

Полноволновое сейсмическое моделирование с использованием метода спектральных элементов и его массивно-параллельная реализация на суперкомпьютере МГУ-270

¹Вершинин А.В., ¹Ампилов Ю.П., ²Антонов А.М., ¹Левин В.А.

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

²ООО “Фидесис”, Москва



Светлой памяти Вл.В. Воеводина

- Конференция “Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи”, Абрау-Дюрсо, 2010.
- Сборник “Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности”, серия Суперкомпьютерное образование, Издательство Московского университета – 2010/2012
- Международная Летняя Суперкомпьютерная Академия, МГУ 2014



Летняя
Суперкомпьютерная
Академия

- Конференция “Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение”. МГУ. 2017
- Суперкомпьютерный консорциум университетов РФ

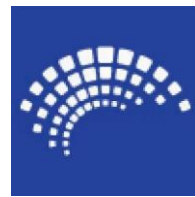


СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЙ
КОНСОРЦИУМ УНИВЕРСИТЕТОВ РОССИИ

- Научный семинар “Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности”, НОЦ “Суперкомпьютерные технологии” МГУ
- Научный семинар “Обратные задачи математической физики”, НИВЦ МГУ, 2025



- Информационно-аналитический Центр по параллельным вычислениям - PARALLEL.RU
НИВЦ МГУ имени М. В. Ломоносова
- Суперкомпьютерный комплекс Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
- HPCMAS25: High-performance computing: mathematical models, algorithms, software and computing platforms
- Международная научная конференция “Суперкомпьютерные дни в России”, 2023/2026

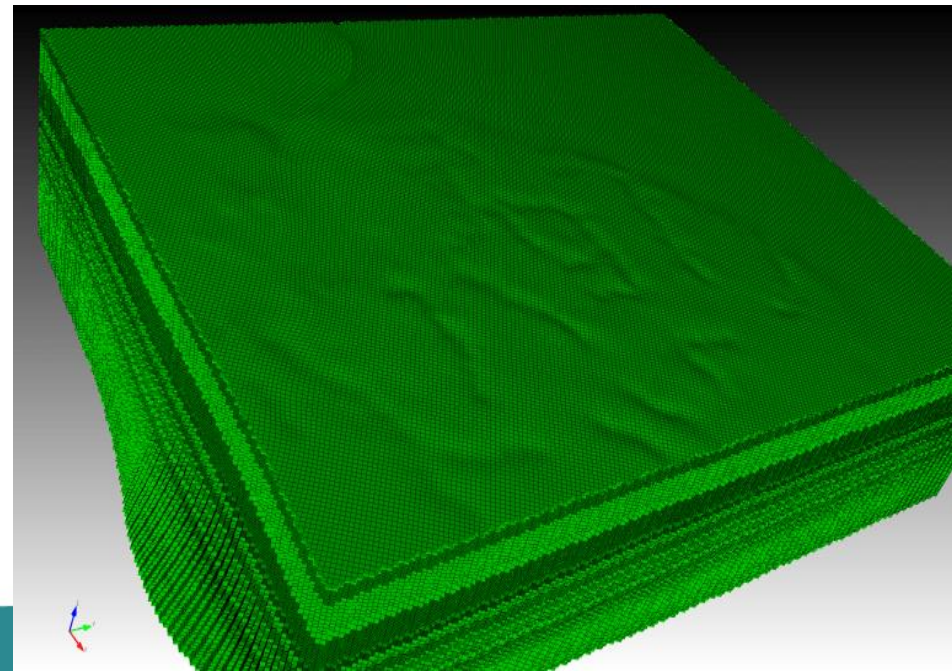
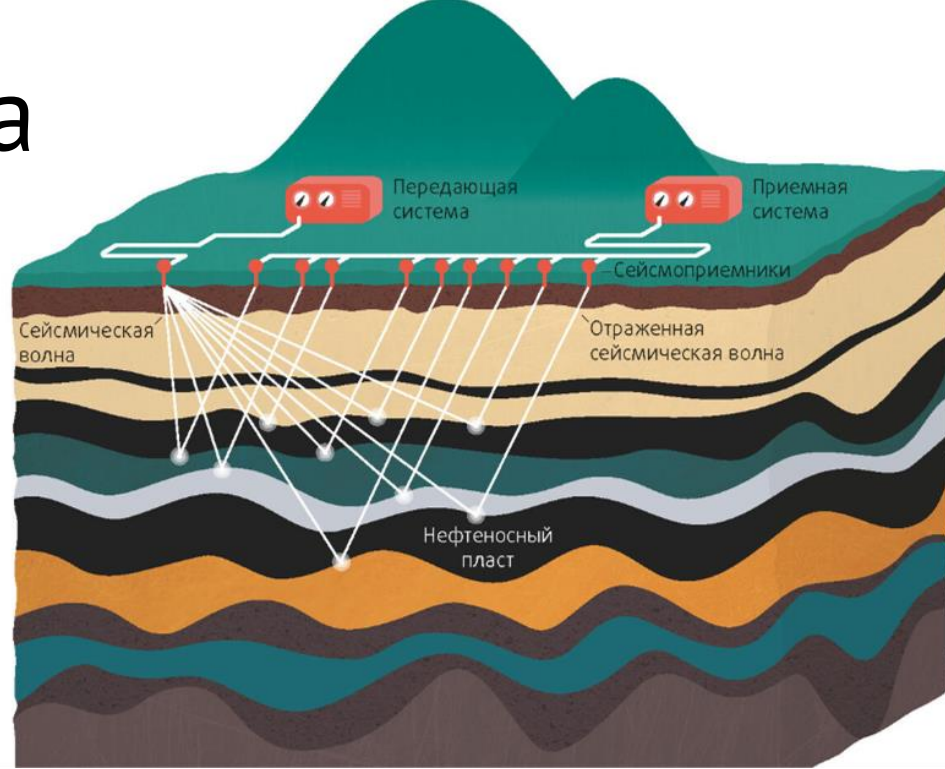




Сейсморазведка

Ампилов Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. М., «Недра», 1992 г., 160 с.

- Цель: Верифицировать методы решения обратной задачи сейсморазведки
- Сейсморазведка: метод исследования земных недр посредством создания сейсмических волн (взрывов) с регистрацией их сеткой приемников
- Сейсморазведка решает (обратную) задачу: по данным приемников получить информацию о недрах
- Для верификации нужно решить прямую задачу: по известной информации о недрах описать сигнал с приемников
- Решение трехмерной задачи полноволнового моделирования возможно только с использованием эффективных численных методов и их параллельной реализации на современных СуперЭВМ



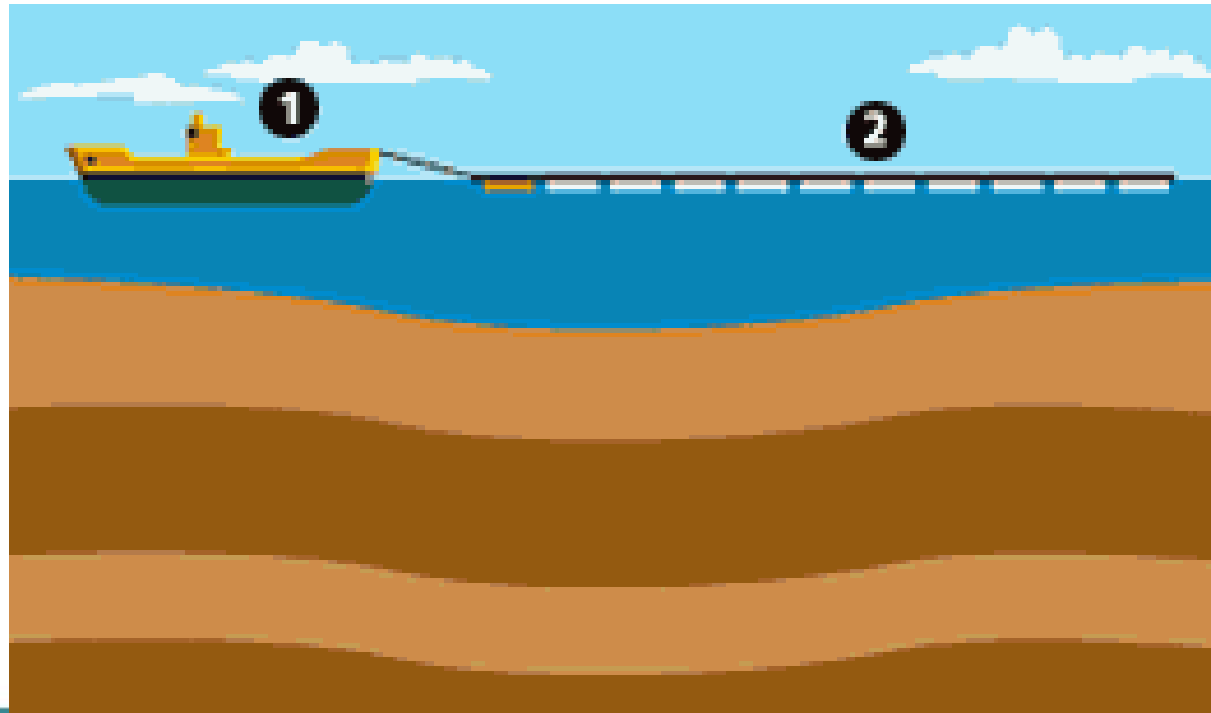


Сейсмическое моделирование: состояние вопроса и предпосылки

1. Существующее промышленное ПО для решения данной задачи не позволяет учитывать сложные особенности строения геологических слоев, поскольку основано на стандартных методах моделирования.
2. Разрешающая способность регистрирующей аппаратуры превышает погрешность моделирования (особенно в сложнопостроенных объемных областях).
3. Современные задачи геологоразведки требуют повышения точности моделирования, учета сложного геологического строения месторождений, решения сверхбольших задач.

1 – тральщик сейсмической косы

2 – сейсмическая коса
(излучатель и приемники сейсмического сигнала)





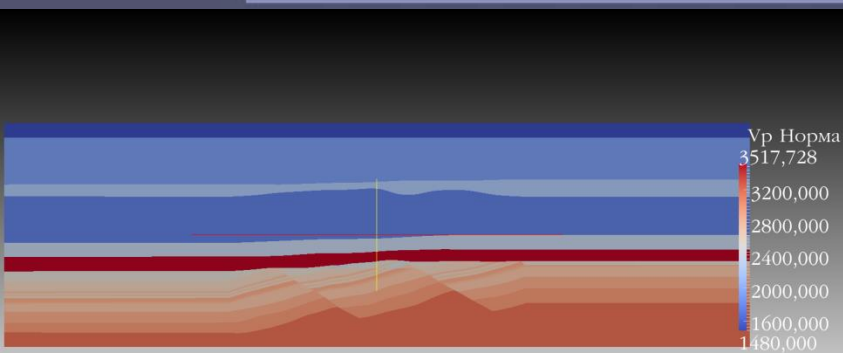
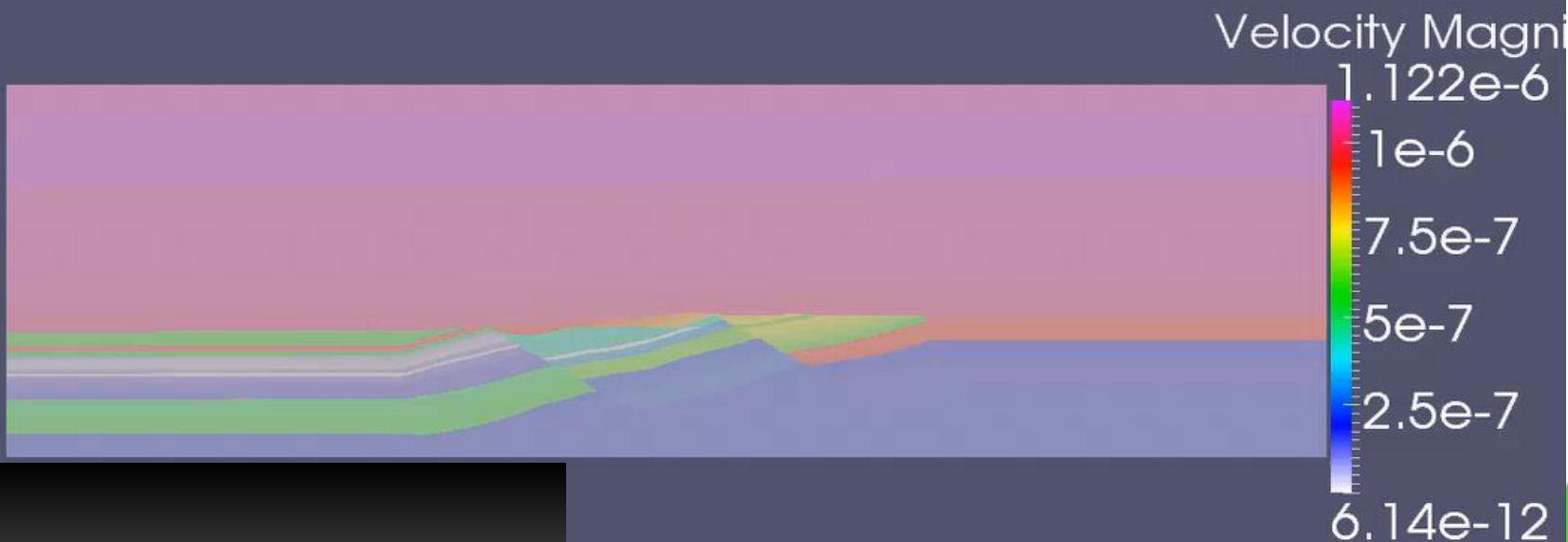
Лучевая (геометрическая)сейсмика предполагает, что:

- Размер неоднородностей существенно меньше длины волны (~ 50-150 м на сейсмических частотах)
- Вся локальная энергия волны сосредоточена внутри лучевой трубки и не «выходит за ее стенки»
- Амплитуда волны при ее распространении рассчитывается упрощенно в рамках нулевого приближения лучевого метода.
- В сейсморазведке имеют дело преимущественно только с продольными волнами, в то время как в среде на каждой границе генерируется большое количество обменных волн

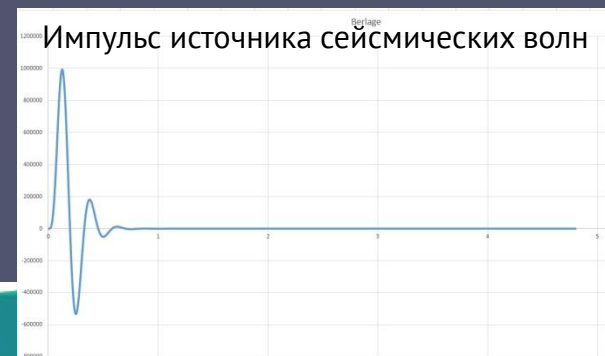
Все перечисленные допущения не имеют ничего общего с реальной геологической средой!



Пример полноволнового моделирования в сложнопостроенной геологической модели

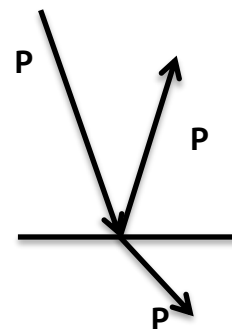
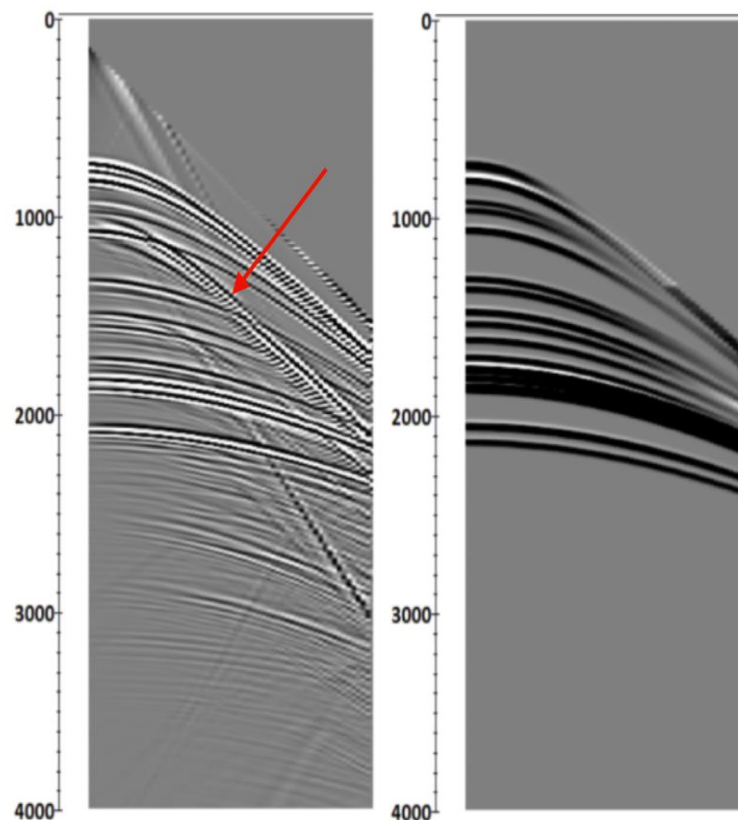
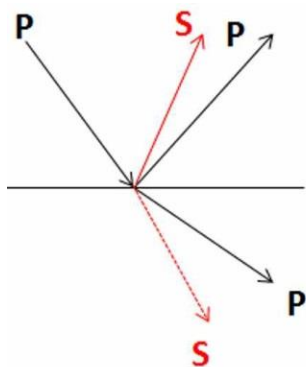


Распределение скорости продольной волны по модели





Сейсмограммы, полученные полноволновым (слева) и лучевым (справа) методами (красной стрелкой показана обменная отраженная волна)



Ю. П. Ампилов, А. В. Вершинин, Д. С. Кунченко, К. А. Петровский, and К. Р. Сафуанова.
Прогноз мощности тонких пластов с использованием сейсмического полноволнового
моделирования. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, (1):97–104, 2025.
<http://dx.doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-97-104>



Математическая модель

Левин В.А., Вершинин А.В. Численные методы. Параллельные вычисления на ЭВМ Т.2 (Нелинейная вычислительная механика прочности. Цикл монографий в 5 томах под. ред. В.А. Левина). – ФИЗМАТЛИТ Москва, 2015. – 544с.

Трехмерная линейно-упругая
динамическая задача

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot (\sigma + S(t)I)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

$$\epsilon = \frac{\nabla \vec{u} + \vec{u} \nabla}{2}$$

Материал:

Материал Гука
линейный,
изотропный,
неоднородный.

Условие на верхней (свободной)
границе

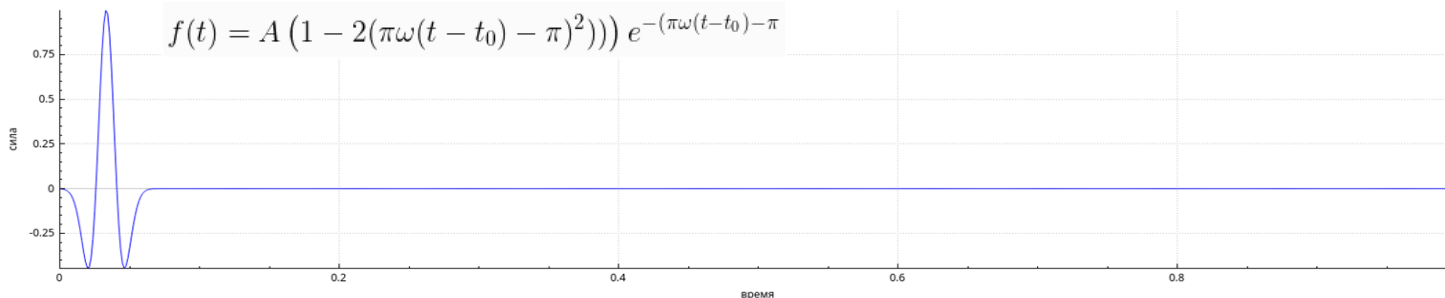
$$\sigma \cdot \vec{n} = 0$$

Условие поглощения на боковых и
нижней границах

$$-\sigma_{ij} \cdot \vec{n} = \rho c_p \frac{\partial \vec{u}_n}{\partial t} + \rho c_s \frac{\partial \vec{u}_t}{\partial t}$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_n &= (\vec{u} \cdot \vec{n}) \vec{n}; \\ \vec{u}_t &= \vec{u} - \vec{u}_n \end{aligned}$$

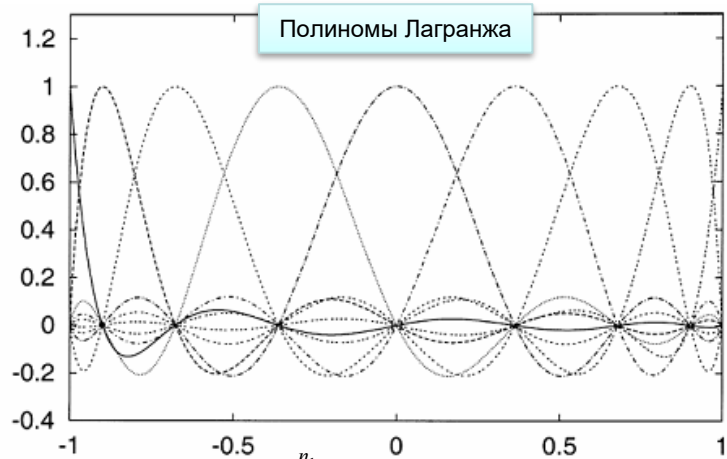
Граничное условие точечного источника:
импульс Рикера (30 Hz)





Метод спектральных элементов

(Komatitsch, D., and Vilotte, J. P., 1998; Komatitsch, Tromp, 1999; Komatitsch, Barnes, Tromp, 2000)



$$l_{\alpha}^{n_l}(\xi) = \frac{(\xi - \xi_0)}{(\xi_{\alpha} - \xi_0)} \cdots \frac{(\xi - \xi_{\alpha-1})}{(\xi_{\alpha} - \xi_{\alpha-1})} \frac{(\xi - \xi_{\alpha+1})}{(\xi_{\alpha} - \xi_{\alpha+1})} \cdots \frac{(\xi - \xi_{n_l})}{(\xi_{\alpha} - \xi_{n_l})}$$

ξ_{α} – GLL – узлы

$$l_{\alpha}^{n_l}(\xi_{\beta}) = \delta_{\alpha\beta}$$

Ортогональный базис в GLL-квадратуре

$$\int_{-1}^1 l_m(\xi) l_n(\xi) d\xi = \frac{2}{2n+1} \delta_{mn}$$

$$f(\mathbf{x}(\xi, \eta, \zeta)) \approx \sum_{\alpha, \beta, \gamma=0}^{n_l} f^{\alpha\beta\gamma} l_{\alpha}(\xi) l_{\beta}(\eta) l_{\gamma}(\zeta) \quad - \text{Разложение функции и ее производной по базису в 3D}$$

$$\nabla f(\mathbf{x}(\xi, \eta, \zeta)) \approx \sum_{i=1}^3 \mathbf{e}_i \sum_{\alpha, \beta, \gamma=0}^{n_l} f^{\alpha\beta\gamma} [l_{\alpha}'(\xi) l_{\beta}(\eta) l_{\gamma}(\zeta) \partial_i \xi + l_{\alpha}(\xi) l_{\beta}'(\eta) l_{\gamma}(\zeta) \partial_i \eta + l_{\alpha}(\xi) l_{\beta}(\eta) l_{\gamma}'(\zeta) \partial_i \zeta]$$

$$\int_{\Omega_e} f(\mathbf{x}) d^3 \mathbf{x} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\mathbf{x}(\xi, \eta, \zeta)) J_e(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \approx \sum_{\alpha, \beta, \gamma=0}^{n_l} \omega_{\alpha} \omega_{\beta} \omega_{\gamma} f^{\alpha\beta\gamma} J_e^{\alpha\beta\gamma} \quad \text{Интеграл по кубатурной формуле GLL}$$



GLL-квадратура

Квадратурная формула Гаусса-Лежандра
(точна для полиномов степени не выше $2N-1$):

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = \sum_{i=0}^{n-1} w_i f(x_i) + E_n \quad E_n = \frac{2^{2n+1} (n!)^4}{(2n+1)(2n!)^3} f^{(2n)}(\xi) \quad \xi \in [-1, 1]$$

x_i - корни полиномов Лежандра $P_N(x)$ N -ой степени:

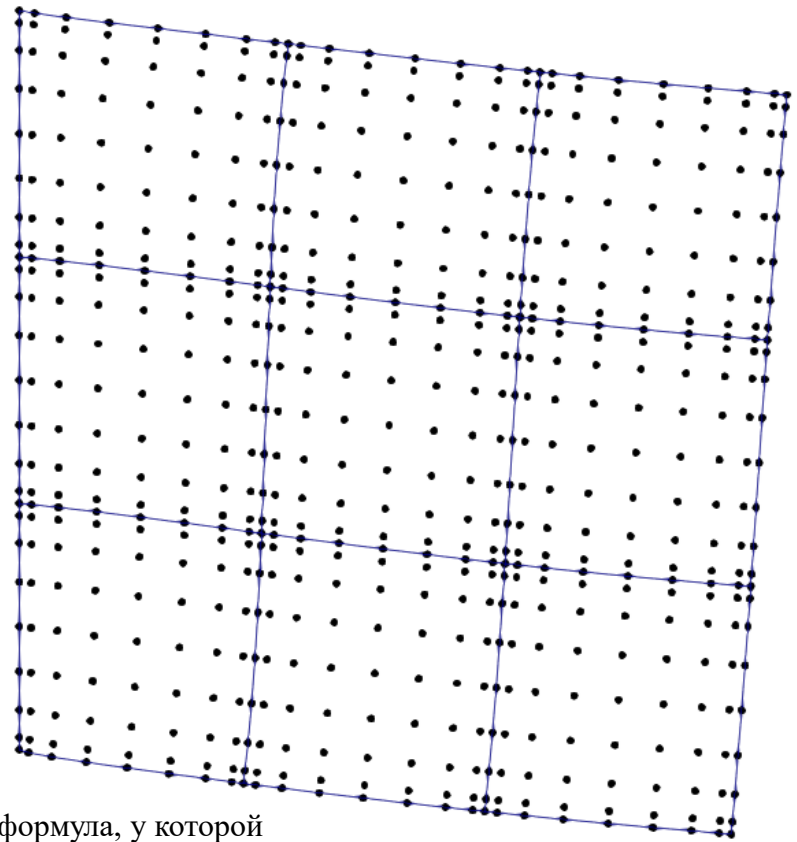
$$w_i = \frac{2}{(1-x_i^2) \left(\frac{d}{dx} P_N(x_i) \right)^2} \quad P_N(\xi) = \frac{1}{2^N N!} \frac{d^N}{d\xi^N} (\xi^2 - 1)^N$$

Квадратурная формула Гаусса-Лежандра-Лобатто (GLL) - это квадратурная формула, у которой один из узлов находится в точке -1 на левой границе отрезка интегрирования $[-1, 1]$, а второй - на правой $+1$. При этом остальные $N-2$ узлов располагаются так, что формула с N узлами точна для полиномов степени не выше, чем $2N-3$.

Точки квадратуры Гаусса-Лежандра-Лобатто (GLL-узлы), являются корнями уравнения:

$$(1 - \xi^2) P_{n_i}'(\xi) = 0 \quad P_{n_i}' - \text{производная многочлена Лежандра степени } n_i$$

$$\begin{cases} w_a = \frac{2}{N(N+1)[P_N(\xi_a)]^2} \text{ для } \xi_a \neq \pm 1 \\ w_a = \frac{2}{N(N+1)} \text{ для } \xi_a = \pm 1 \end{cases} \quad - \text{ GLL-веса}$$





Требования по дискретизации

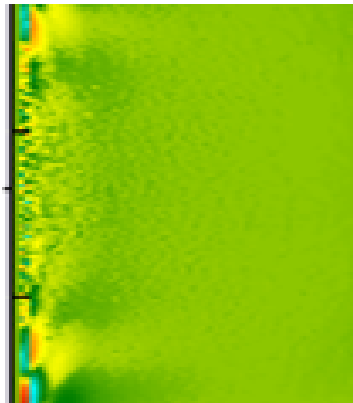
Ограничение на шаг сетки:

$$h \leq \frac{1}{EPW(N)} \frac{V_{\min}}{f_{\max}},$$

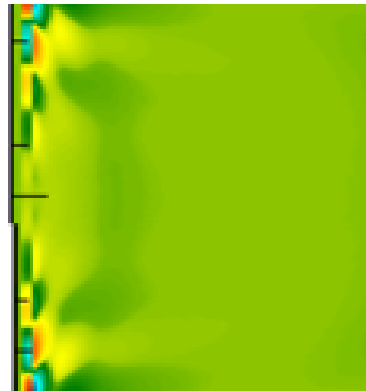
$V_{\min}$ – минимальная скорость волн

$f_{\max}$ – максимальная частота источника

$EPW(N)$ – число элементов на длину волны



Низкий EPW



Высокий EPW



Источник волн

Charara M, Vershinin A, Sabitov D and Pekar G, SEM wave propagation in complex media with tetrahedral to hexahedral mesh 73rd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition pp 41–45, 2011

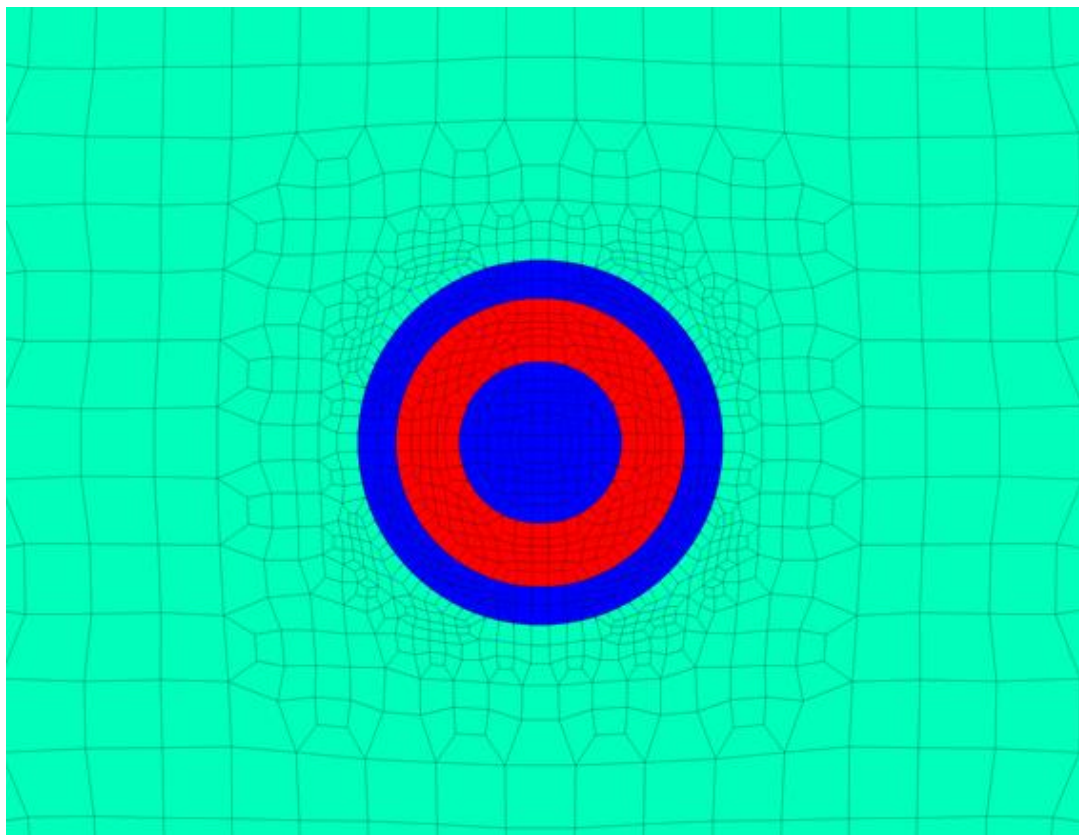


Требования по дискретизации

Максимизация длины самого короткого ребра при дискретизации границ криволинейных подобластей.

условие Куранта:

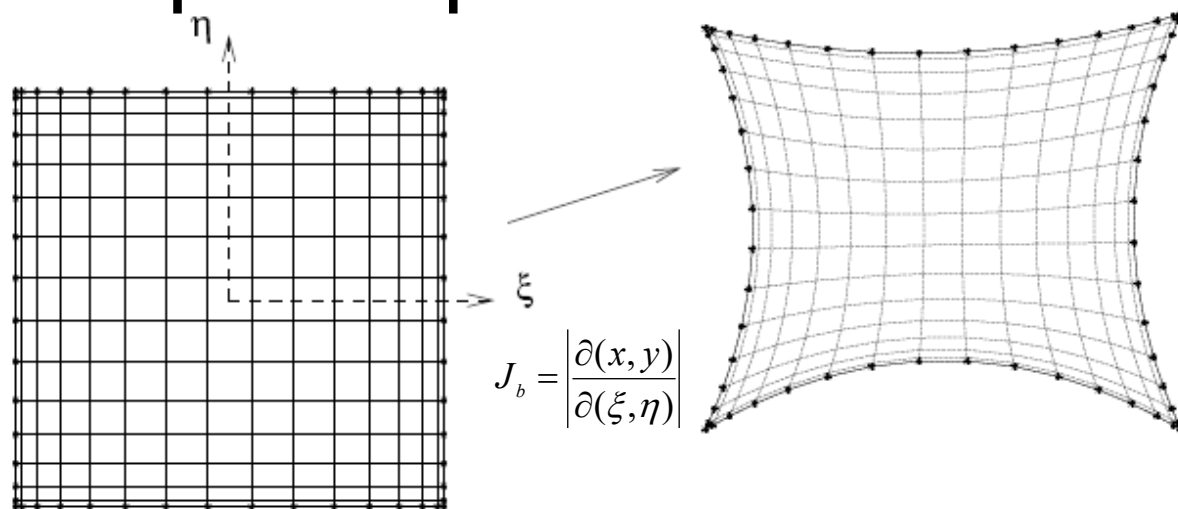
$$\Delta t \leq C \min_{\Omega_e \in \Omega} \frac{h^e}{V_{\max}^e}$$



Vershinin A. Poroelastoplastic modeling of a borehole stability under small and finite strains using isoparametric spectral element method // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. — 2022.



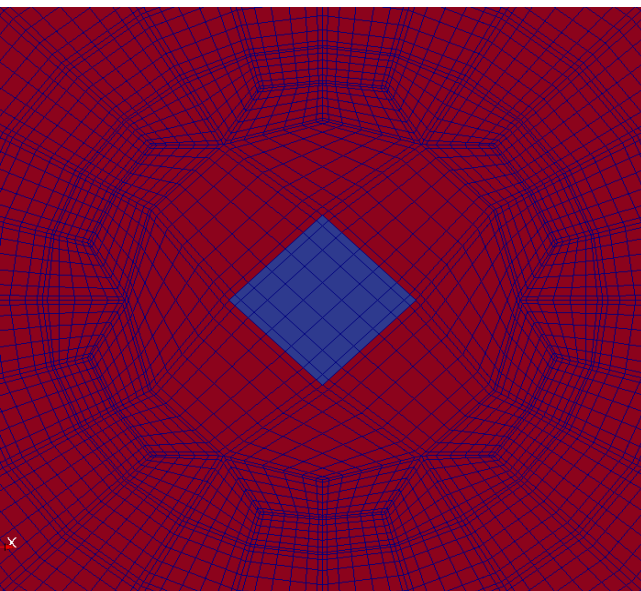
Изопараметрический МСЭ



$$\mathbf{x}(\xi) = \sum_{a=1}^{n_a} l_a(\xi) \mathbf{x}_a$$

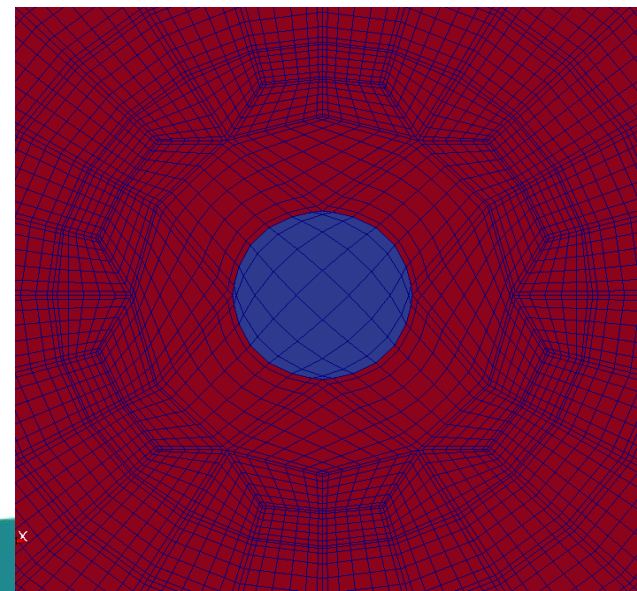
$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi} = \sum_{a=1}^{n_a} \frac{\partial l_a}{\partial \xi} \mathbf{x}_a$$

Отображение эталонного элемента на криволинейный спектральный элемент высокого порядка с использованием базисных функций МСЭ – изопараметрическая аппроксимация.



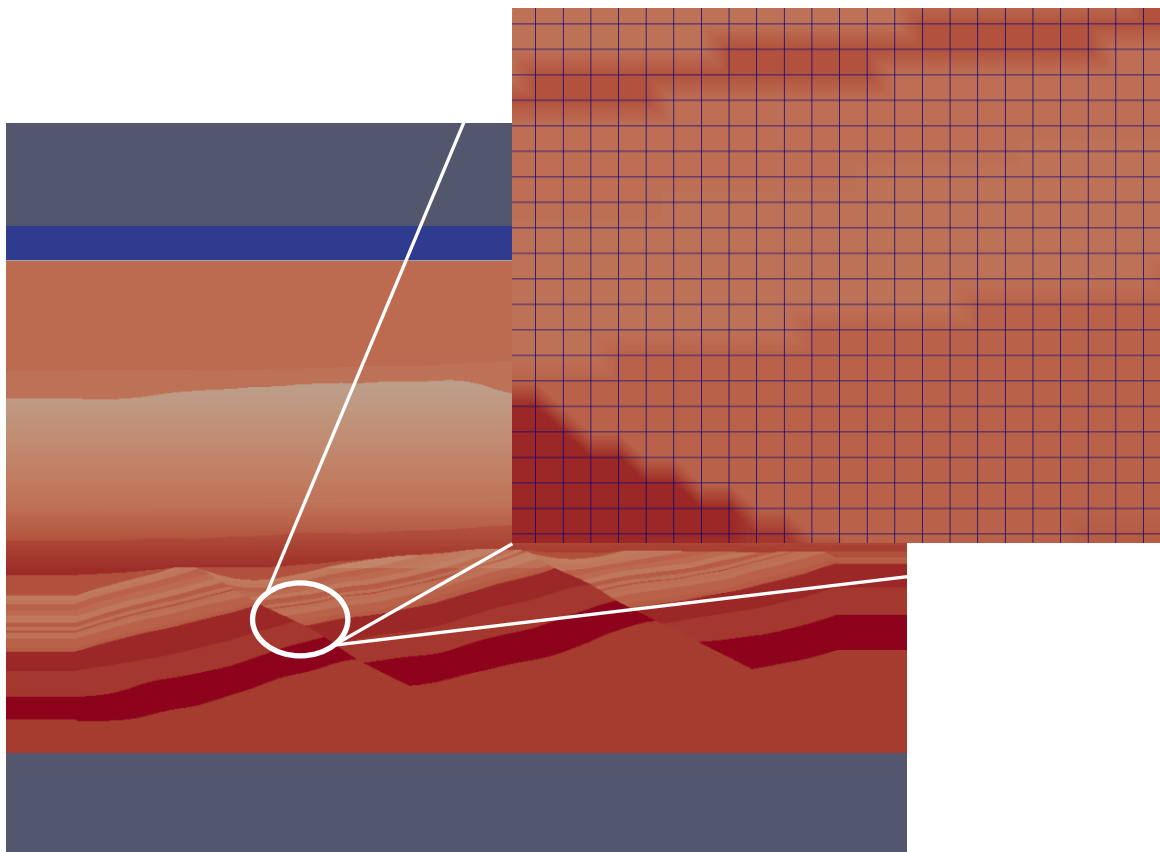
Линейные (слева) и изопараметрические (справа) спектральные элементы

Спектральная сходимость (superconvergence, Bernardi and Maday 1992) на гладких решениях вычислительной схемы с минимальными численной дисперсией и диффузией (Komatitsch 1997): $\|u - u_h\| \leq Ch^N e^{-N}$ в H^1 -норме, где h – характерный размер сеточного элемента, N – порядок элемента, C – константа, не зависящая от h и N .





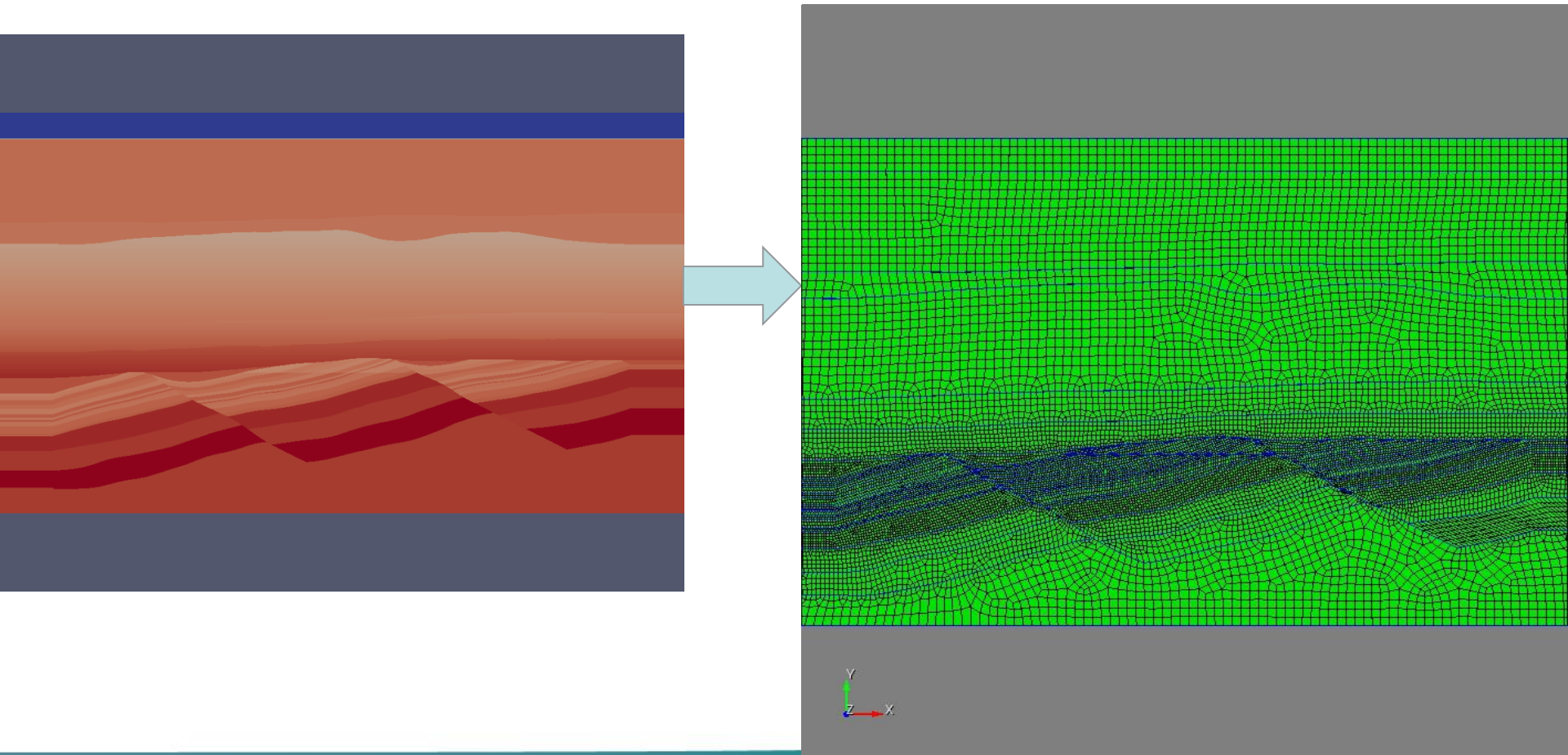
Стандартная “воксельная” дискретизация геологической модели





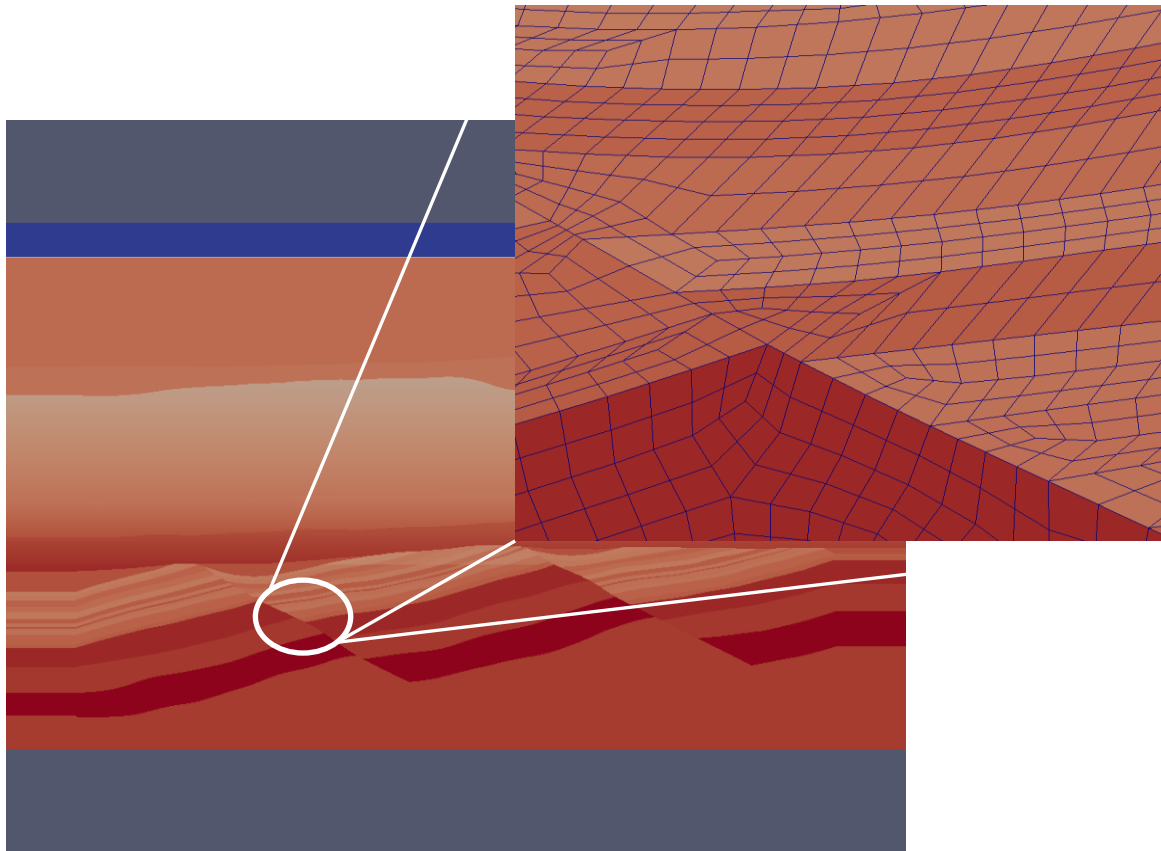
Сплайн-аппроксимация контрастных границ слоев

The implementation of spectral element method in a cae system for the solution of elasticity problems on hybrid curvilinear meshes / D. Konovalov, A. Vershinin, K. Zingerman, V. Levin // *Modelling and Simulation in Engineering*. — 2017





Дискретизация с использованием неструктурированных сеток

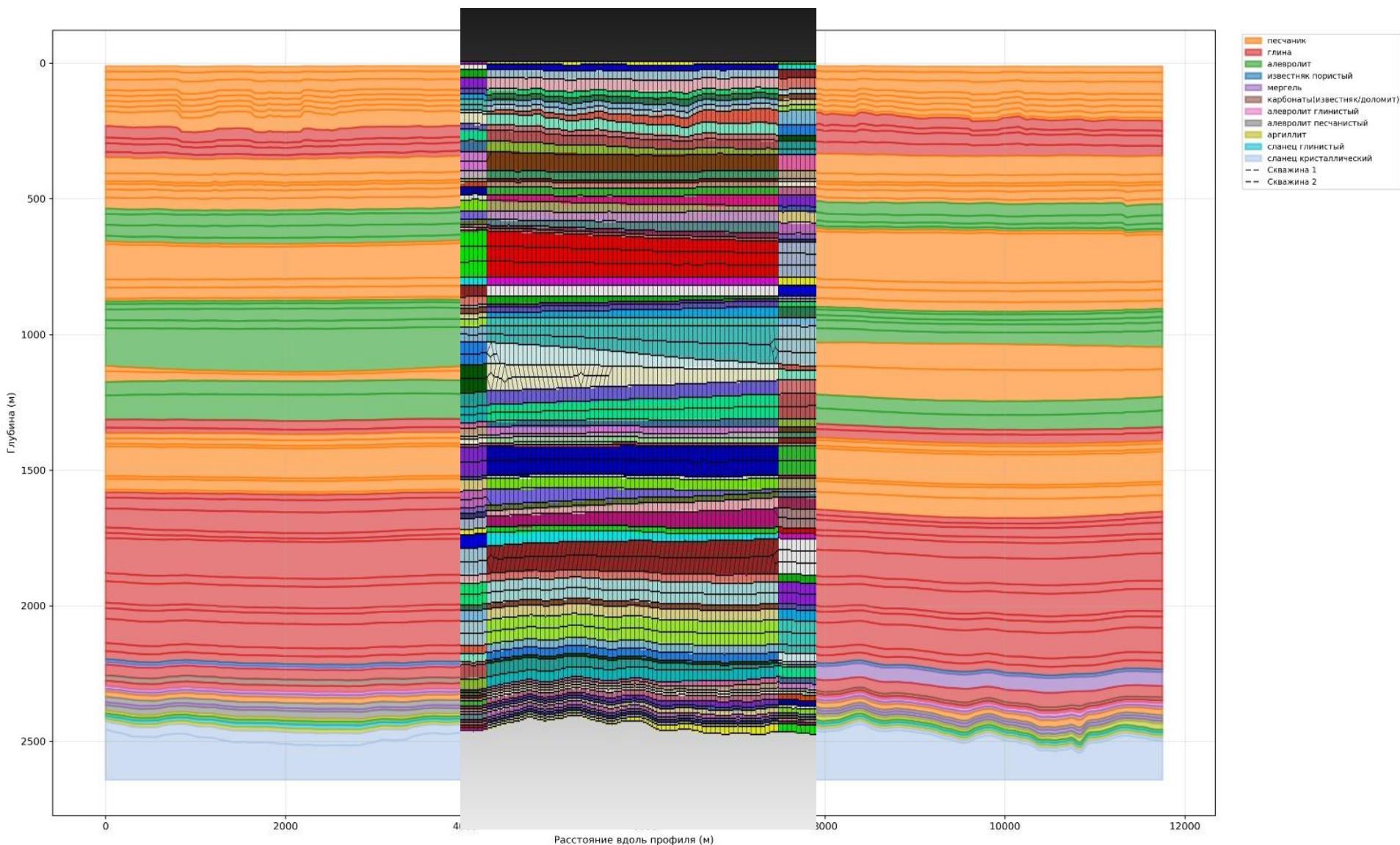


Application of variable order spectral element method on non-conformal unstructured meshes for an engineering analysis of assemblies with geometric inaccuracies / A. Vershinin, V. Levin, A. Kukushkin, D. Konovalov // Proceedings of the International SPDM Conference NAFEMS World Congress. — Quebec City, Canada: 2019



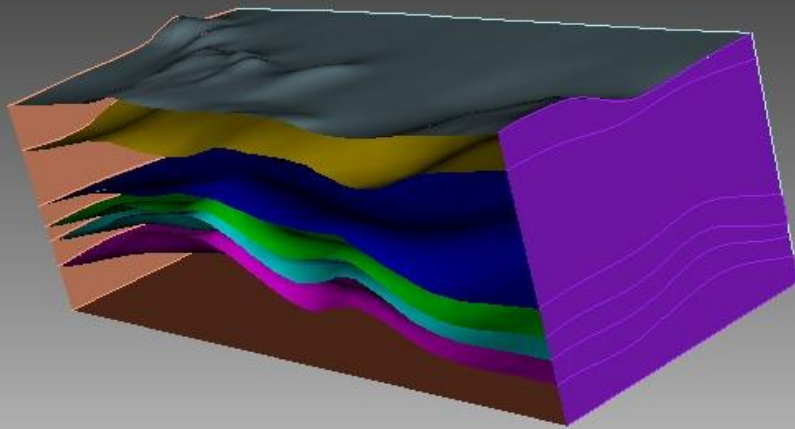
Тонкослоистая модель

Prediction of thin-layer thickness using seismic full-waveform modeling / Y. P. Ampilov, A. V. Vershinin, D. S. Kunchenko et al. // *Moscow University Geology Bulletin*. — 2025. — P. 80.





Сплайн-аппроксимация контрастных границ слоев в 3D



SEM wave propagation in complex media with tetrahedral to hexahedral mesh / M. Charara, A. Vershinin, D. Sabitov, G. Pekar // 73rd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition. — Vienna, Austria: 2011. — P. 41–45.

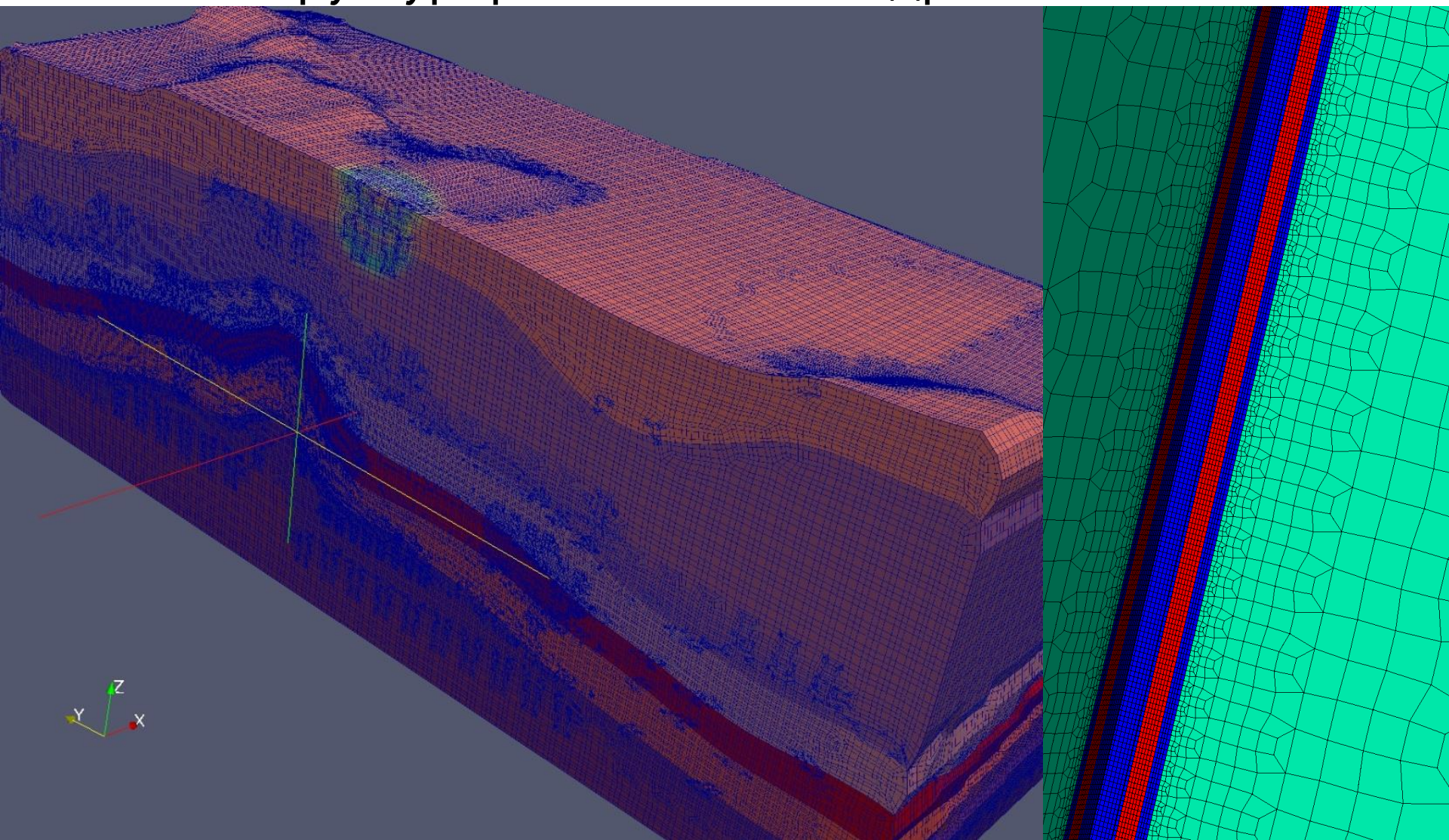
Seam Model



Требования по дискретизации

Минимизация числа элементов =>

неструктурированная гексаэдральная сетка





Верификация: Задача Лэмба

Levin V.A., Vershinin A.V., Zingerman K.M., Ukhanov E.M. Convergence analysis of the spectral element method on the example of the Lamb problem in comparison with the analytical solution. *Chebyshevskii Sbornik*. 2026;27(1):153-165.

Для определения скорости поверхностной волны Рэлея:

$$\alpha^6 - 8\alpha^4 + 8(3 - 2\beta^2)\alpha^2 - 16(1 - \beta^2) = 0$$

$$\alpha = \frac{k_t}{k} = \frac{c_R}{c_S} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{k_l}{k_t} = \frac{c_S}{c_P};$$

c_P, c_S - скорости продольных и поперечных волн,

c_R - скорость волны Рэлея.

$$c_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad c_R \approx \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot c_S$$

Аналитическое решение задачи Лэмба в точке (r, z) полупространства для компонент смещений получается с использованием обратного преобразования Фурье:

$$u_x(r, z, t) = \int_0^\infty (R_P^x(k) \cdot e^{-\alpha_P z} + R_S^x(k) \cdot e^{-\alpha_S z}) \cdot F(\omega) \cdot J_1(kr) dk$$

$$u_y(r, z, t) = \int_0^\infty (R_P^y(k) \cdot e^{-\alpha_P z} + R_S^y(k) \cdot e^{-\alpha_S z}) \cdot F(\omega) \cdot J_1(kr) dk$$

$$u_z(r, z, t) = \int_0^\infty (R_P^z(k) \cdot e^{-\alpha_P z} + R_S^z(k) \cdot e^{-\alpha_S z} + R_R^z(k) \cdot e^{-\alpha_R z}) \cdot F(\omega) \cdot J_0(kr) dk$$

$$R_P(k) = \frac{2\mu k}{\rho(c_P^2 k^2 - \omega^2)}$$

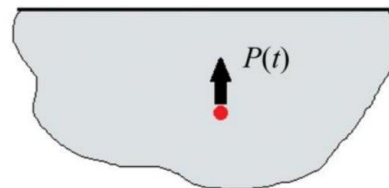
$J_1(kr)$ - функция Бесселя первого рода

$$R_S(k) = \frac{2\mu k}{\rho(c_S^2 k^2 - \omega^2)}$$

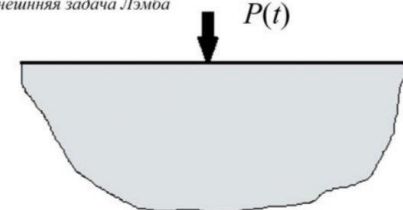
$$F(\omega) = \int_0^\infty f(t) \cdot \exp(i\omega t) dt$$

$$R_R(k) \approx e^{-kz}$$

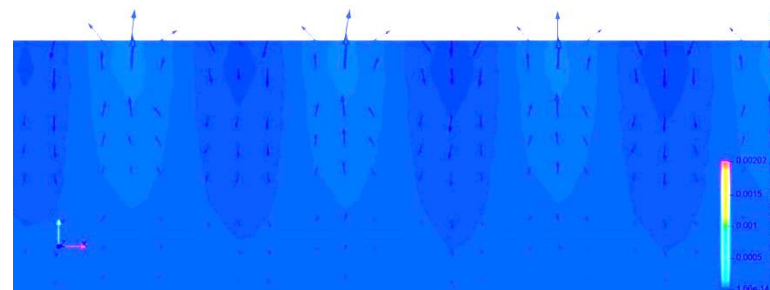
Внутренняя задача Лэмба



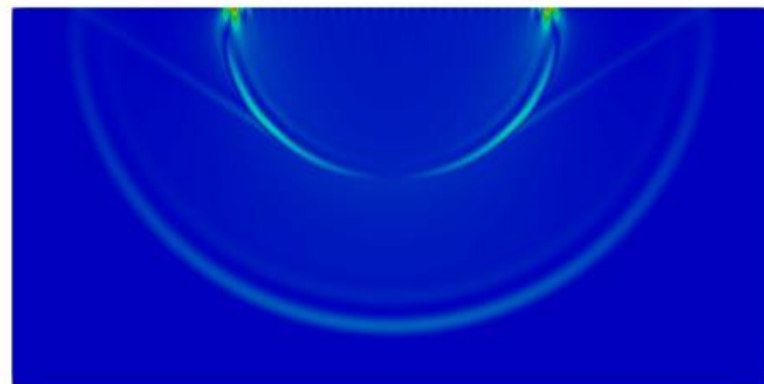
Внешняя задача Лэмба



$$(\lambda + \mu)\nabla \operatorname{div} u + \mu \Delta u + P(x, y, t) = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$



Векторное поле скоростей волны Рэлея



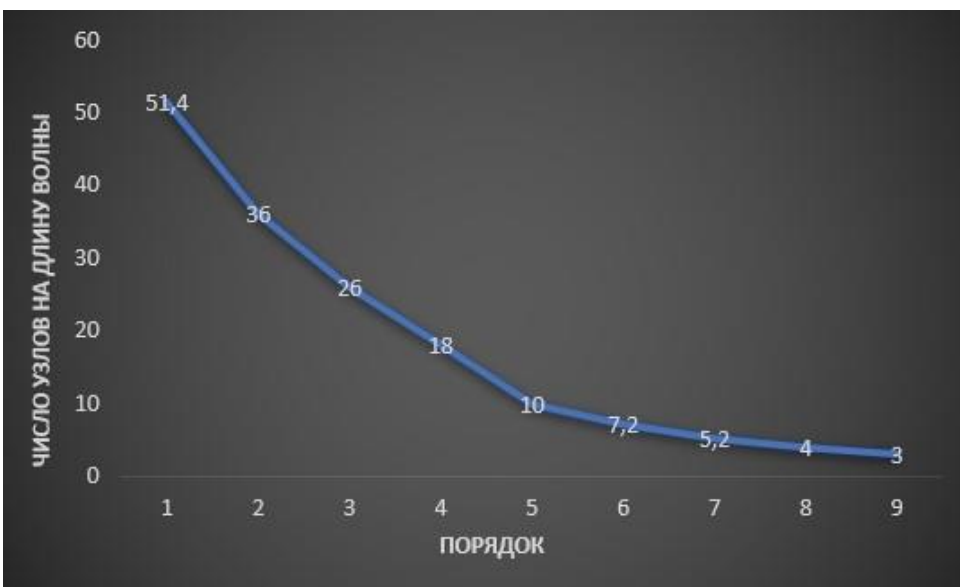


Верификация: Задача Лэмба

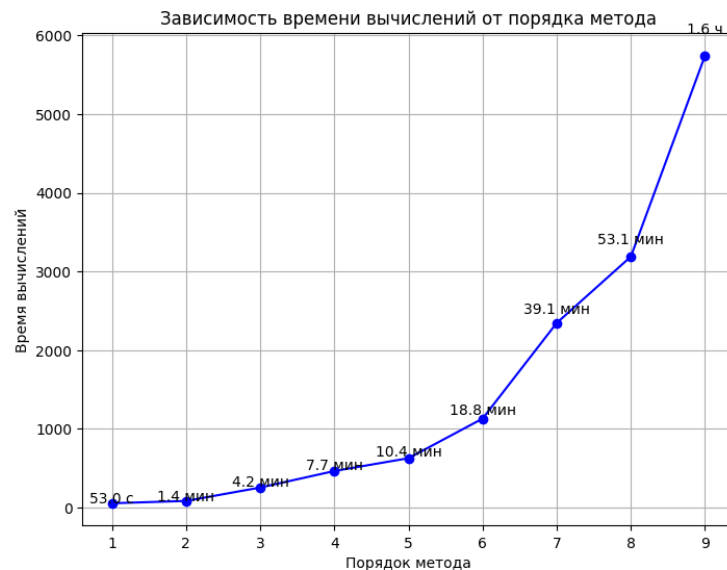
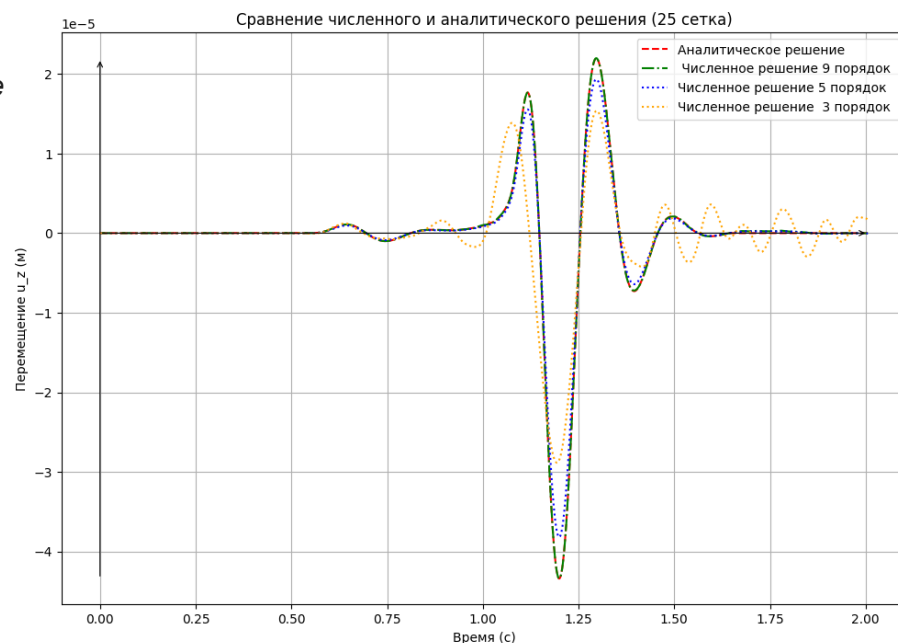
Some results of mesh convergence estimation for the spectral element method of different orders in fidesys industrial package / V. S. Karpenko, A. V. Vershinin, V. A. Levin, K. M. Zingerman // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 158.

Для оценки сходимости решения, полученного в CAE Fidesys, было проведено сравнение результатов на 3м, 5м и 9м порядках МСЭ.

$$\text{Ошибка} = \frac{\max(V_{\text{числ.}}(t) - V_{\text{ан.}}(t))}{\max|V_{\text{ан.}}(t)|} * 100\%$$



С увеличением порядка МСЭ уменьшается общее число узлов в сеточной дискретизации, необходимых для достижения погрешности в 1% в сравнении с аналитическим решением.





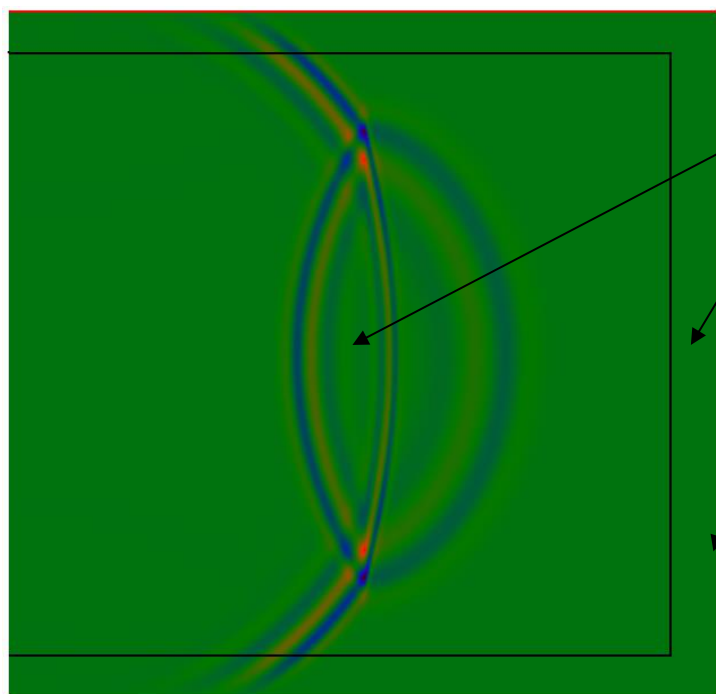
Подавление отражений вблизи искусственных границ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОРЯДКА СПЕКТРАЛЬНОГО
ЭЛЕМЕНТА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПОЛНОВОЛНОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В
СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ / А. М. Антонов, Д. С. Кунченко, А. В. Вершинин и др. // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика.* – 2026. – Т. 1, № 1. – С. 32–38.

Демпфирующий слой

+

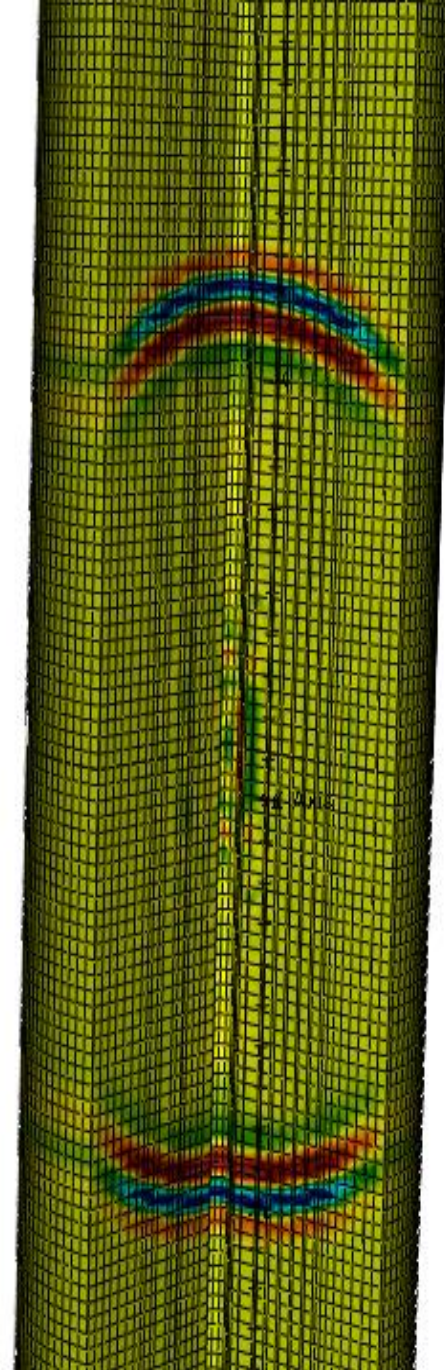
Локальные граничные условия



Расчетная область

Нелокальный
демпфирующий слой

Локальные
неотражающие
граничные условия





Демпфирующий слой вдоль внешней границы тела

Анализ сходимости метода спектральных элементов на примере задачи Лэмба в сравнении с аналитическим решением / В. А. Левин, А. В. Вершинин, К. М. Зингерман, Е. М. Уханов // *Чебышевский сборник*. – 2026. – Т. 27, № 1. – С. 153–165

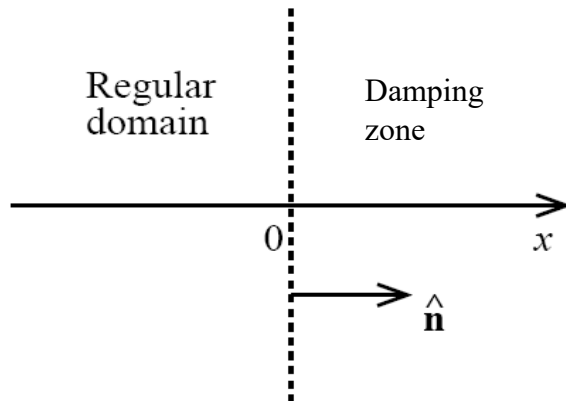
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + b\right)^2 \Phi = c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}$$

$$\Phi(x, t) = (f(x + ct) + g(x - ct))e^{-bt}$$

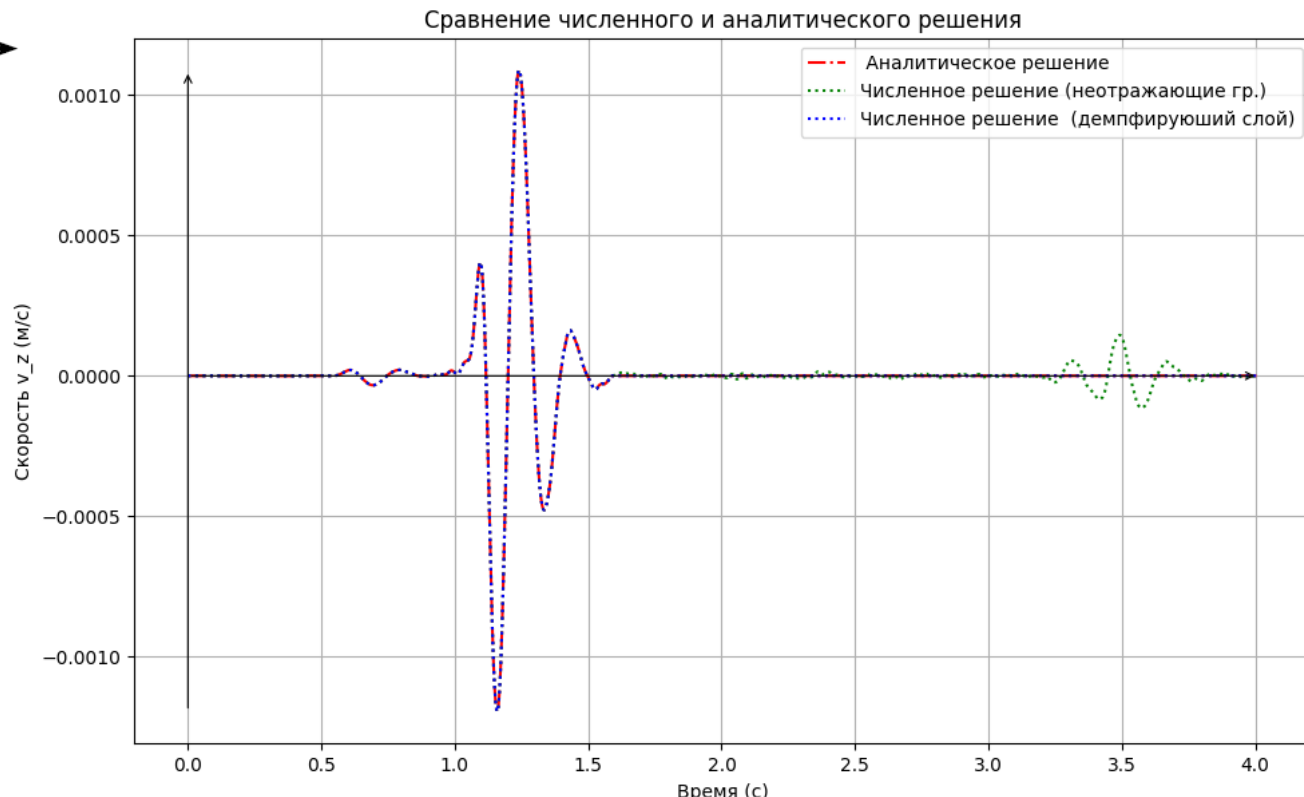
$$b(x) = b_0 \left(\frac{x}{L}\right)^N$$

$$b_0 = -(N+1)c_p \ln(R_c)/(2L)$$

R_c – коэффициент отражения, C_p – скорость волны, L – ширина демпфирующего слоя

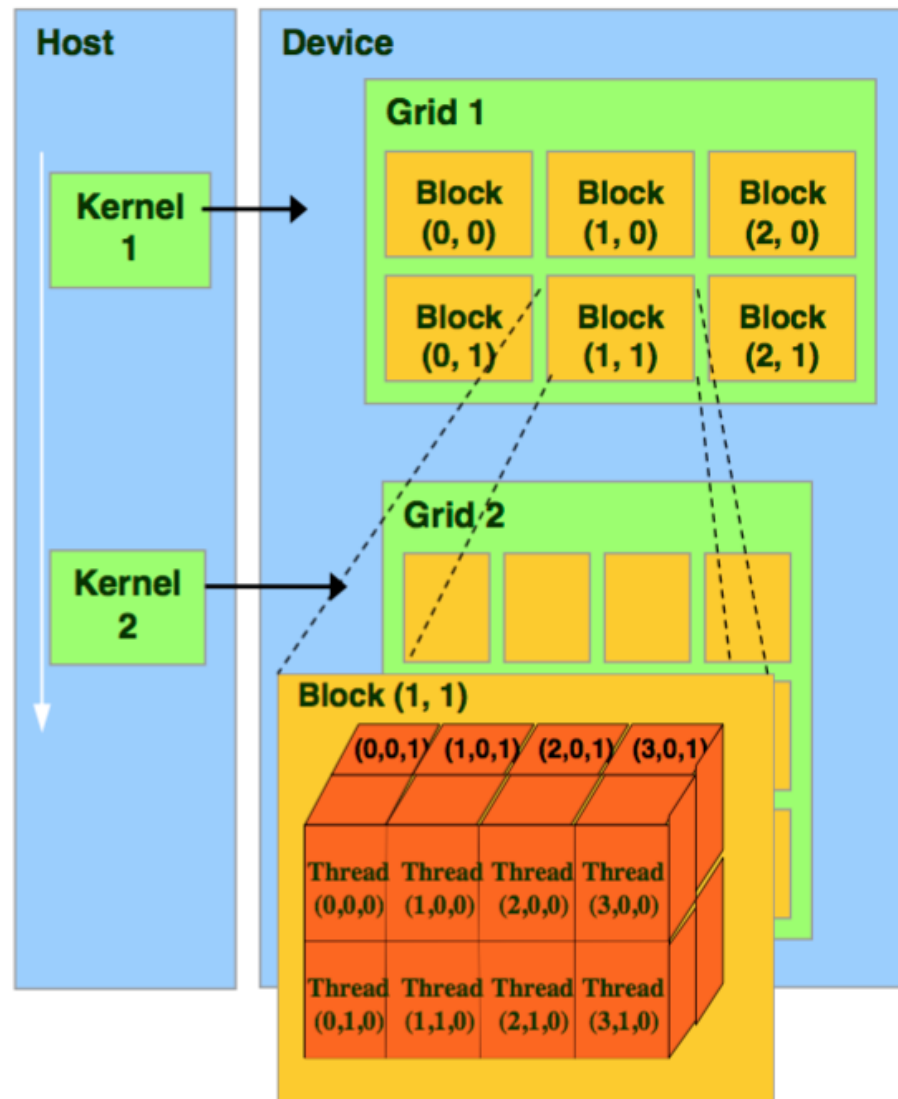
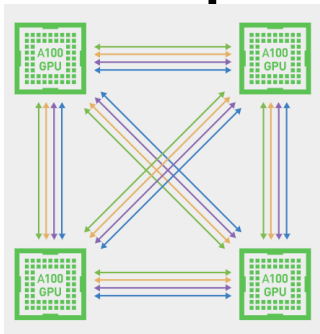


После добавления нелокальных демпфирующих условий вдоль искусственных границ тела удалось эффективно погасить отражённые волны от границ модели.





Массивно-параллельная реализация на графических картах (GPU)



- Набор функций (kernels): интегрирование по пространству, интегрирование по времени, граничные условия
- МКЭ/МСЭ-сетка отображается на Grid-сетку GPU: каждый элемент сетки обрабатывается отдельным блоком (Block), а соответственно отдельные узлы внутри элемента отдельными потоками (Thread) => эффективное использование Shared (разделяемой) памяти для кэширования данных внутри элемента при вычислении пространственных производных
- Размер блока автоматически определяется порядком элемента, количество блоков постоянно при фиксированной сетке
- Использование атомарных операций, текстурной памяти, асинхронная работа с памятью, применение графов на GPU позволяют в разы оптимизировать программу и повысить эффективность распараллеливания!

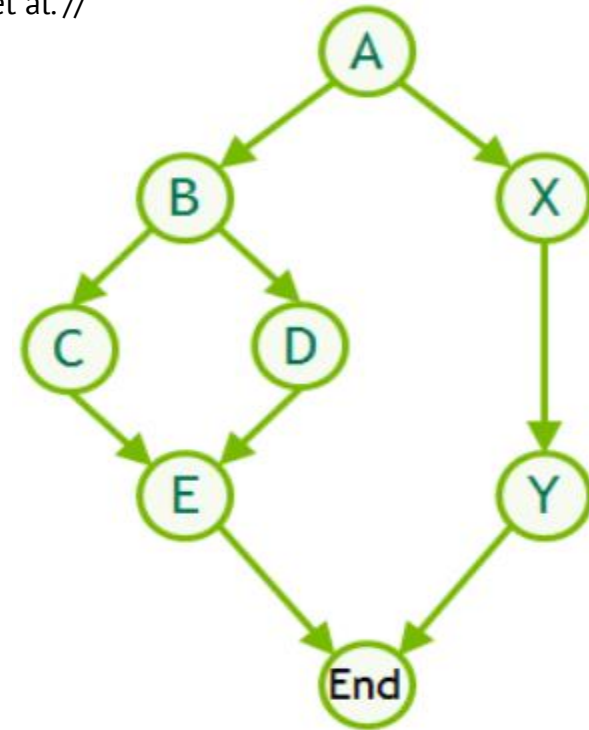


Использование графов в CUDA 10

Full-waveform seismic simulation using spectral element method and its massively parallel implementation on msu-270 supercomputer / Y. P. Ampilov, A. M. Antonov, D. S. Kunchenko et al. // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. — 2025. — Vol. 46, no. 8. — P. 3605–3616

Применение безматричного метода спектральных элементов и схемы Ньюмарка для численного интегрирования по времени подразумевает многократный (несколько десятков тысяч итераций по времени) вызов CUDA kernels (ассемблирование по пространству и интегрирование по времени).

Для оптимизации данной процедуры и сокращения накладных расходов на запуск kernels используются CUDA graphs – графы вызова kernels, позволяющие выполнять асинхронные запуски kernels и операций с памятью (memcpy/memset).





Вычислительная платформа

(Суперкомпьютер МГУ270 в
МГУ имени М.В. Ломоносова)

Параметры узла:

- 8xTesla A100 NVLink 3.0
- Пропускная способность памяти для обменов между GPU - **600 ГБ/с**
- Поддержка технологии NVIDIA Grid для удаленного запуска CUDA-приложений и 3D рендеринга
- Поддержка технологий CUDA Unified Memory, OverSubscription для MultiGPU-вычислений

NVIDIA Tesla A100:

- Операции с двойной точностью - **9,7 Терафлопс**
- Стековая память HBM2e объемом **80 Гб**
- 108 мультипроцессоров, **6912** ядер CUDA
- Пропускная способность глобальной памяти - **2039 ГБ/с**
- Поддержка CUDA 12

Технология совместного использования видеокарт на узле (MultiGPU) с использованием nvLink.

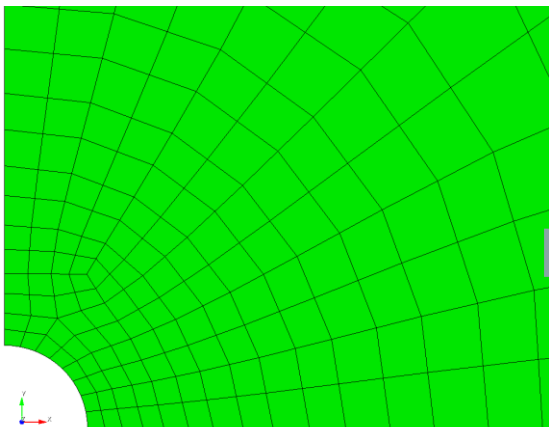
Для автоматического параллельного исполнения задач на кластере использовался slurm с контейнеризацией через docker.



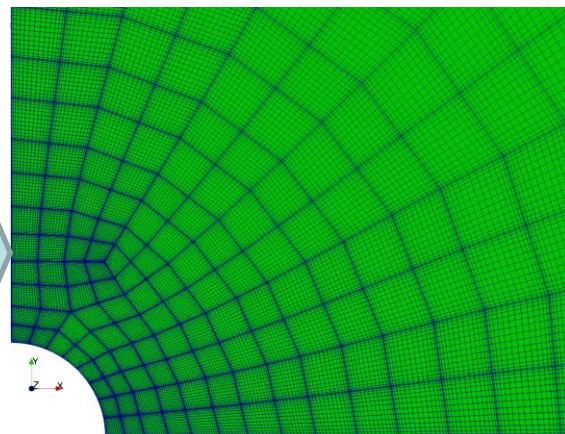


Анализ производительности на MultiGPU-системе

Full waveform modeling in seismic exploration based on a digital geological model using spectral element method on gpu / A. Vershinin, Y. Ampilov, V. Levin, K. Petrovsky // 16th World Congress on Computational Mechanics and 4th Pan American Congress on Computational Mechanics. – Numerical Methods and Algorithms in Science and Engineering. – CIMNE Vancouver, Canada: 2024.

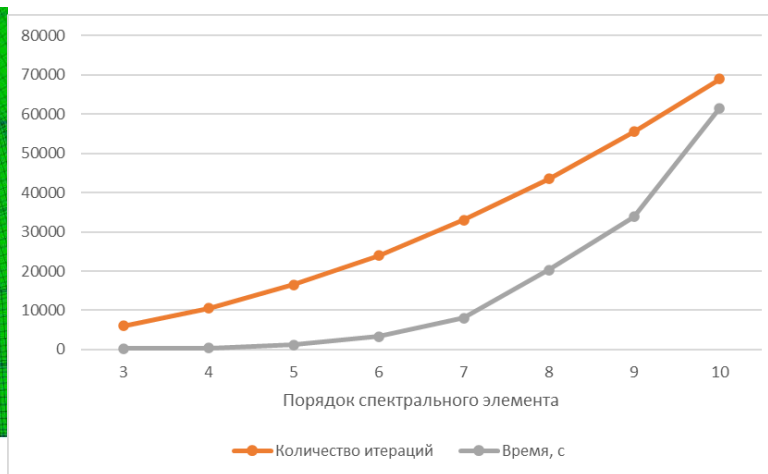


Неструктурированная сетка из криволинейных четырехугольных элементов

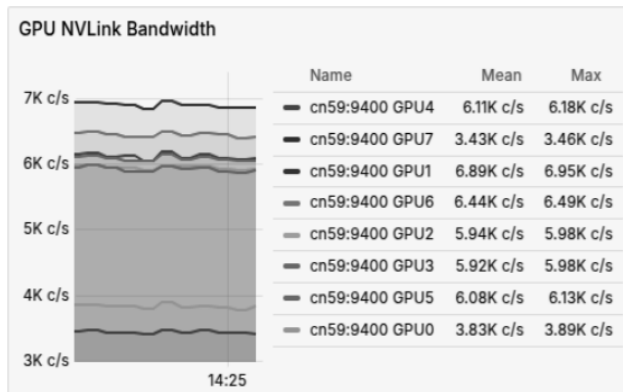
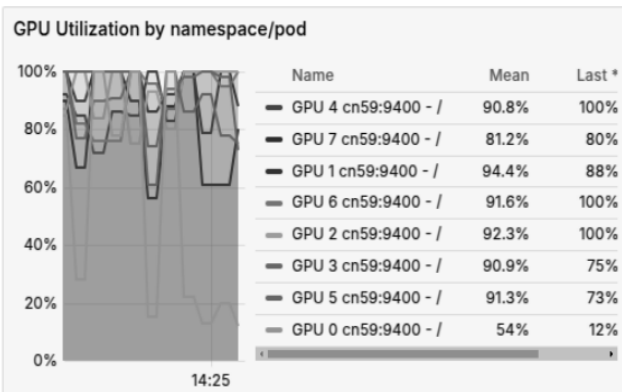


Спектральноэлементная сетка 15го порядка

10000 итераций по времени выполняются приблизительно 2 сек на NVIDIA A100.



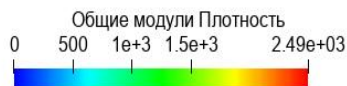
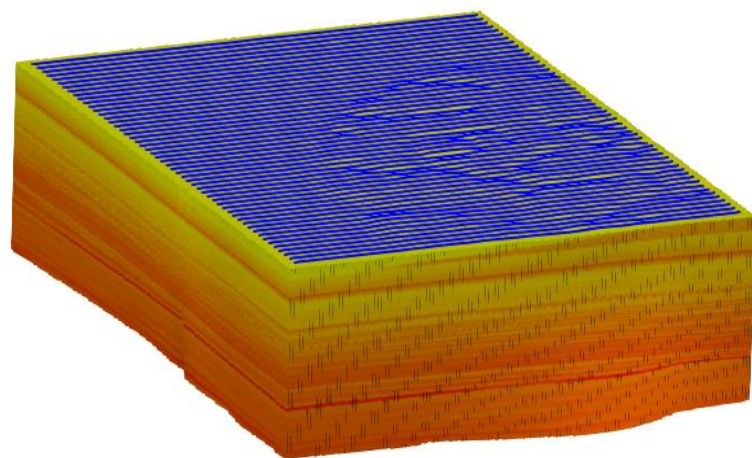
С увеличением порядка схемы ошибка уменьшается экспоненциально, в то время как время вычислений растет полиномиально за счет использования массивно-параллельной архитектуры CUDA.





Полноволновое 3D моделирование месторождения

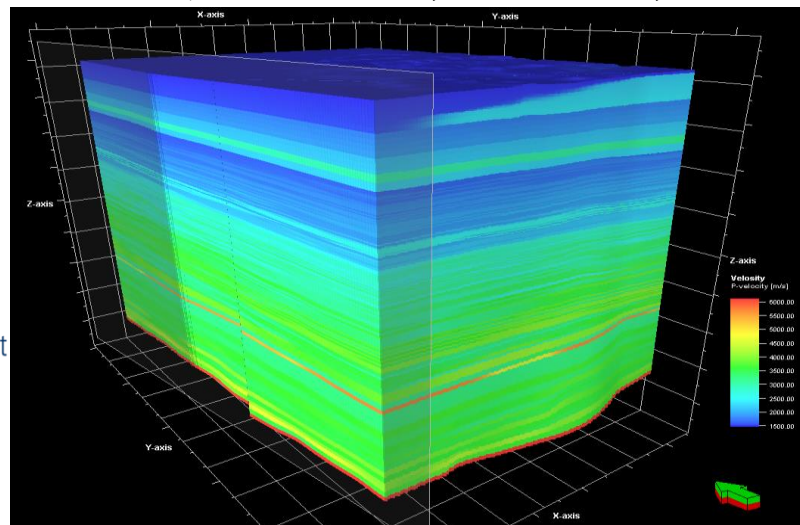
ОПЫТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛНОВОЛНОВОГО 3d-МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ МГУ-270 ДЛЯ ТИПОВОЙ МОДЕЛИ ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ / Ю. П. АМПИЛОВ, А. М. АНТОНОВ, А. И. БОТВИН и др. // *Геофизика*. — 2025. — № 3. — С. 106–112.



- ✓ Полноволновое сейсмическое моделирование в трехмерной постановке;
- ✓ Прямая передача трехмерной геологической модели из Petrel в CAE Fidesys;
- ✓ Моделирование распространения волновых процессов для любых систем наблюдений, включая 3D
- ✓ Генерация синтетических сейсмограмм

Моделируются сейсмограммы с 52-х линий приемников по 231 приемник на линию - всего **12012 приемников**.

Моделируется серия для 39 линий источников по 315 источников на линию - всего **12285 источников**.

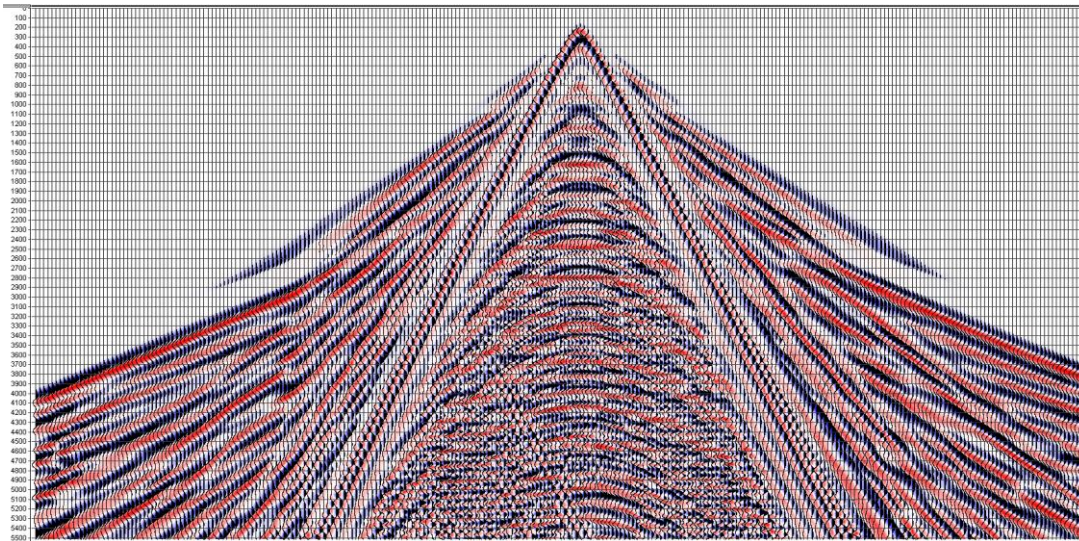


Цифровая геологическая модель «Западная Сибирь»

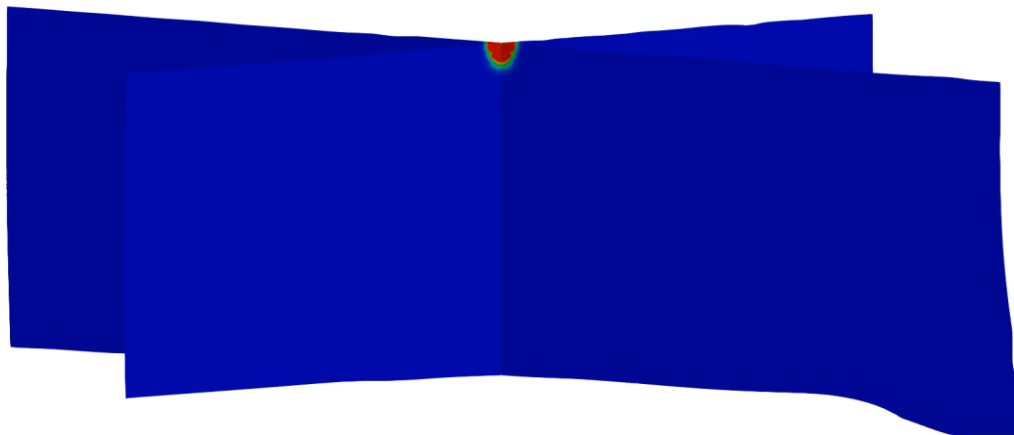
- ✓ 16×12 км в горизонтальной плоскости и от 0 до - 4.1км по вертикали
- ✓ 144 слоя по 39 961 значимых ячеек в каждом слое
- ✓ Смоделированы зоны вечной мерзлоты с очагами растепления
- ✓ Залежи углеводородов с соответствующим изменением свойств
- ✓ Разрывные нарушения, способные генерировать дифрагированные волны



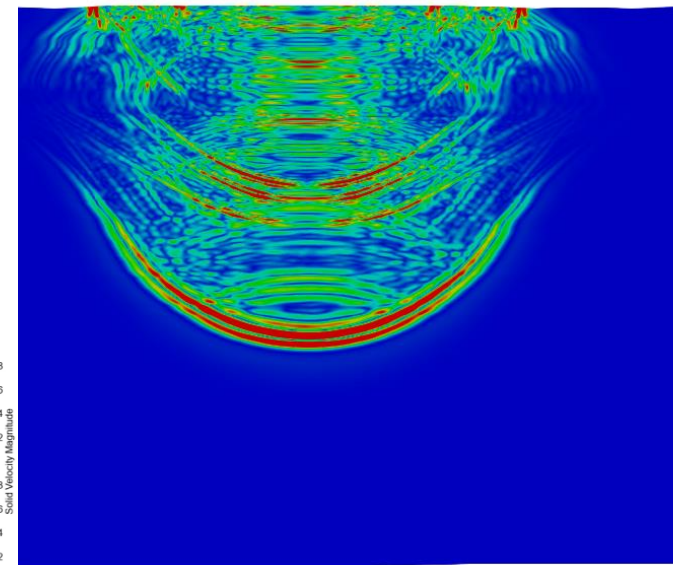
Ю. П. АМПИЛОВ, А. В. ВЕРШИНИН, В. А. ЛЕВИН, К. А. ПЕТРОВСКИЙ, И. И. ПРИЕЗЖЕВ, Я. И. ШТЕЙН.
ПОЛНОВОЛНОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. Геология и геофизика, 2024.



- Впервые осуществлено полноволновое трехмерное моделирование методом спектральных элементов для детальной модели, содержащей более 5 миллионов спектральных элементов и **5 миллиардов** расчетных МСЭ-узлов (10й порядок МСЭ).
- Время расчета – 10 часов (72000 шагов по времени, **0.5 секунды** на шаг интегрирования по времени).
- Рассчитаны как поверхностные волны Рэлея, так и полный набор объемных отраженных, преломленных и рефрагированных волн, продольных, поперечных и обменных.
- Учитываются всевозможные факты дифракции и многократных отражений – всё то, что происходит в реальной среде.



Суммарное время расчета на единичном узле заняло бы
около 6.2 года.

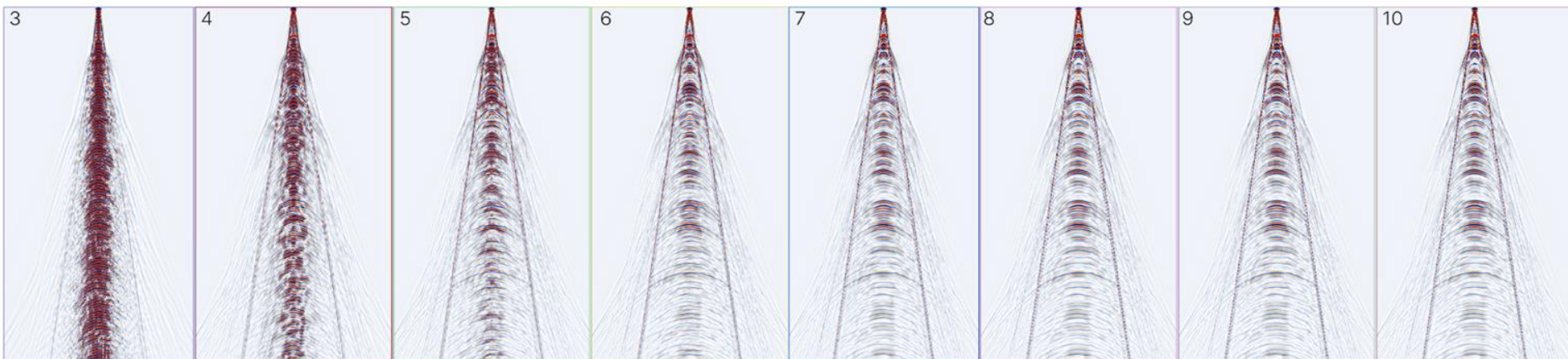




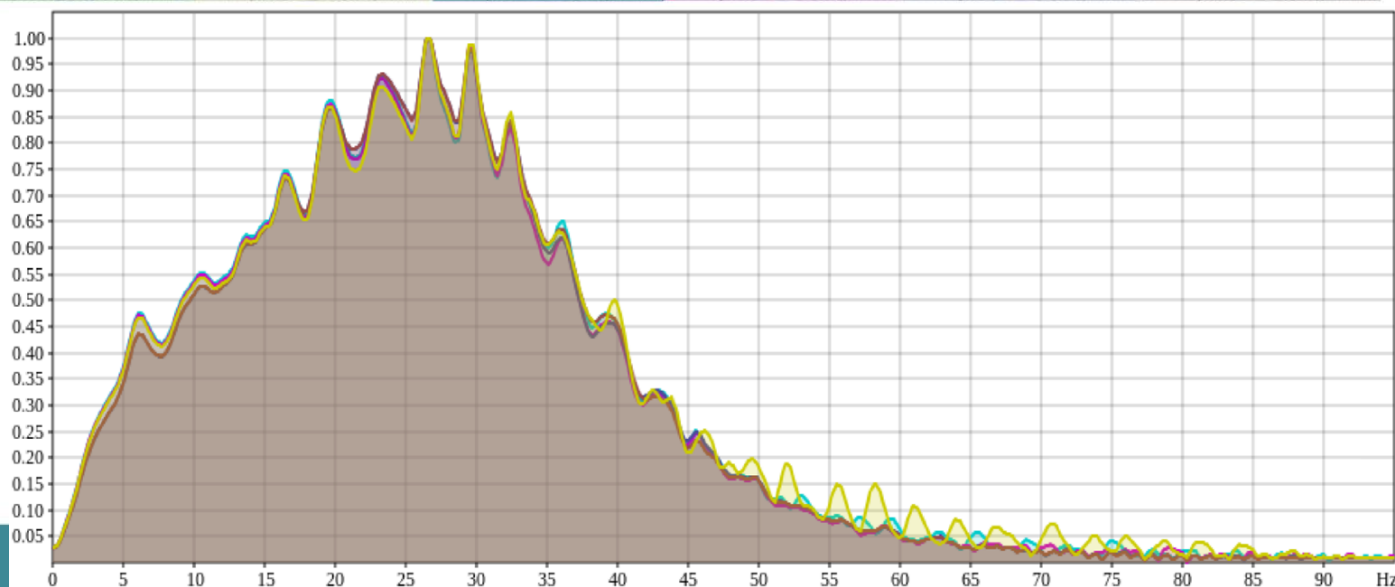
Верификация сеточной сходимости

Determining the optimal value of the order of spectral element in the solution of full-wave modeling problem in seismic exploration / A. M. Antonov, D. S. Kunchenko, A. V. Vershinin et al. // *Moscow University Mechanics Bulletin*. – 2026. – Vol. 81, no. 1. – P. 1–8.

Были построены сейсмограммы для одной и той же точки взрыва с 3 по 10 порядок МСЭ для центральной линии приема модели. Был произведен анализ амплитудно-частотной характеристики полученных сейсмограмм в смысле сеточной сходимости.



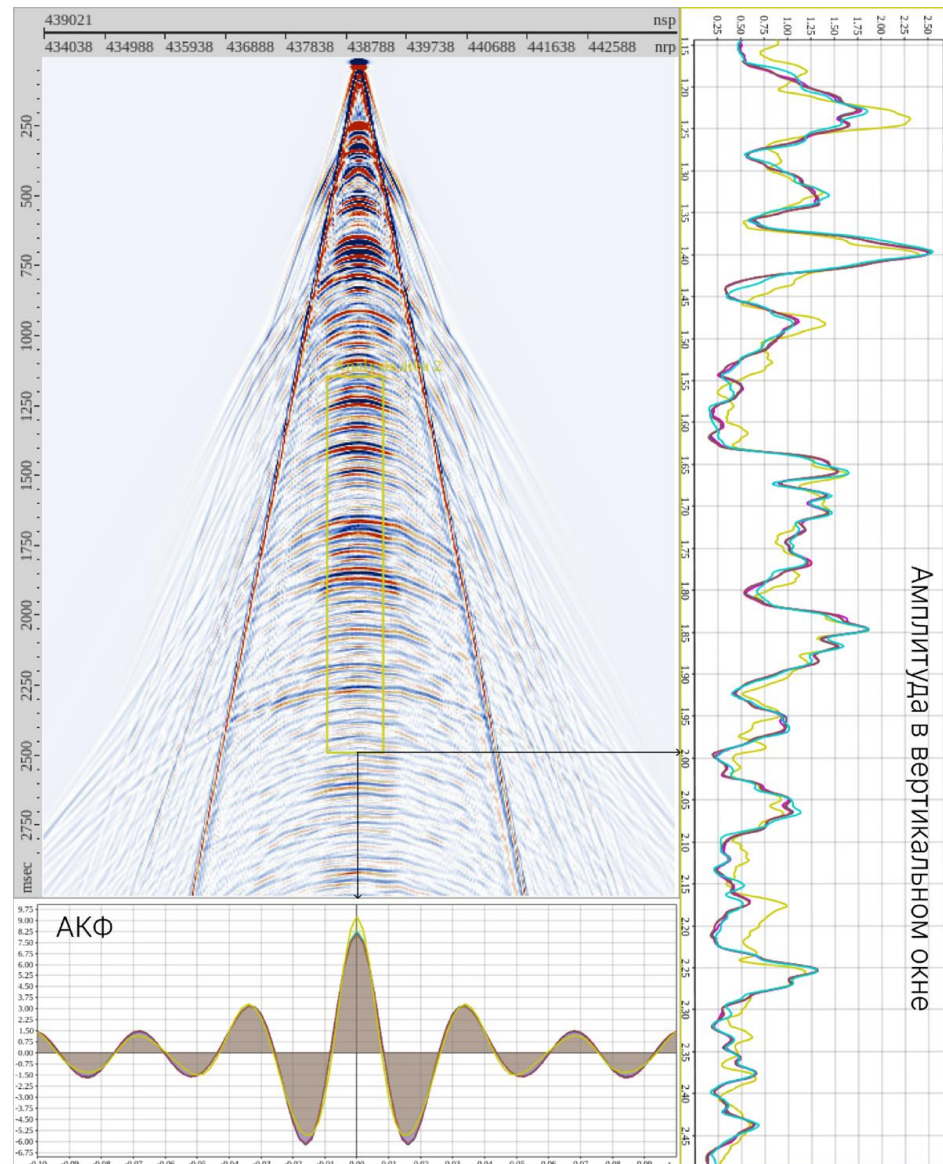
Проведенный анализ выявил, что 8 порядок спектрального элемента является достаточным (в смысле сеточной сходимости).





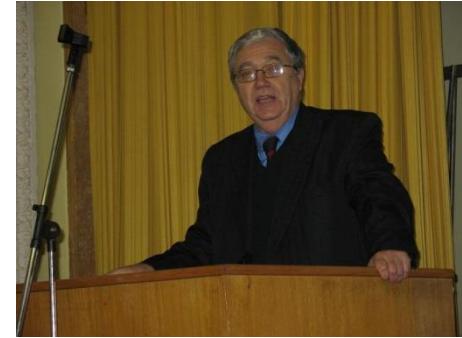
Область применения:

- Создание эталонных моделей среды для основных нефтегазоносных регионов России с целью детального исследования закономерностей формирования волновой картины;
- Исследования реальных возможностей современных методов обработки и интерпретации данных сейсморазведки ;
- Использование полноволновых моделей заказчиками сейсмической обработки (в режиме «скрытых» исходных данных) для объективной технической пре-квалификации исполнителей в рамках тендеров;
- Моделирование 4-D сейсмического сигнала для разрабатываемых месторождений, подземных хранилищ газа (ПХГ) и потенциальных резервуаров для захоронения CO₂
- Обучение нейросетей в конкретных сейсмогеологических условиях с использованием синтетических сейсмограмм, полученных в результате полноволнового трехмерного моделирования





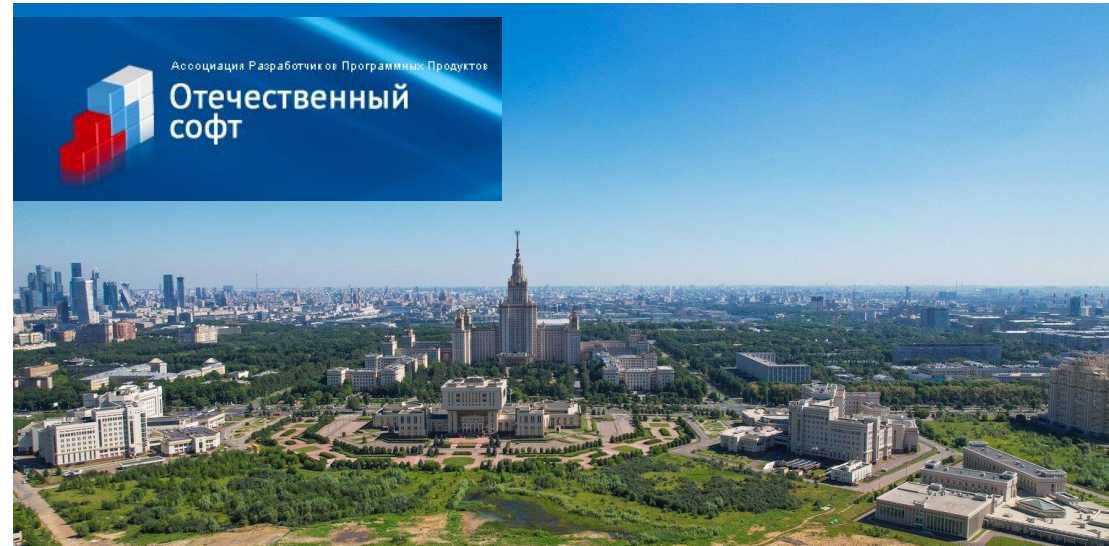
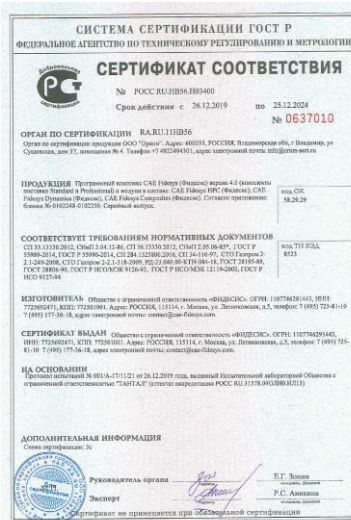
CAE Fidesys – российское ПО для инженерного анализа и вычислительной механики



В основе CAE Fidesys лежат результаты научных исследований в области нелинейной механики деформируемого твердого тела, проведенные коллективом сотрудников кафедры вычислительной механики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (заведующий кафедрой академик РАН Владимир Алексеевич Левин).

Научная новизна результатов отражена в **теории многократного наложения больших деформаций**, разработанной **заслуженным деятелем науки РФ, профессором Владимиром Анатольевичем Левиным**. Данная теория позволяет описывать в процессе нагружения изменение формы, материала и границ отдельных элементов изделия. Кроме того, разработчиками CAE Fidesys **впервые в мире реализован инновационный метод спектральных элементов** (в дополнение к методу конечных элементов, используемому в большинстве мировых CAE-систем) для цифрового моделирования прочностных испытаний.

CAE Fidesys входит в реестр **отечественного ПО Минцифры** с 2016 г. и аттестован по нормам атомной отрасли. Компания Фидесис является членом российской Ассоциации разработчиков программных продуктов (АРПП) и резидентом **технологической долины МГУ имени М.В. Ломоносова**.





Благодарности и публикации



Исследование выполнено на суперкомпьютере “270 лет МГУ”.

Авторы выражают благодарность группе технической поддержки факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова за оказанную помощь.

1. Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Левин В.А., Петровский К.А., Приезжаев И.И., Штейн Я.И. Полноволновое моделирование в сейсморазведке на основе цифровой геологической модели с использованием метода спектральных элементов. Геология и геофизика, 2024
2. Антонов А.М., Кунченко Д.С., Вершинин А.В., Ампилов Ю.П., Левин В.А., Петровский К.А. Определение оптимального значения порядка спектрального элемента при решении задачи полноволнового моделирования в сейсморазведке // «Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика», 2025
3. Yu. P. Ampilov, A.M. Antonov, D.S. Kunchenko, V. A. Levin, and A. V. Vershinin Full-waveform seismic simulation using specsupercomputer // Lobachevskii Journal of Mathematics, 8, 2025
4. Ю. П. Ампилов, А. М. Антонов, А. И. Ботвин, А. В. Вершинин, Е. А. Милентьева, В. А. Левин, К. А. Петровский. Опыт сейсмического полноволнового 3D-моделирования методом спектральных элементов на суперкомпьютере МГУ-270 для типовой модели Западная Сибирь. Геофизика, (3):106–112, 2025.
5. Ю. П. Ампилов, А. В. Вершинин, Д. С. Кунченко, К. А. Петровский, К. Р. Сафуанова. Прогноз мощности тонких пластов с использованием сейсмического полноволнового моделирования. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, (1):97–104, 2025.
6. В.А. Левин, А.В. Вершинин, К.М. Зингерман, Е.М. Уханов. Анализ сходимости метода спектральных элементов на примере задачи Лэмба в сравнении с аналитическим решением. Чебышевский сборник, 27(1):153–165, 2026.

Спасибо за внимание!

