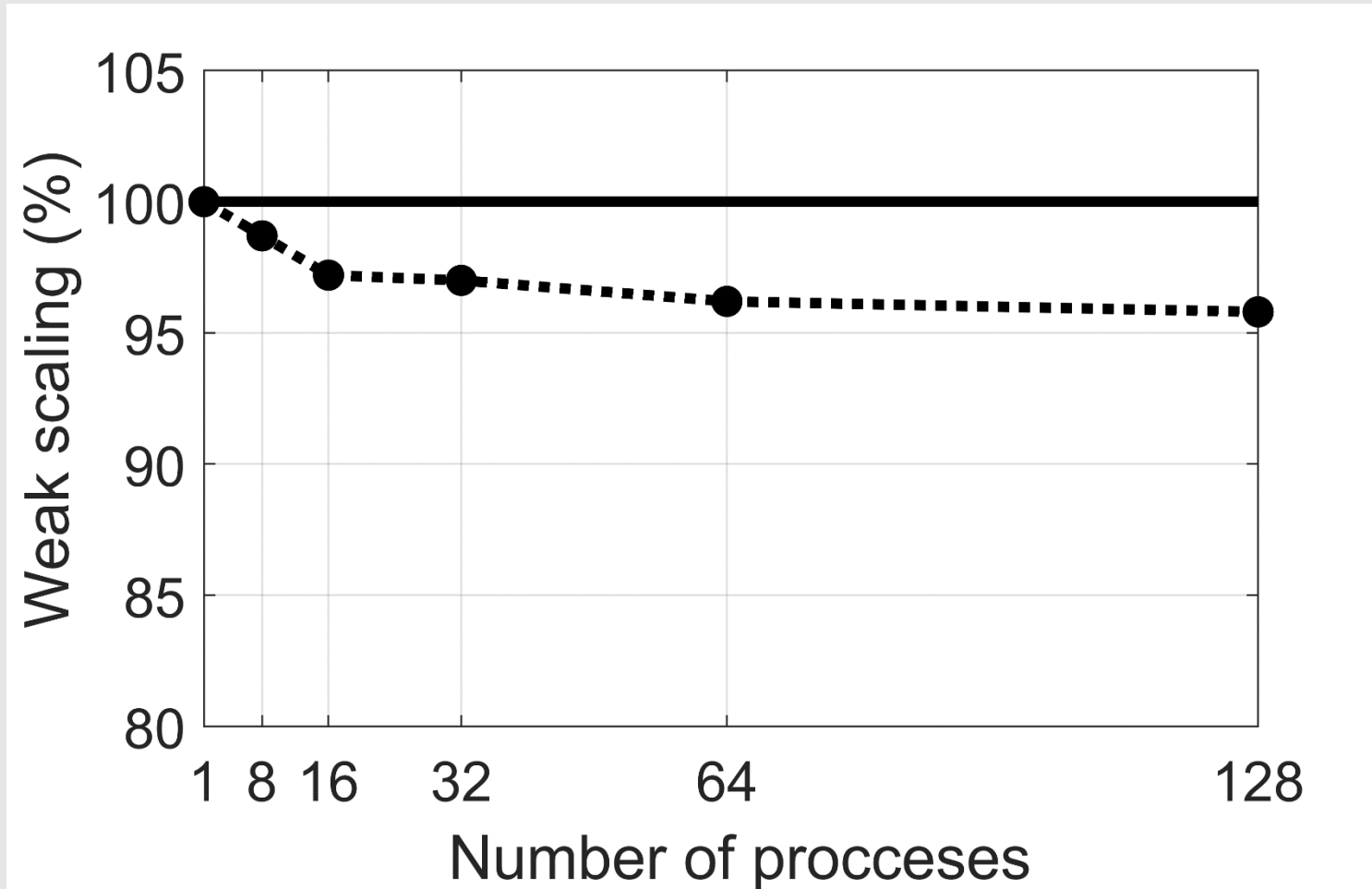
Для оценки масштабируемости мы использовали два параметра:

- ***Сильная масштабируемость*** - показывает, как меняется время решения задачи с увеличением количества процессоров (или вычислительных узлов) при неизменном общем объёме задачи;
- ***Слабая масштабируемость*** - показывает, как меняется время решения задачи с увеличением количества процессоров (узлов) при неизменном объёме задачи для одного процессора (или узла).

Сильная масштабируемость



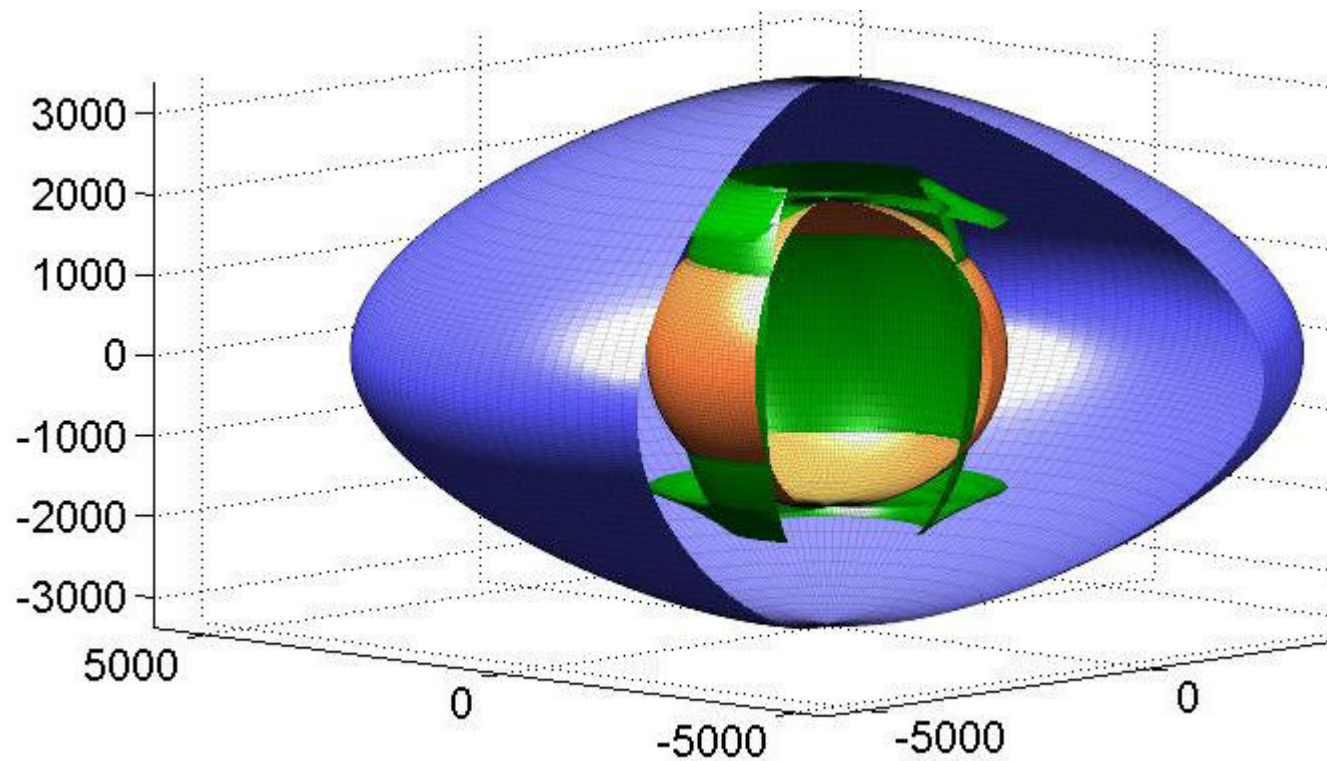
Слабая масштабируемость



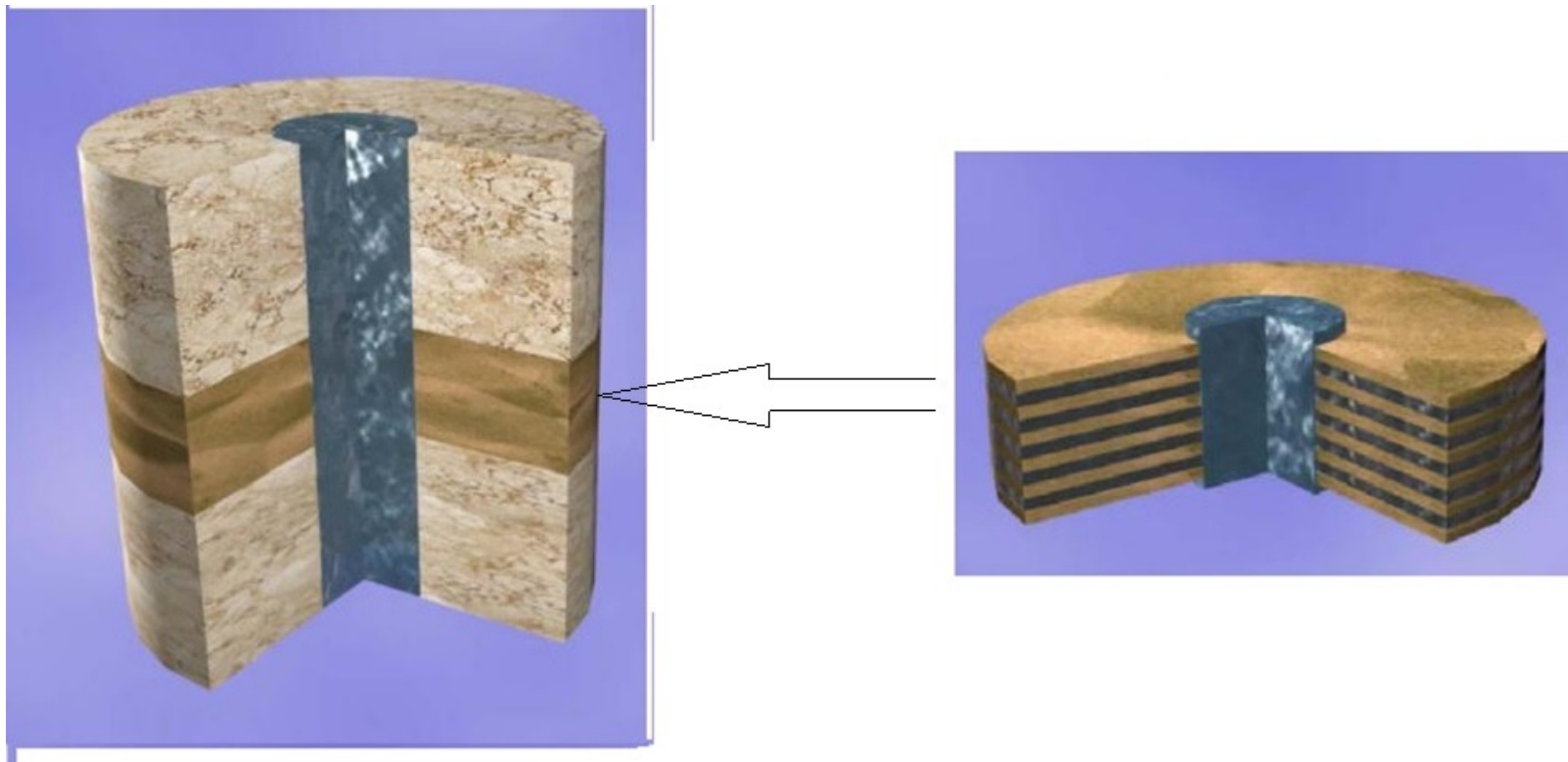
Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. Постановка задачи.
4. Особенности численного алгоритма и его программная реализация.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. **Результаты численных экспериментов.**
7. План дальнейших исследований.

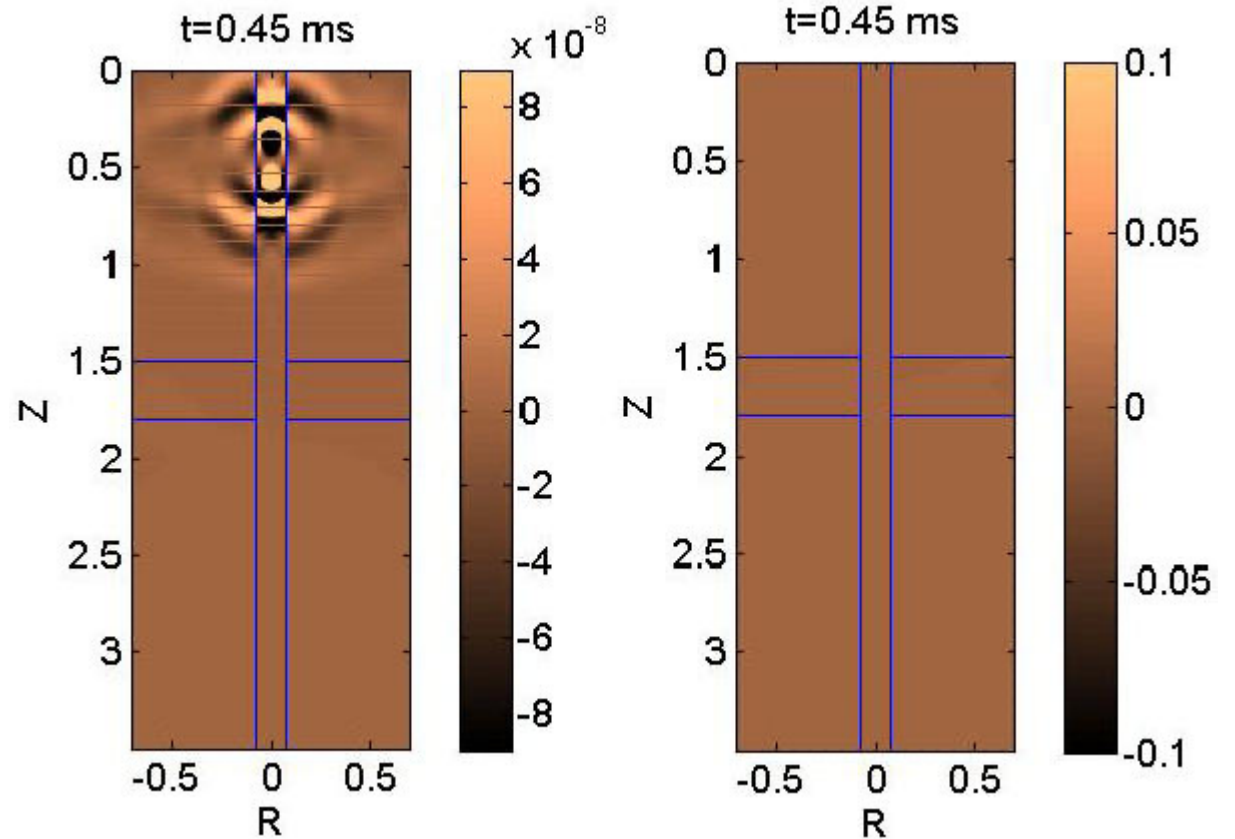
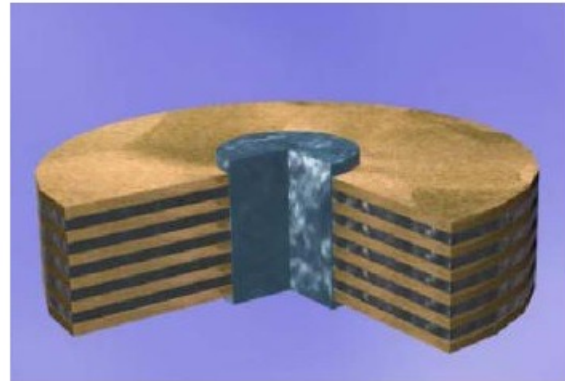
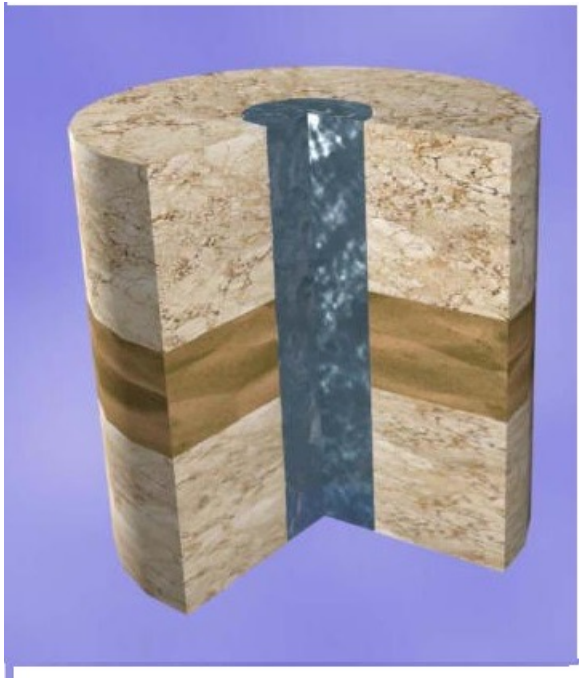
Численные эксперименты



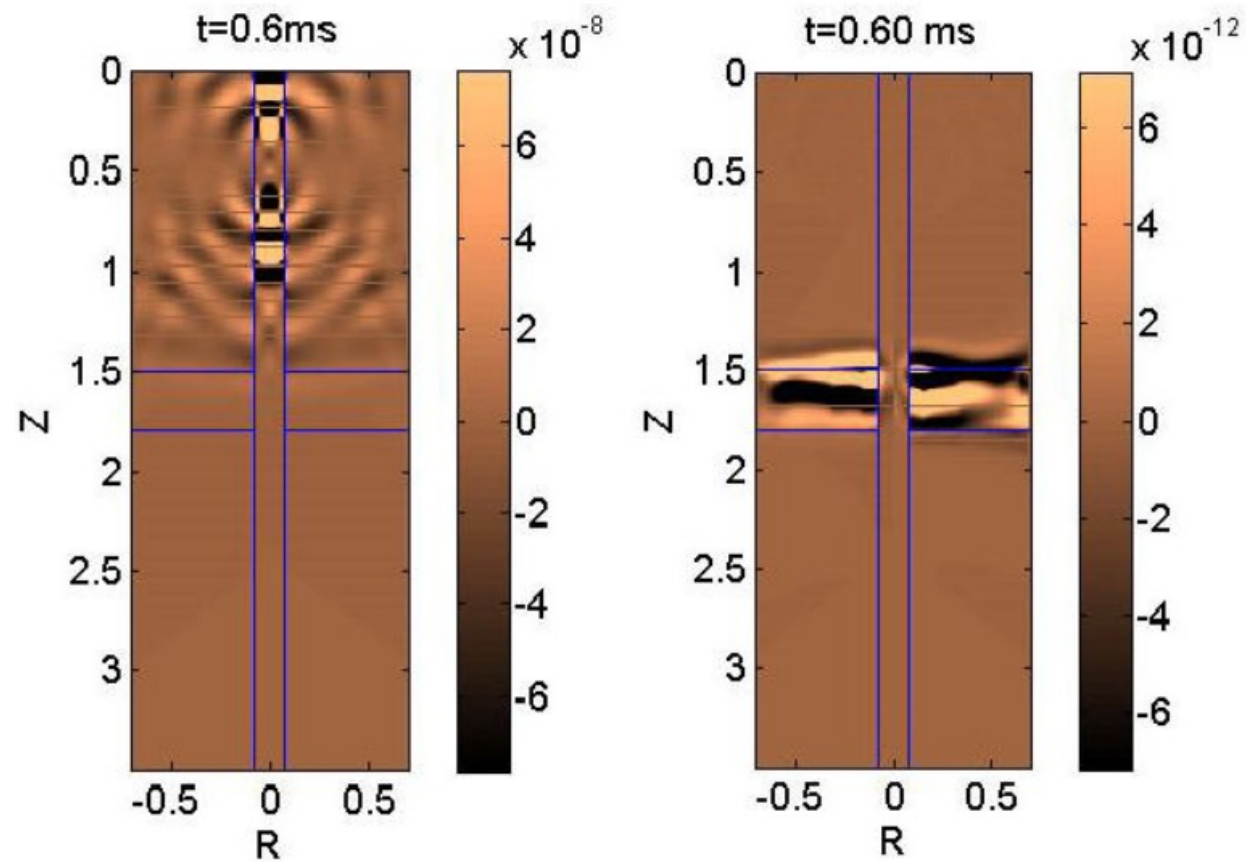
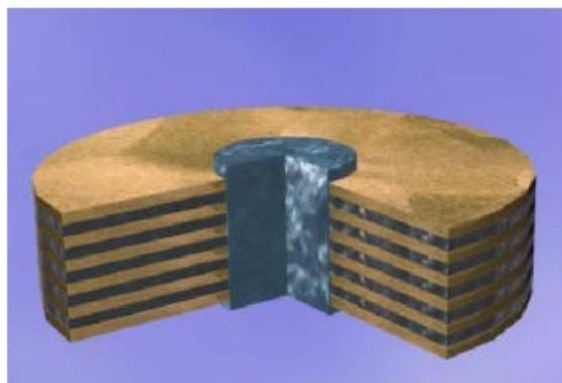
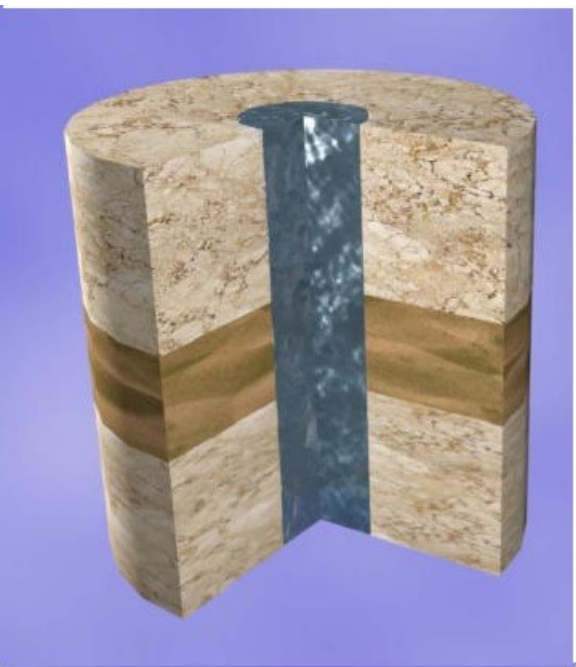
Численные эксперименты



Численные эксперименты



Численные эксперименты



Содержание

1. Что такое акустический каротаж?
2. Некоторые типы анизотропии упругих сред.
3. Постановка задачи.
4. Особенности численного алгоритма и его программной реализации.
5. Организация параллельных вычислений и их масштабируемость.
6. Результаты численных экспериментов.
7. План дальнейших исследований.

Что дальше?

Наши дальнейшие усилия будут направлены на изучение проявления пористости и флюидонасыщенности в акустических волновых полях. При этом основное внимание собираемся уделить выявлению различий между открытой и закрытой пористостью, проявляющихся в акустических волновых полях.

Спасибо за внимание!