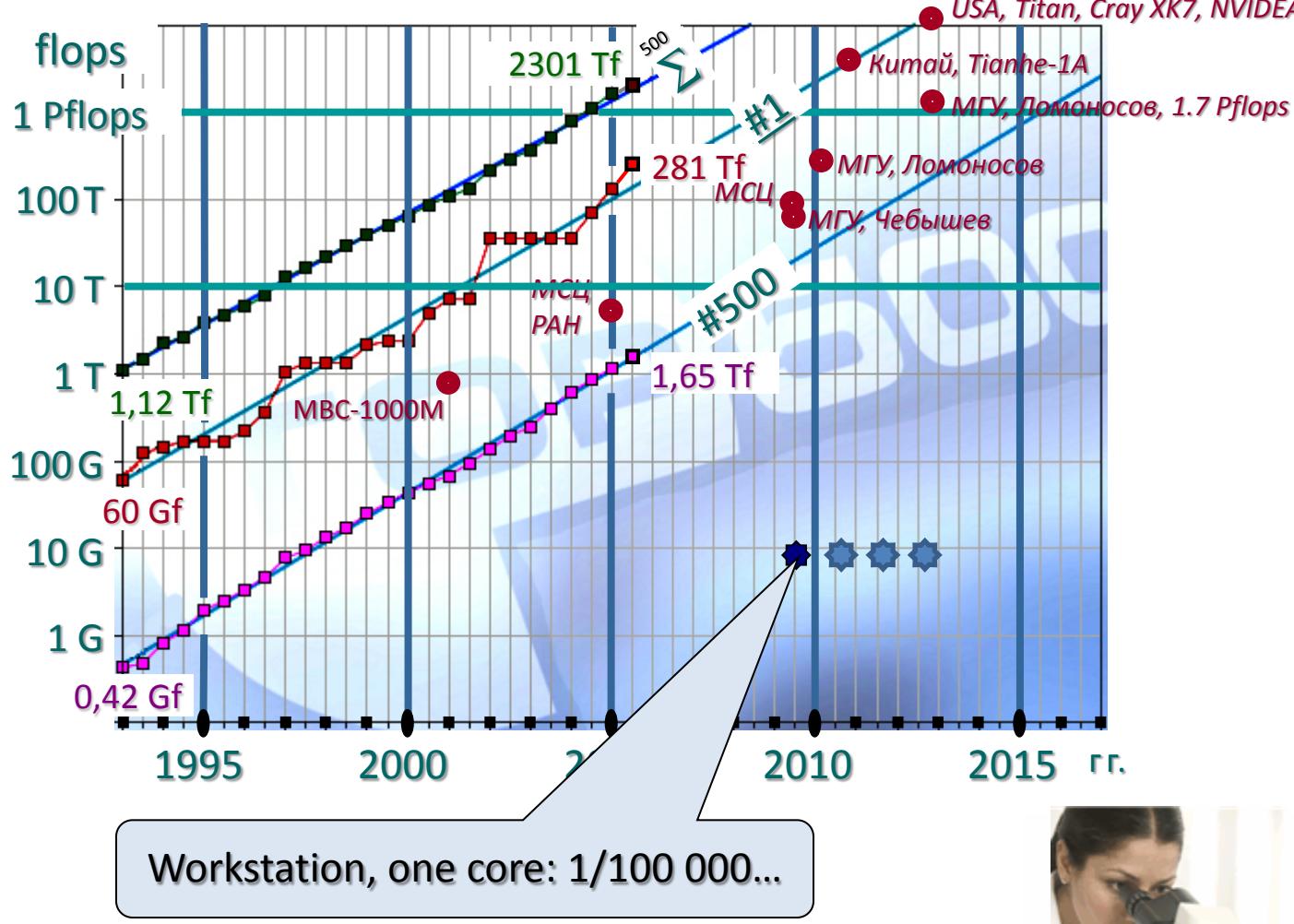


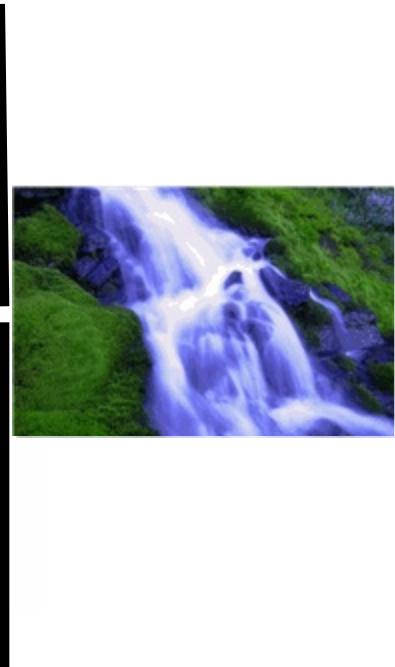
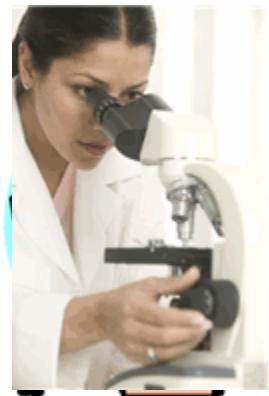
Визуализация сеточных данных

Якововский Михаил Владимирович

Компьютер пользователя на порядки слабее суперкомпьютера



Москва, 2025 г.



Визуализация

- Скалярные
- Векторные
- Стационарные
- Зависящие от времени
- Решетки
- Треугольные и тетраэдральные сетки





Этапы визуализации

Запись

Сетка

Сеточная функция

Чтение

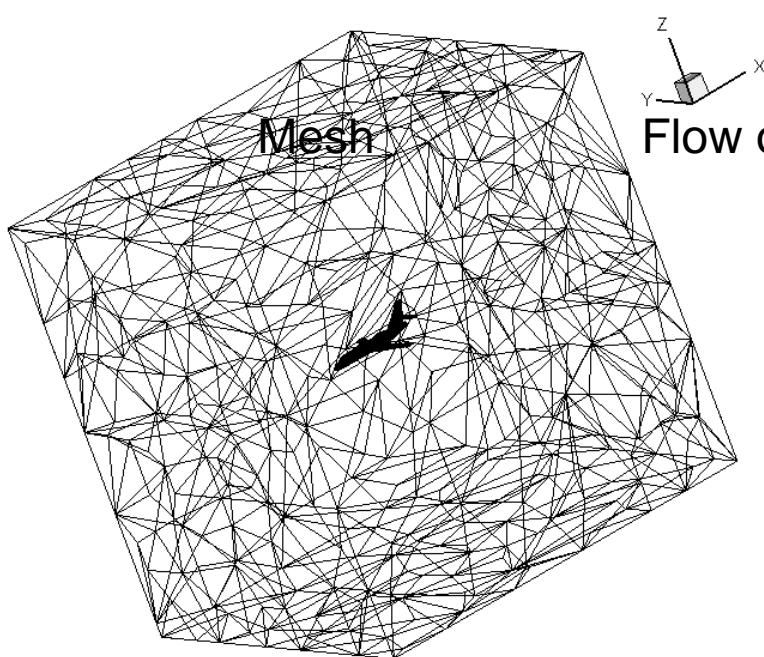
Формирование объектов виртуальной сцены

Отображение

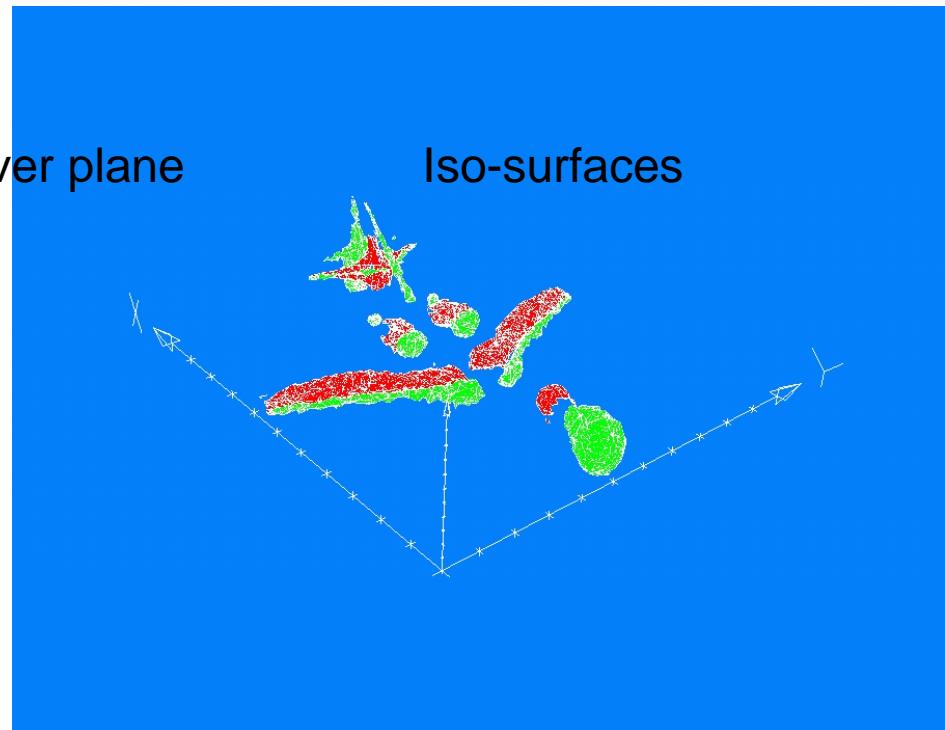
Методы

- Распределенное иерархическое хранение
- Декомпозиция
- Огрубление с контролируемой точностью
- Клиент-серверная технология
- Потоковая обработка
- Хранение образов

Визуализация в распределенных системах

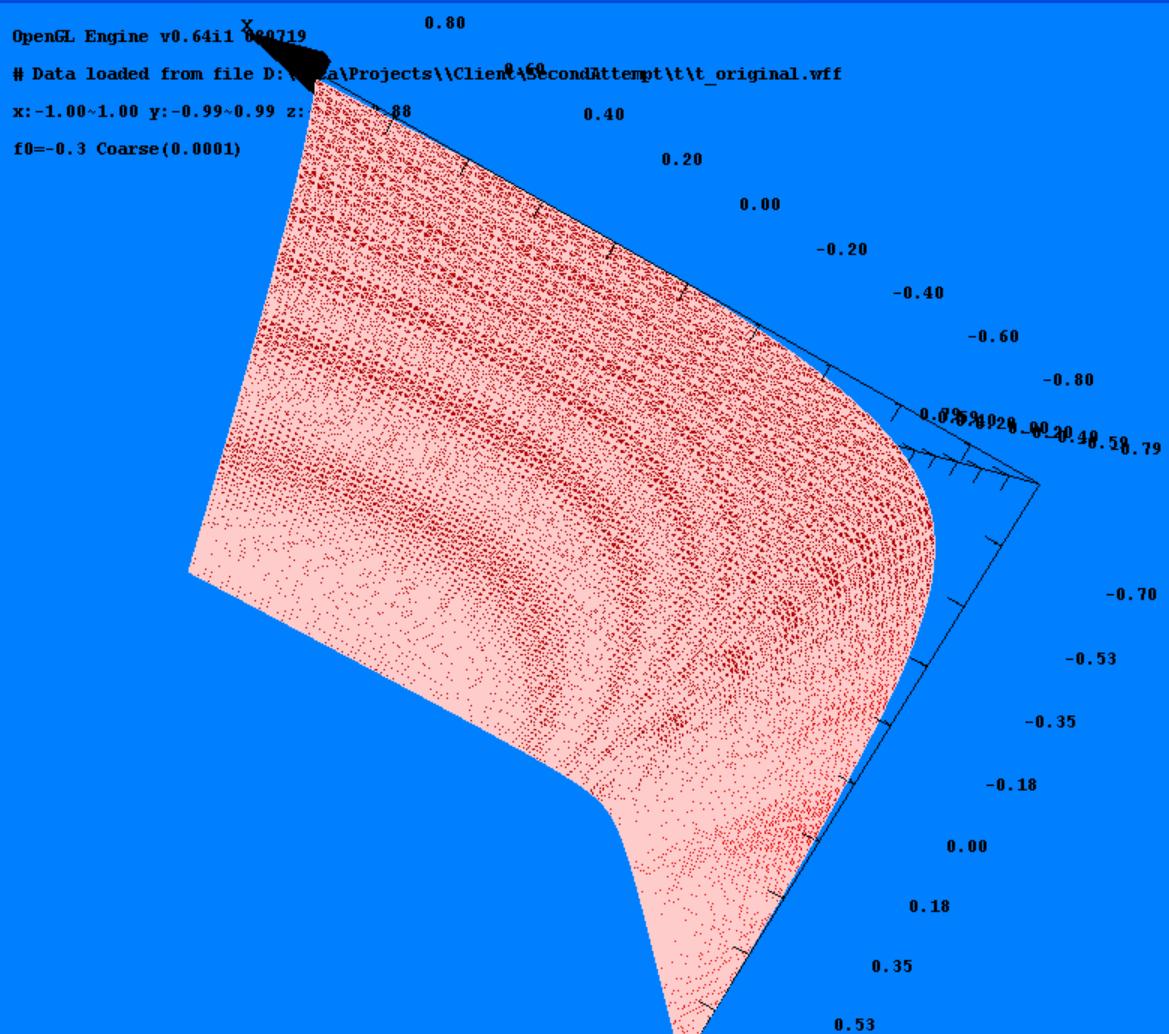


Flow over plane



Iso-surfaces

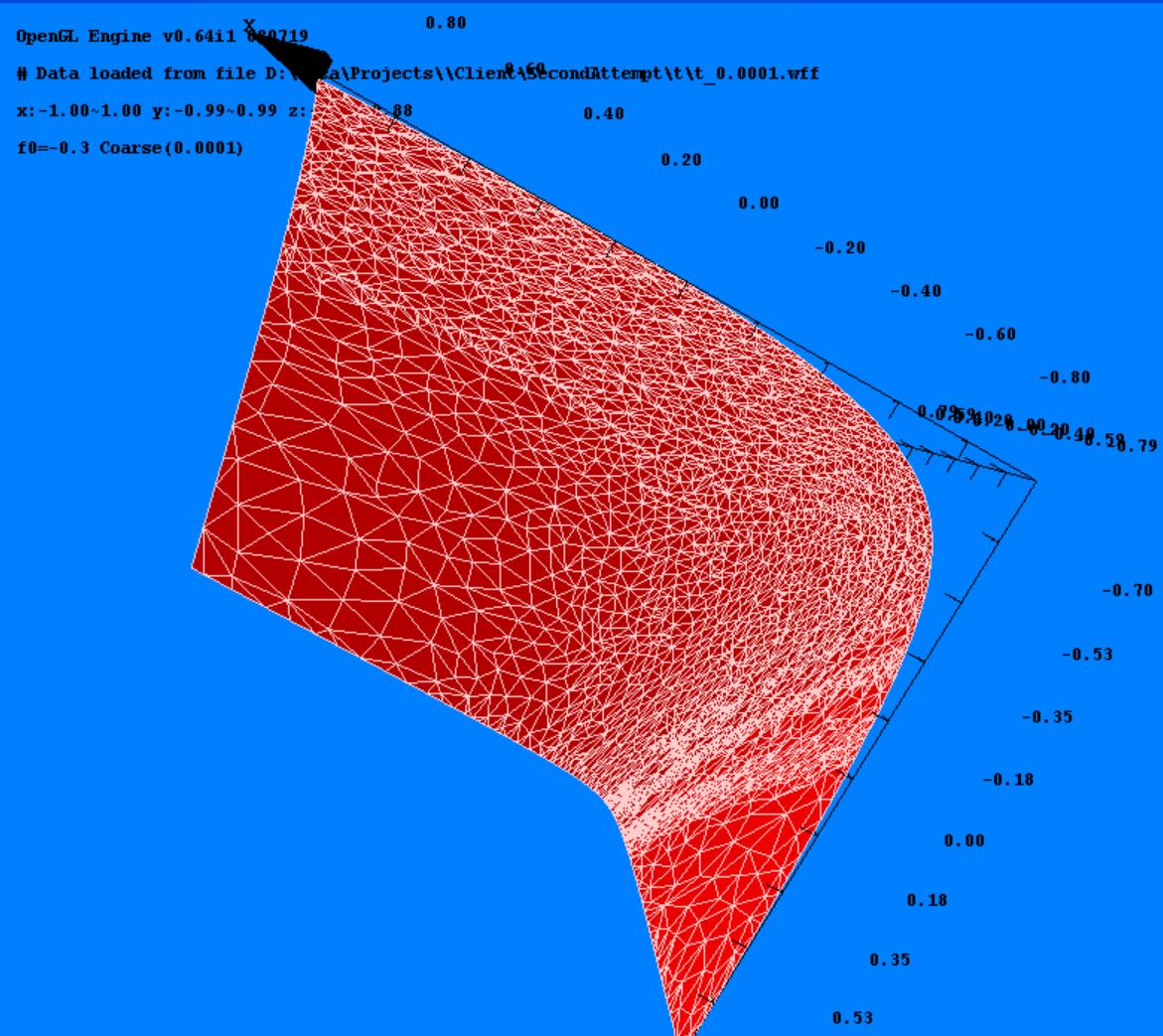
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



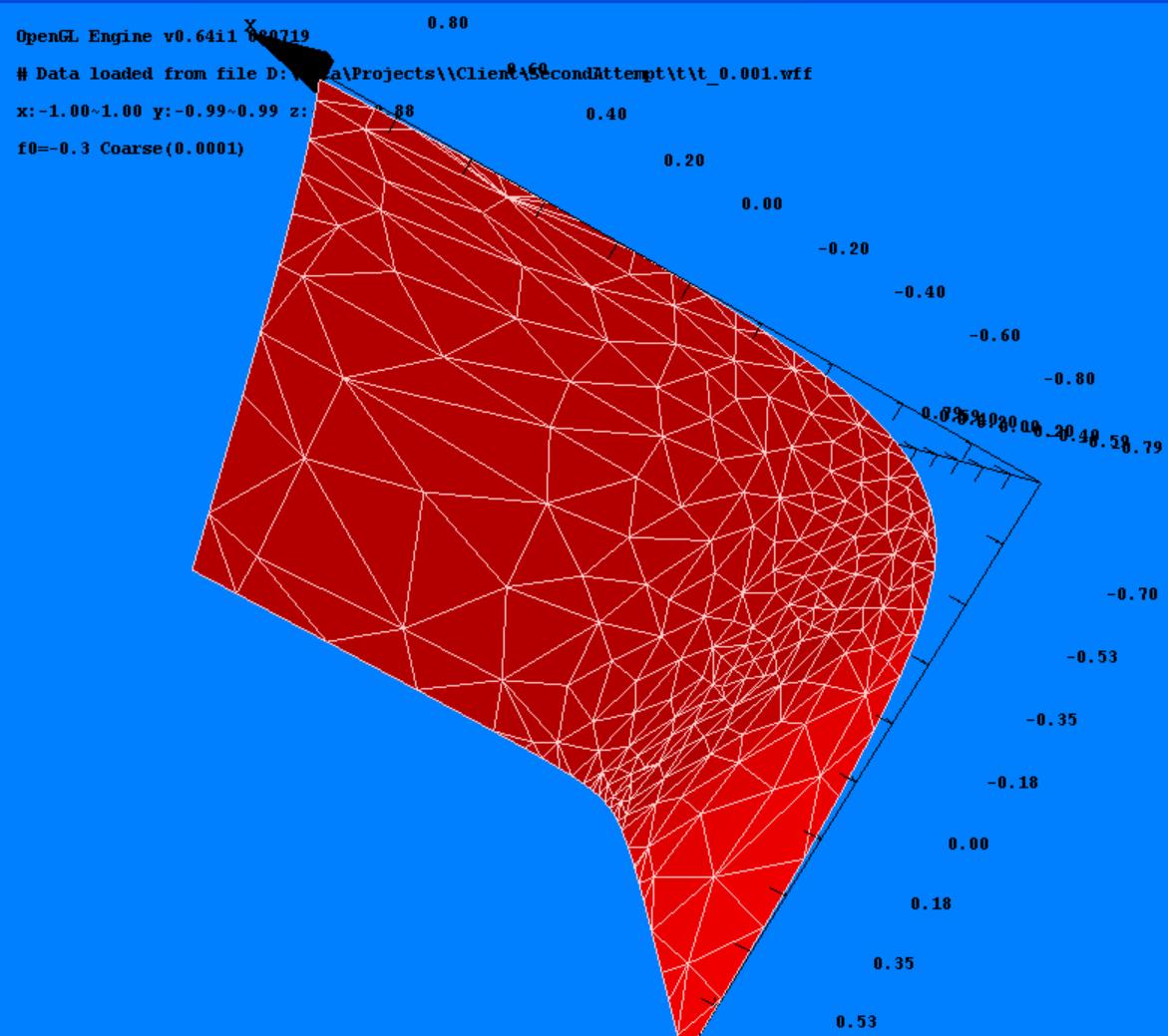
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



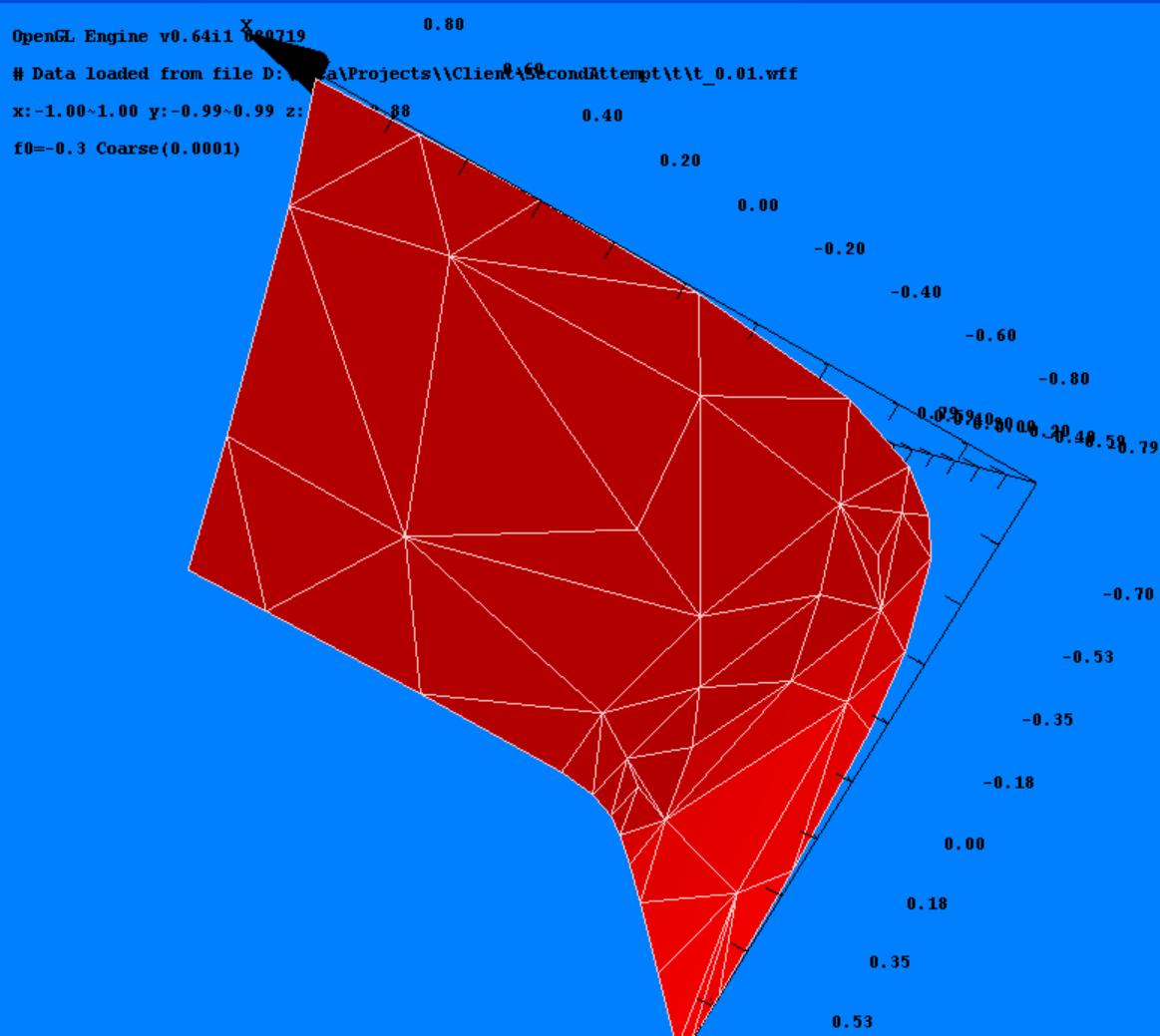
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



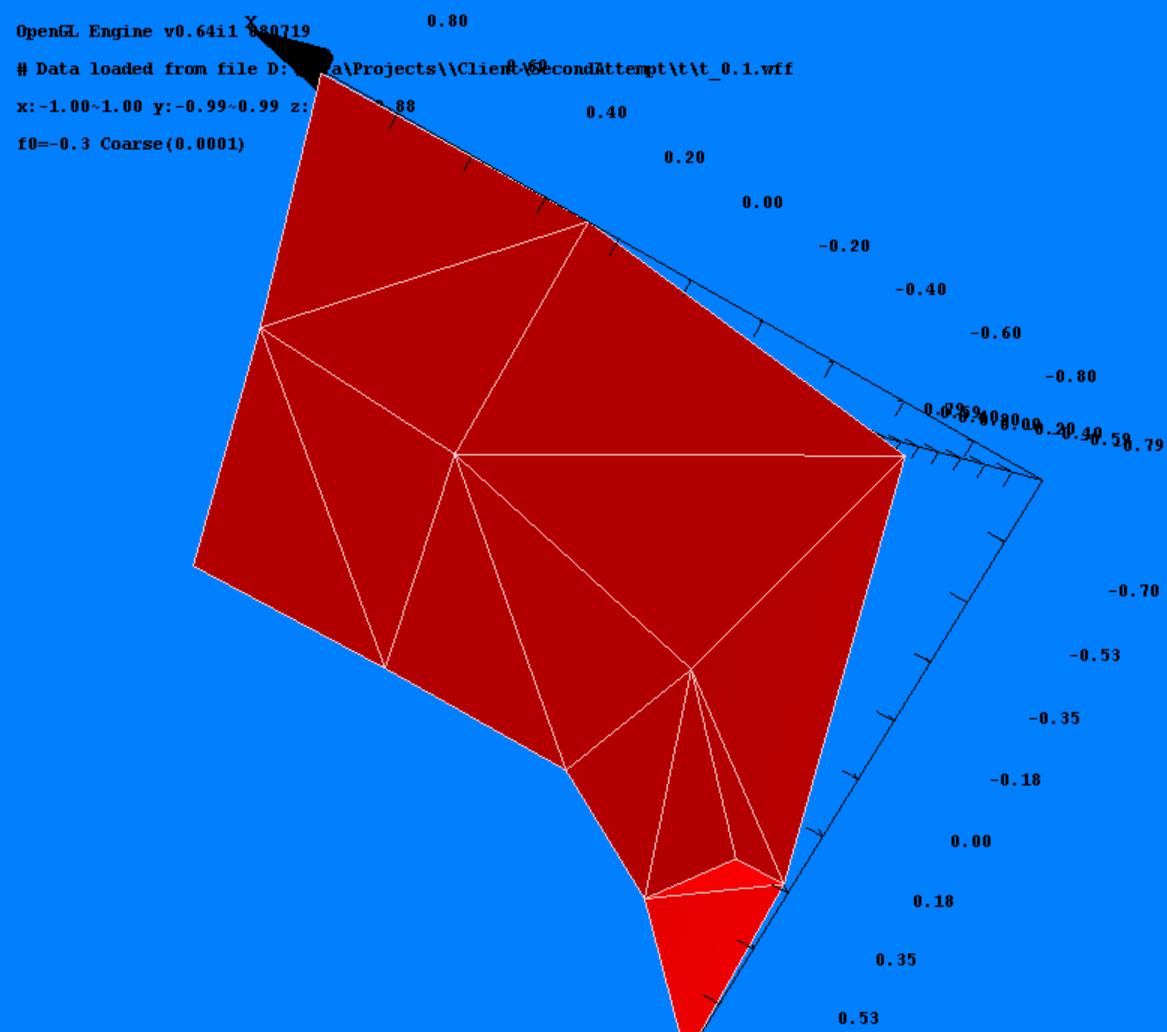
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



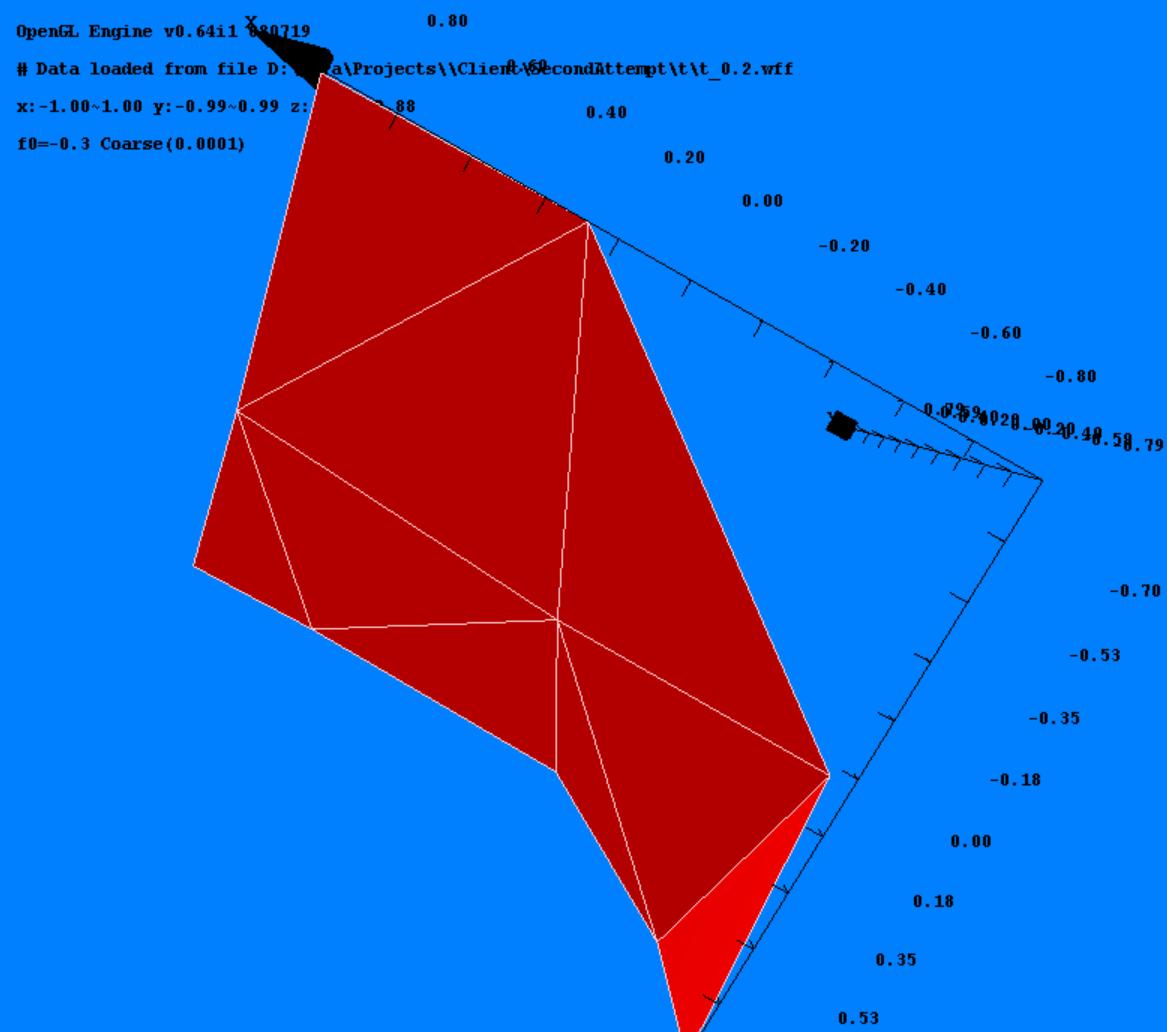
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



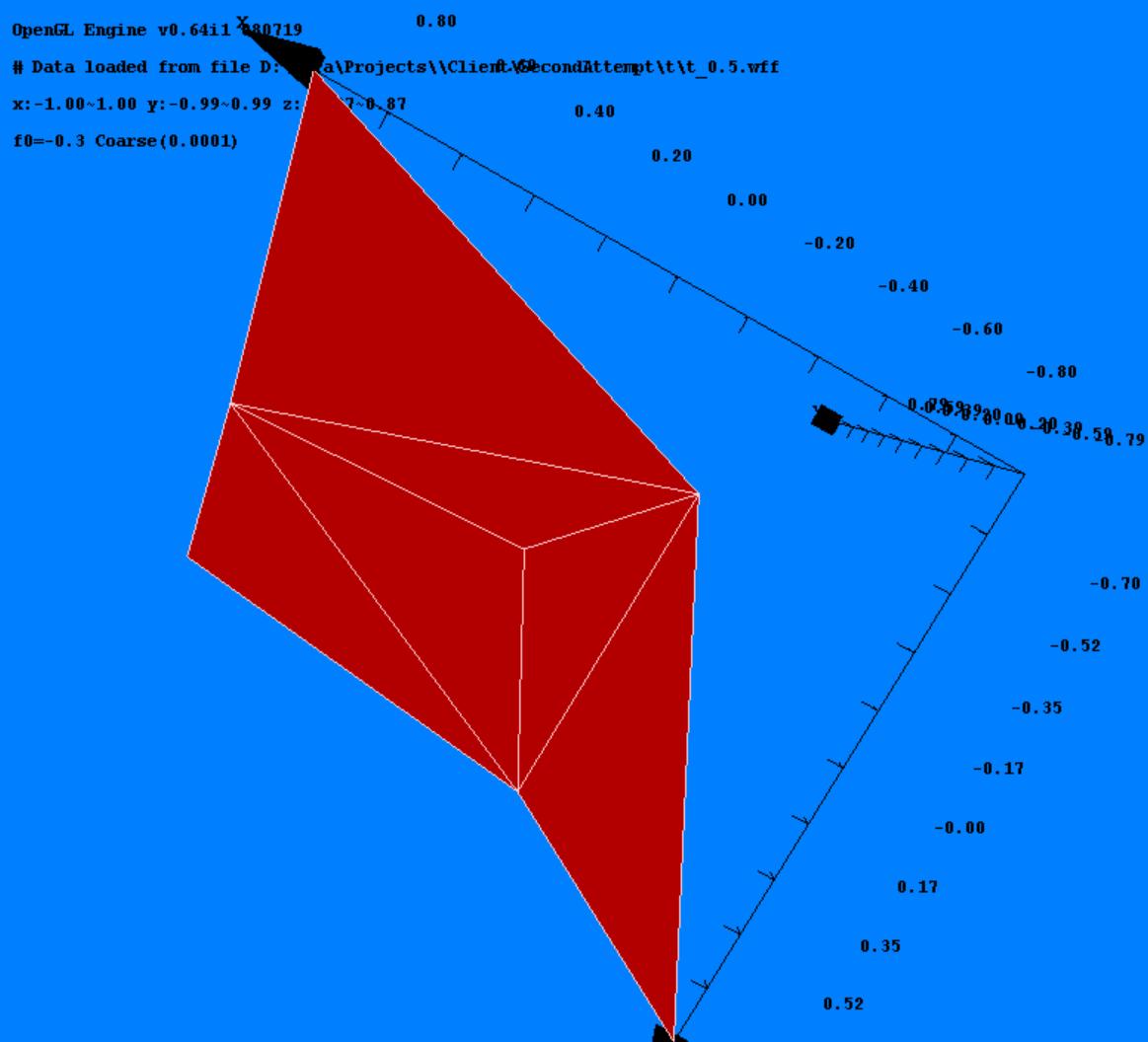
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



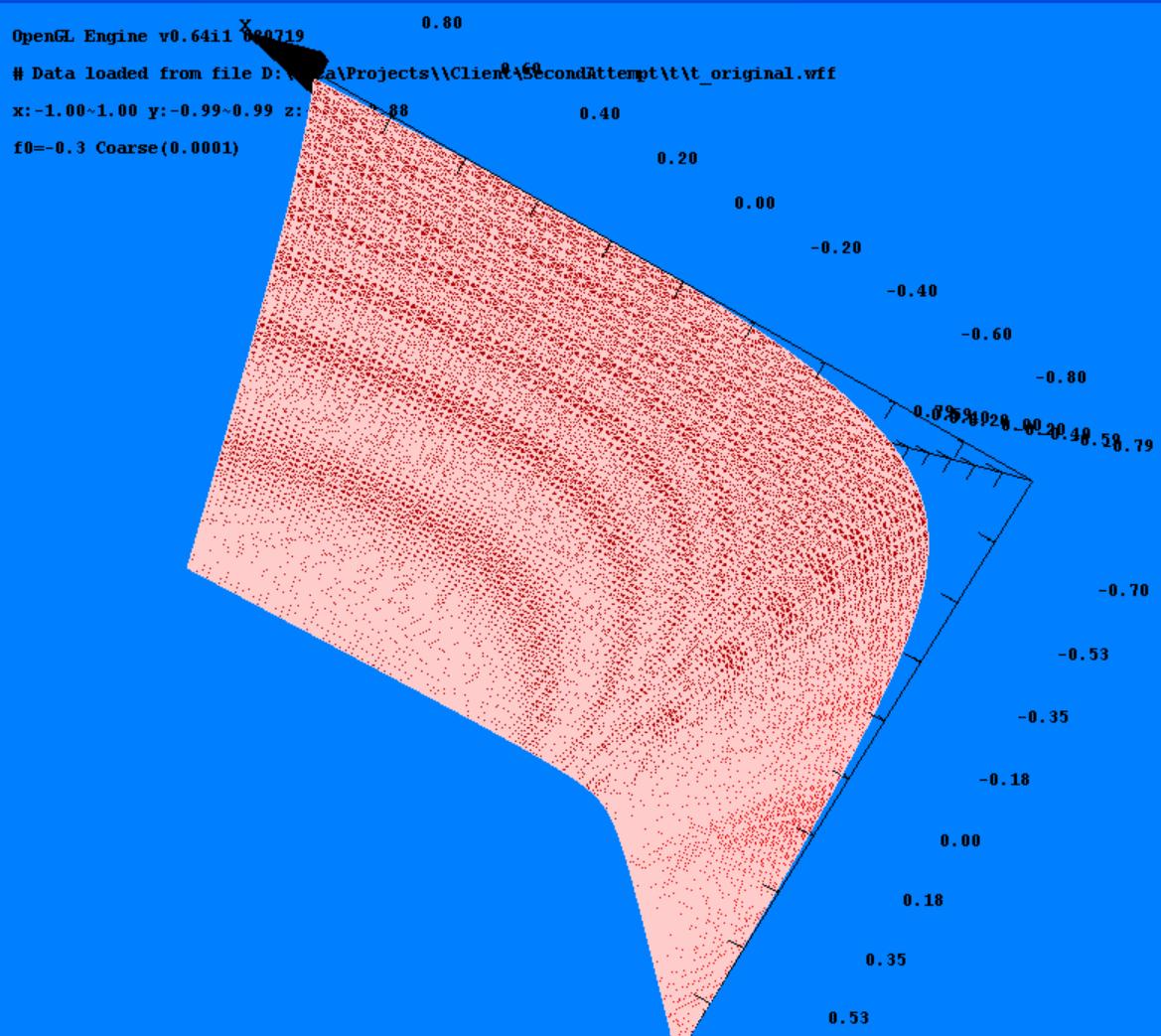
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



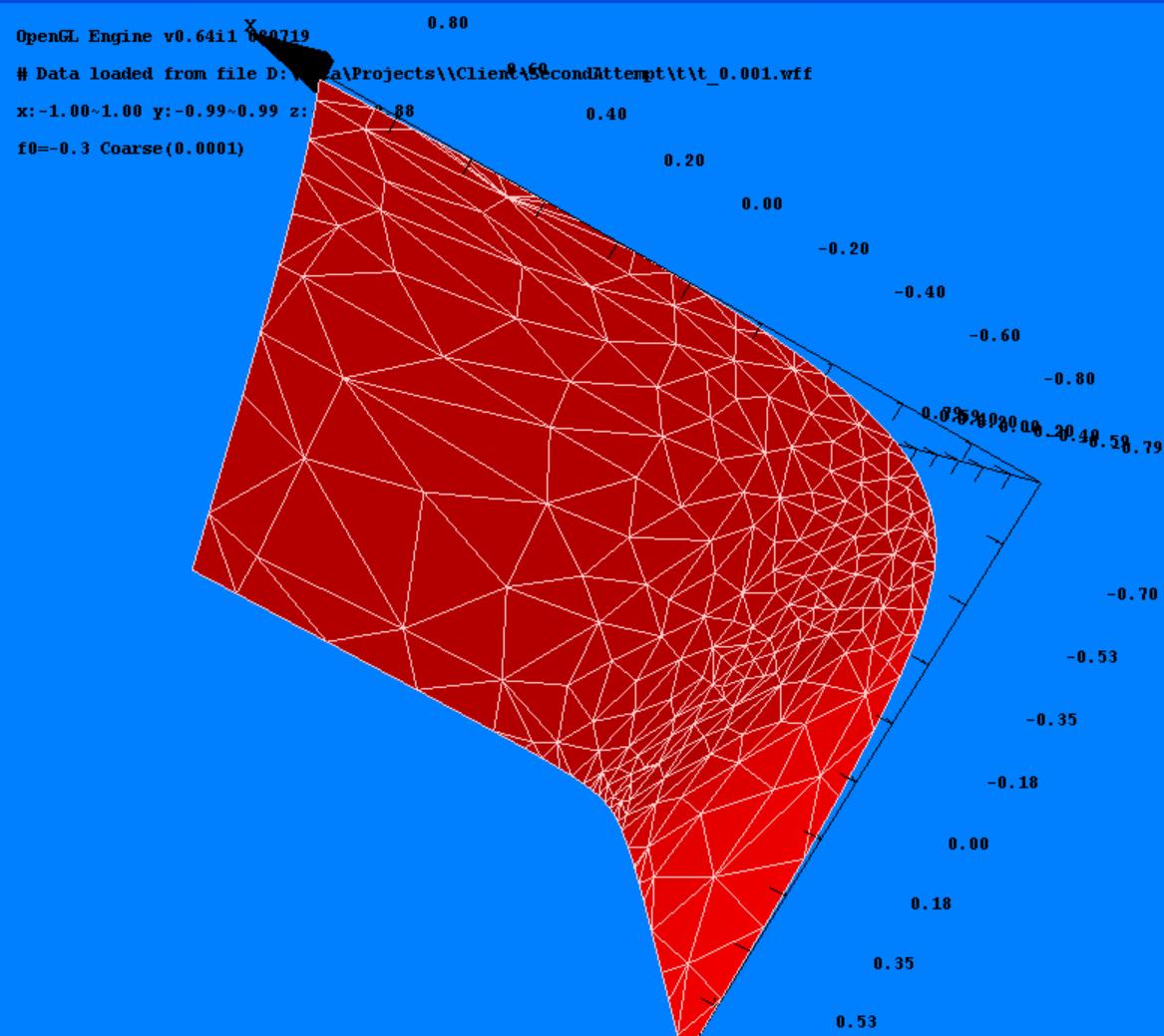
IMM RemoteViewer Client - Visualization window



пуск



IMM RemoteViewer Client - Visualization window

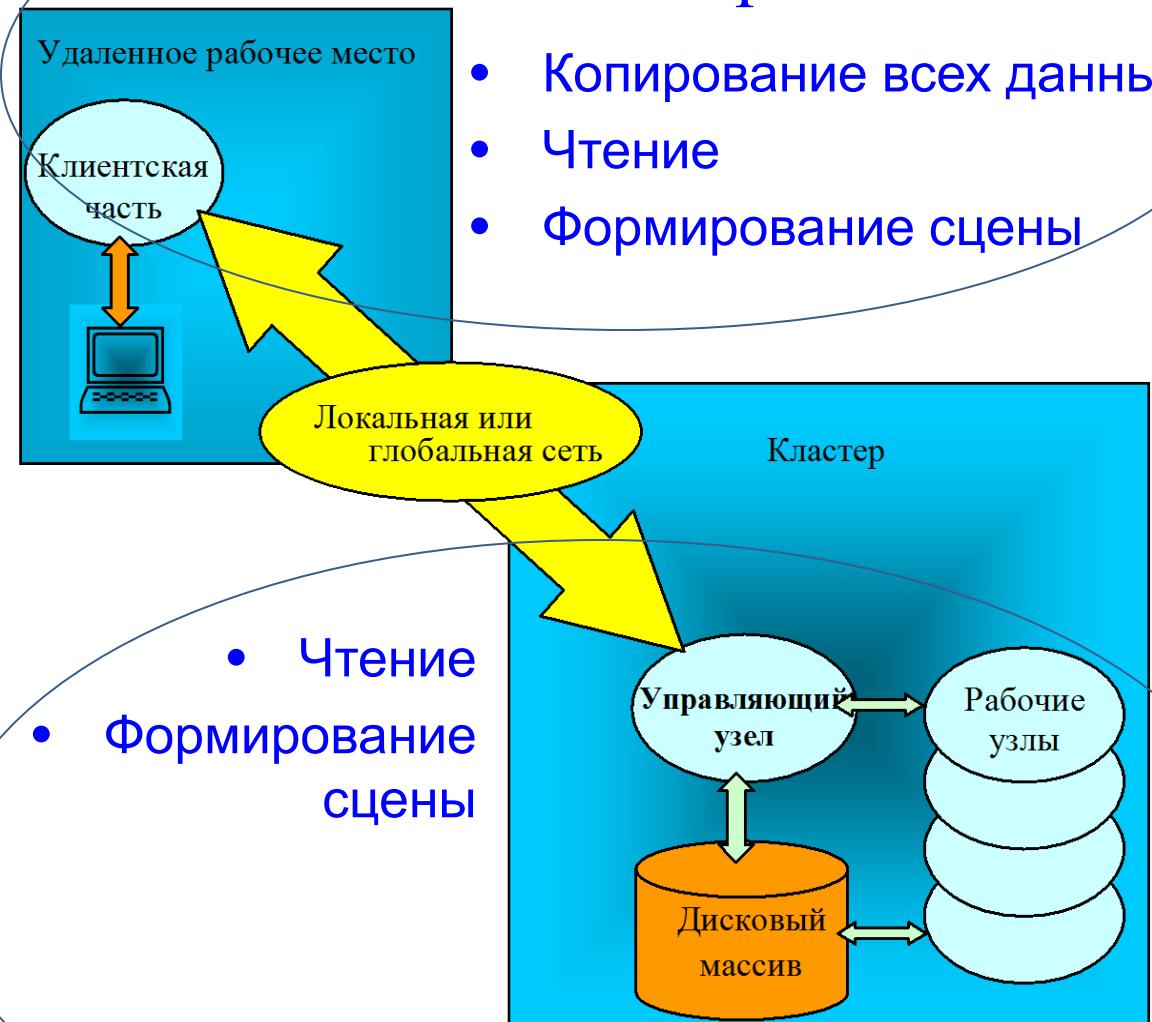


пуск



Аппроксимация и потоковая обработка

- Отображение
- On/Off line
- Расчет
- Запись результатов

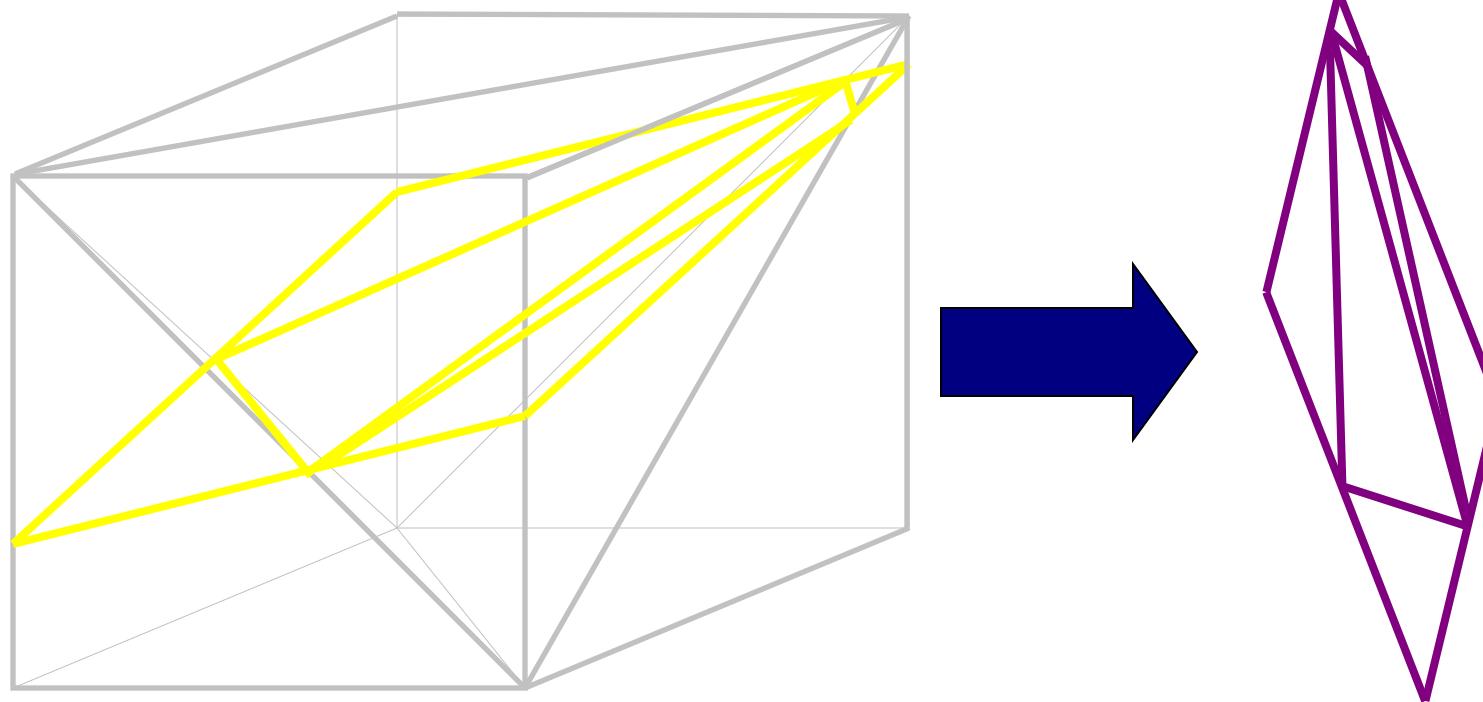


Клиент-серверная
технология

TecPlot
Origin
VISIT ParaView
EnSight OpenDX

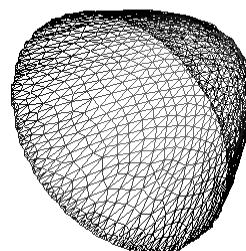
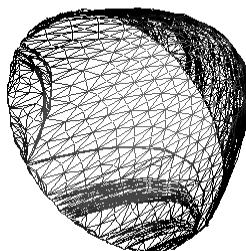
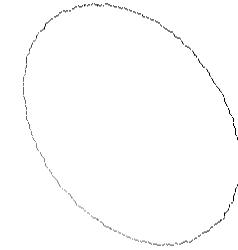
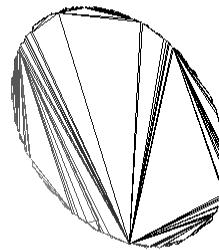
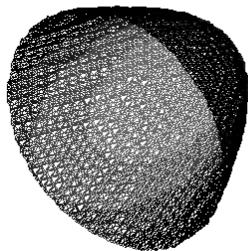
Сечение регулярной 3D сетки плоскостью

- В результате сечения регулярной кубической решетки получается фрагмент неструктурированной сетки



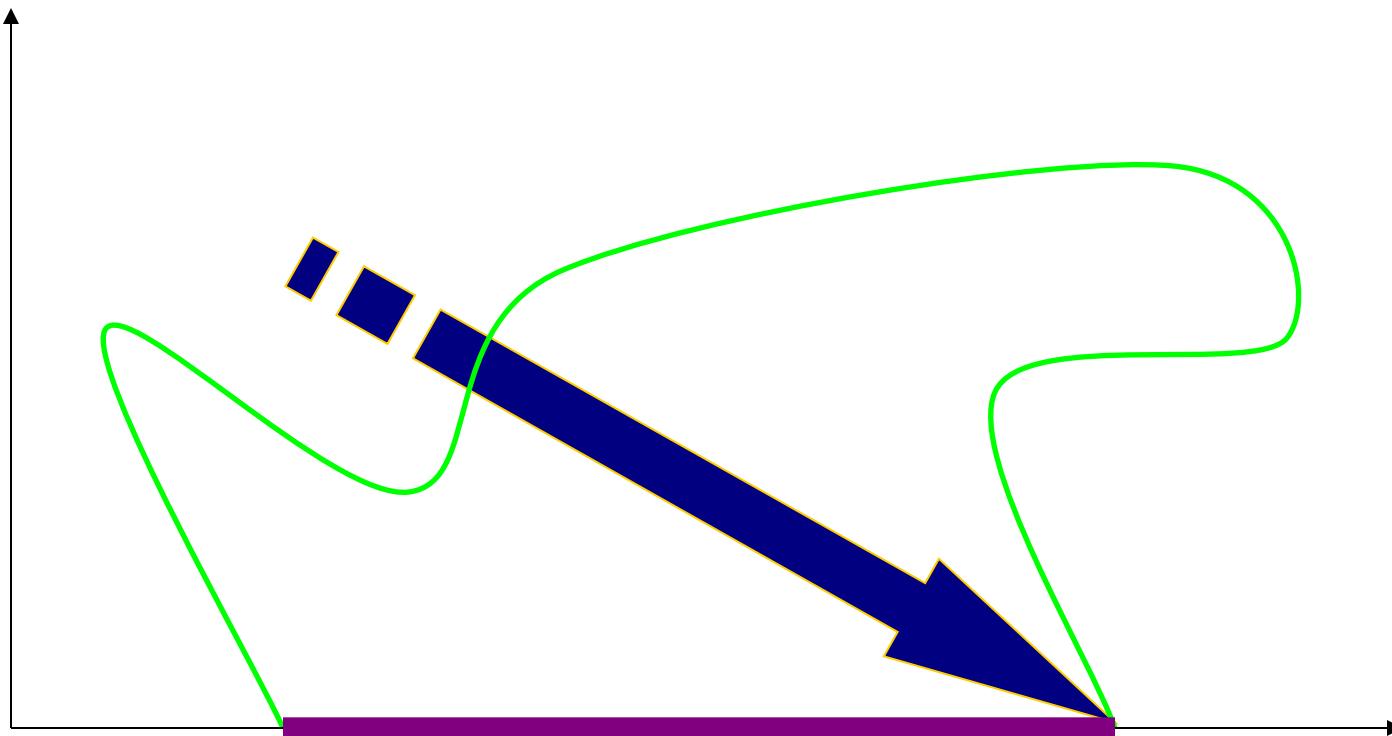
Аппроксимация триангулированных поверхностей

- Алгоритмы синтеза



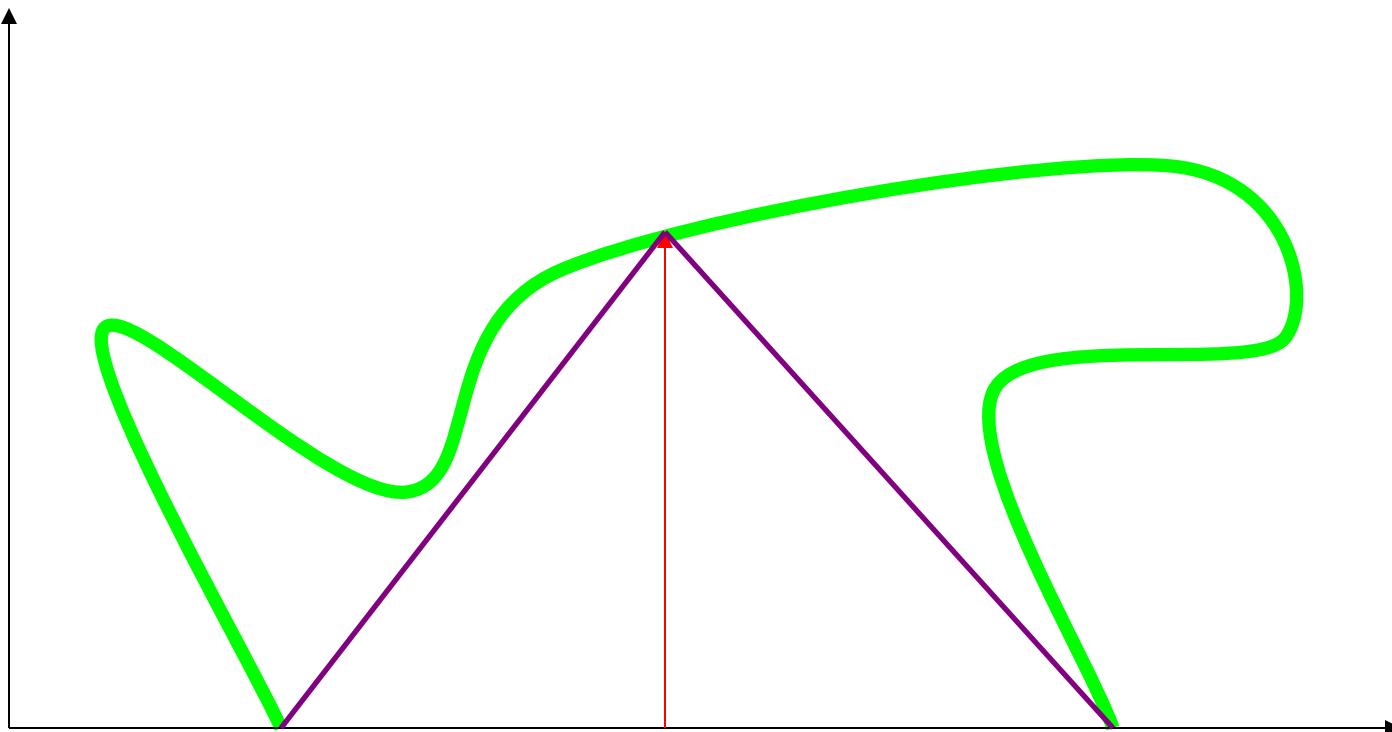
- Алгоритмы редуцирования

Начальная аппроксимация кривой



Аппроксимация кривой

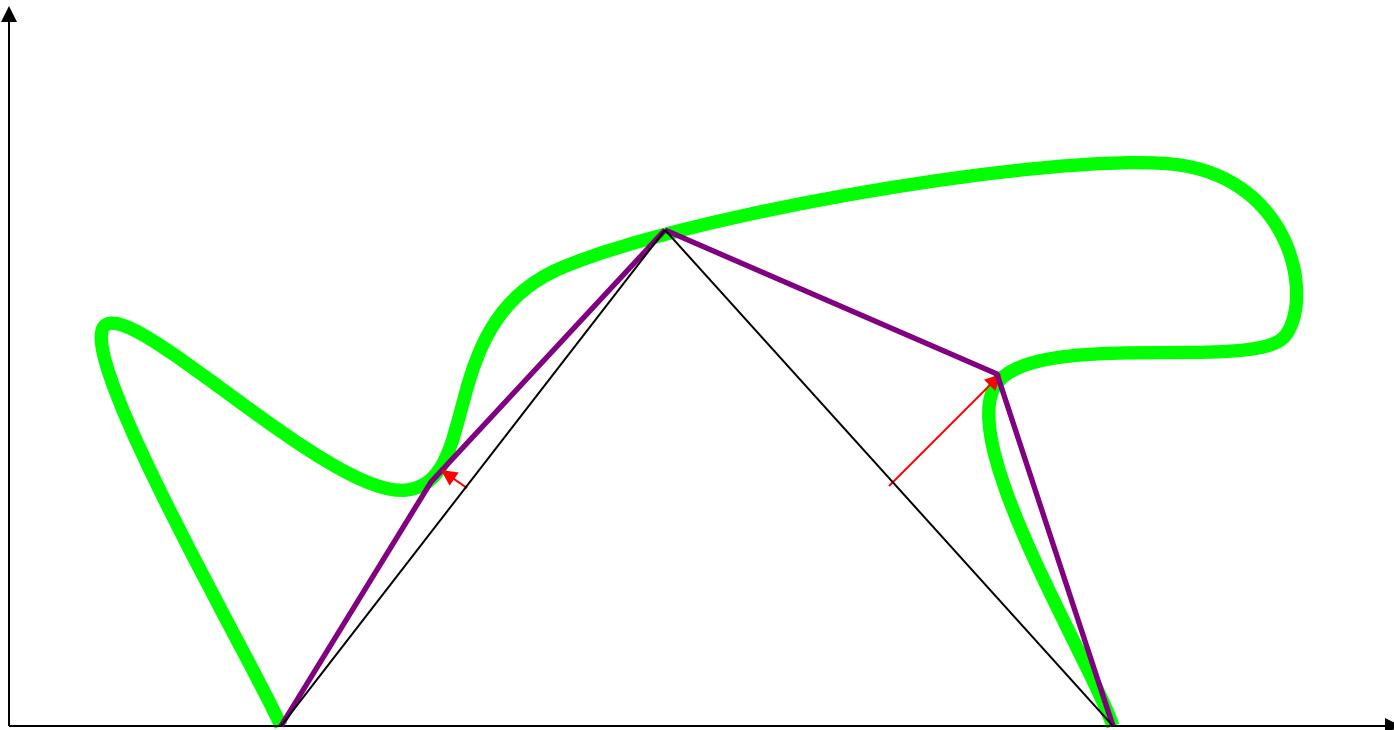
этап 2



1 вектор

Аппроксимация кривой

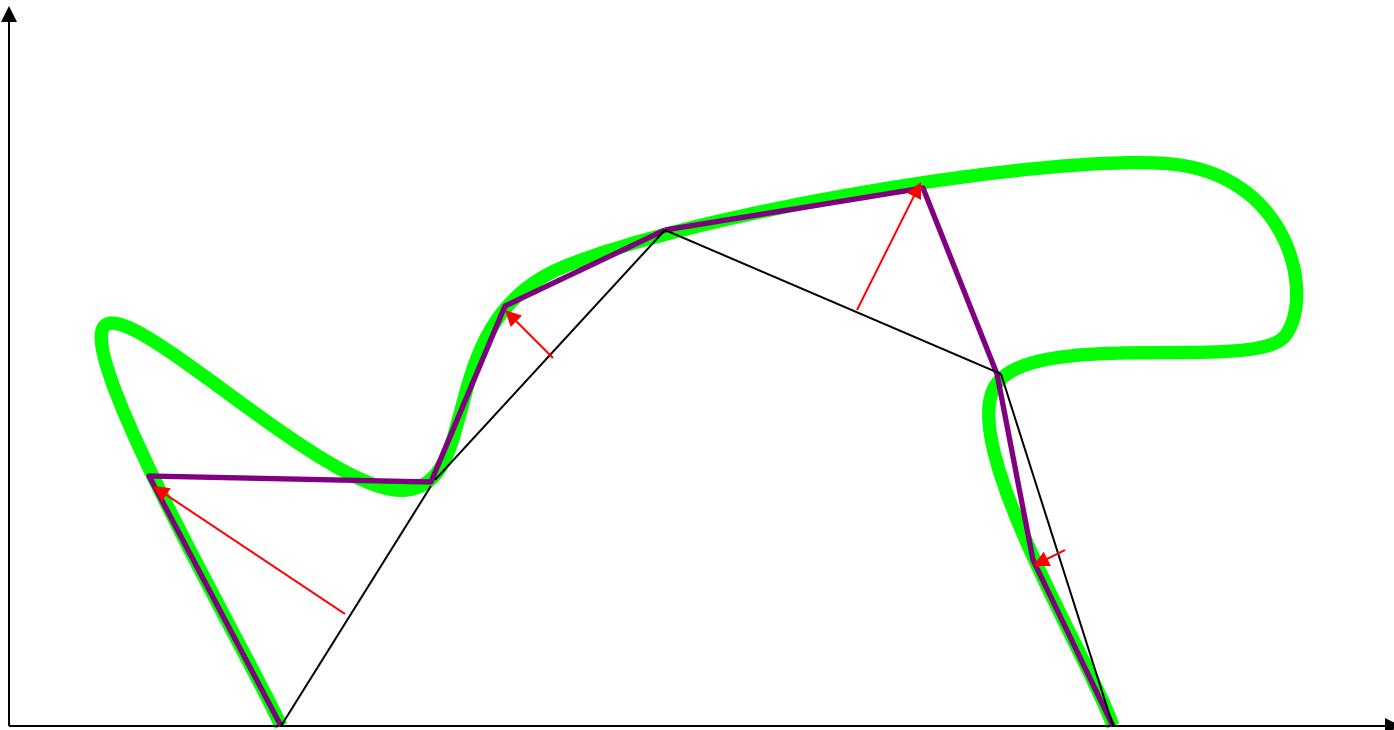
этап 3



3 вектора

Аппроксимация кривой

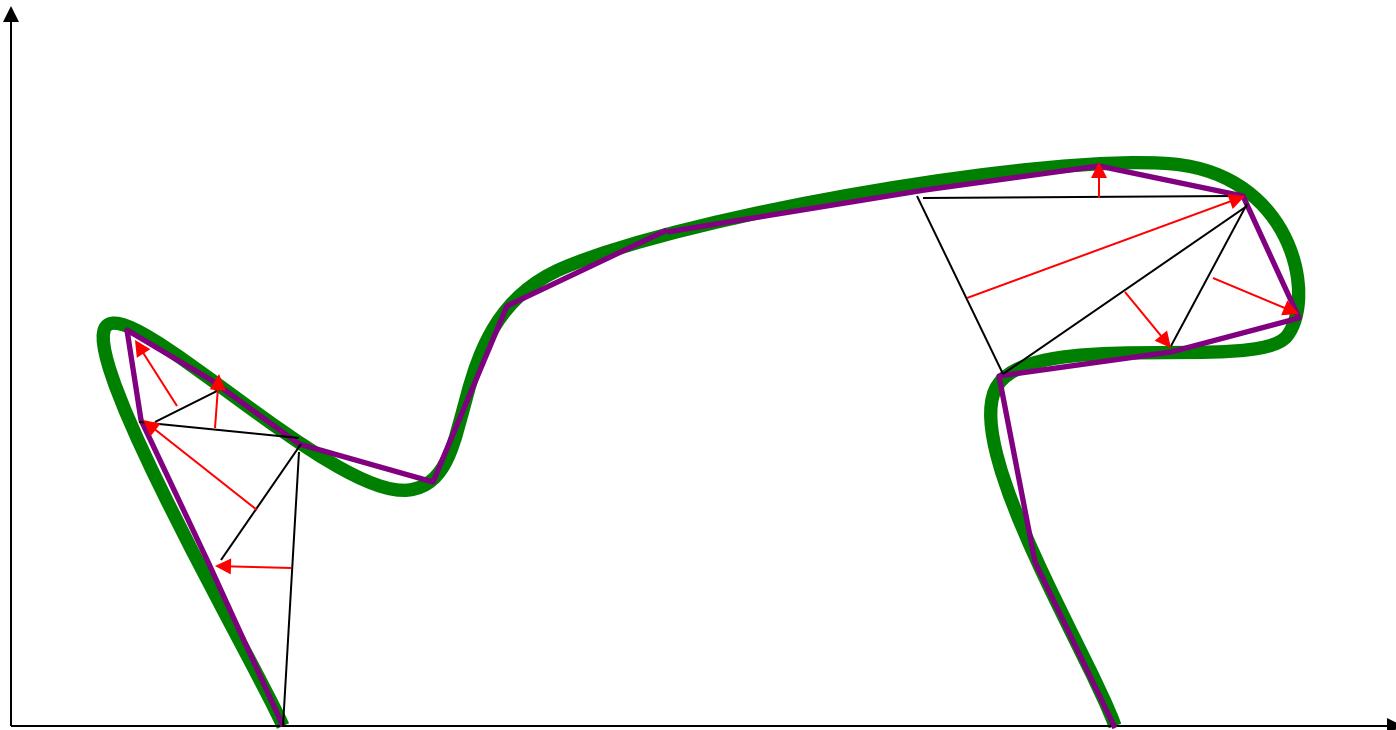
этап 4



7 векторов

Аппроксимация кривой

этап 5

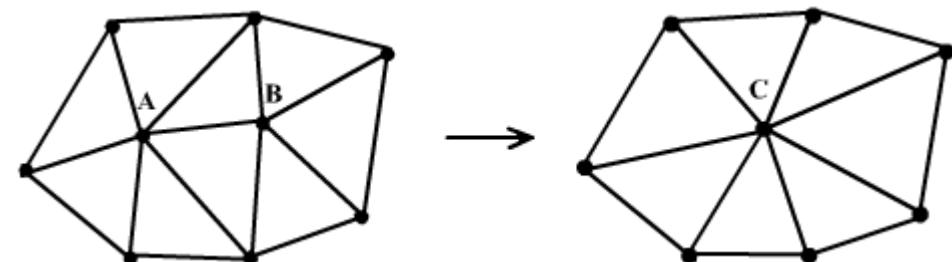


15 векторов

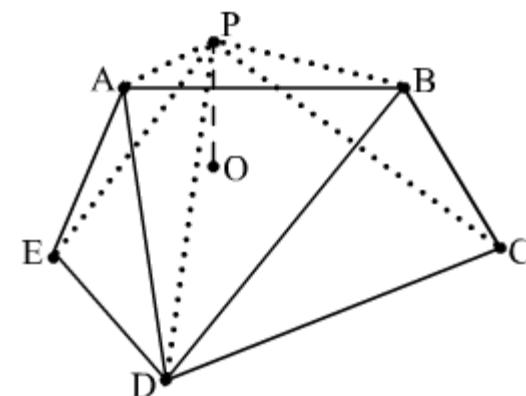


Методы редуцирования

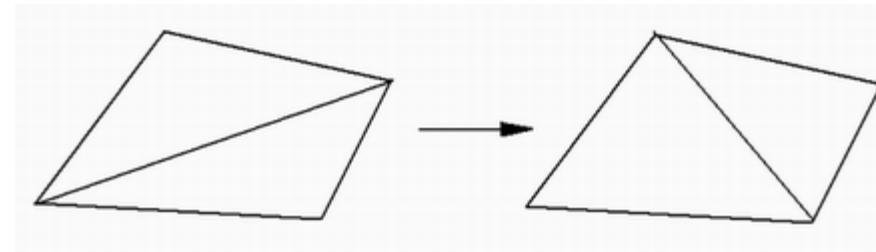
Удаление ребра



Удаление точки

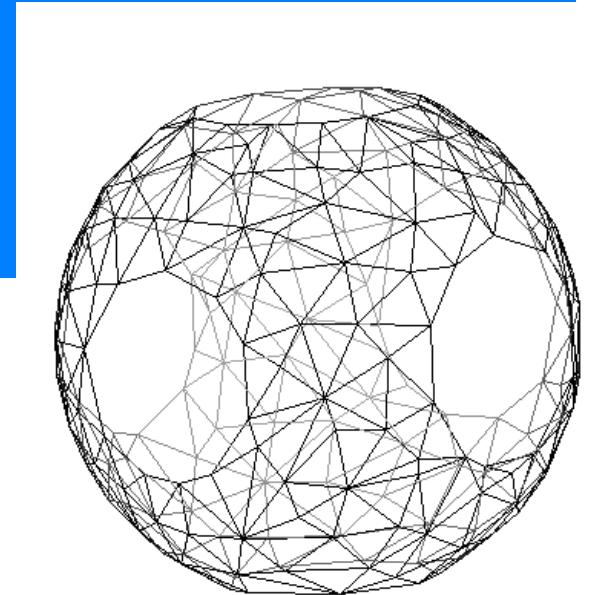
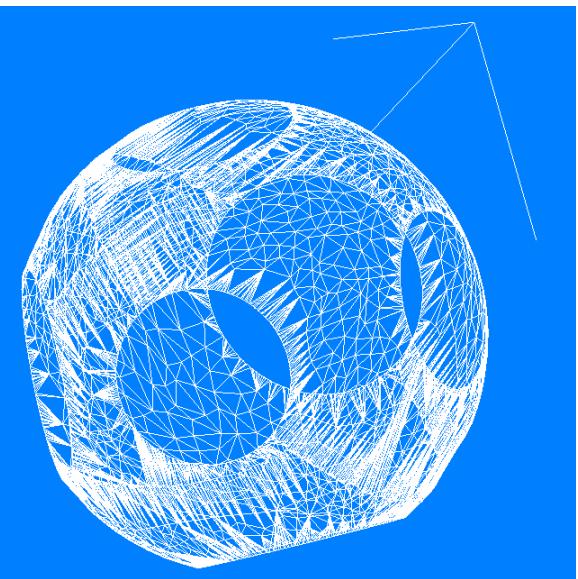
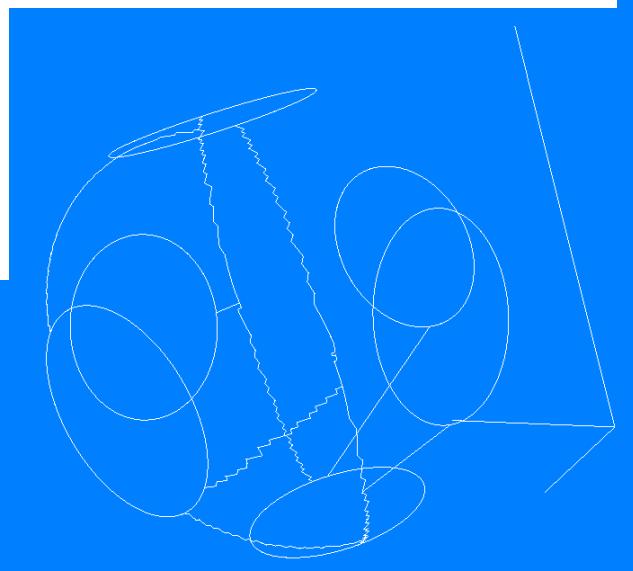
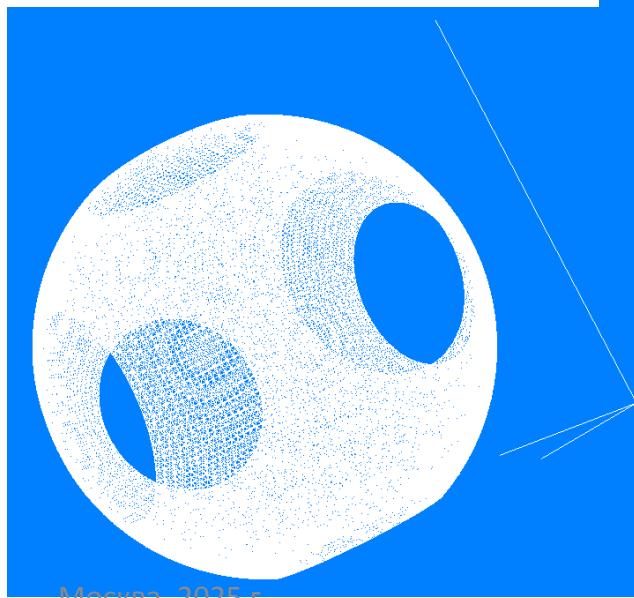


Уточнение топологии





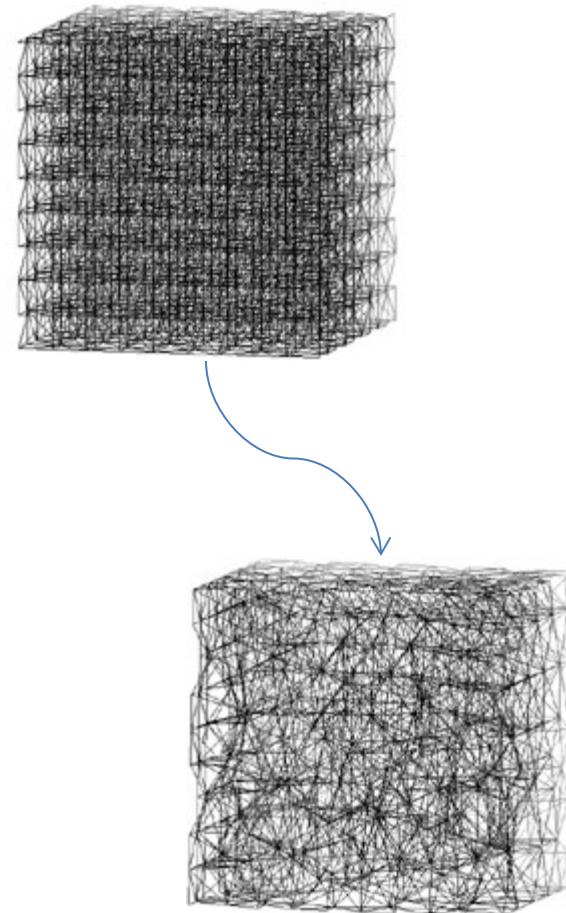
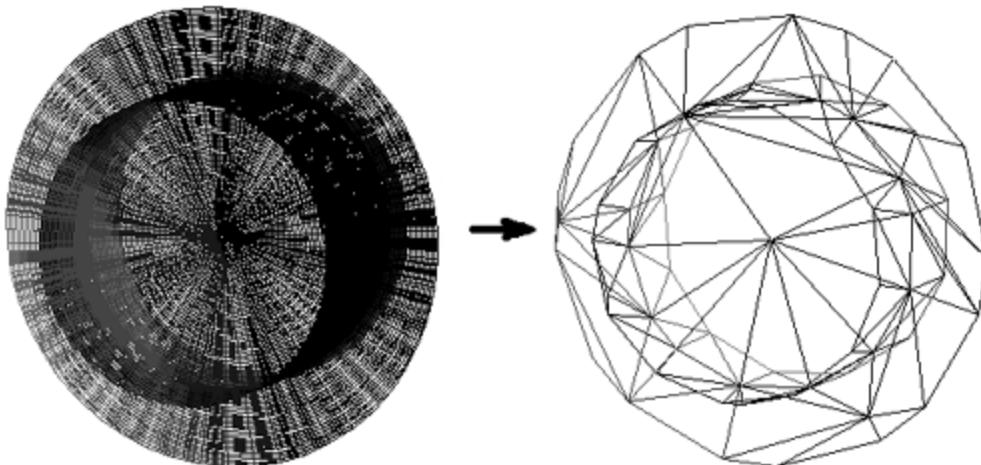
Аппроксимация изоповерхностей



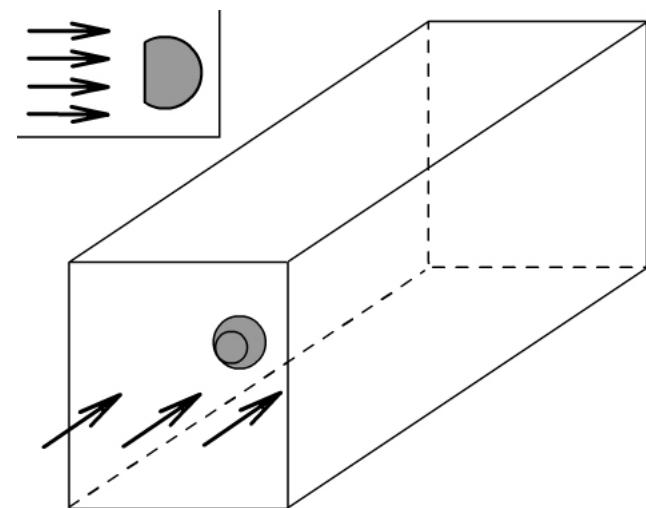
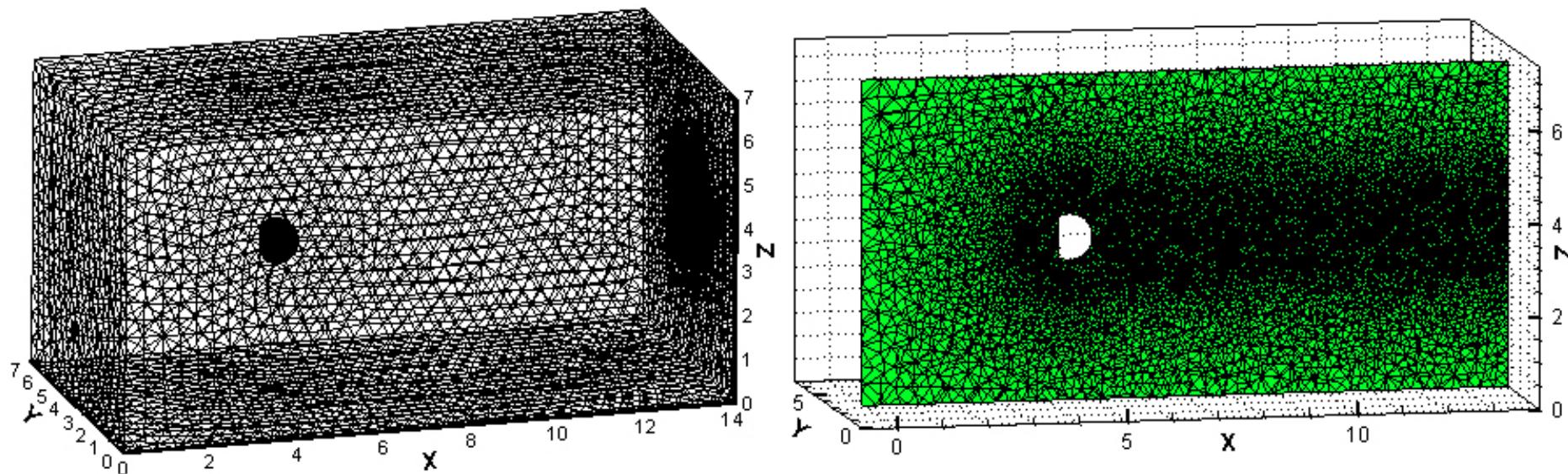
Москва, 2025 г.

Изоповерхности

Ошибка аппроксимации 5%

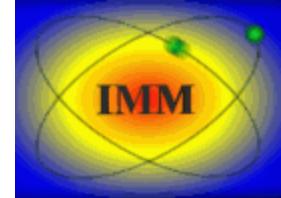


Расчетная сетка



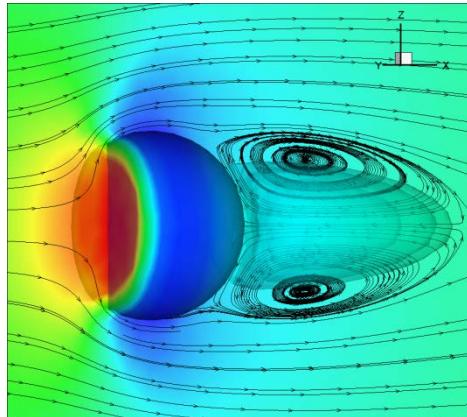


Моделирование обтекания тел сферической формы



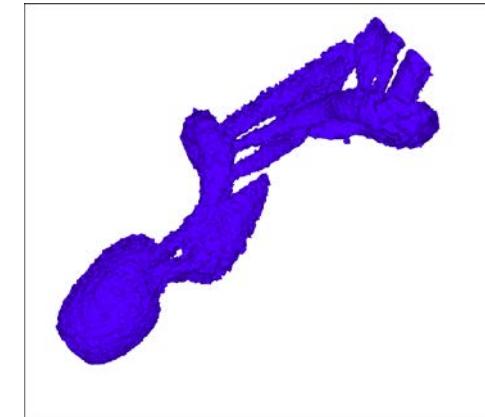
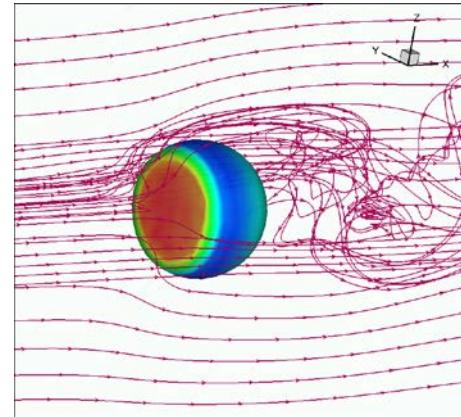
Стационарное обтекание скошенной сферы

$M = 0.8$ $Re = 100$

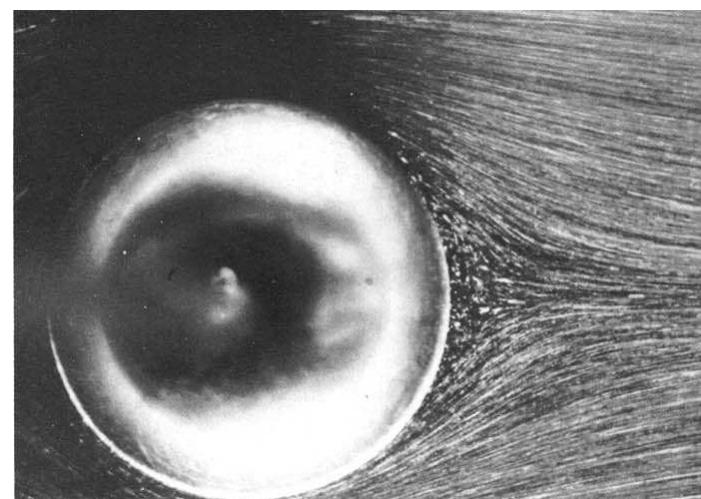
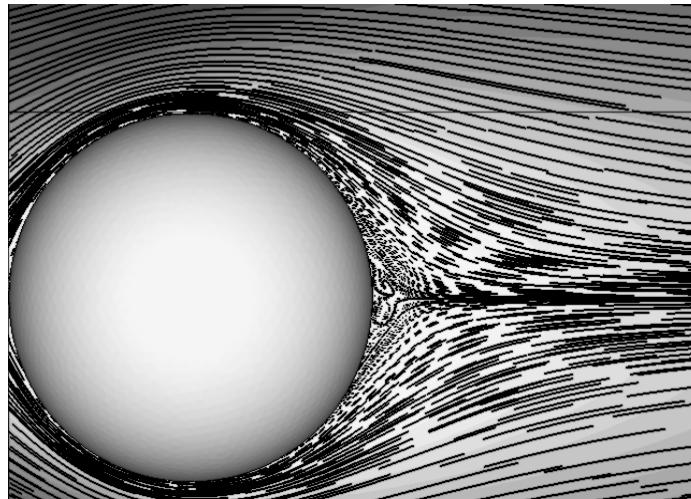


Нестационарное обтекание скошенной сферы

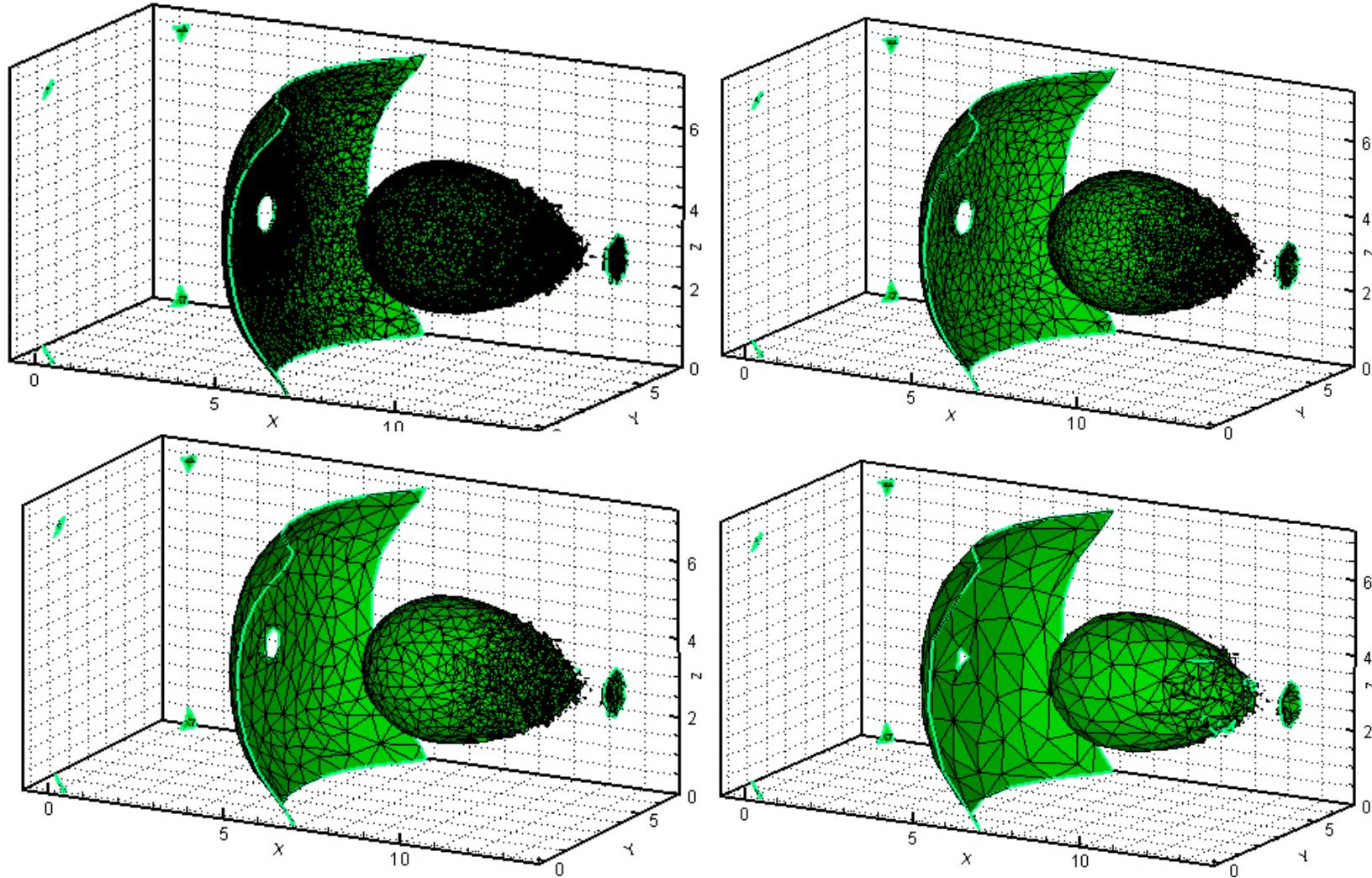
$M = 0.8$ $Re = 100000$



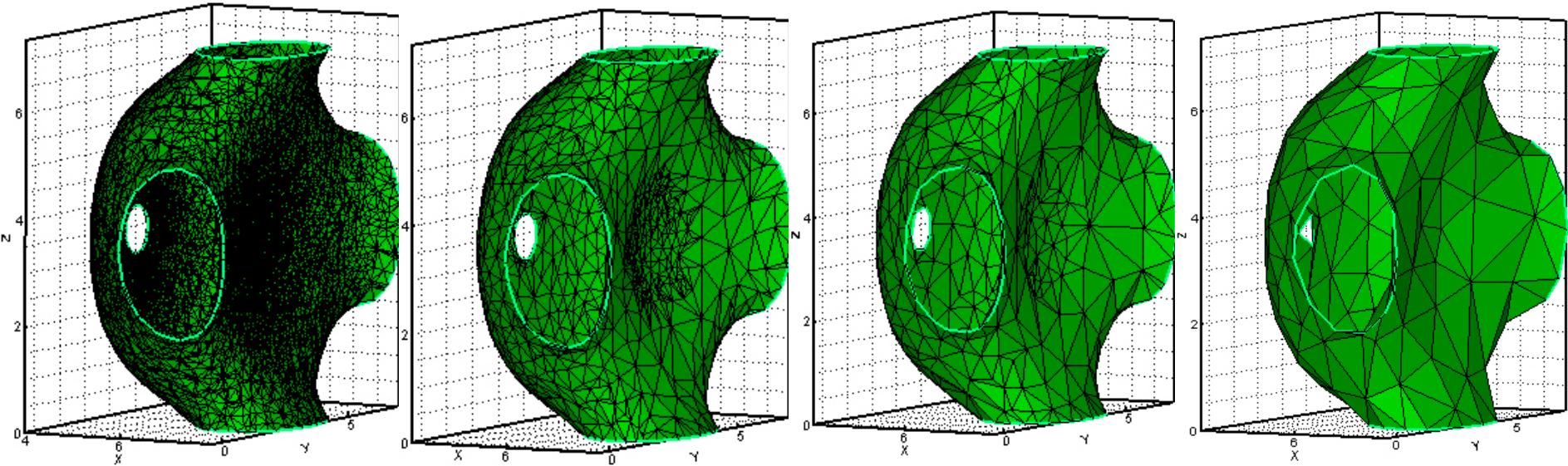
Стационарное обтекание сферы $M = 0.1$ $Re = 25$



Огрубление поверхностей

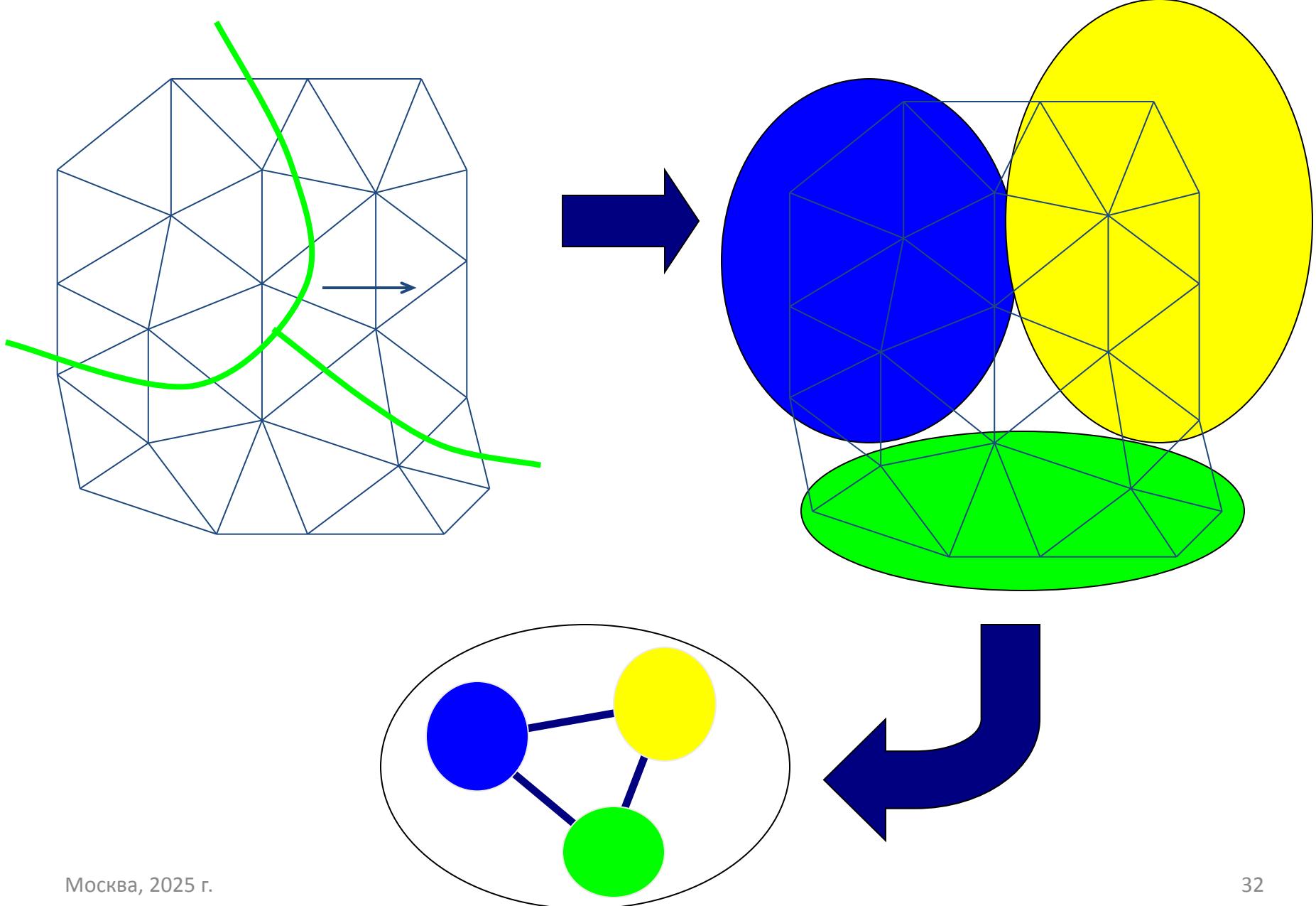


Огрубление поверхностей



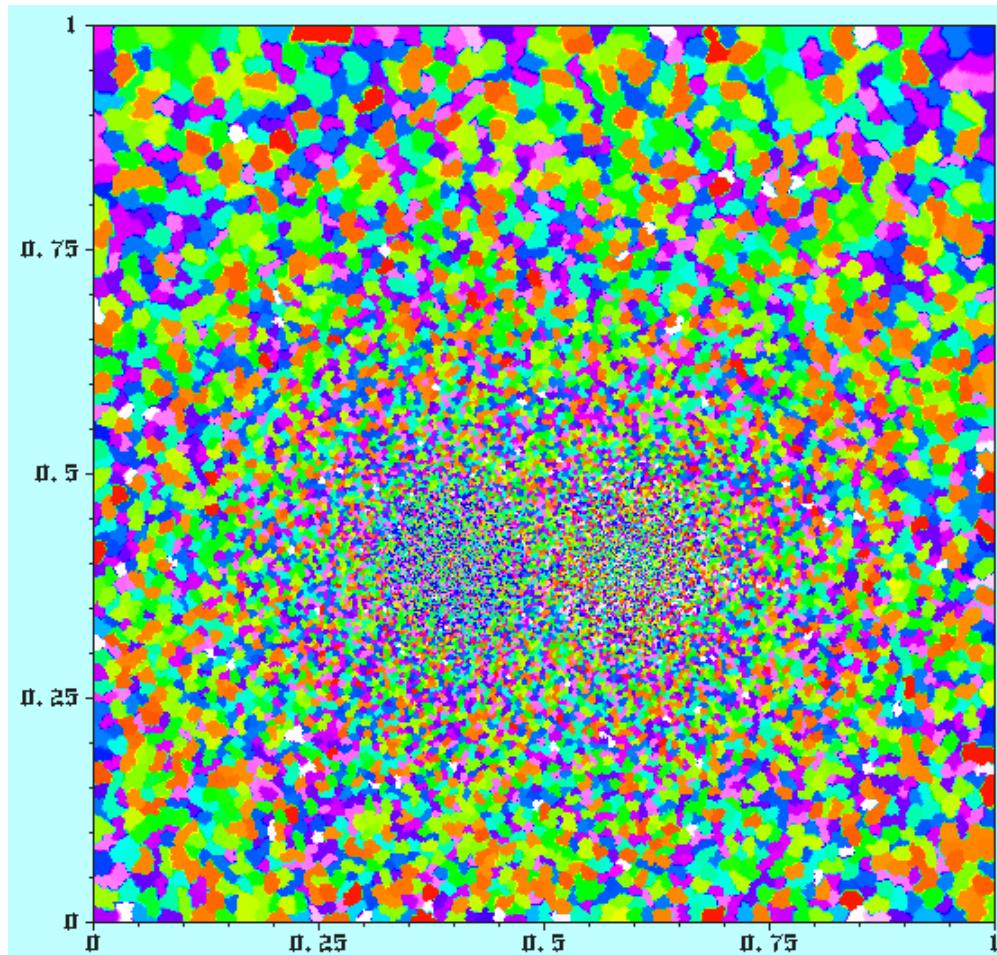
Ошибка	Количество точек	Количество треугольников	Коэффициент сжатия
0%	13800	27357	-
0,1%	1120	2117	12,9
0,2%	447	808	33,9
0,5%	175	304	90,0

Формирование макрографа



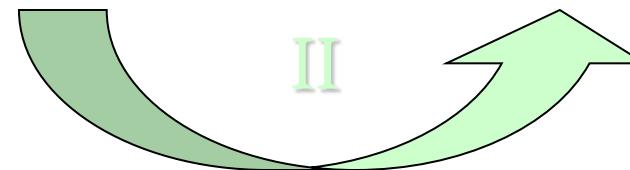
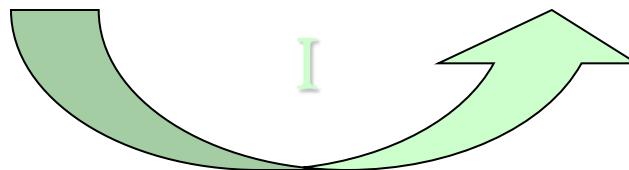
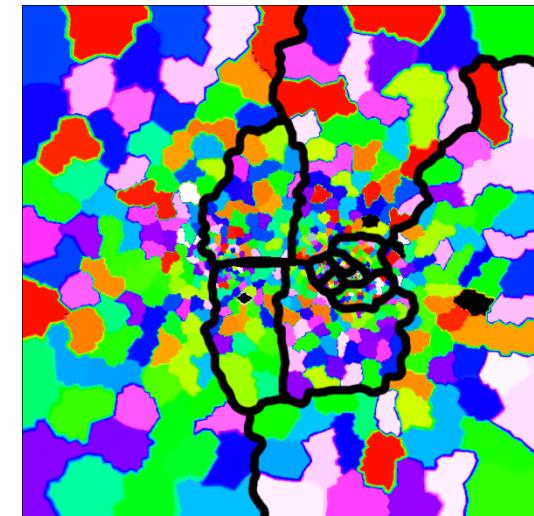
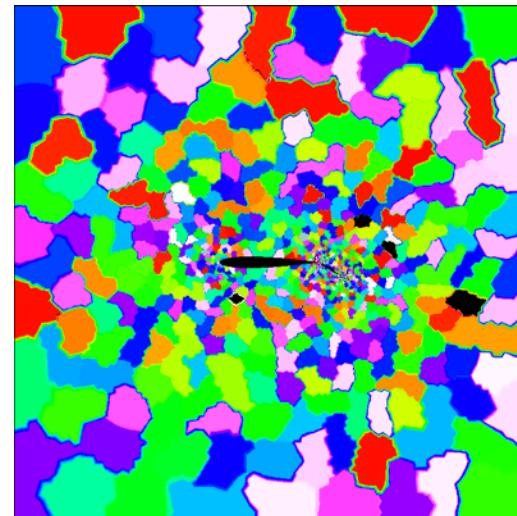
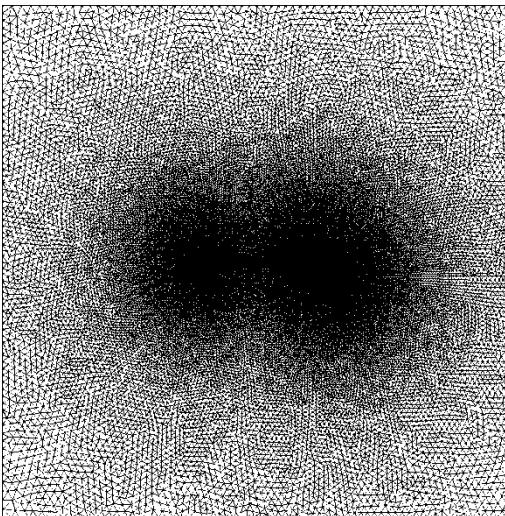
Сетка микродоменов

вес	ЧИСЛО	% ОТН. ЧИСЛО
12	3	0.01%
13	3	0.01%
14	15	0.03%
15	33	0.06%
16	228	0.44%
17	1 373	2.66%
18	5 433	10.54%
19	11 713	22.73%
20	14 218	27.59%
21	11 069	21.48%
22	5 737	11.13%
23	1 505	2.92%
24	192	0.37%
25	13	0.03%
26	2	0.00%
27	1	0.00%



51 538 микродомен

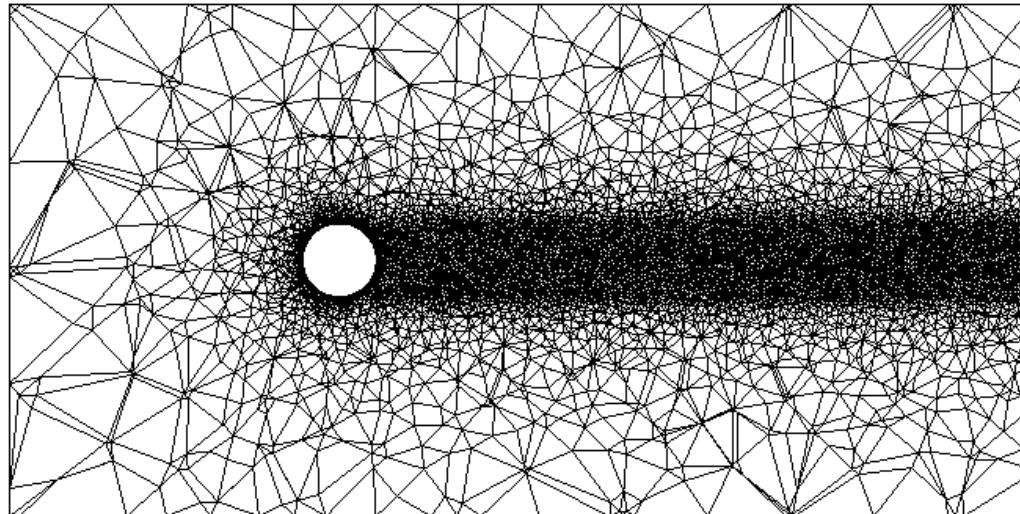
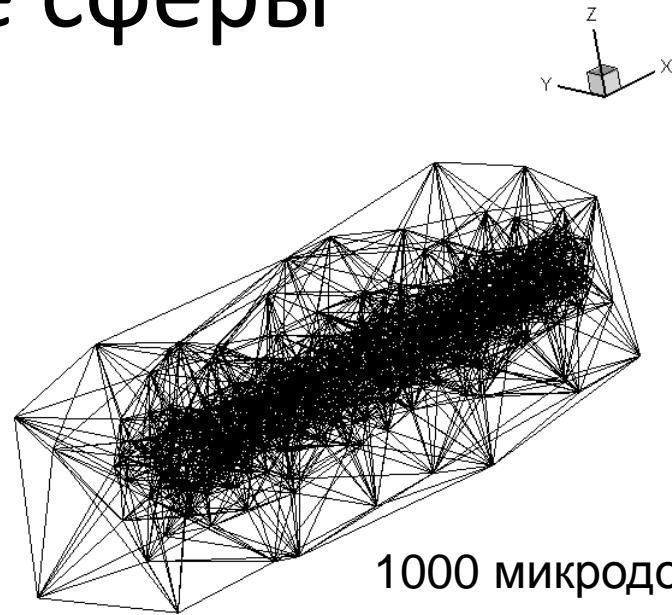
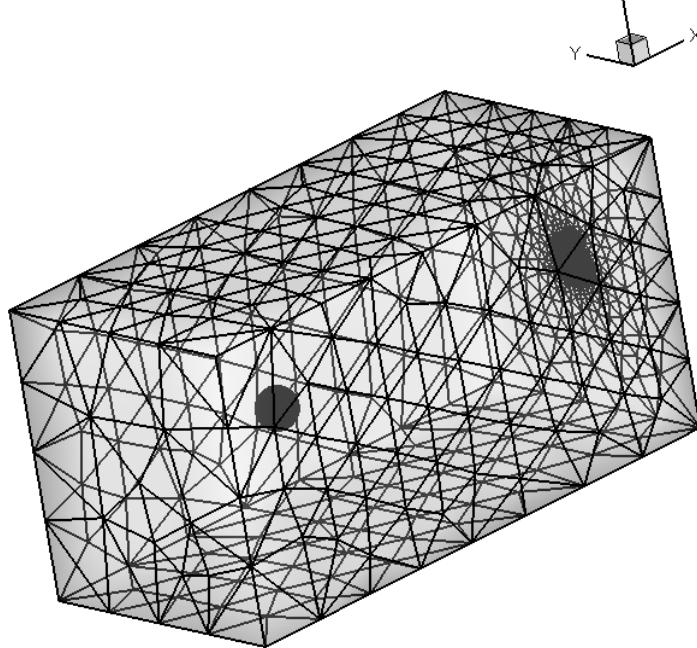
Двухуровневое разбиение



Сетка предварительно разбивается на большое число микродоменов, образующих макрограф

Вершины макрографа распределяются по процессорам

Обтекание сферы



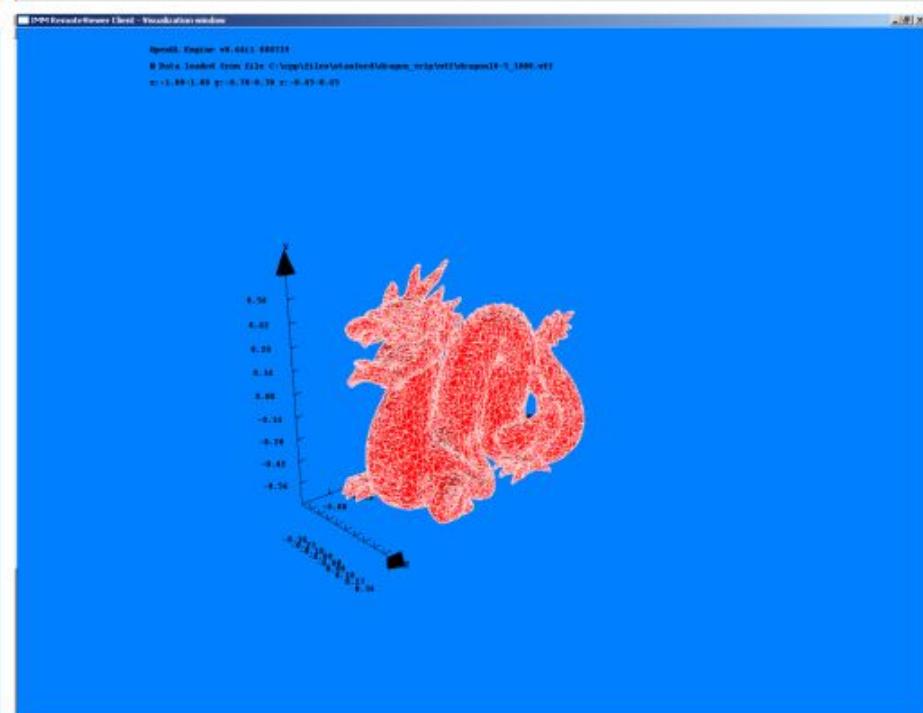
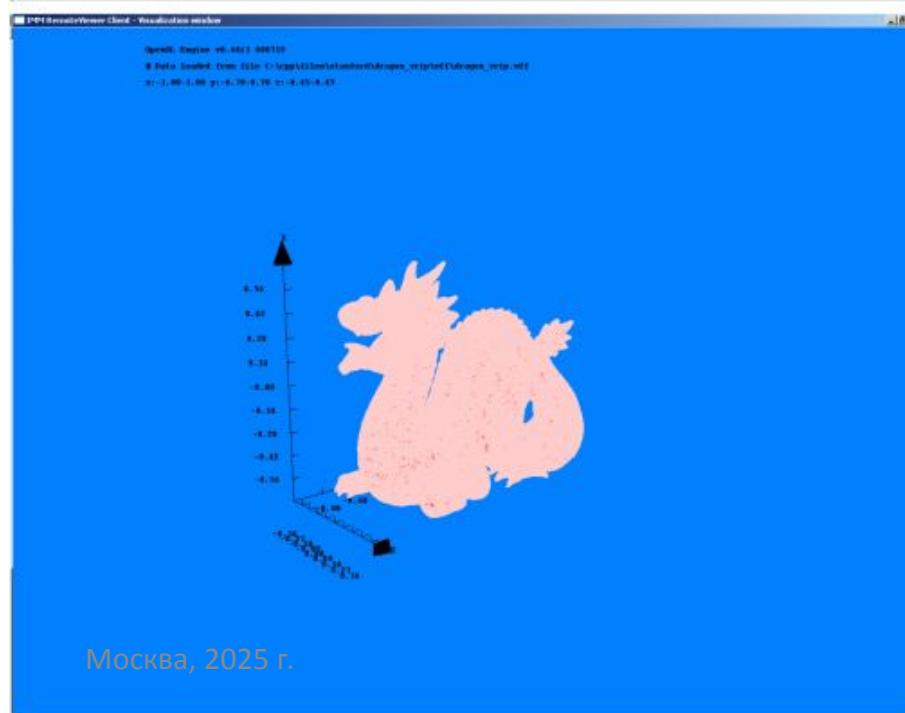
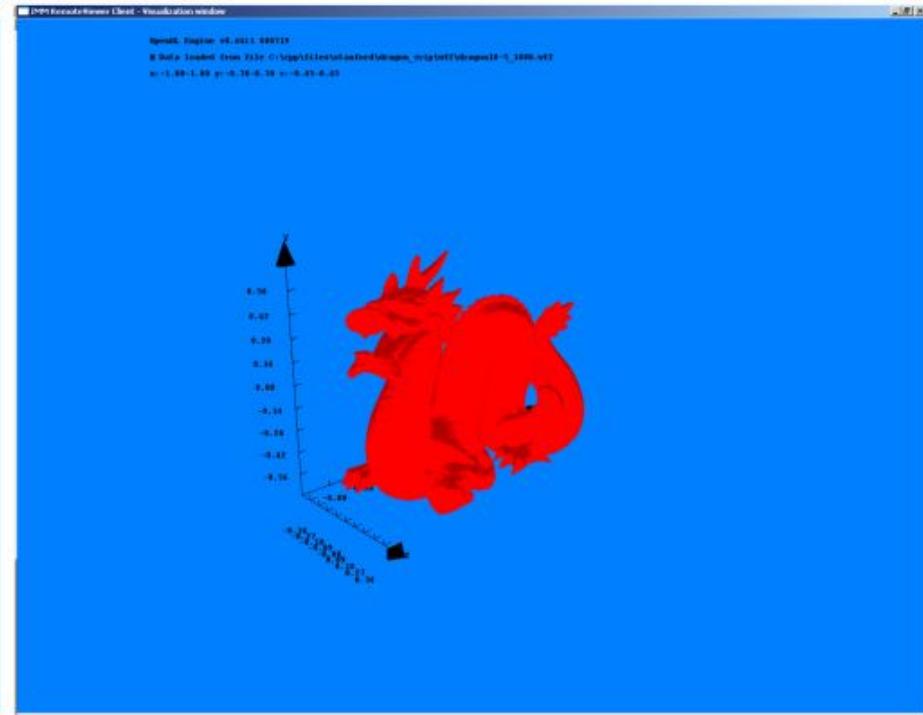
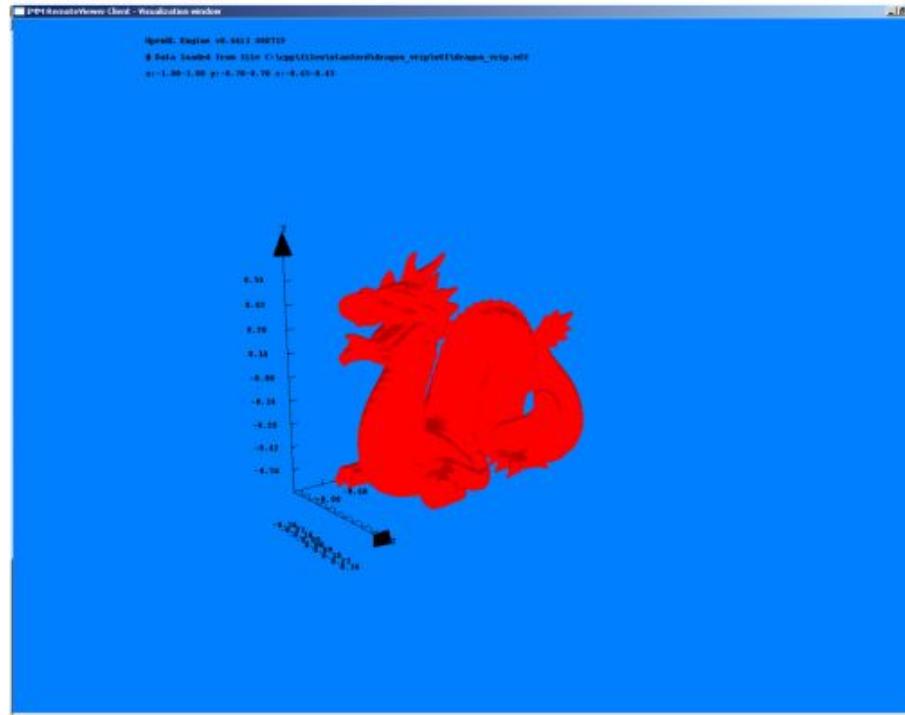
Потоковая обработка

40 процессоров, полное чтение файла

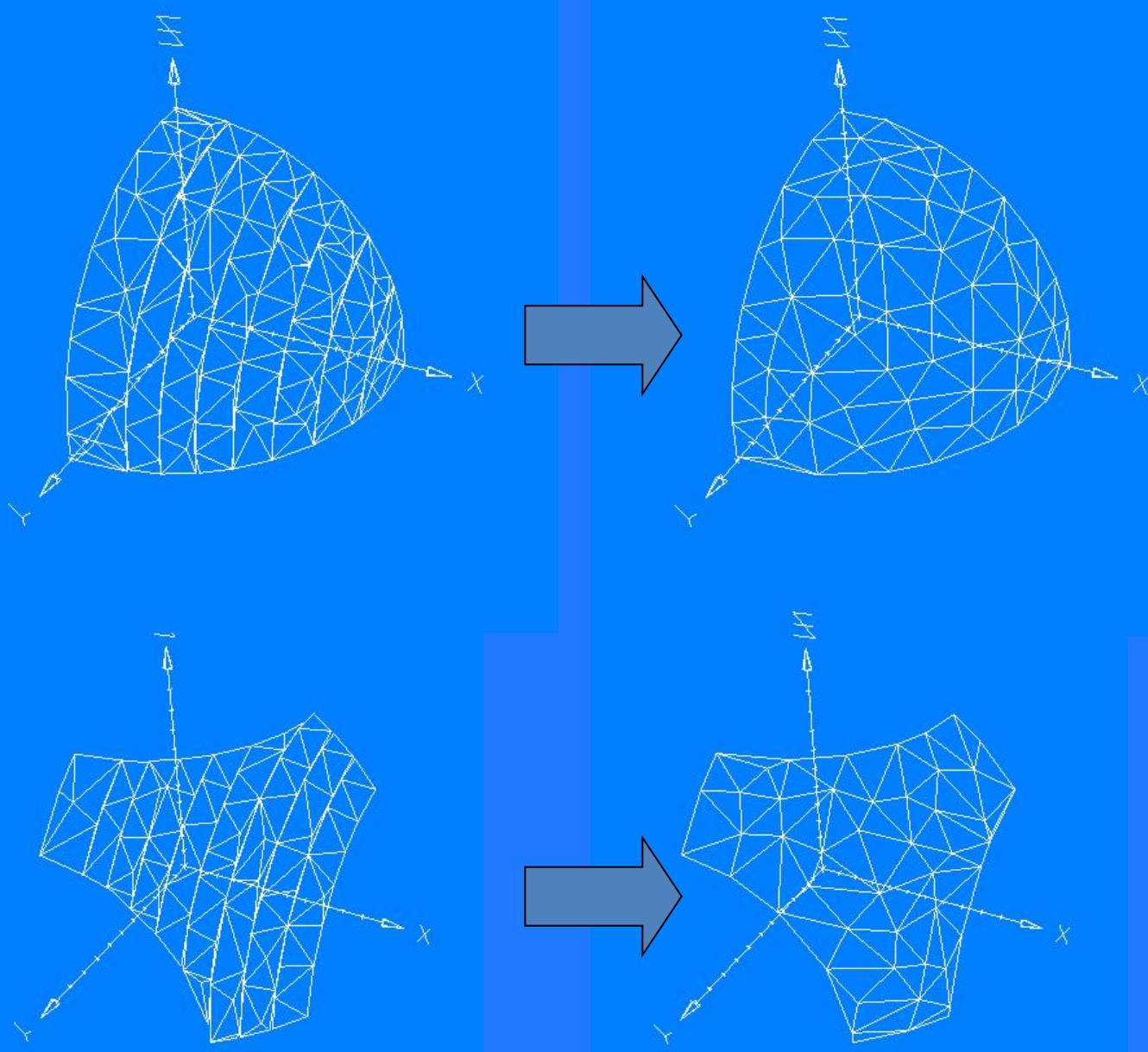
Кол-во исходных точек	Время чтения файлов данных, мин:сек	Общее время работы, мин:сек	Кол-во полученных точек
100 млн.	0:08	0:13	1 681
252 млн.	4:38	36:51	3 010
512 млн.	32:07	Не хватило памяти	-
1000 млн.	56:54	Не хватило памяти	-

40 процессоров, чтение фрагментов файла

Кол-во исходных точек регулярной сетки	Число фрагментов, на которые разбивался каждый файл	Общее время работы, мин:сек	Кол-во полученных точек изоповерхности
252 млн.	1	24:51	2 997
252 млн.	8	4:20	5 891
252 млн.	64	0:14	11 198
512 млн.	8	41:40	7 996
512 млн.	27	0:25	10 997
512 млн.	64	0:26	14 026
1000 млн.	27	0:45	16 171
1000 млн.	8	2:34	13 218

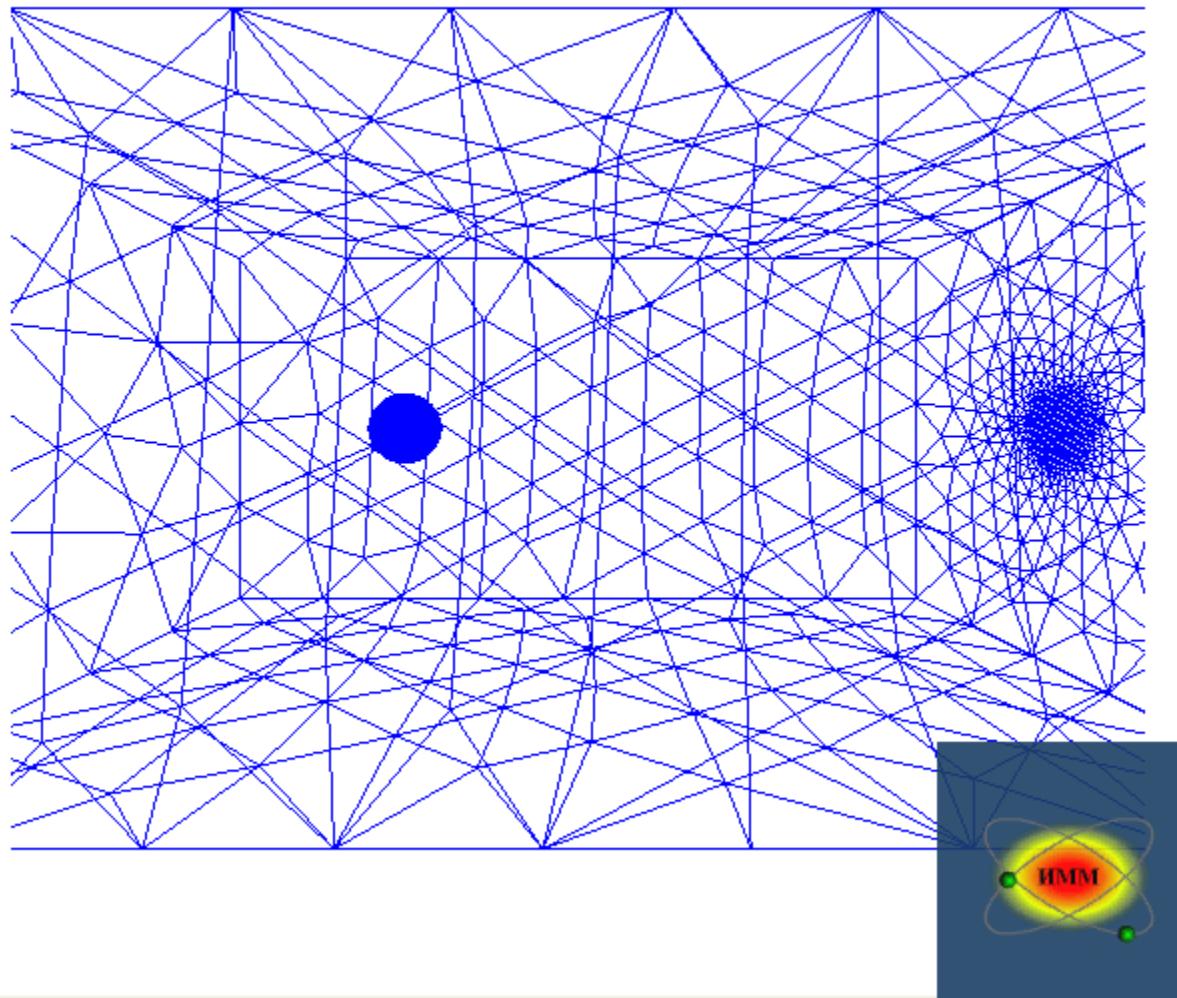


Москва, 2025 г.

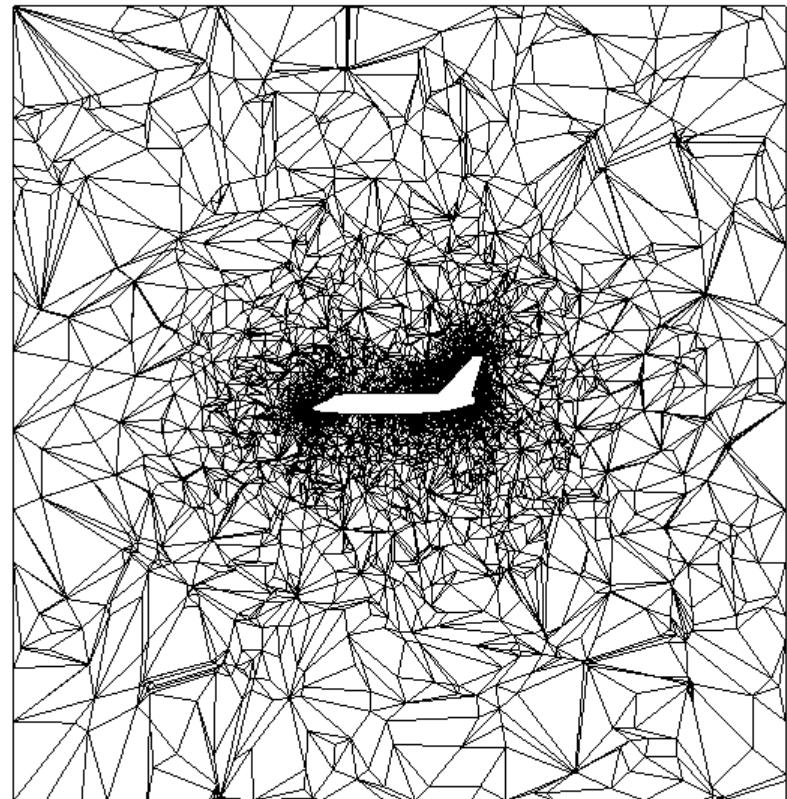
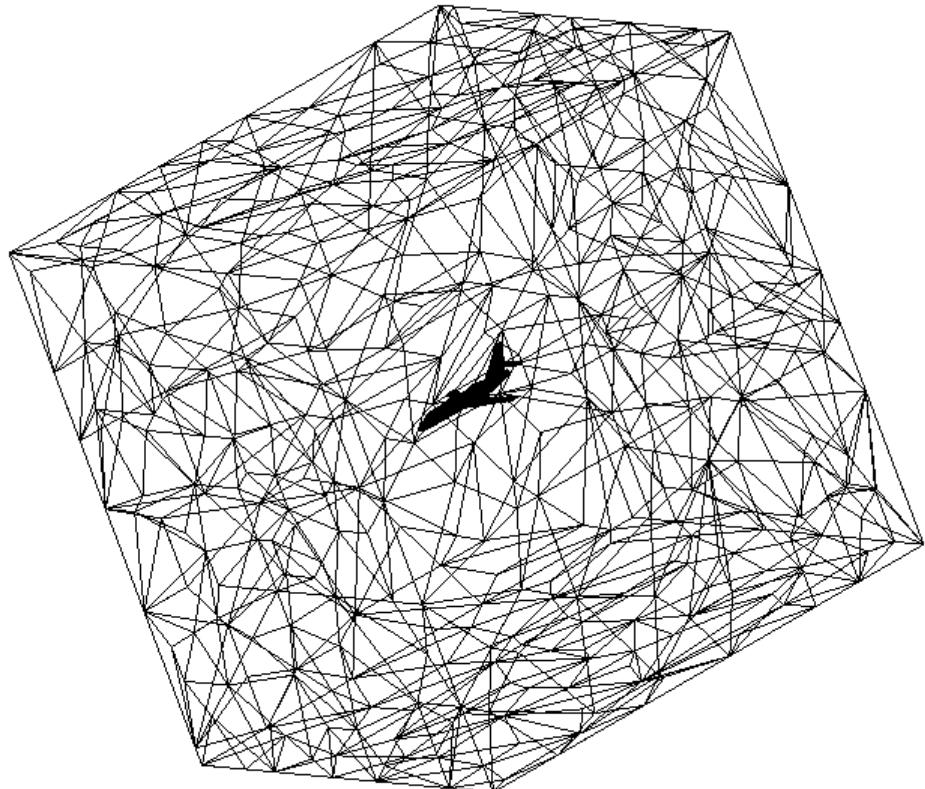


Многоуровневое огрубление больших сеток

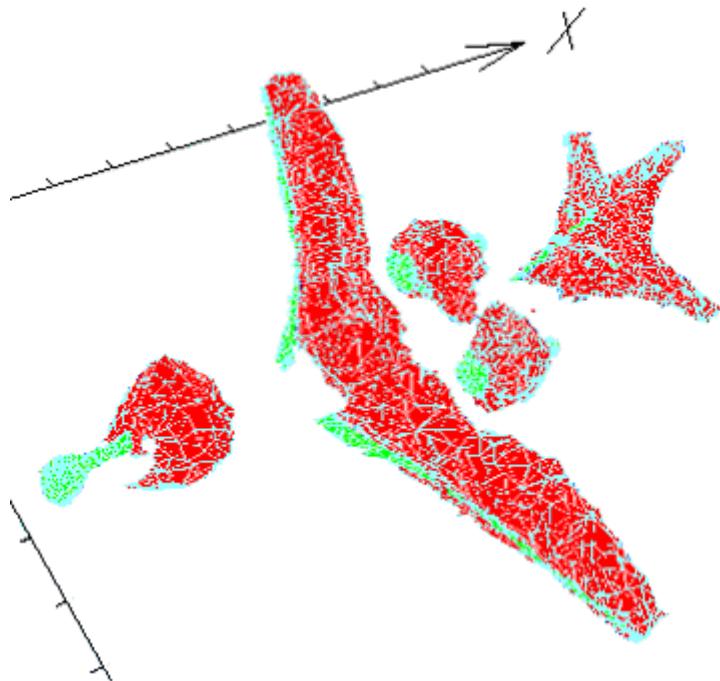
Траектории невесомых частиц



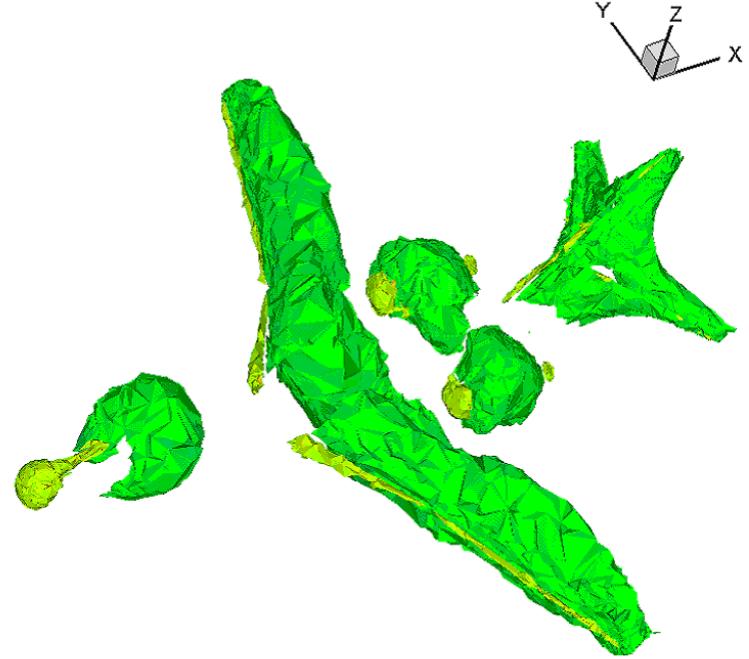
Моделирование течения вокруг летательного аппарата



Изоповерхности поля плотности

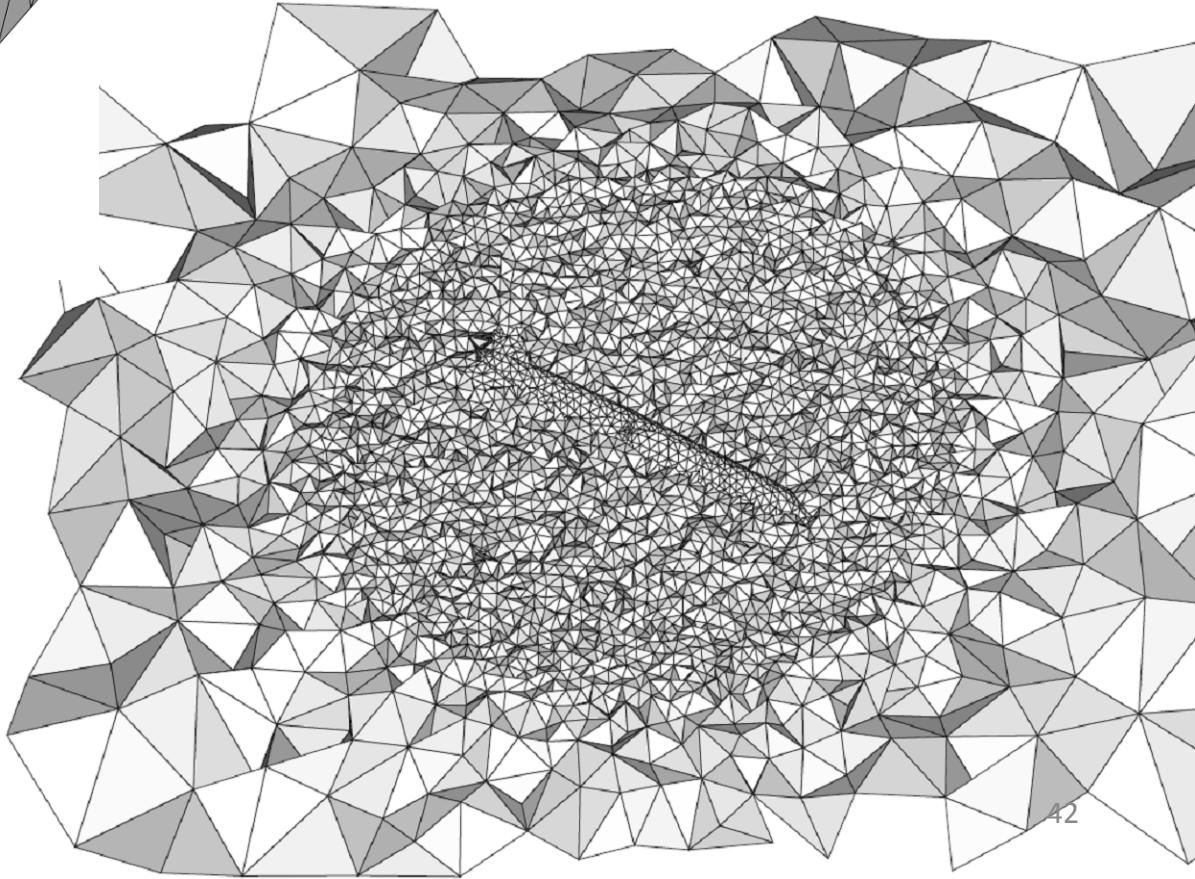
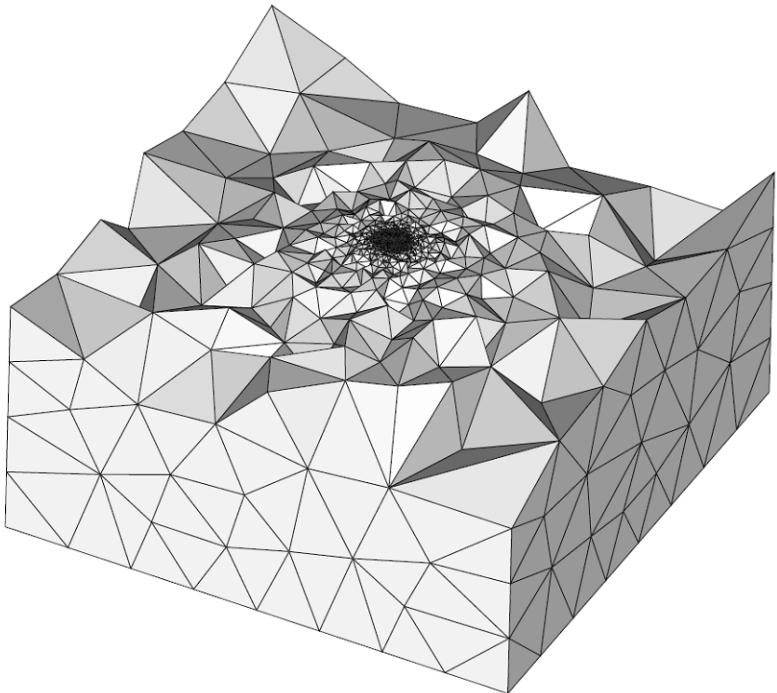


*R*_{remote} *Viewer*

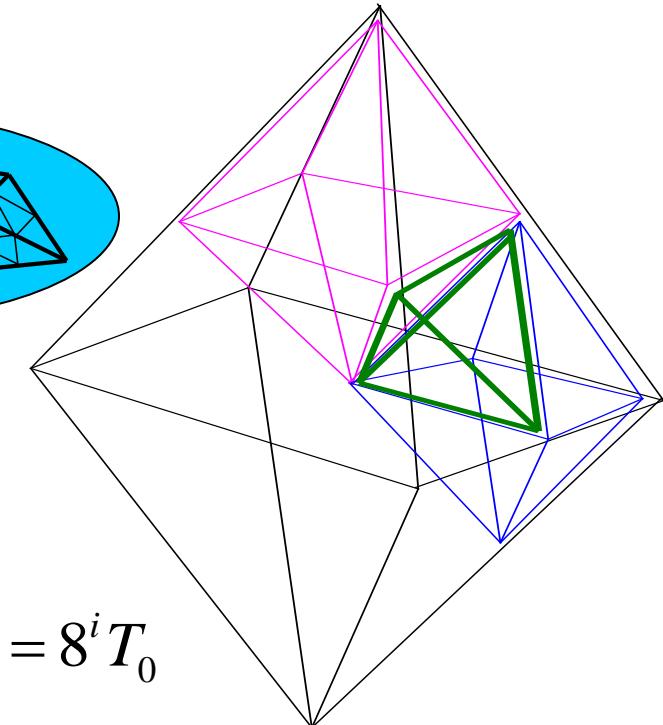
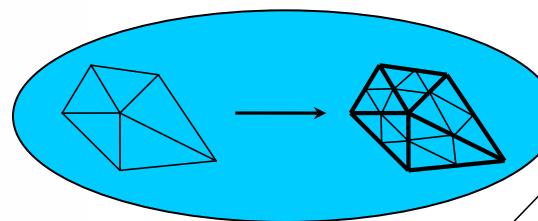
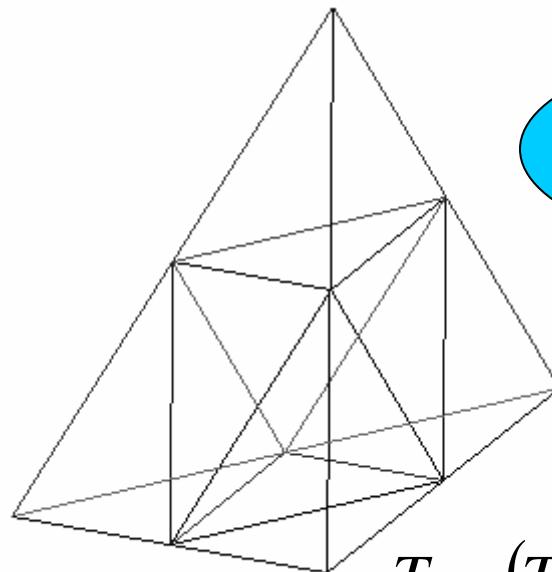


Tecplot

Тетраэдральные сетки 10^8 узлов



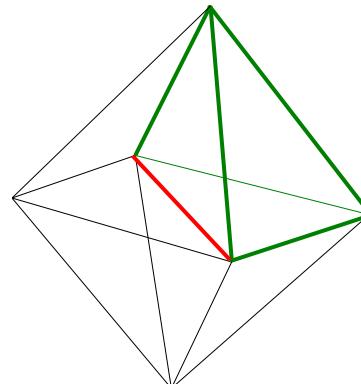
Измельчение тетраэдральной сетки



Разбиение

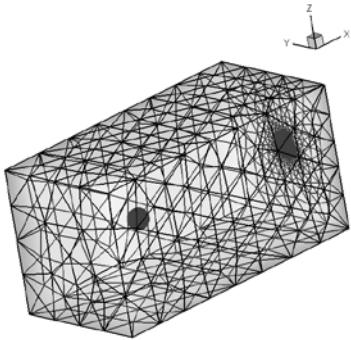
тетраэдра:

- 4 пирамиды
- 1 октаэдр

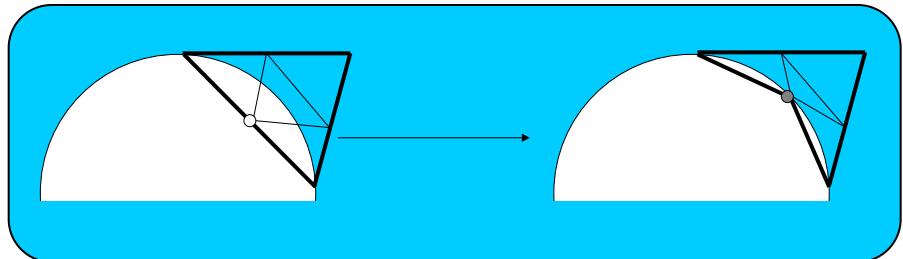
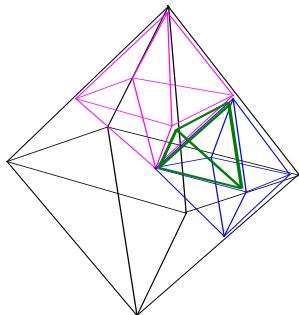


Разбиение октаэдра:

- 8 пирамид
- 6 октаэдров



Тетраэдральная сетка



70 300 → **34 422 954** узлов

401 819 * 8³ → **205 731 328** тетраэдров

Бинарный формат без сжатия - 4.1 Гбайт

500 микродоменов, 44 файла, со сжатием gzip

(словарного сжатия Зива-Лемпела) - 1.8 Гбайт

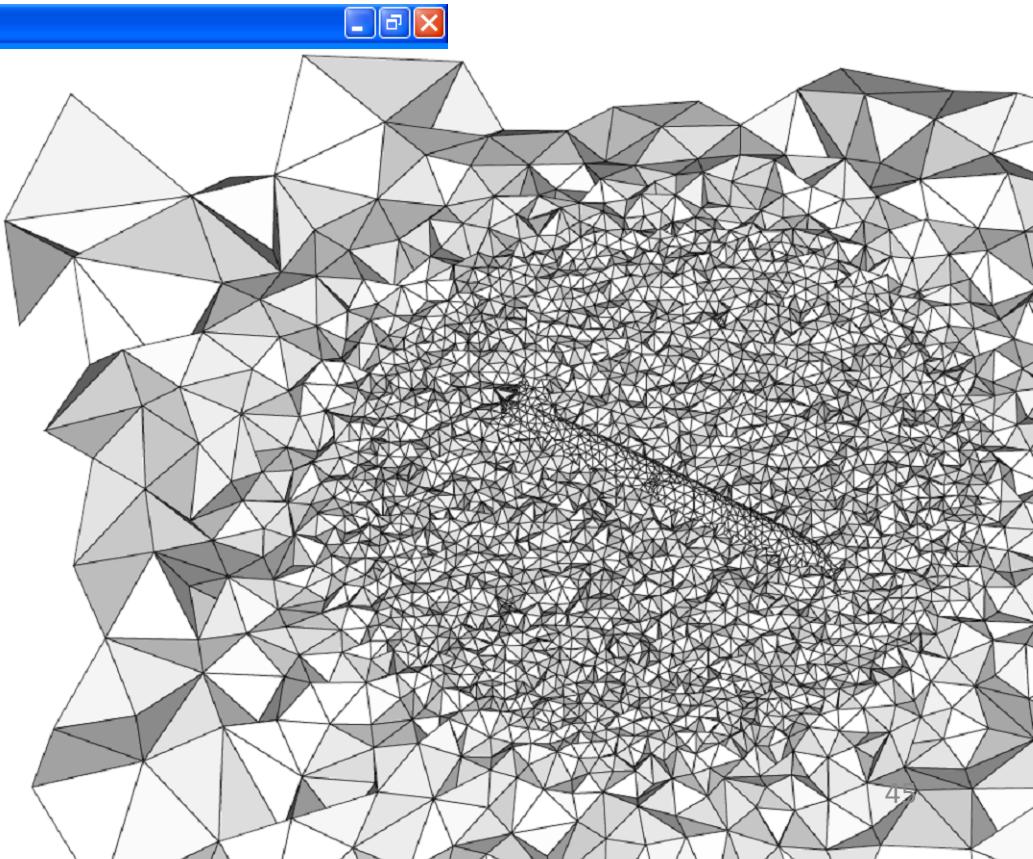
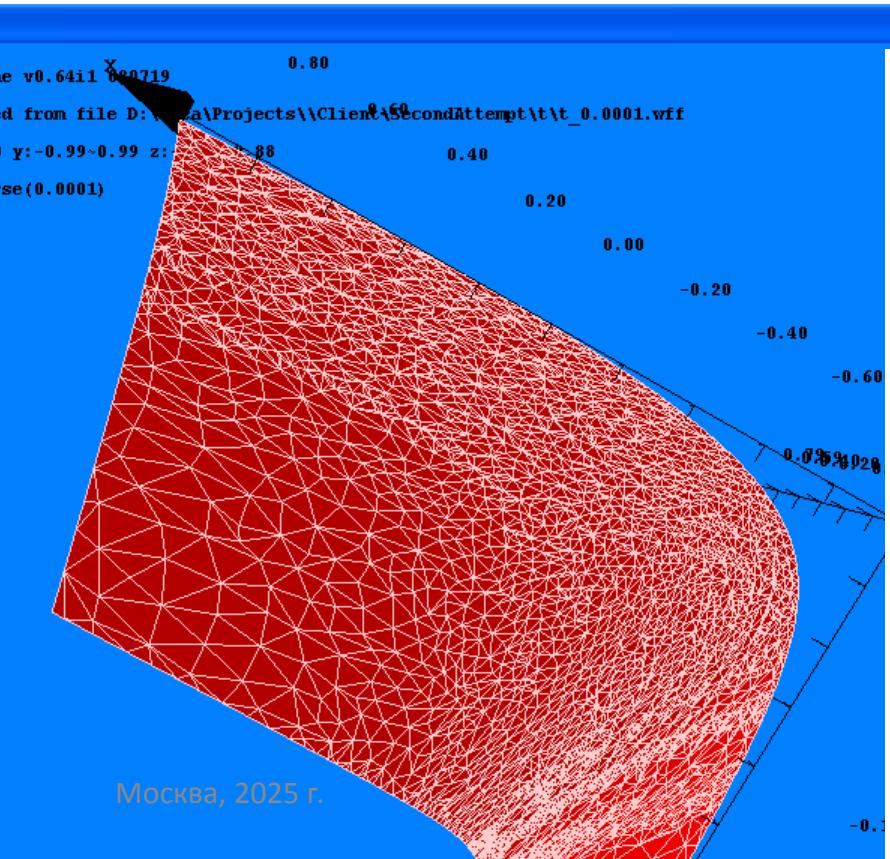
Время расчета шага на 44 процессорах Xeon 3,06 Ghz
- 23 секунды

Время чтения данных – 20 секунд

Параметры сетки

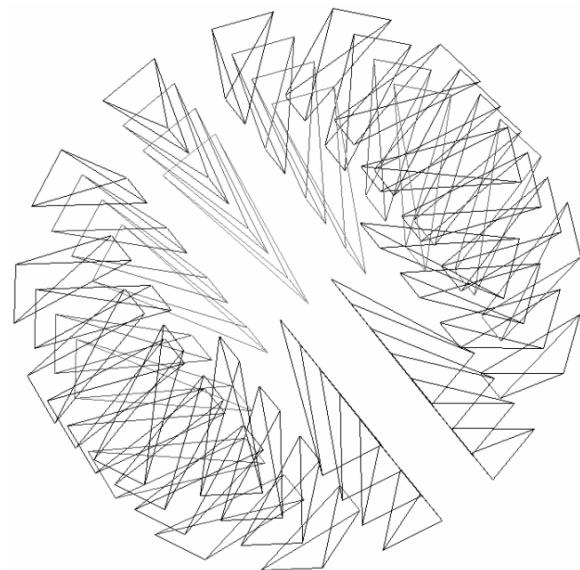
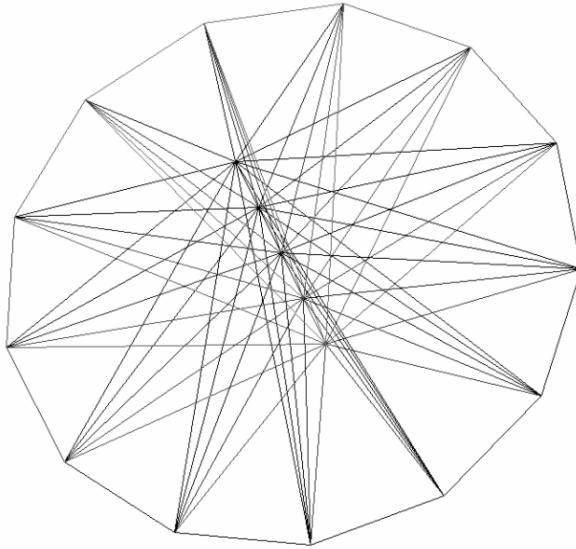
Сколько треугольников в
2D в среднем
опирается на один
узел?

Сколько пирамид в 3D в
среднем опирается на
один узел?



Заполнение пространства пирамидами

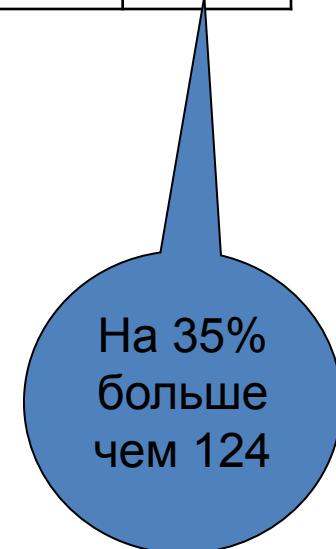
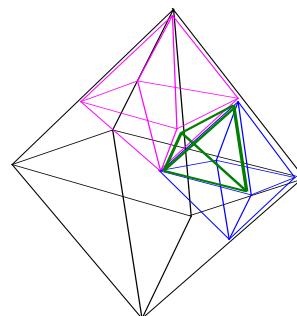
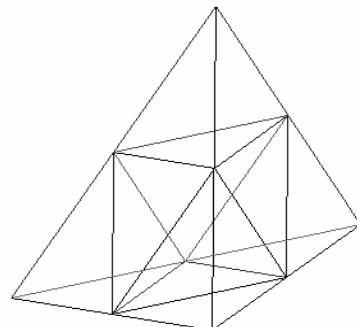
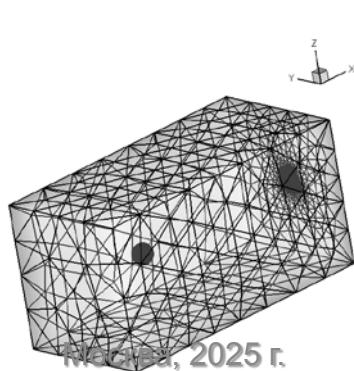
- На каждую из $2n$ точек в среднем опирается $2n$ пирамид
- Число пирамид $\sim n^2$



Зависимость объема хранимых данных от числа микродоменов

Число микродоменов	1	50	1000	1500	2000	2500	3000
Размер описания (МБ)	124	127	145	152	158	163	168

38 350 -> 2 356 196 узлов
219 034 * 8² -> 14 018 176 тетраэдров



Аппроксимация и потоковая обработка

- Отображение
- Расчет
- Запись результатов

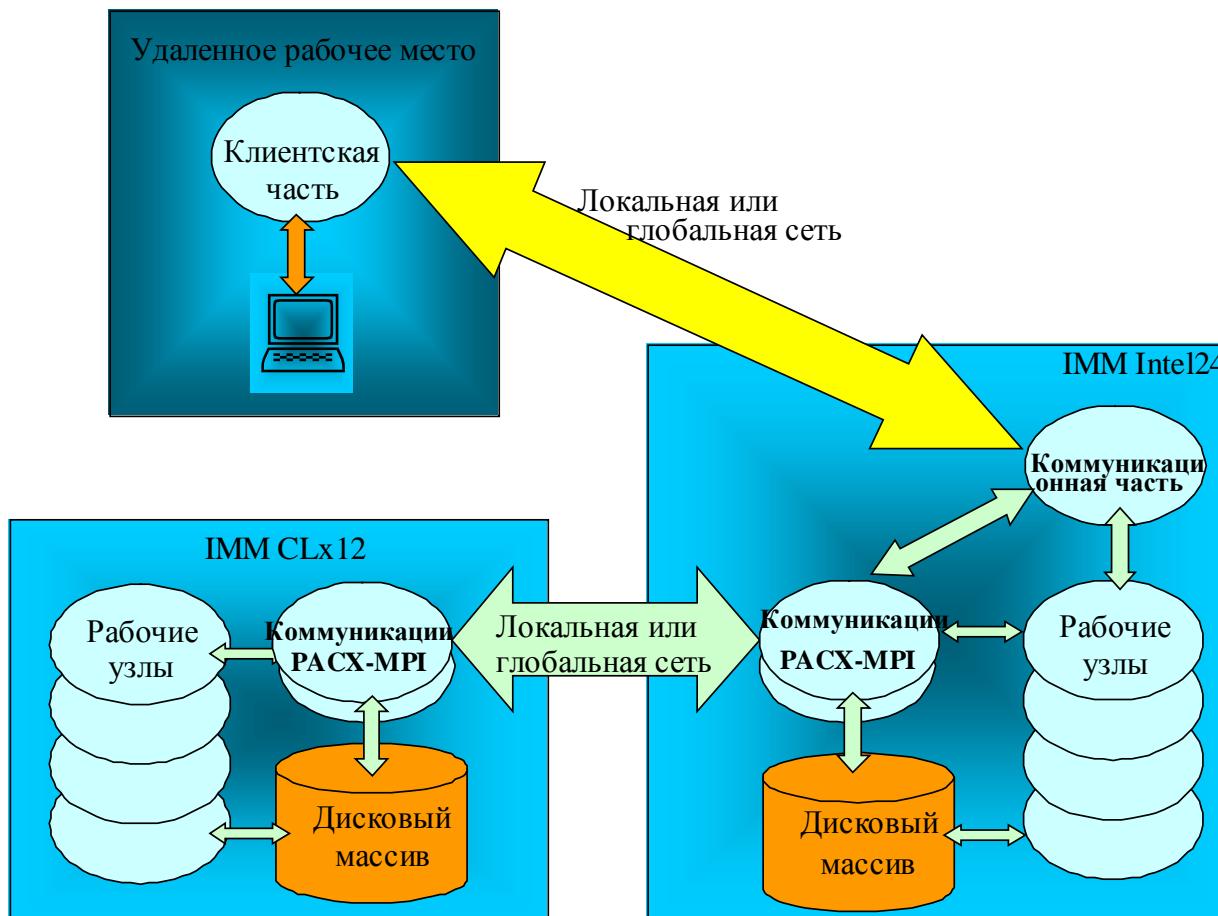


- Чтение
- Формирование сцены

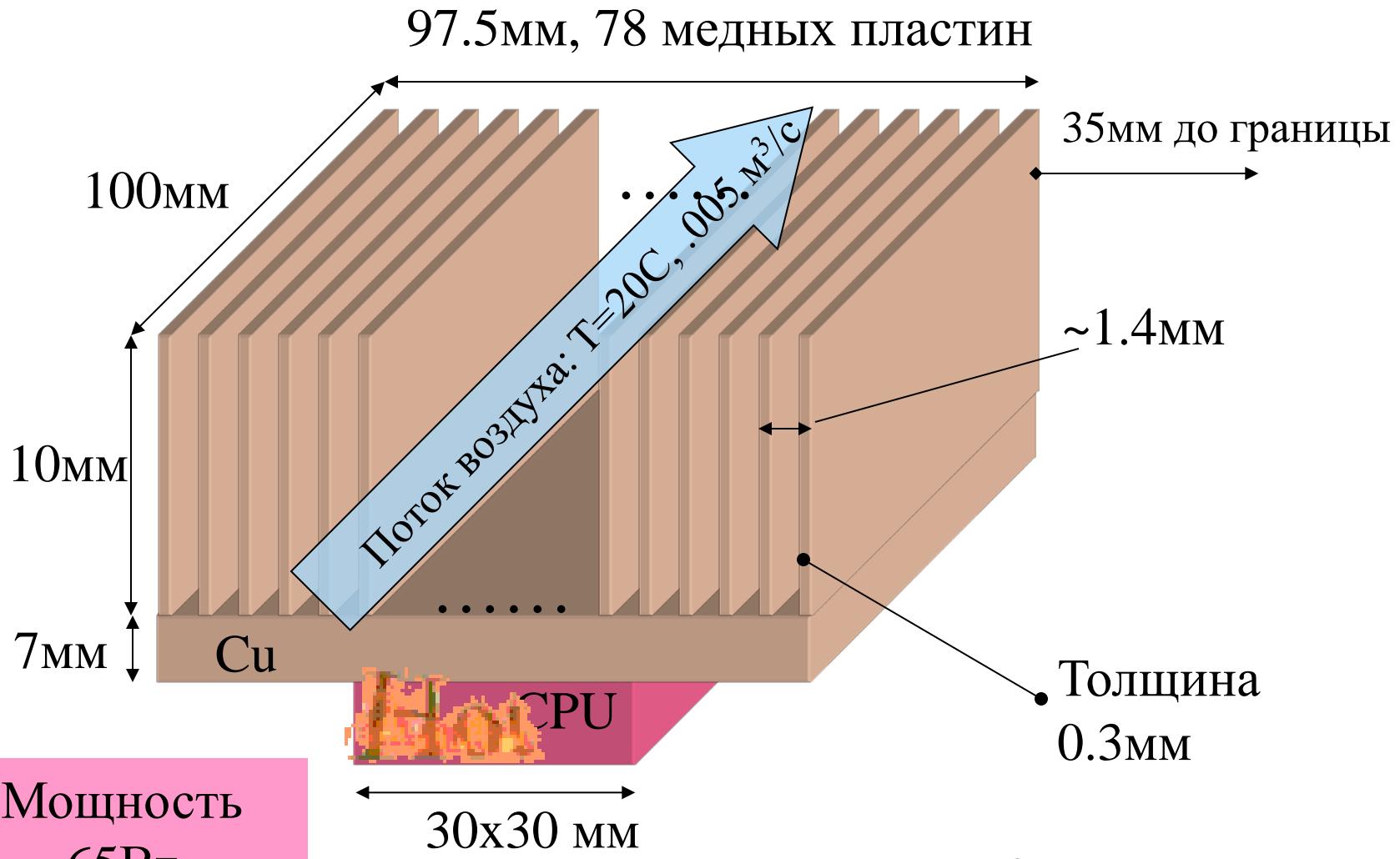
Клиент-серверная
технология

TecPlot
Origin
VISIT ParaView
EnSight OpenDX

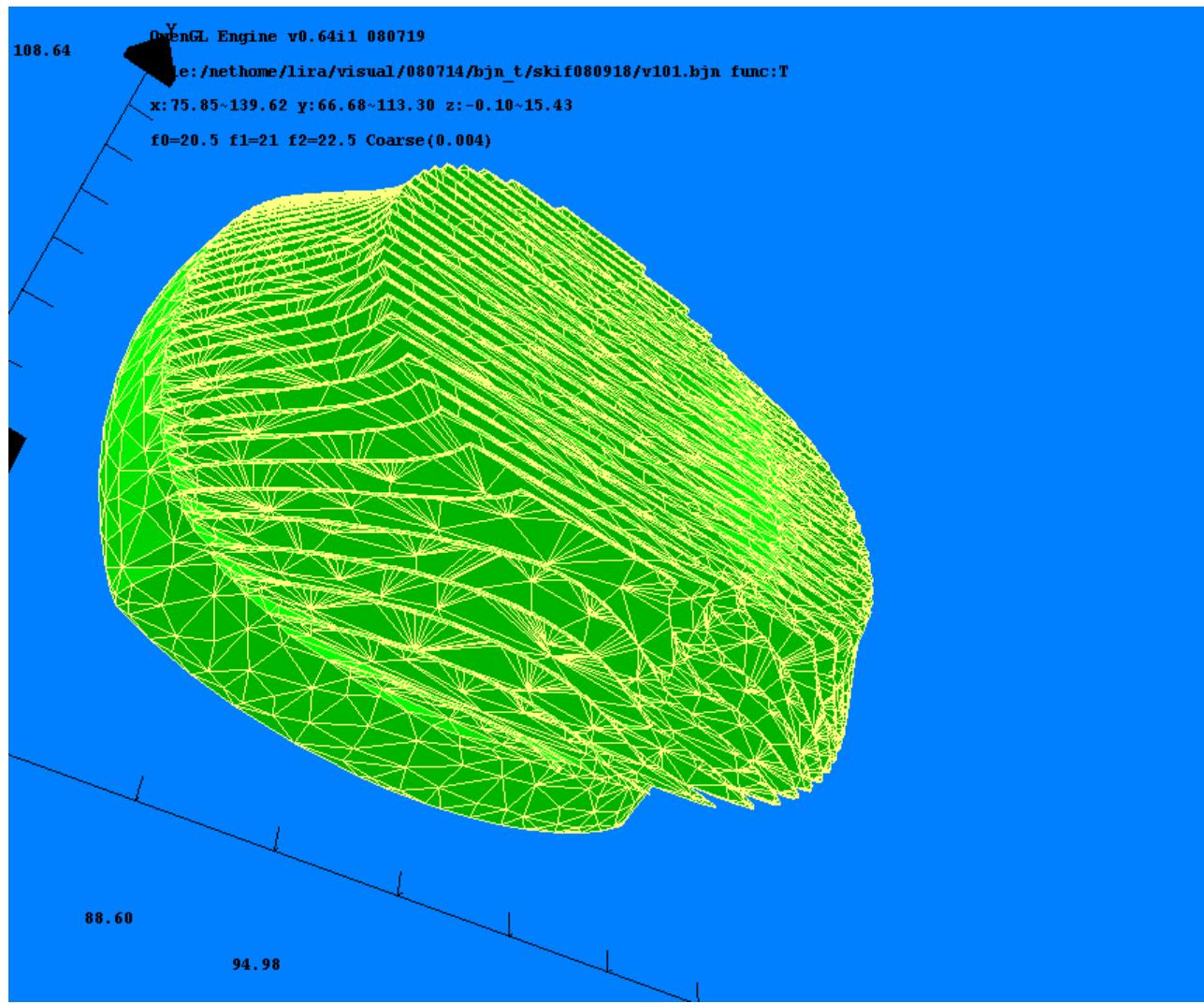
Распределенная визуализация



Охлаждение процессора медным радиатором



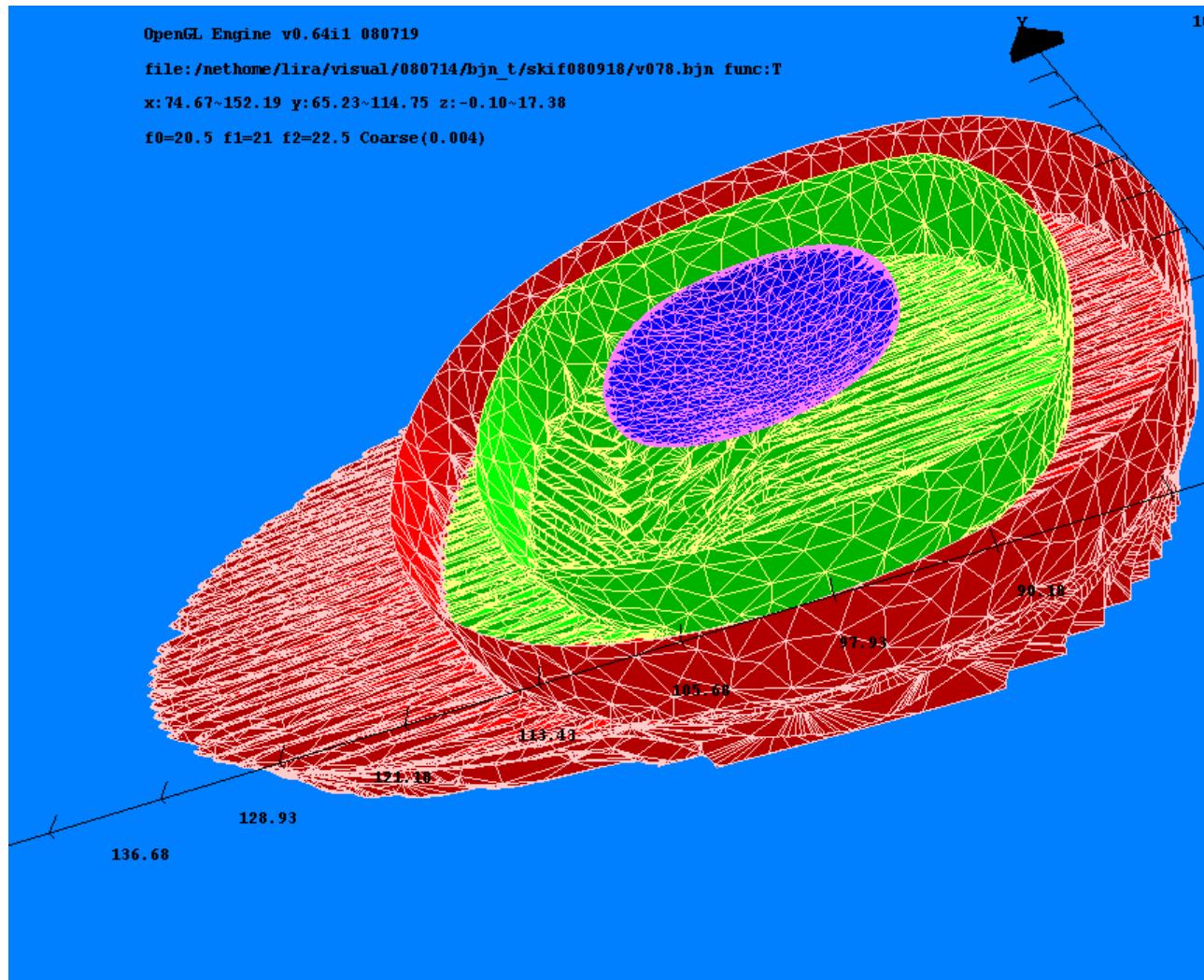
Температура над радиатором изоповерхность 20.5 °C



Изоповерхности температуры: T=20.5, 21, 22.5 C сетка 800*700*120=67,2 млн. узлов

Показано, что радиаторы рассматриваемой конструкции должны иметь не менее 25 ребер для предохранения процессора от перегрева.

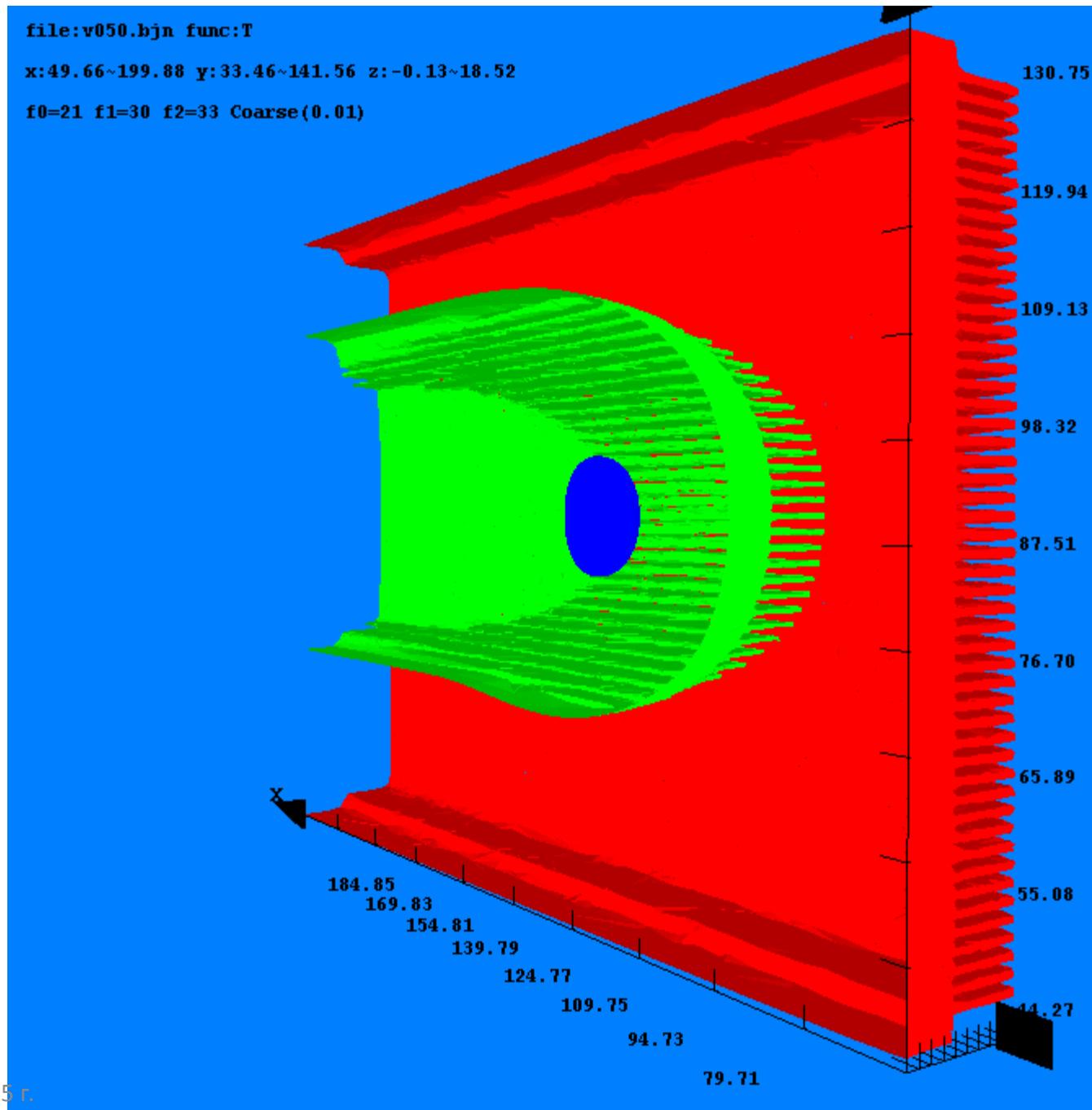
Оптимальной является конфигурация с количеством ребер более 75-100, при которой процессор с потребляемой мощностью 65 Вт ни в каком режиме не нагревается выше 70 °C.
Москва, 2025 г.



file:v050.bjn func:T

x:49.66~199.88 y:33.46~141.56 z:-0.13~18.52

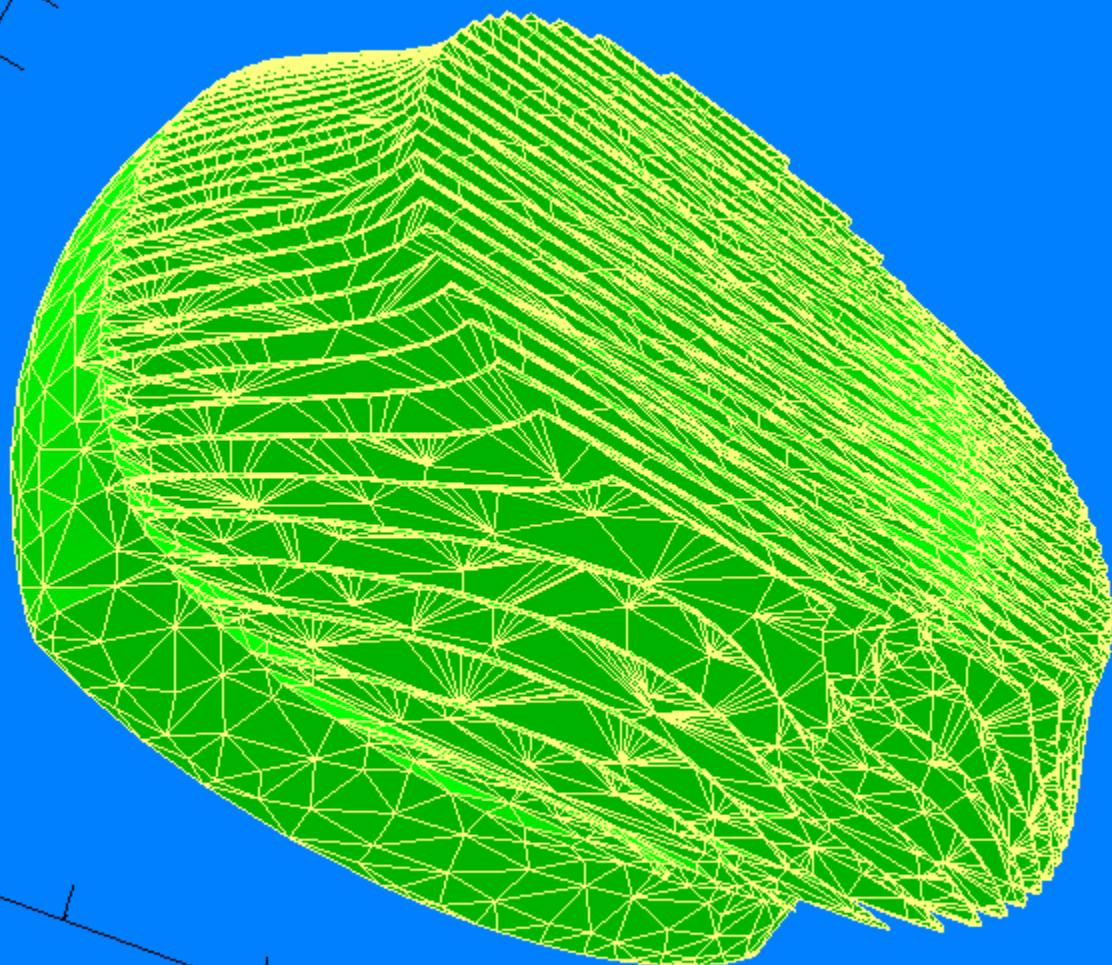
f0=21 f1=30 f2=33 Coarse(0.01)



OpenGL Engine v0.64i1 080719

108.64

file:/nethome/lira/visual/080714/bjn_t/skif080918/v101.bjn func:T
x:75.85~139.62 y:66.68~113.30 z:-0.10~15.43
f0=20.5 f1=21 f2=22.5 Coarse(0.004)



88.60

Москва, 2025 г.

94.98

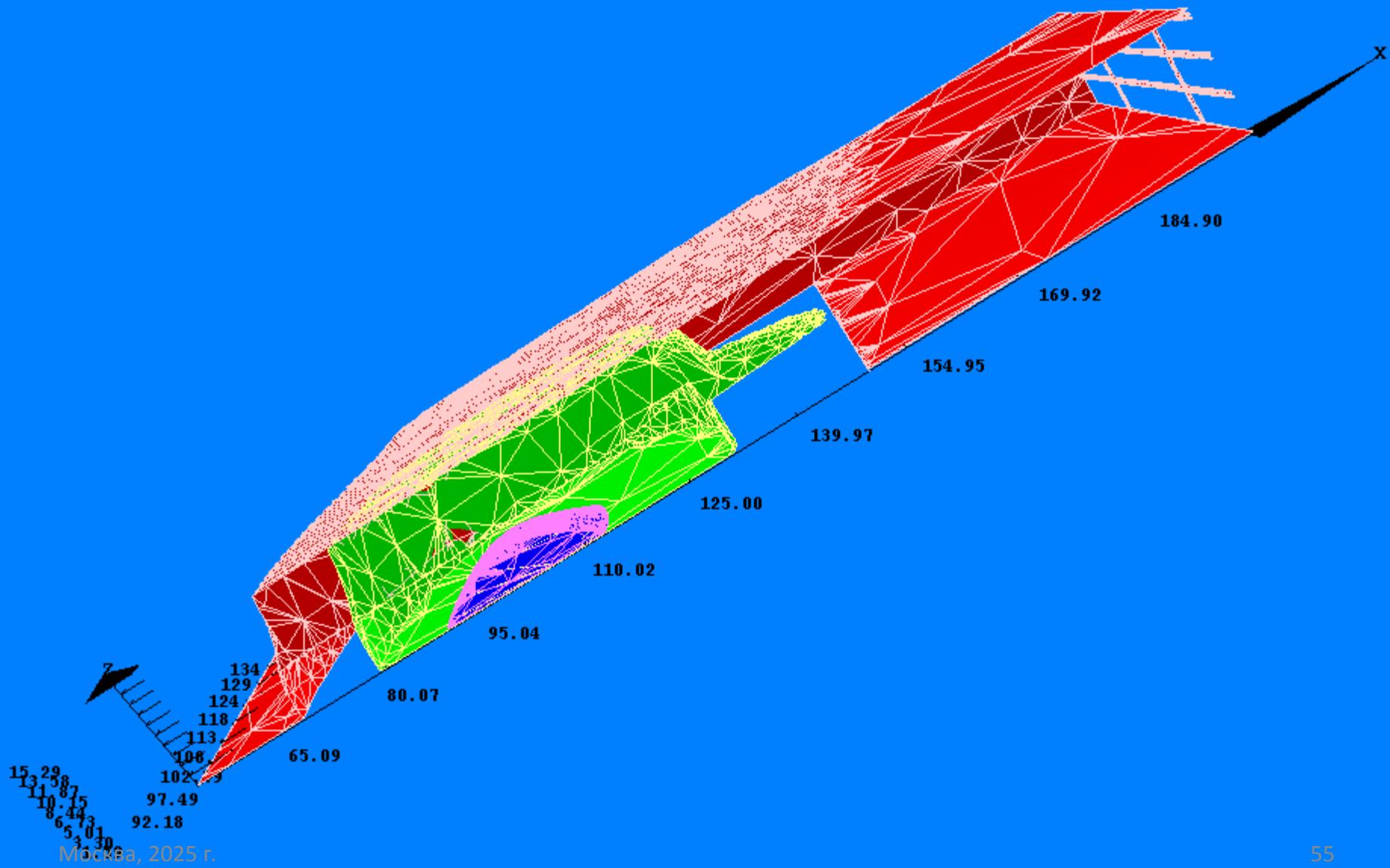
54

OpenGL Engine v0.64i1 080719

file:w050.bjn func:T

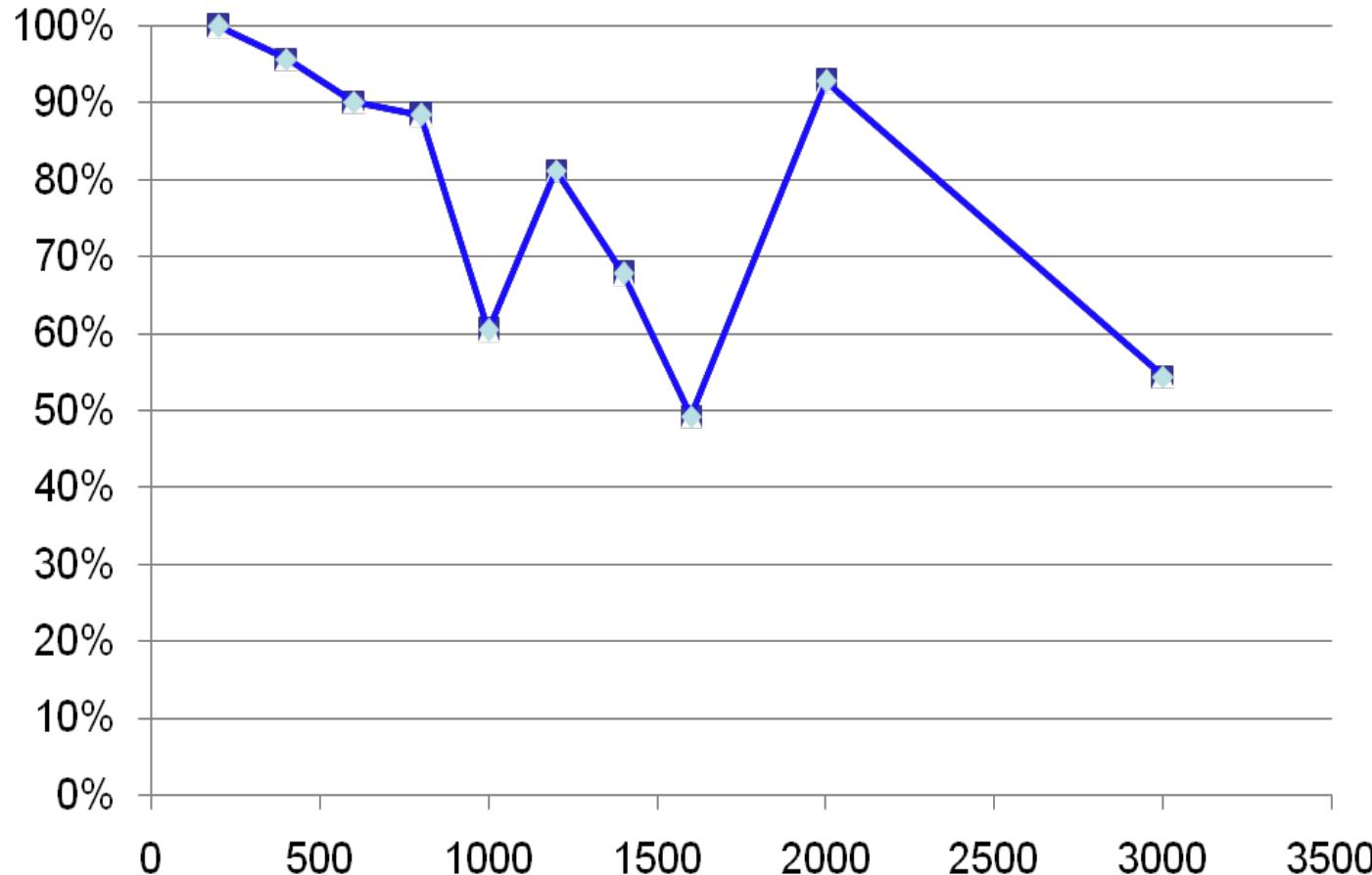
x:50.12~199.88 y:86.88~139.94 z:-0.13~17.01

f0=69.1 f1=70.51 f2=72.5 Coarse(0.01)





Зависимость эффективности от числа ядер



Конфигурация: 78 тонких ребер (0.3 мм) на радиаторе

Сетка: $1000 \times 3500 \times 150 = 525$ млн.

Параллельная реализация: MPI + нити (8 нитей на узле)

Схема обменов соответствует методу декомпозиции по данным: на каждом шаге обмен с ближайшими и коллективная операция

- взаимодействие соседних в трёхмерной
решётке процессов для согласования
величин на внутренних границах

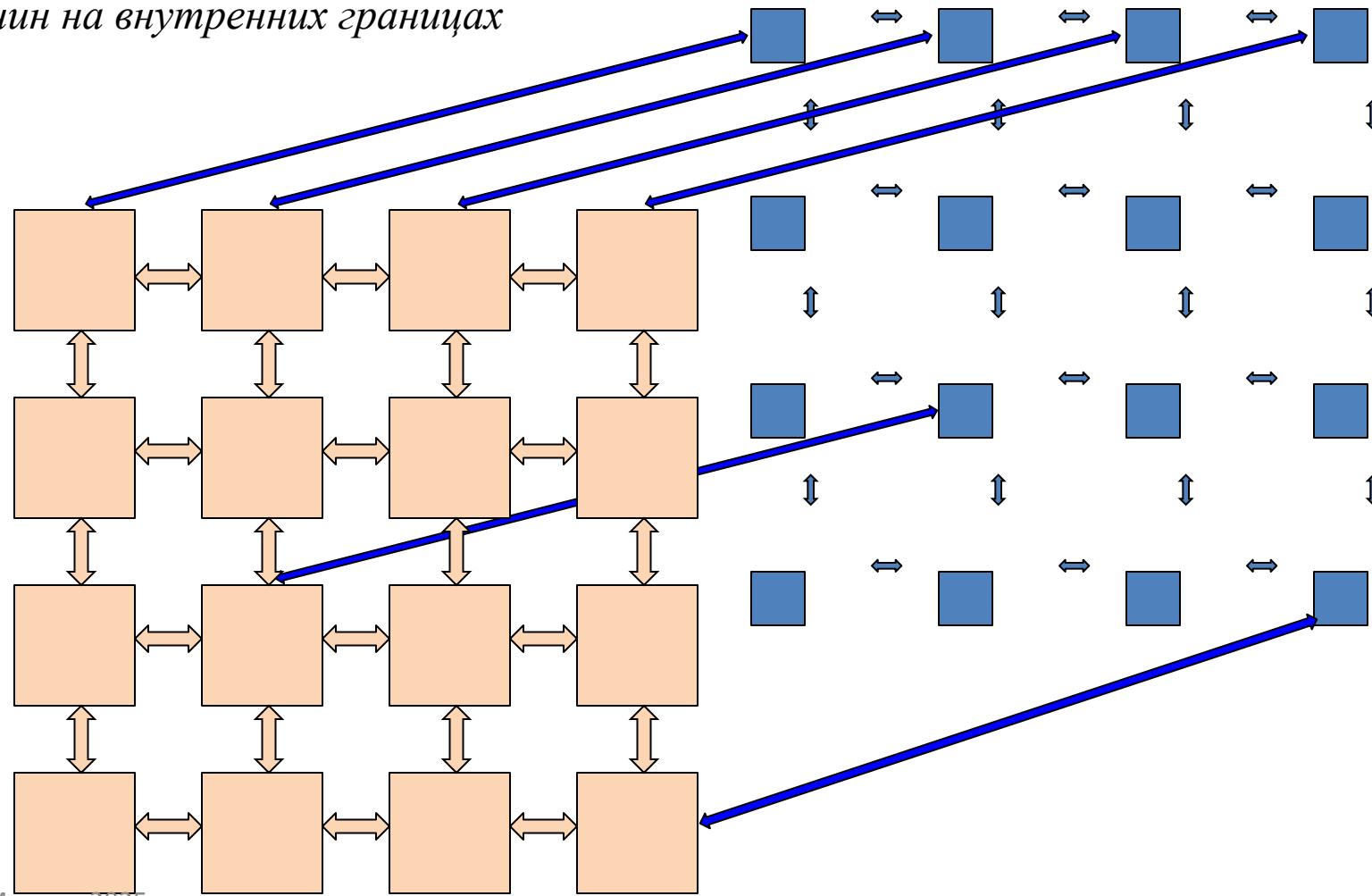
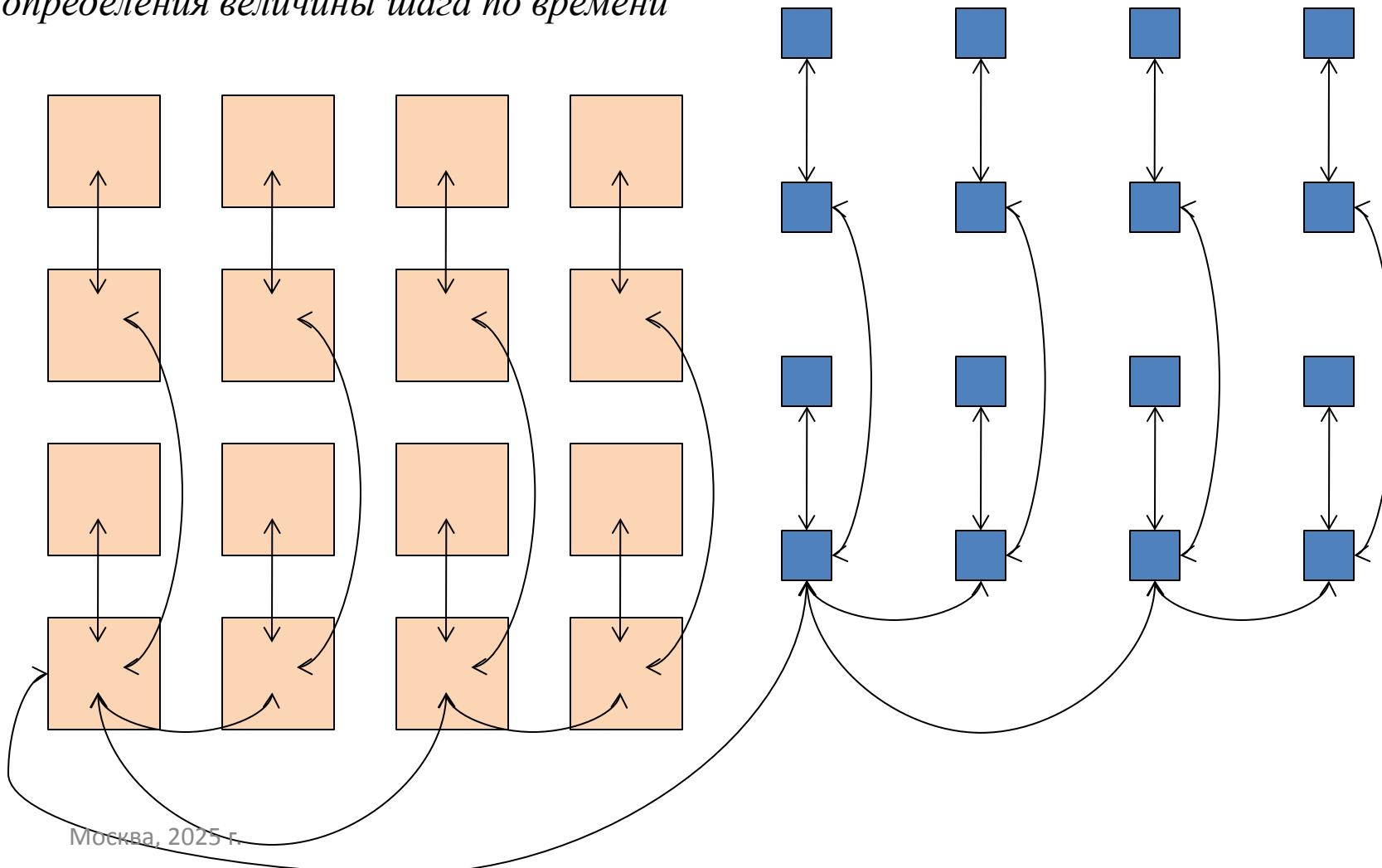


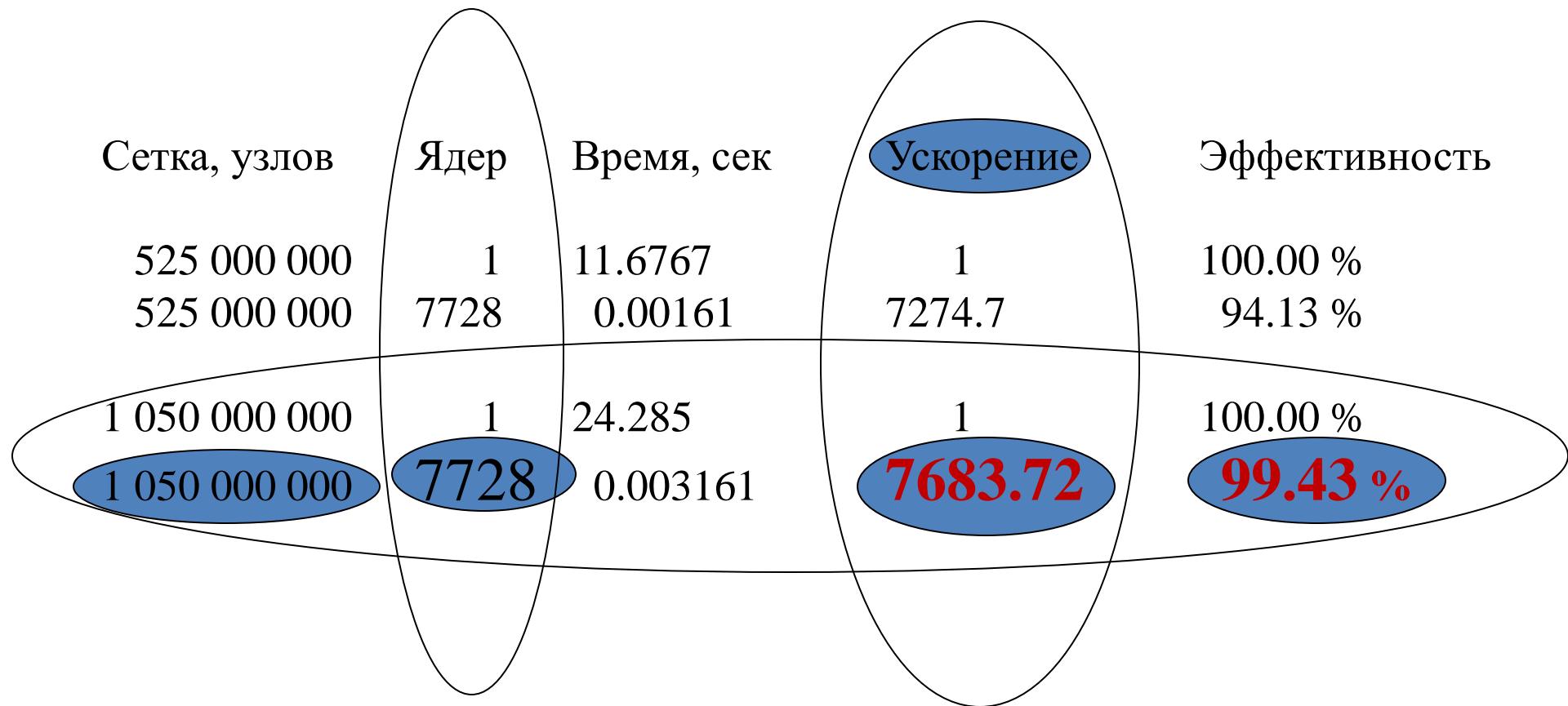
Схема обменов соответствует типичным итерационным методам на компактных шаблонах: на каждом шаге обмен с ближайшими и коллективная операция

- коллективная операция редуцирования для
определения величины шага по времени



Эффективность расчета 99%

996 узлов 966 по 8 ядер – всего 7728 ядер,
организованных в трёхмерную решетку размером 24 x 161 x 2

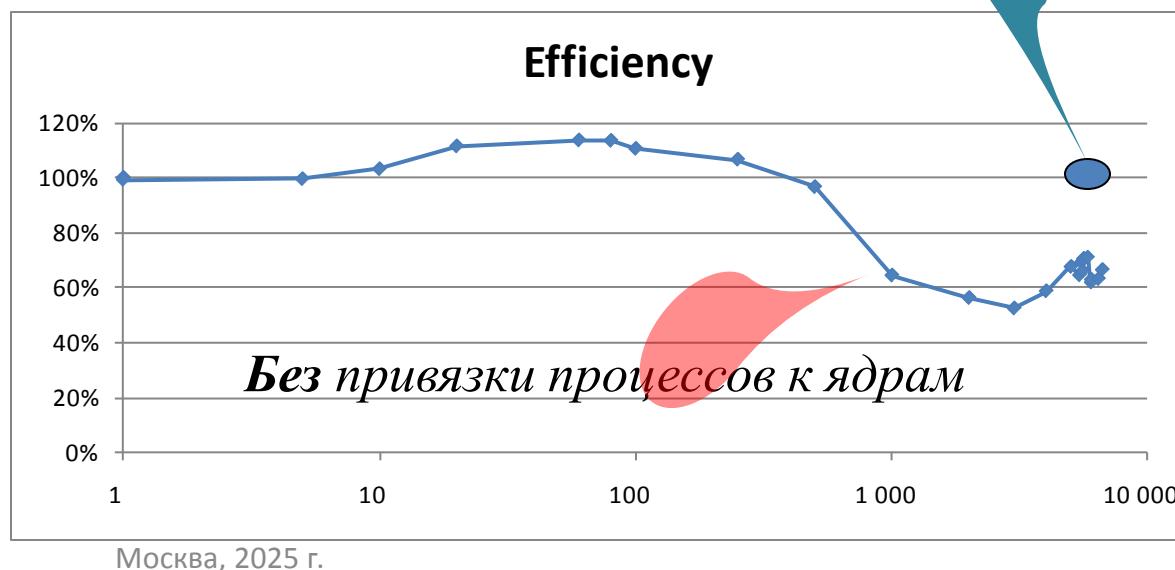


Результаты тестирования производительности

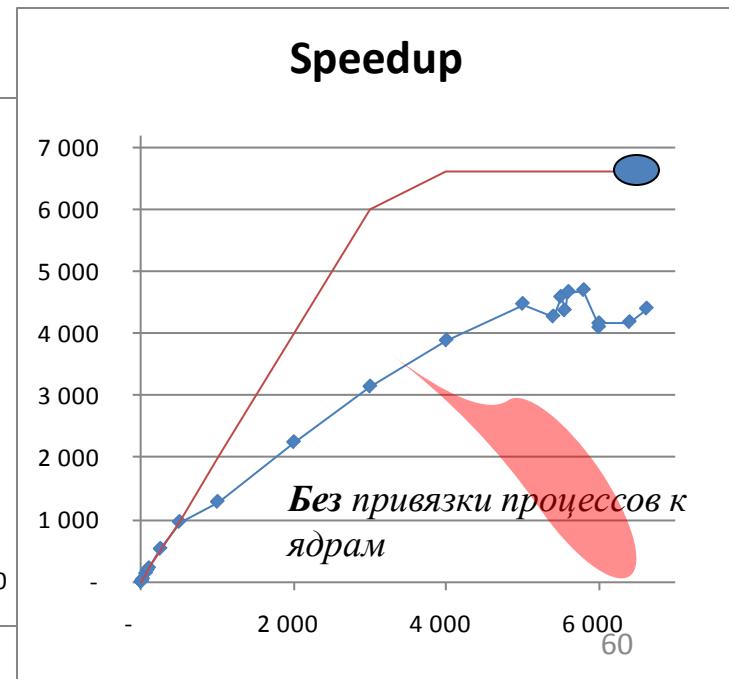
- асинхронные обмены,
- коллективные операции редуцирования
- привязка MPI-процессов к ядрам процессоров

обеспечивают отсутствие деградации эффективности (99%) на доступном числе ядер при

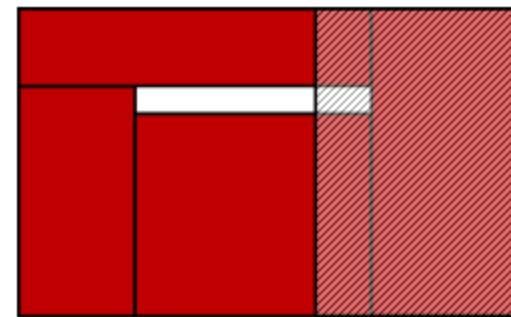
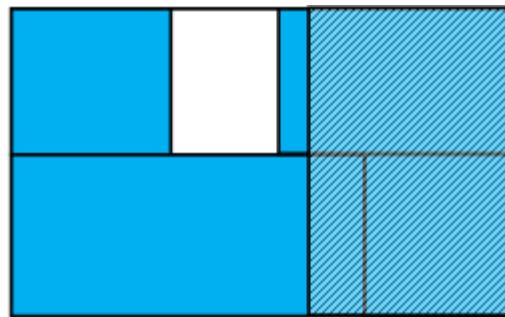
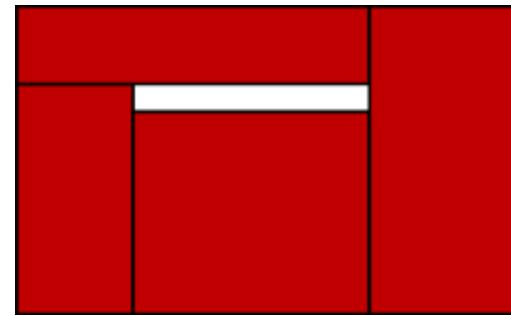
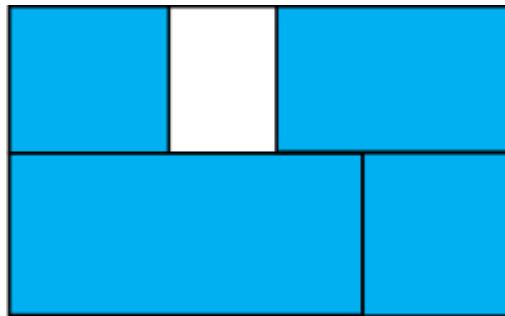
- компактном шаблоне
- сетке 1 миллиард узлов
- 7728 ядрах



Без привязки процессов к ядрам эффективность расчетов на числе процессоров, большем чем число узлов, падает до величины порядка 70%.

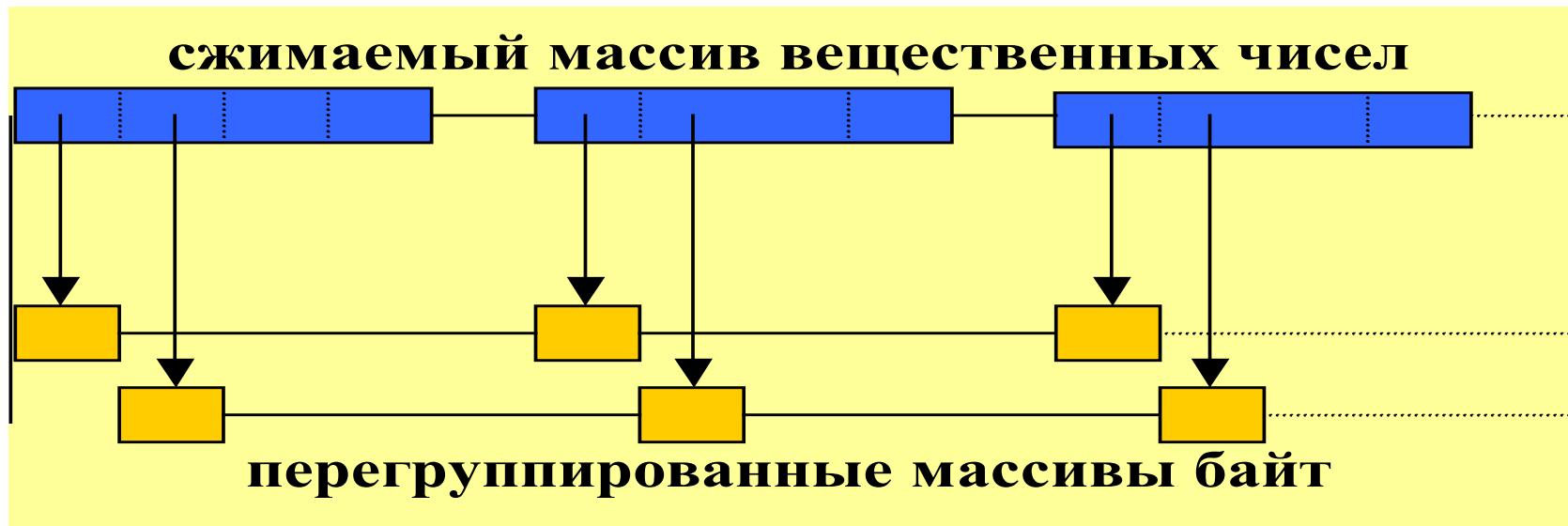


Записи двух сеточных 2d функций



Групповое сжатие вещественных чисел

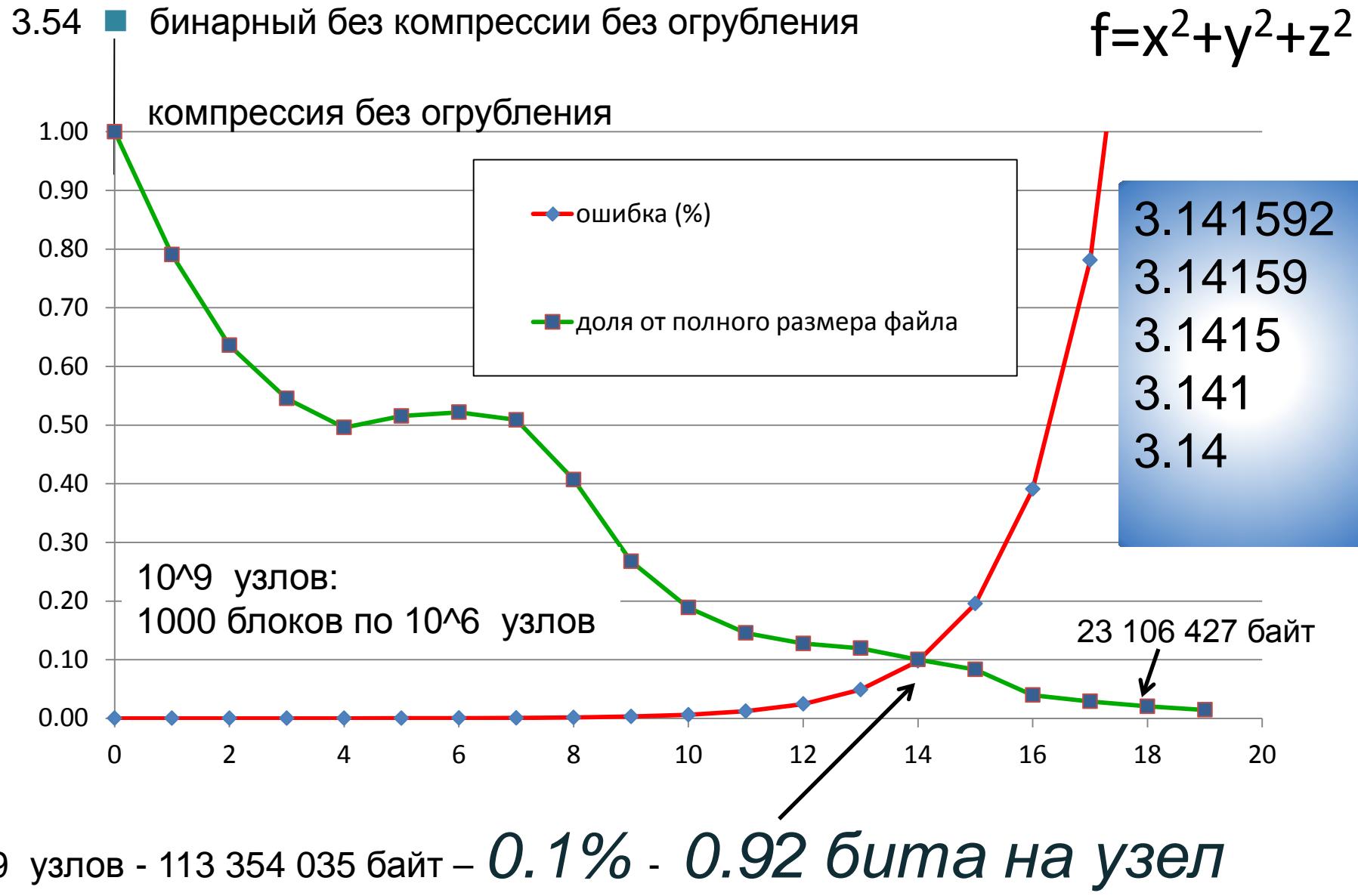
Обнуление младших бит мантиссы



Перегруппировка байт
Сжатие байт стандартной библиотекой
zlib

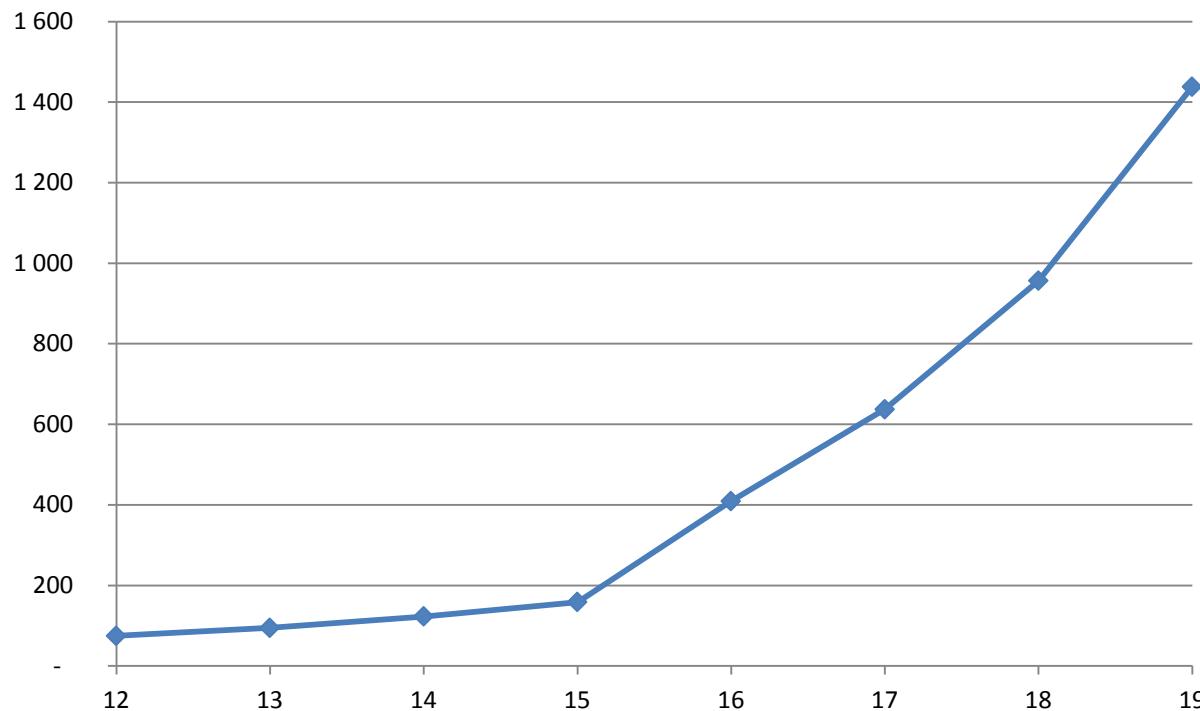
Хранение сеточных данных

Отсечение младших бит мантиссы



Зависимость коэффициента сжатия от числа усеченных бит

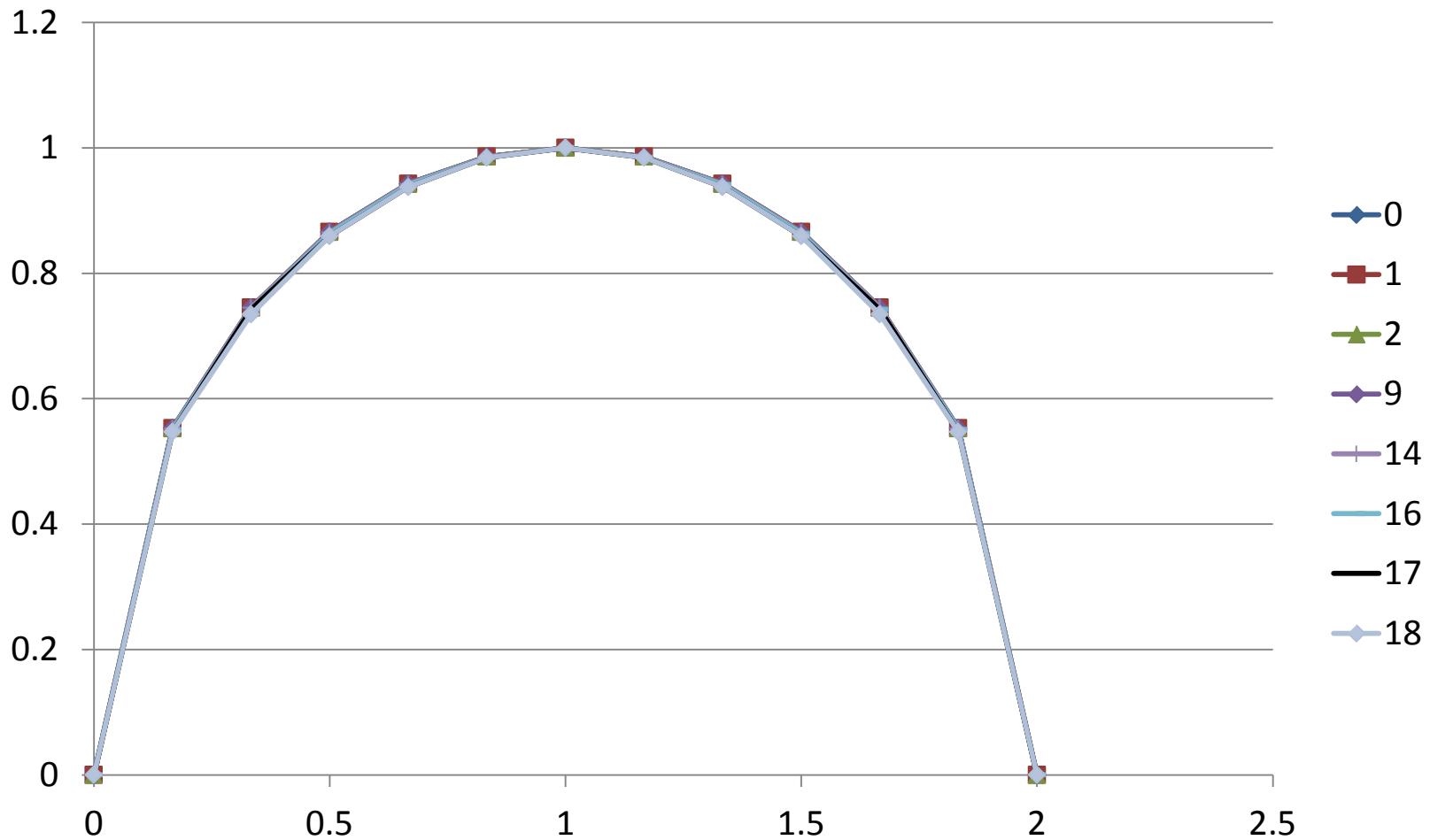
Сетка: $1000 \times 3500 \times 150 = 525$ млн узлов



28	244	379	w101_reduced 12.bjn
22	340	718	w101_reduced 13.bjn
17	228	023	w101_reduced 14.bjn
13	339	249	w101_reduced 15.bjn
5	171	208	w101_reduced 16.bjn
3	321	150	w101_reduced 17.bjn
2	213	949	w101_reduced 18.bjn
1	471	818	w101_reduced 19.bjn

793 457 w101grid.bjn

Огрубление данных



Литература

1. Якововский М.В. [Введение в параллельные методы решения задач](#): Учебное пособие / Предисл.: В. А. Садовничий. – М.: [Издательство Московского университета](#), 2013. – 328 с., илл. – (Серия «Суперкомпьютерное образование») ISBN 978-5-211-06382-2
2. Якововский М.В. Библиотека ввода/вывода сеточных данных. 2007, http://lira.imamod.ru/BjnIO_3D.html

Контакты

Якововский М.В.,

чл.-корр. РАН, проф., д.ф.-м.н.,

И.о. директора

*Института прикладной математики
им. М.В.Келдыша Российской академии наук*

mail: lira@imamod.ru

web: <http://lira.imamod.ru>