ВМК МГУ

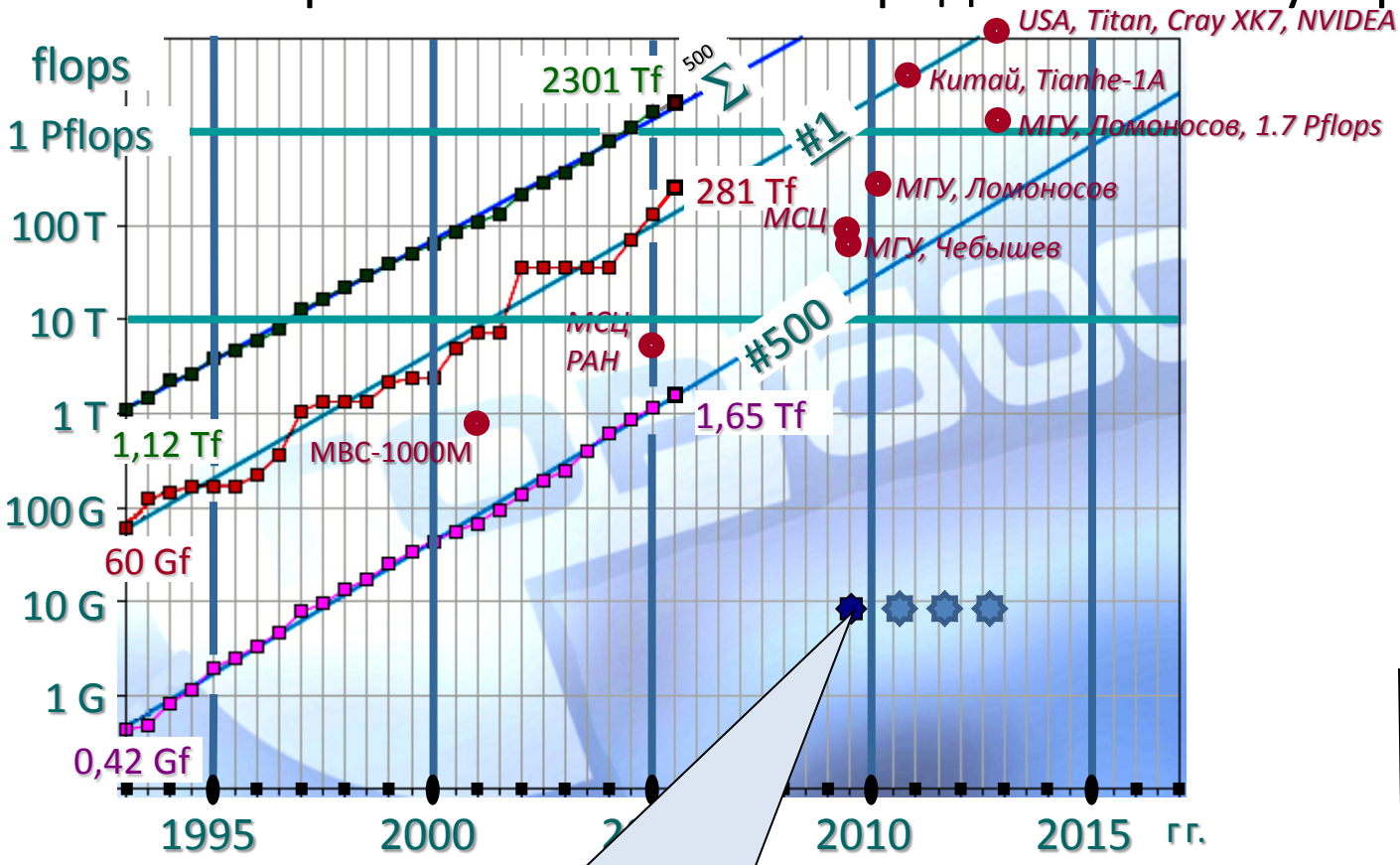
Визуализация сеточных данных

М.В.Якобовский

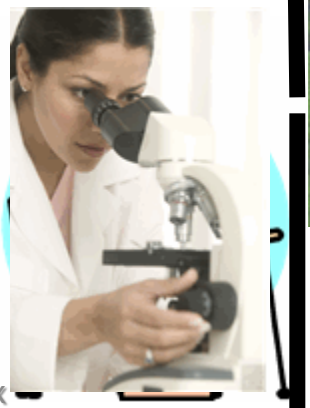
mail: lira@imamod.ru

web: http://lira.imamod.ru

Компьютер пользователя на порядки слабее суперкомпьютера



Workstation, one core: 1/100 000…



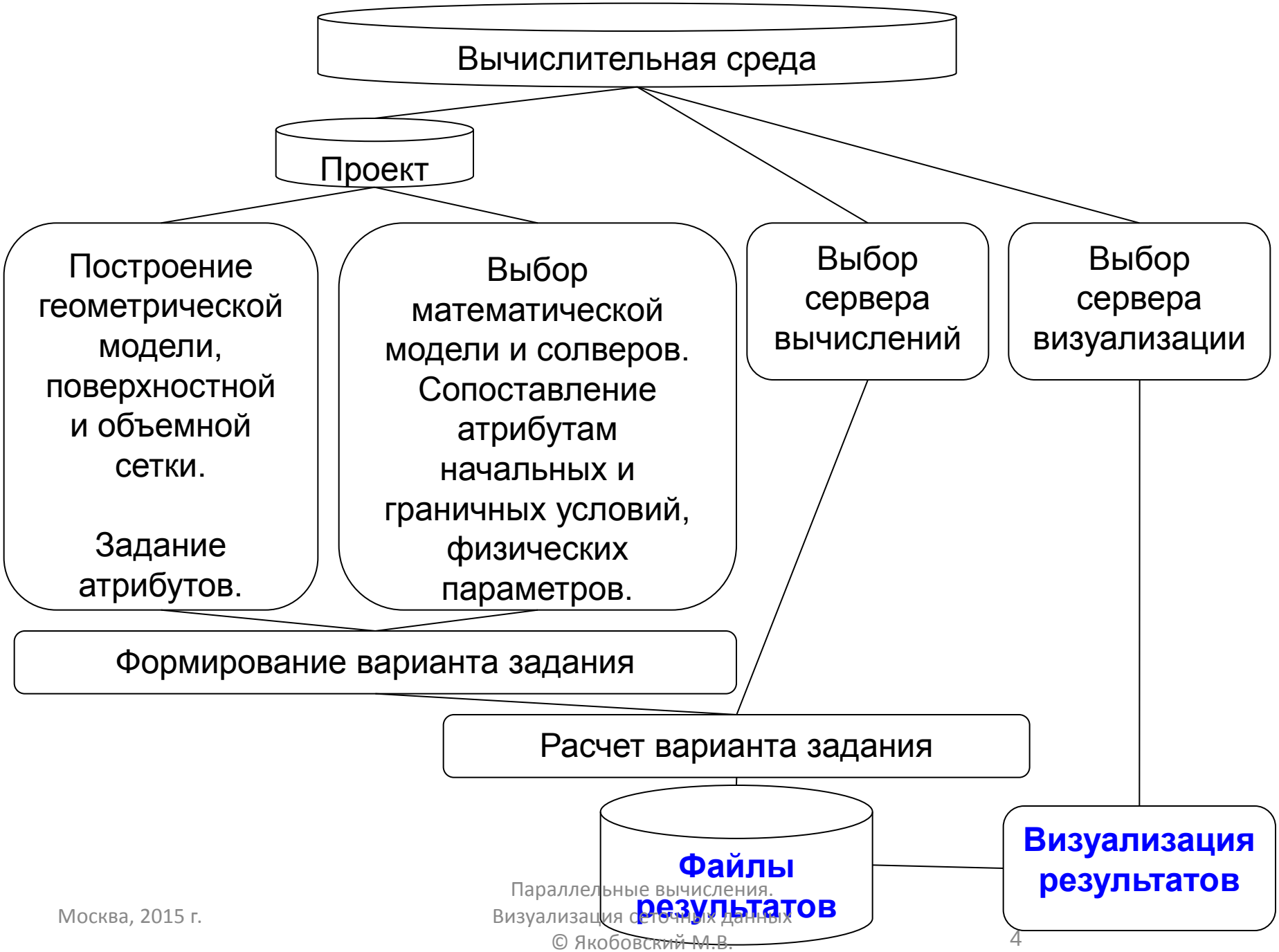
TOP 500

Визуализация

- Скалярные
- Векторные

- Стационарные
- Зависящие от времени

- Решетки
- Треугольные и тетраэдральные сетки


Вычислительная среда
Проект
Построение геометрической модели, поверхностной и объемной сетки.
Задание атрибутов.
Выбор математической модели и солверов. Сопоставление атрибутам начальных и граничных условий, физических параметров.
Выбор сервера вычислений
Выбор сервера визуализации
Формирование варианта задания
Расчет варианта задания
Файлы результатов
Визуализация результатов

Этапы визуализации

Запись

Сетка *Сеточная функция*

Чтение

Формирование объектов виртуальной сцены

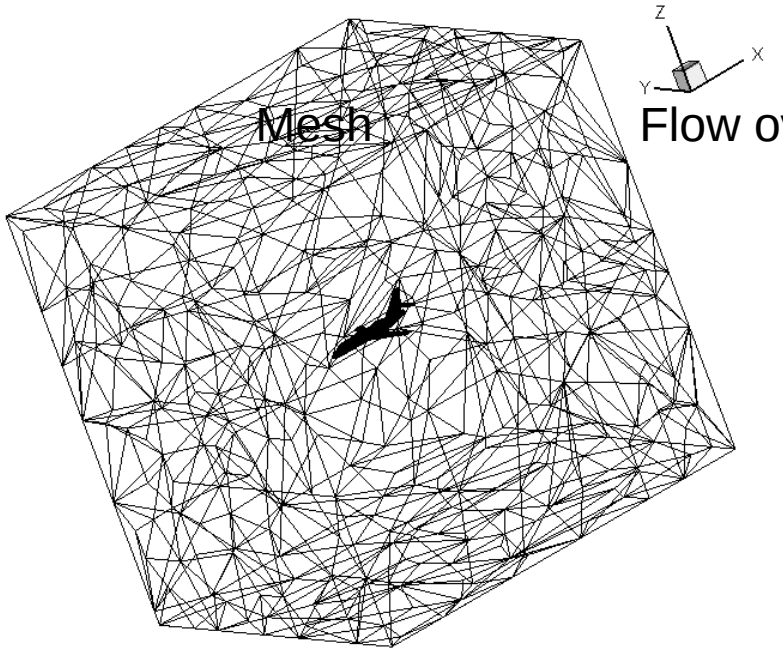
Отображение

Методы

- Распределенное иерархическое хранение
- Декомпозиция
- Огрубление с контролируемой точностью
- Клиент-серверная технология

- Потоковая обработка
- Хранение образов

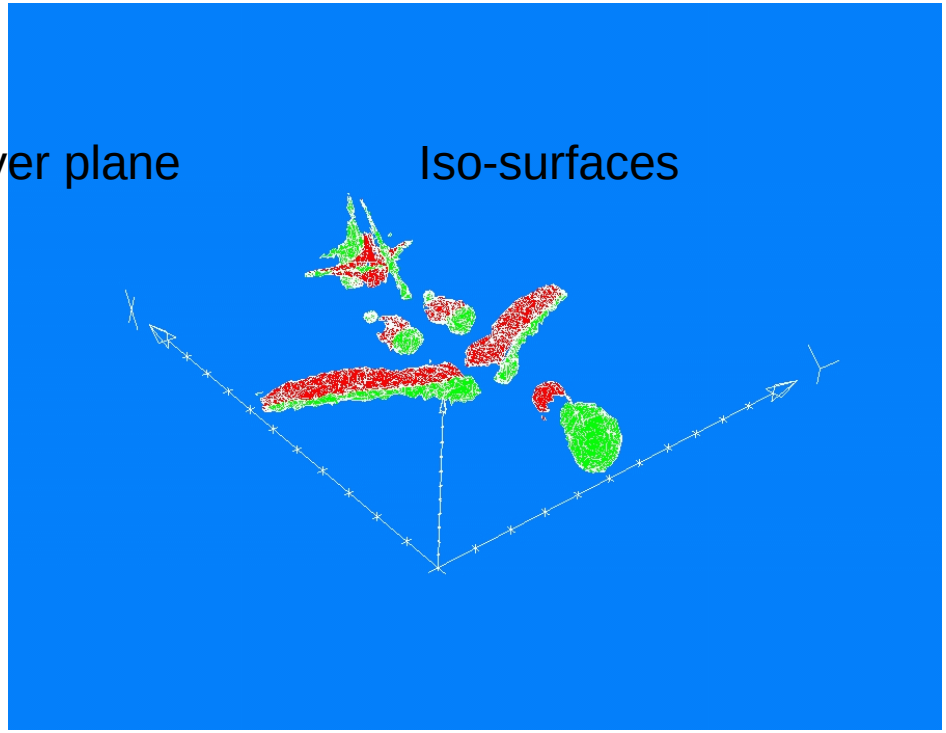
Визуализация в распределенных системах

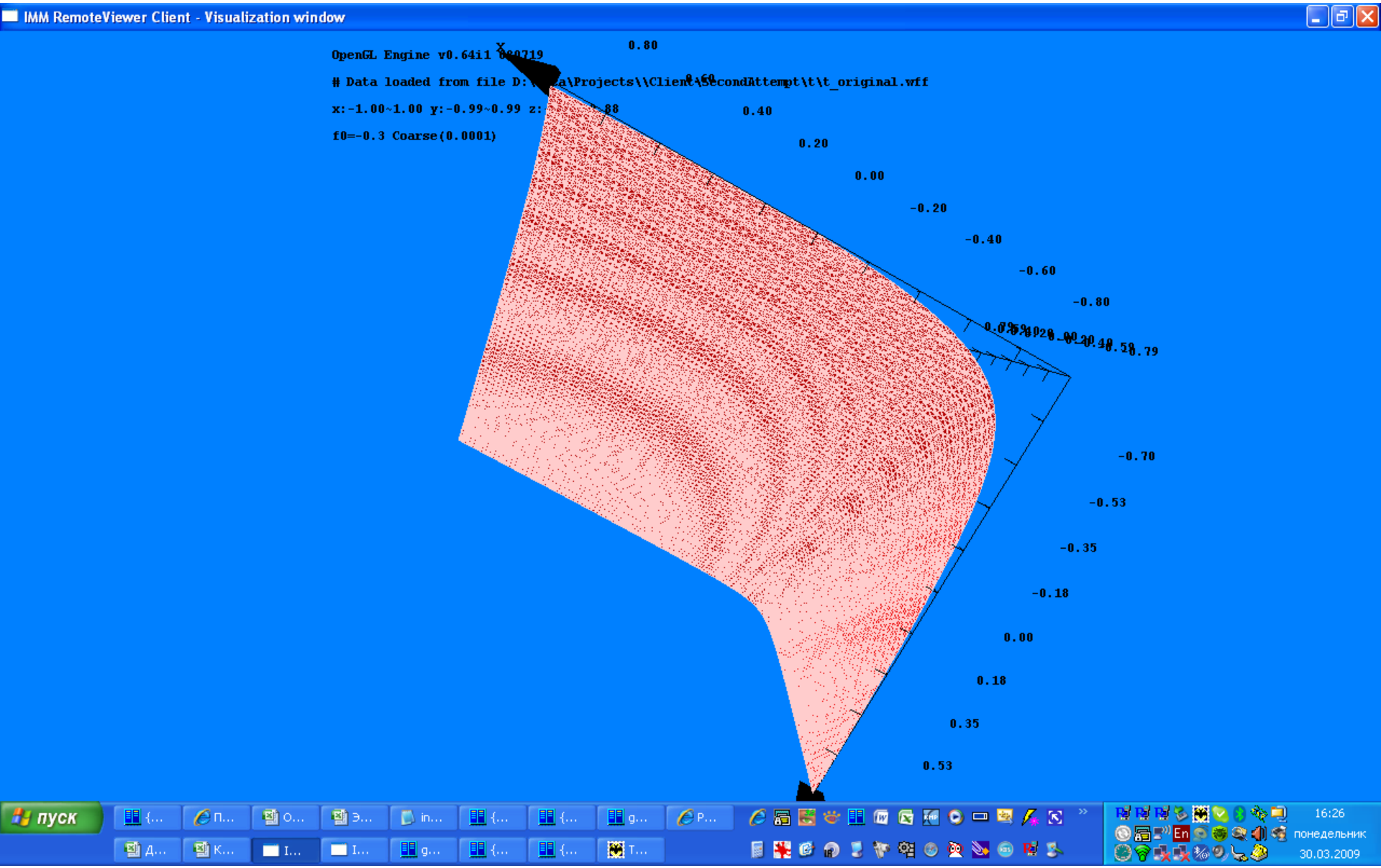


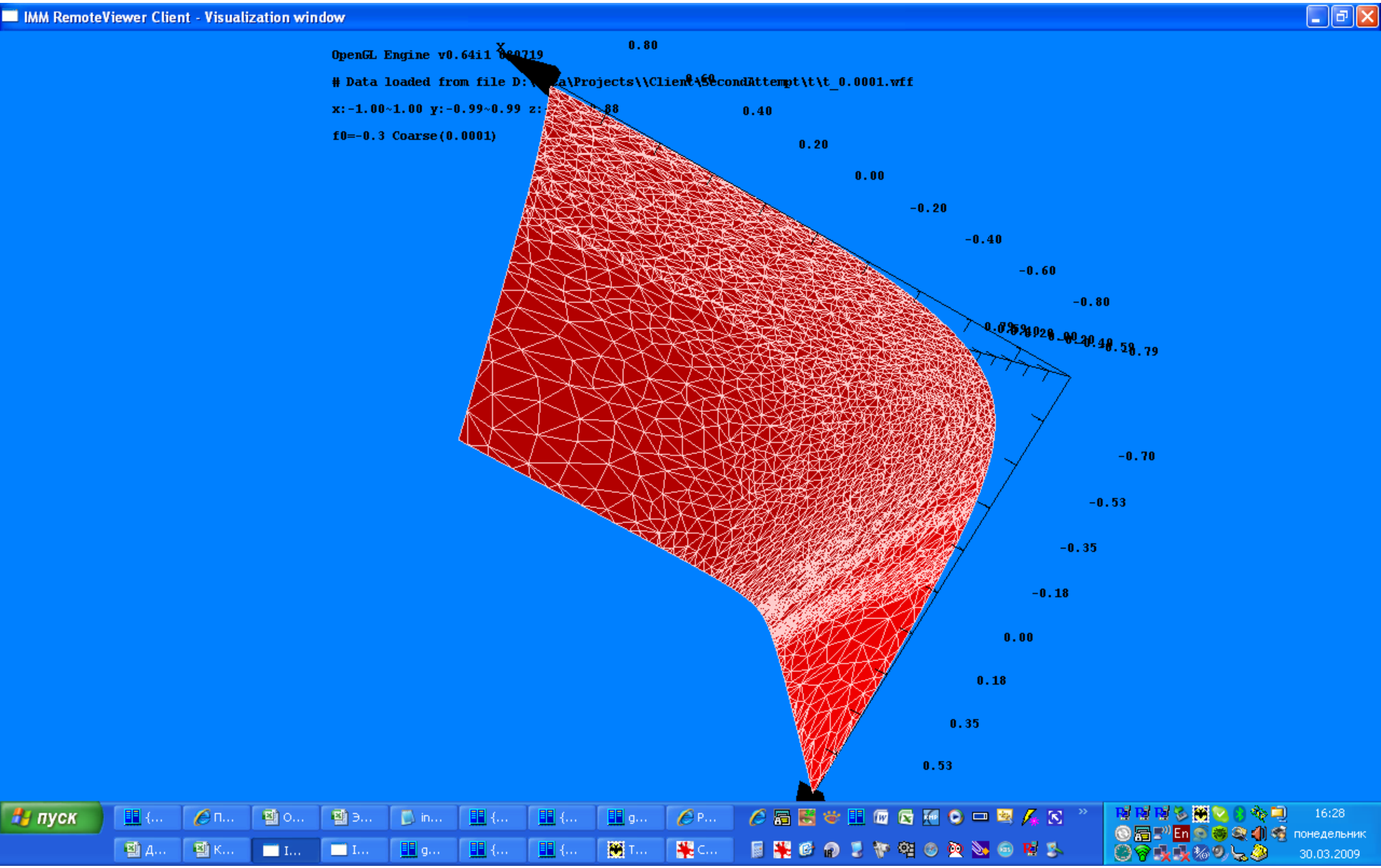
Mesh

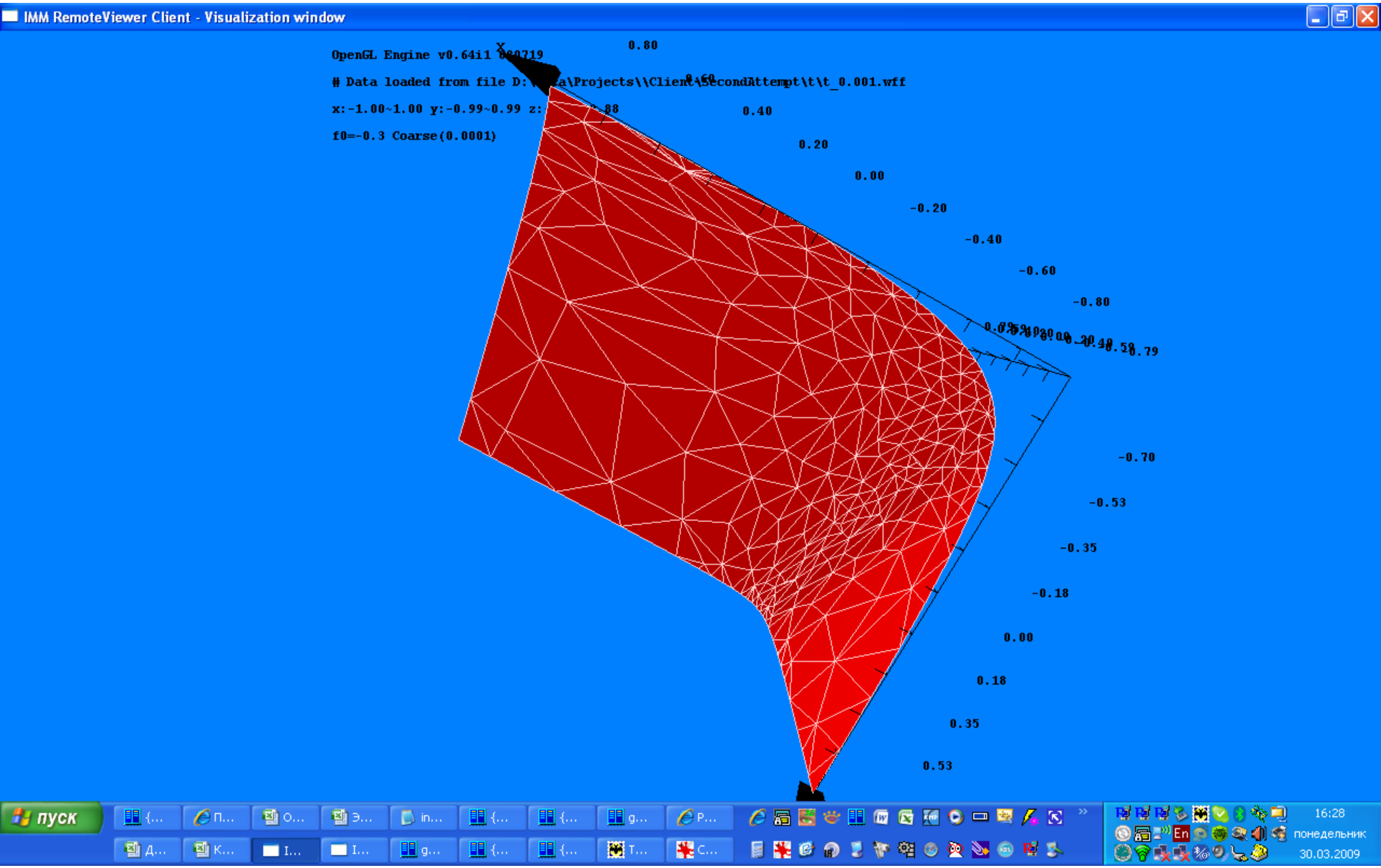
Flow over plane

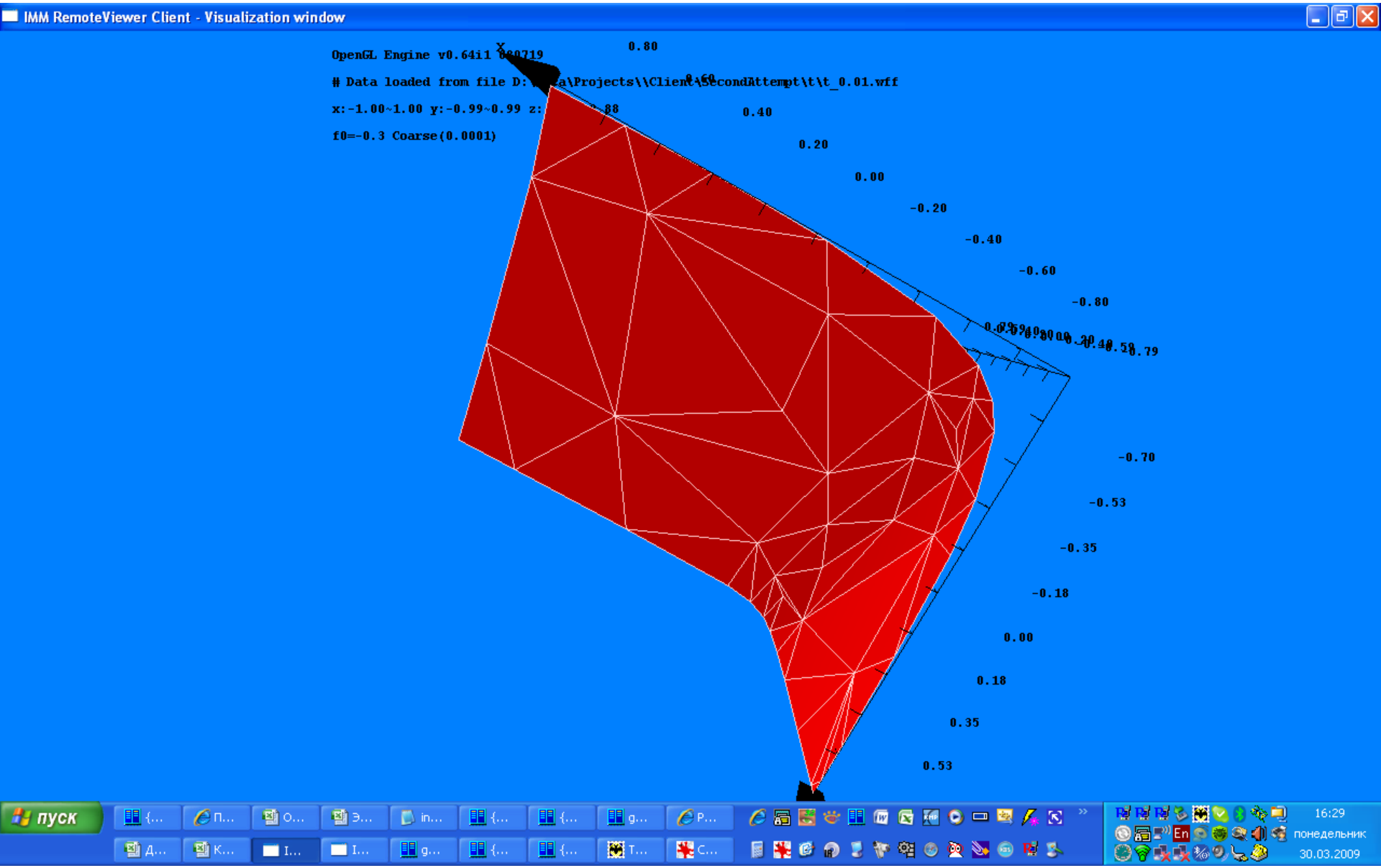
Iso-surfaces

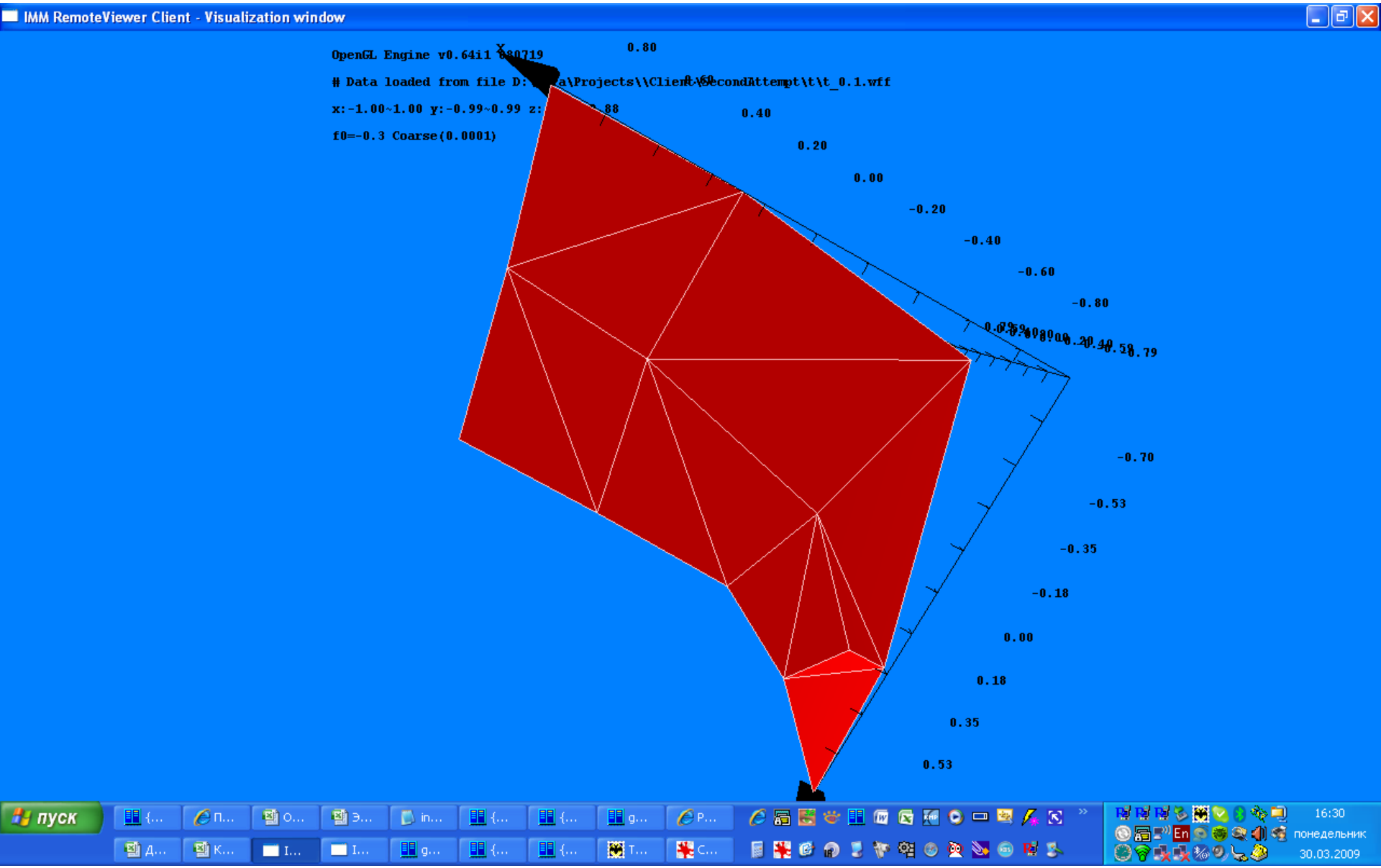


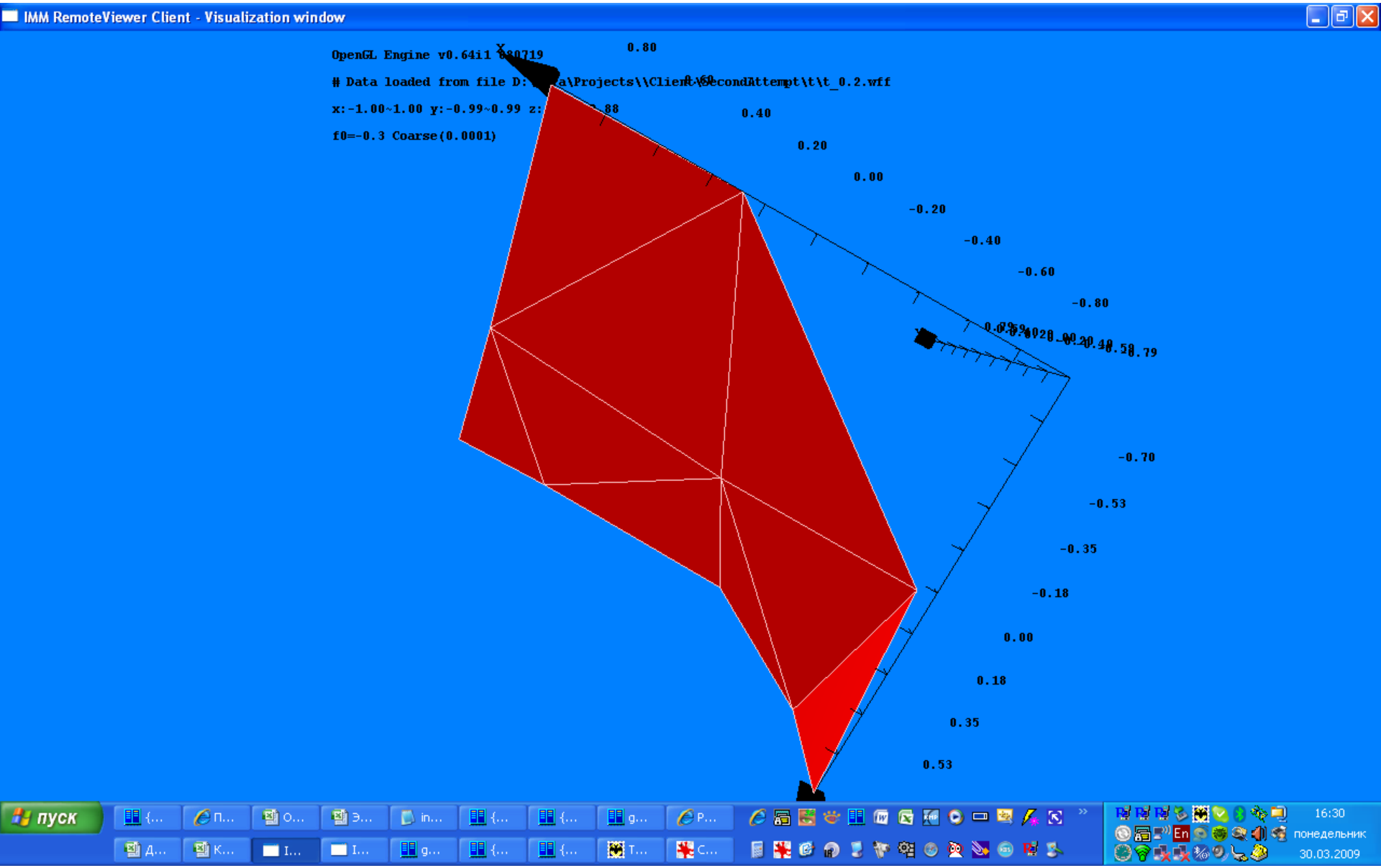

IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1
Data loaded from file D:
\Projects\\Client\SecondAttempt\t\t_original.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
пуск
16:26
понедельник
30.03.2009

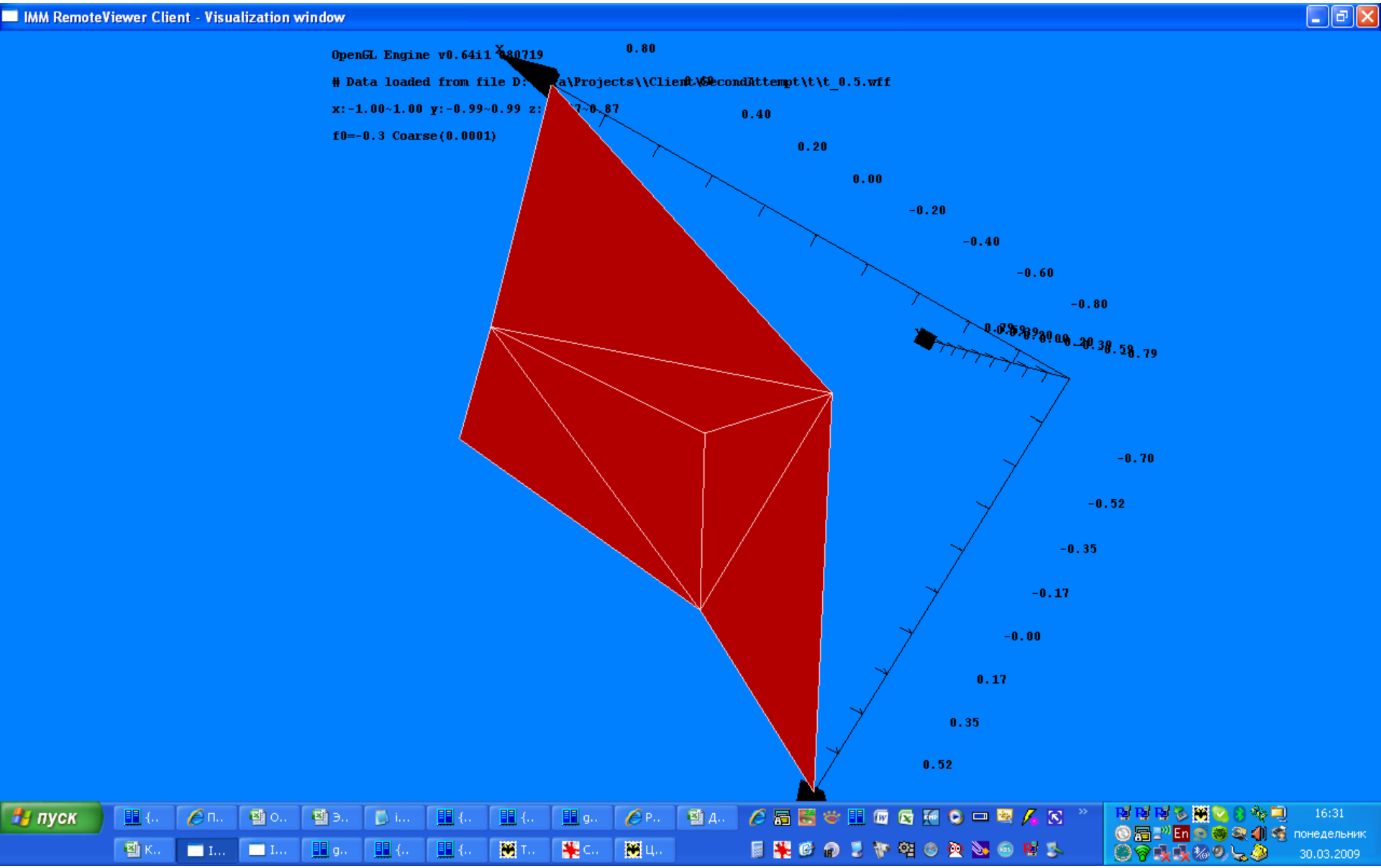

IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1
Data loaded from file D:
Projects\\Client\SecondAttempt\t\t_0.0001.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
пуск
16:28
понедельник
30.03.2009

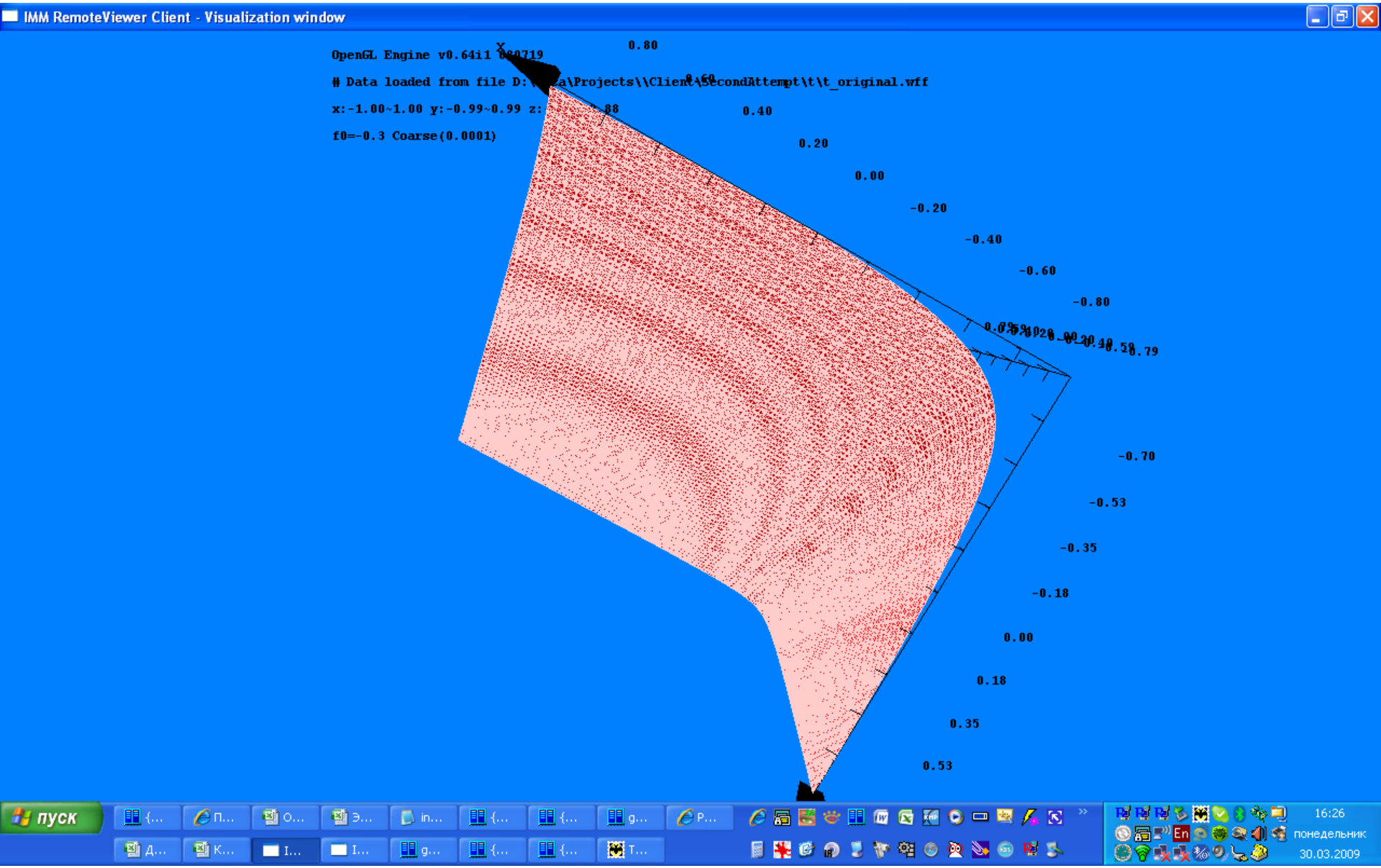

IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1
Data loaded from file D:
Projects\\Client\SecondAttempt\t\t_0.001.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
0.79
пуск
16:28
понедельник
30.03.2009

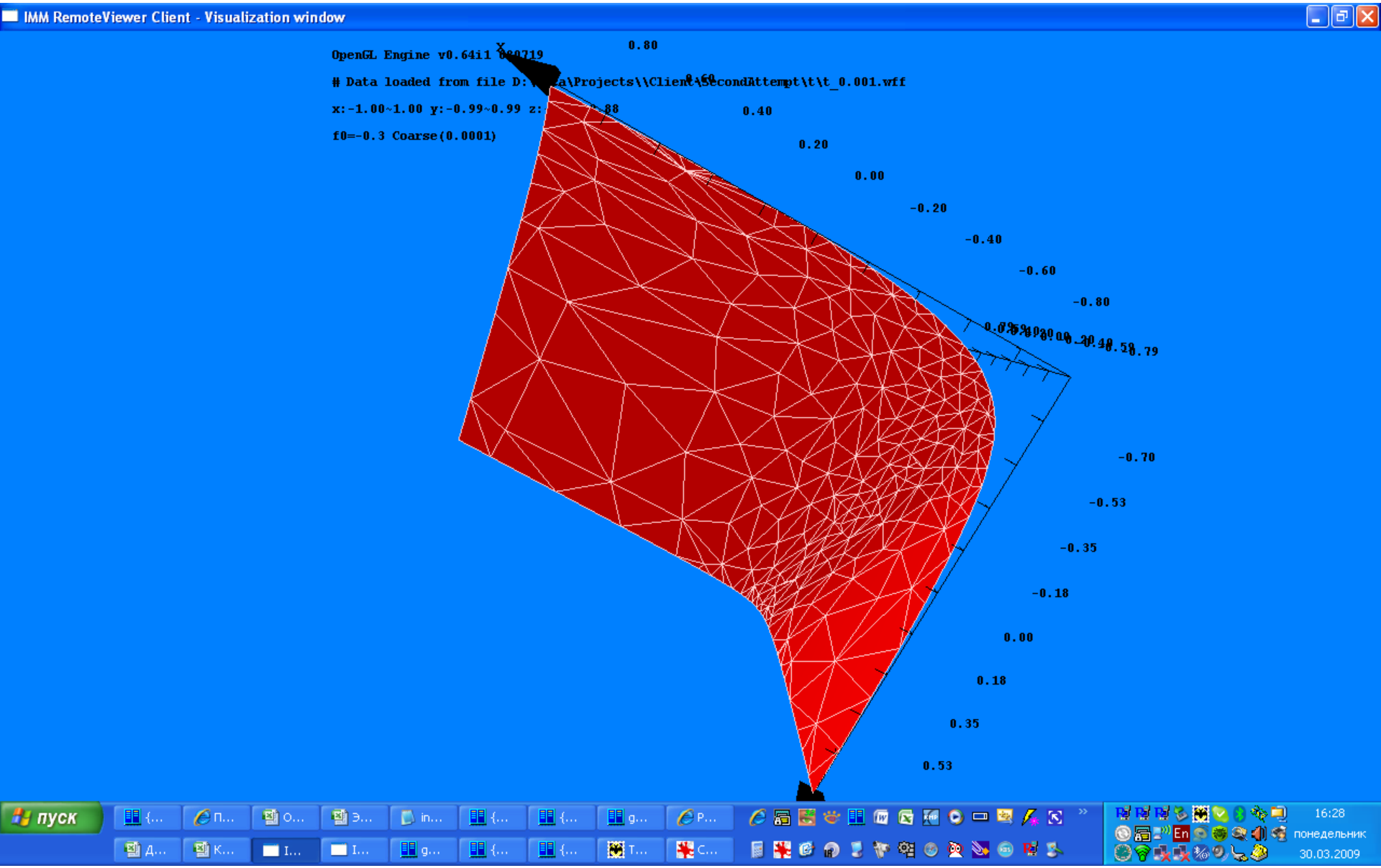

IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1
Data loaded from file D:
Projects\\Client\SecondAttempt\t\t_0.01.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
пуск
16:29
понедельник
30.03.2009


IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1 080719
Data loaded from file D:
a\Projects\\ClientSecondAttempt\t\t_0.1.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
пуск
16:30
понедельник
30.03.2009


IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1
Data loaded from file D:
a\Projects\\ClientVSecondAttempt\t\t_0.2.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
пуск
16:30
понедельник
30.03.2009


IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1 080719
Data loaded from file D:
a\Projects\\Client\SecondAttempt\t\t_0.5.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
7~0.87
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.52
-0.35
-0.17
-0.00
0.17
0.35
0.52
пуск
16:31
понедельник
30.03.2009

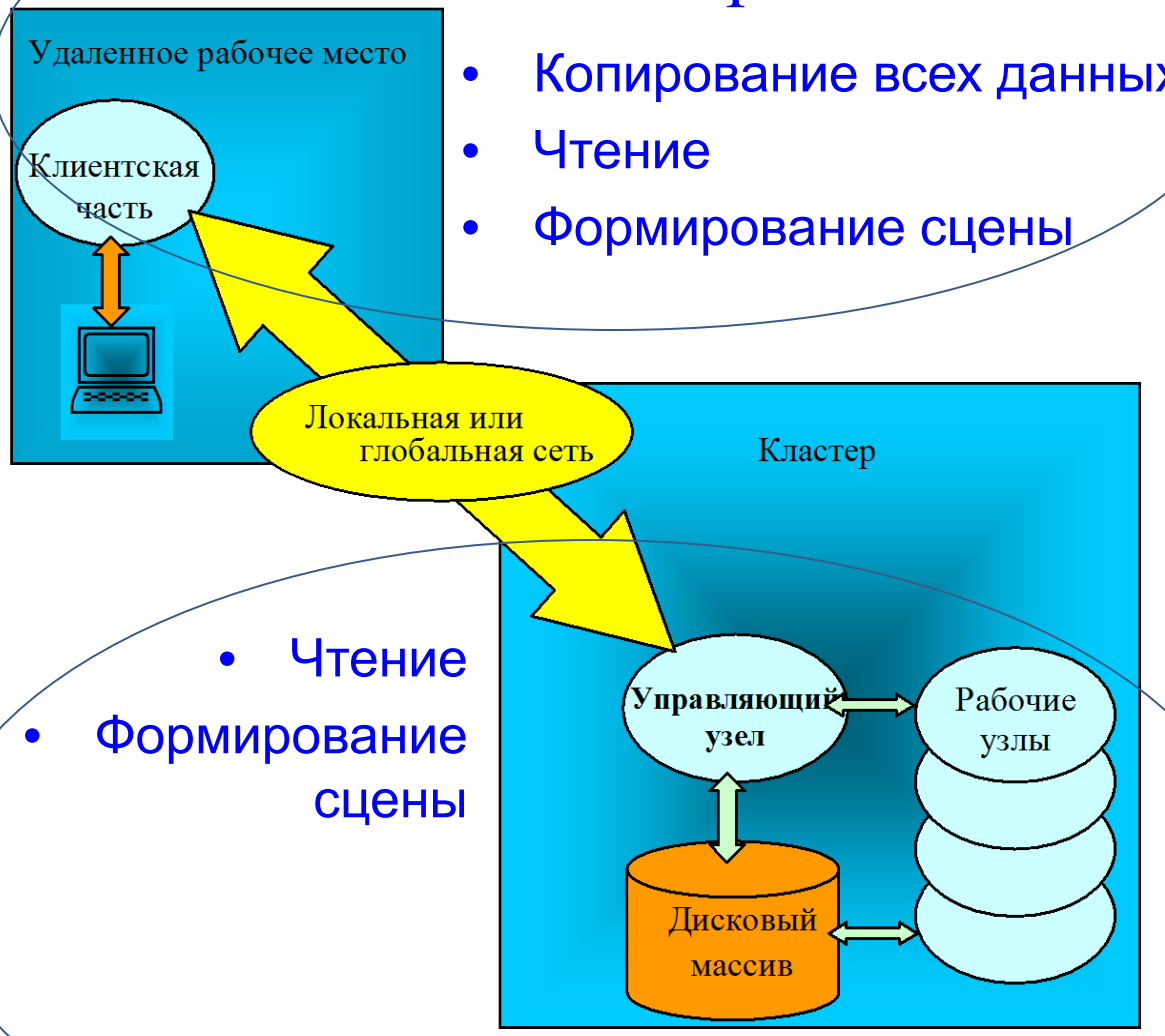

IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1
Data loaded from file D:
Projects\\Client\SecondAttempt\t\t_original.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
X
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
пуск
16:26
понедельник
30.03.2009


IMM RemoteViewer Client - Visualization window
OpenGL Engine v0.64i1
Data loaded from file D:
Projects\\Client\SecondAttempt\t\t_0.001.wff
x:-1.00~1.00 y:-0.99~0.99 z:
f0=-0.3 Coarse(0.0001)
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-0.70
-0.53
-0.35
-0.18
0.00
0.18
0.35
0.53
пуск
16:28
понедельник
30.03.2009

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

Аппроксимация и потоковая обработка

- Копирование всех данных
- Чтение
- Формирование сцены



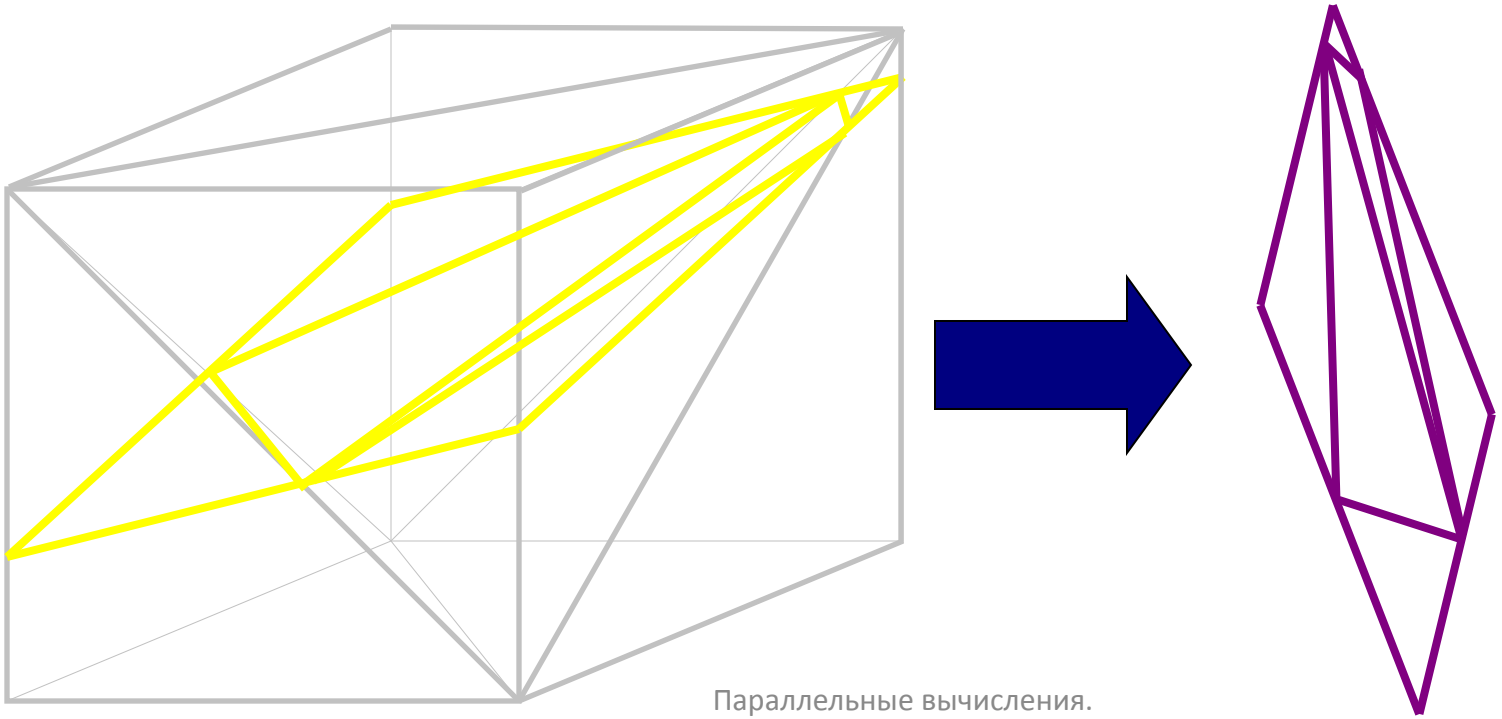
- Чтение
- Формирование сцены

Клиент-серверная технология

TecPlot
Origin
VISIT ParaView
EnSight OpenDX

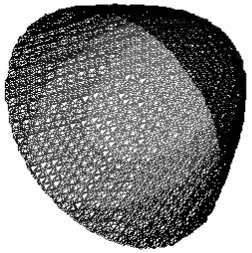
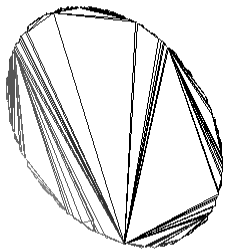
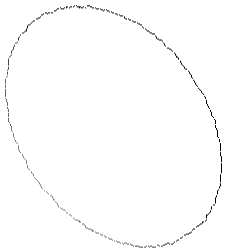
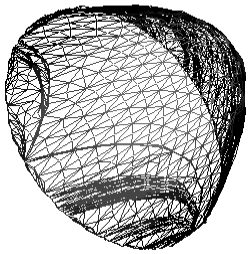
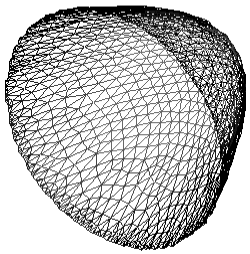
Сечение регулярной 3D сетки плоскостью

- В результате сечения регулярной кубической решетки получается фрагмент неструктурированной сетки



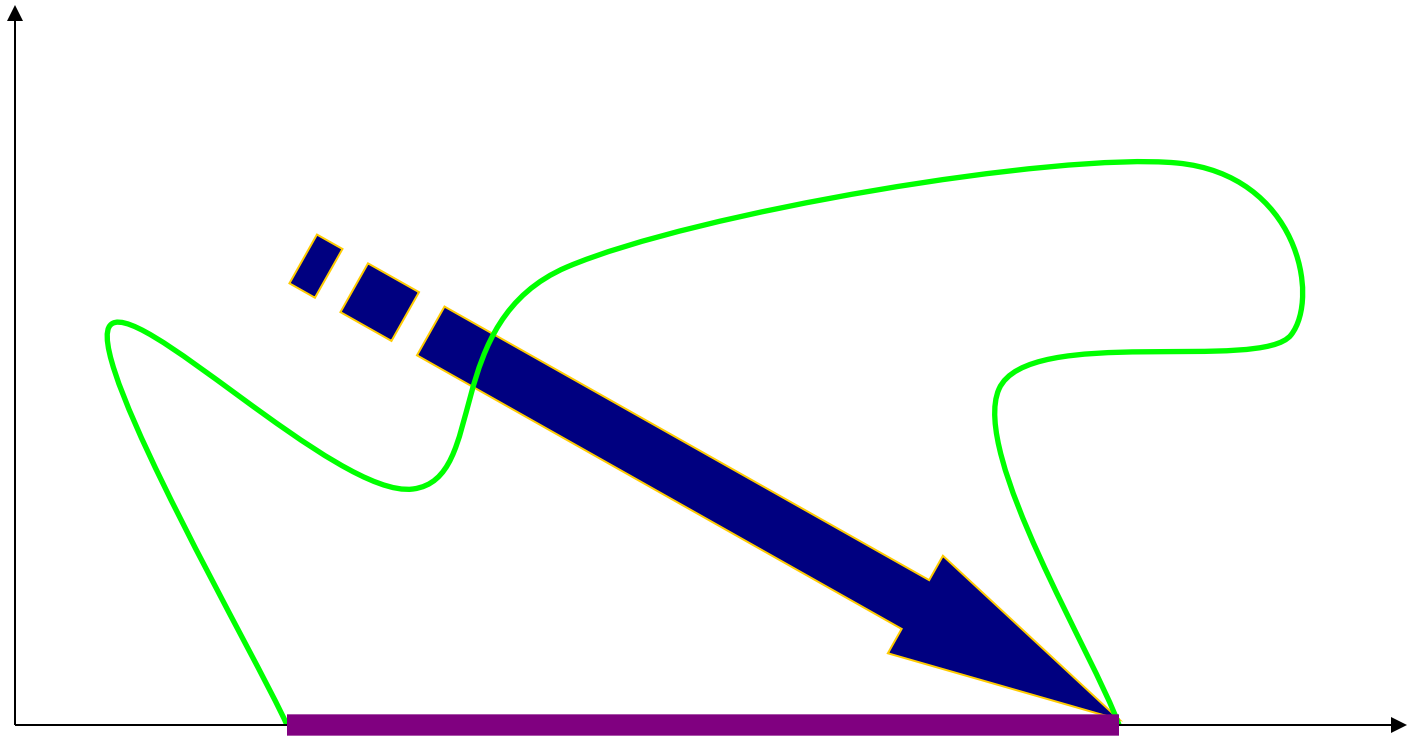
Аппроксимация триангулированных поверхностей

- Алгоритмы синтеза

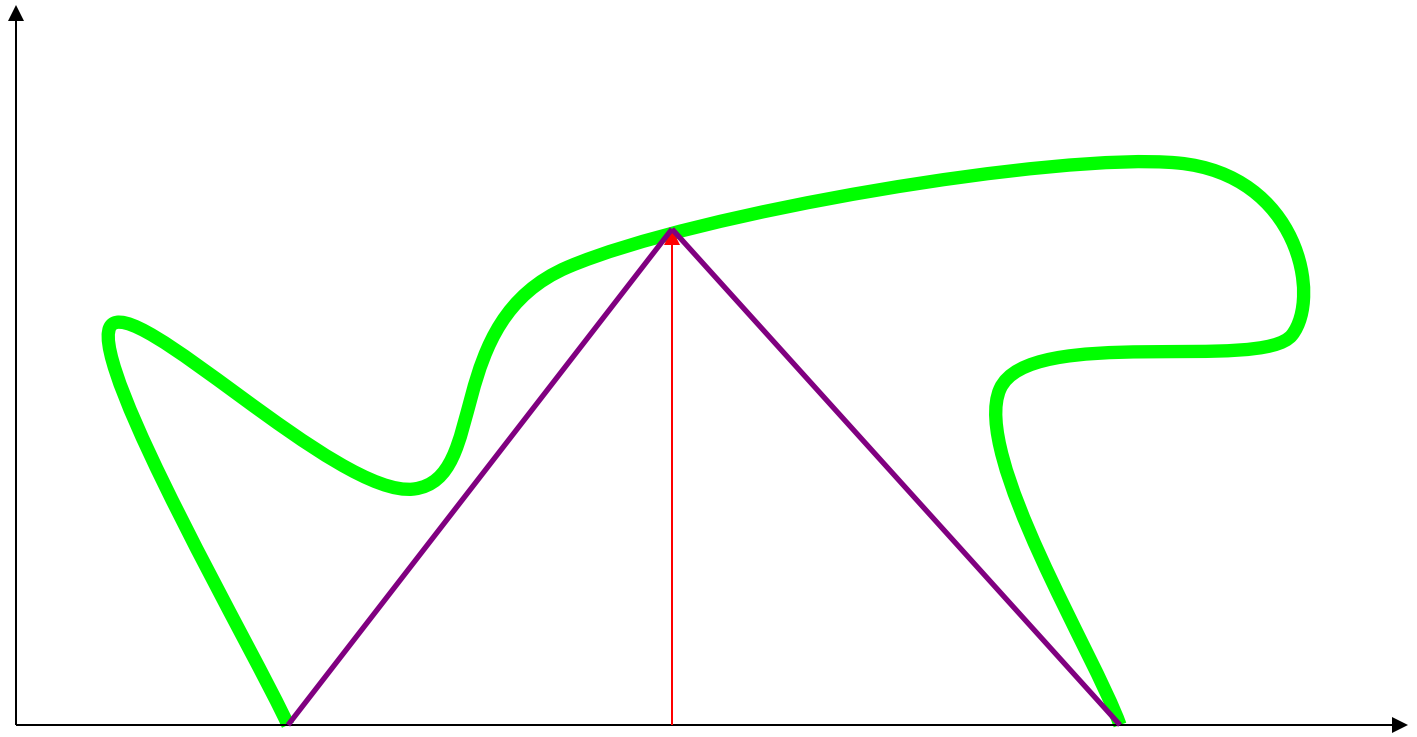






- Алгоритмы редуцирования

Начальная аппроксимация кривой

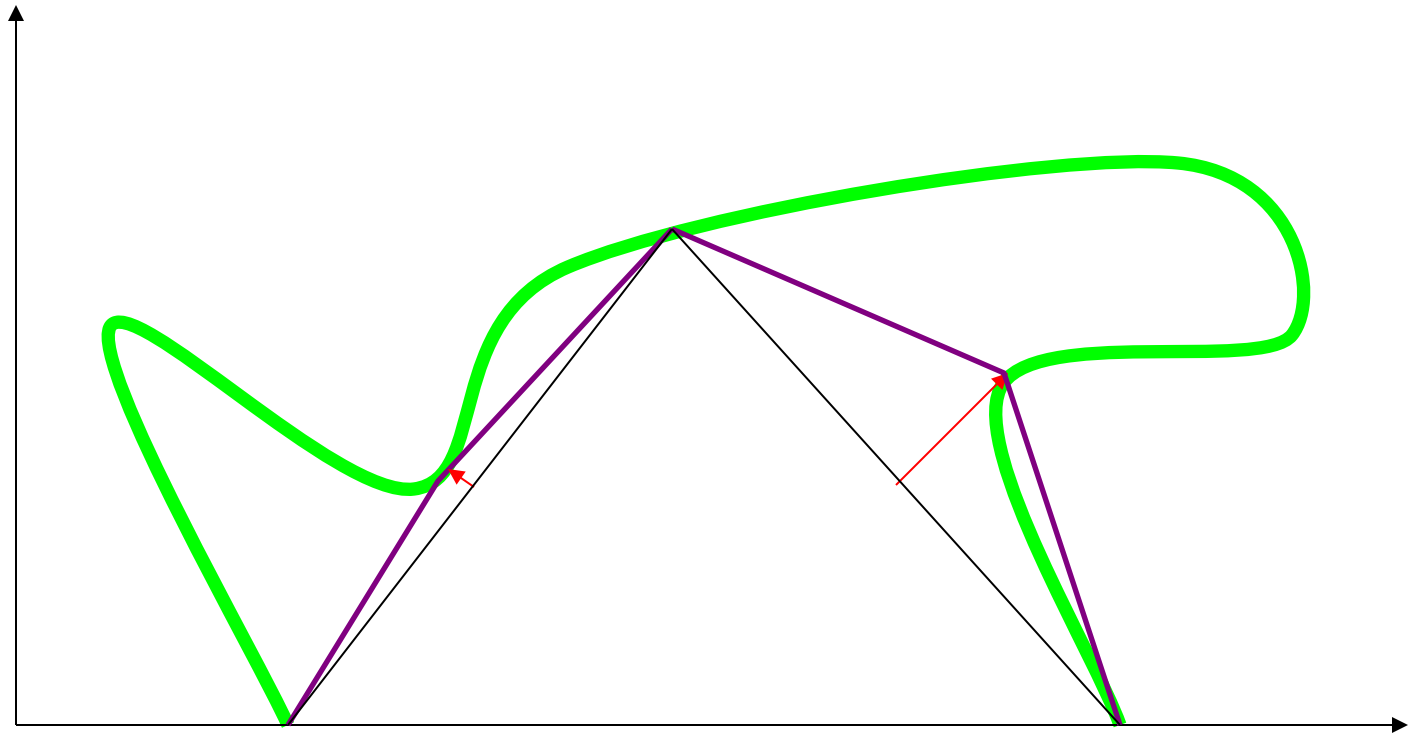


Аппроксимация кривой
этап 2



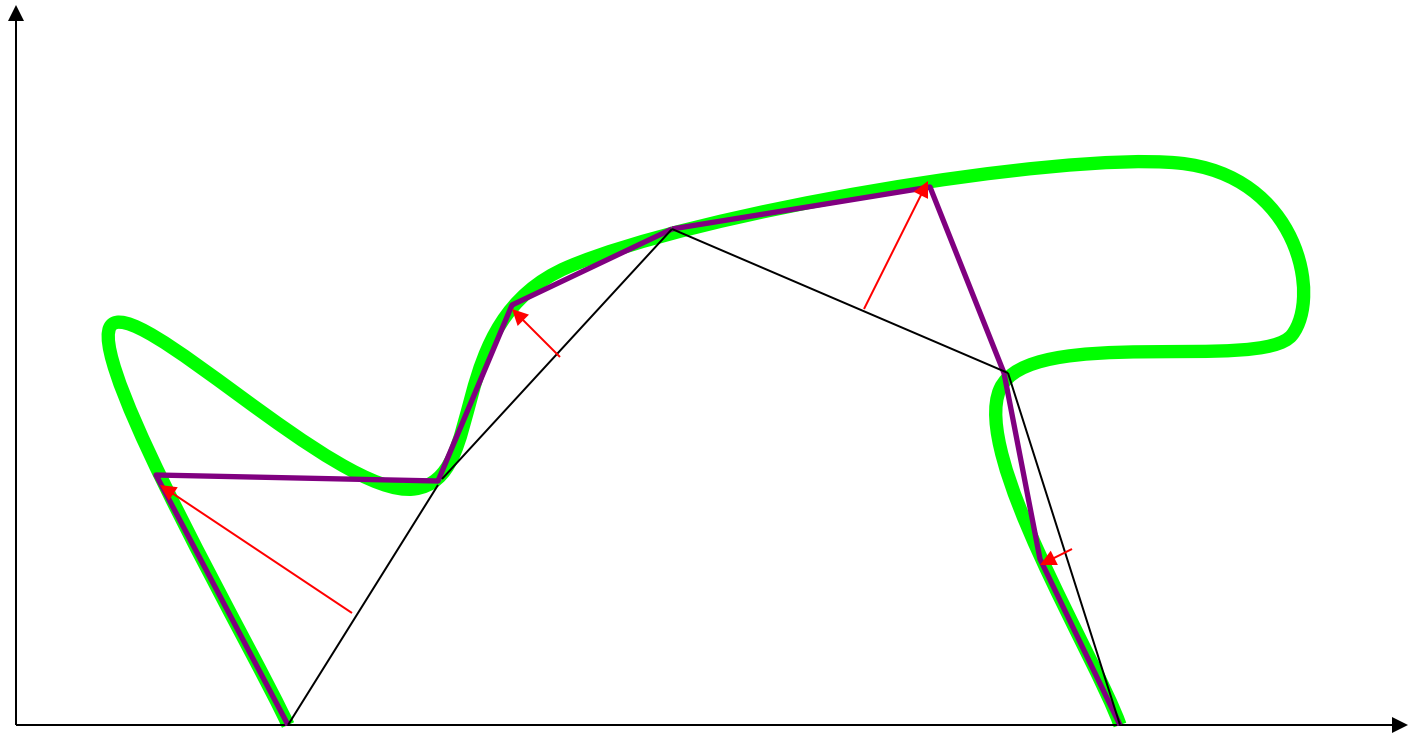
1 вектор

Аппроксимация кривой
этап 3



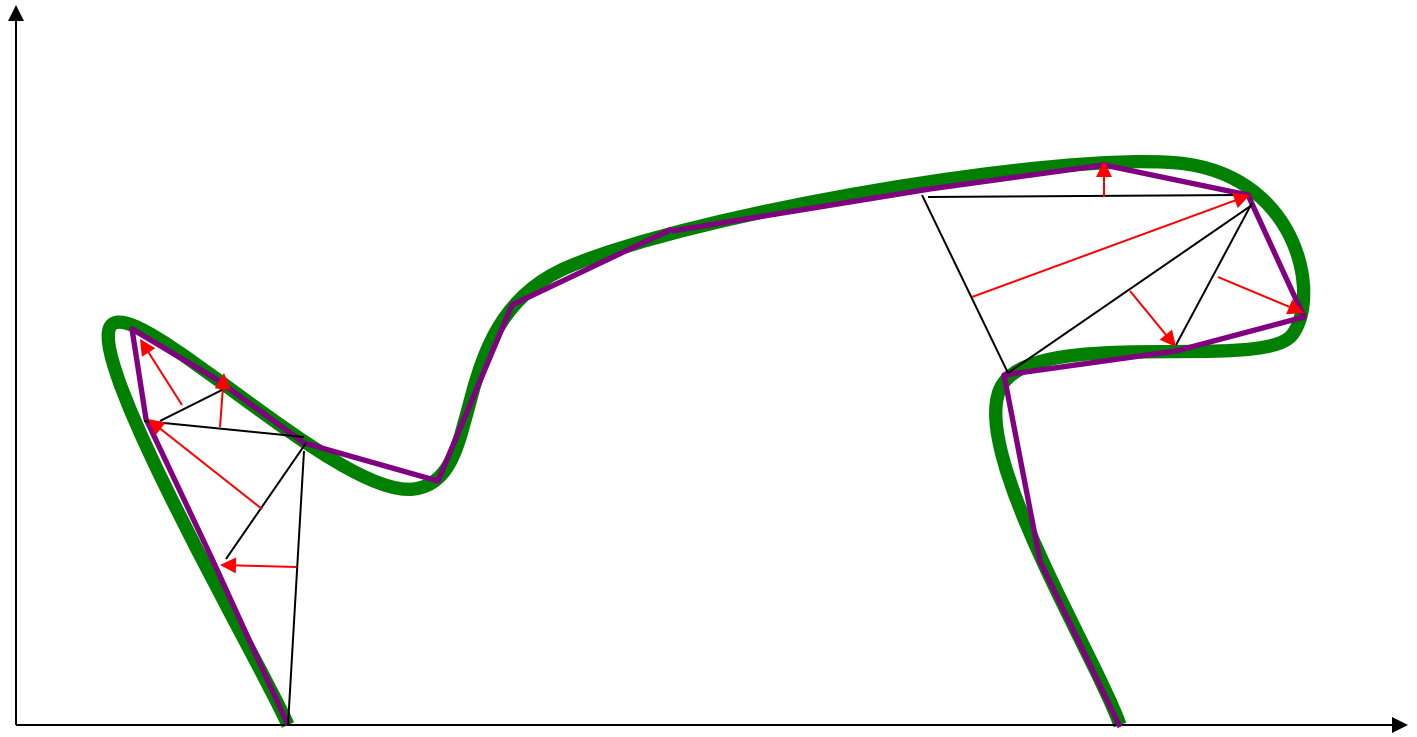
3 вектора

Аппроксимация кривой
этап 4



7 векторов

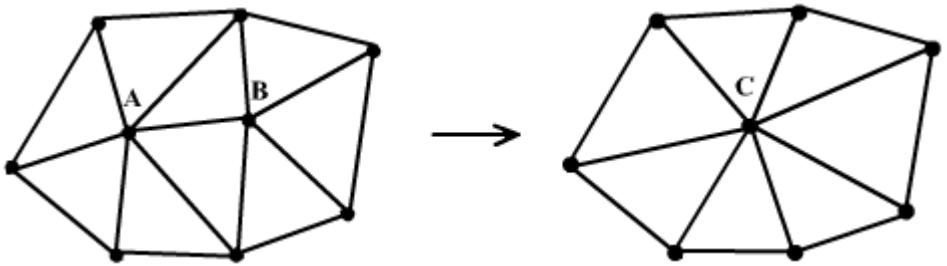
Аппроксимация кривой этап 5



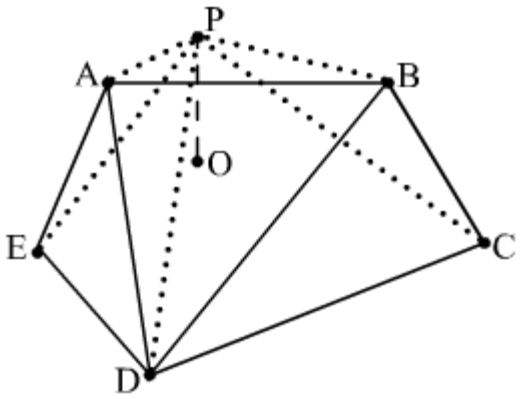
15 векторов

Методы редуцирования

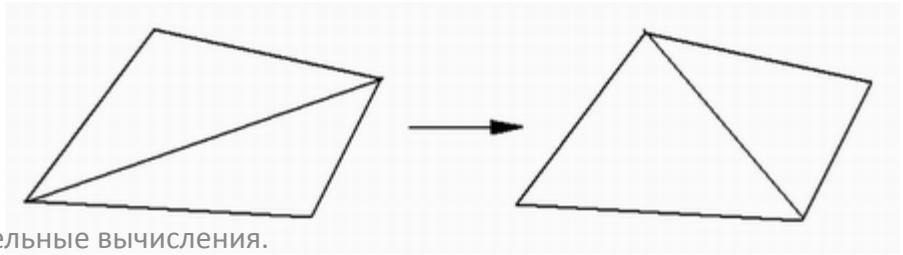
Удаление ребра



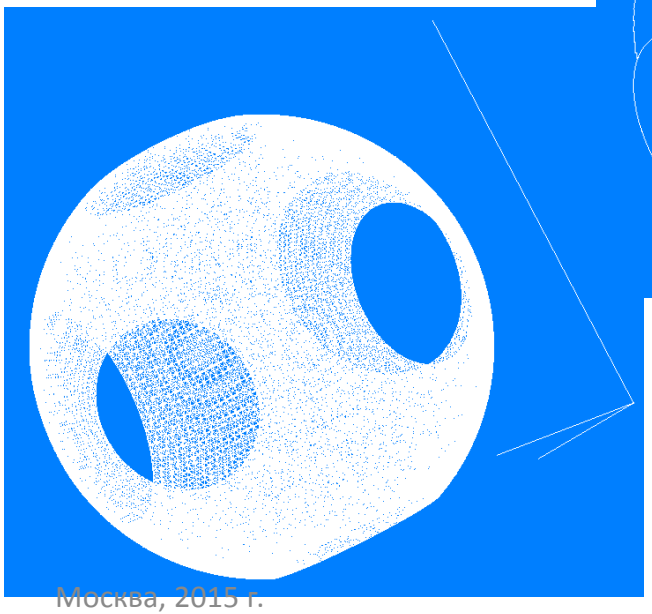
Удаление точки

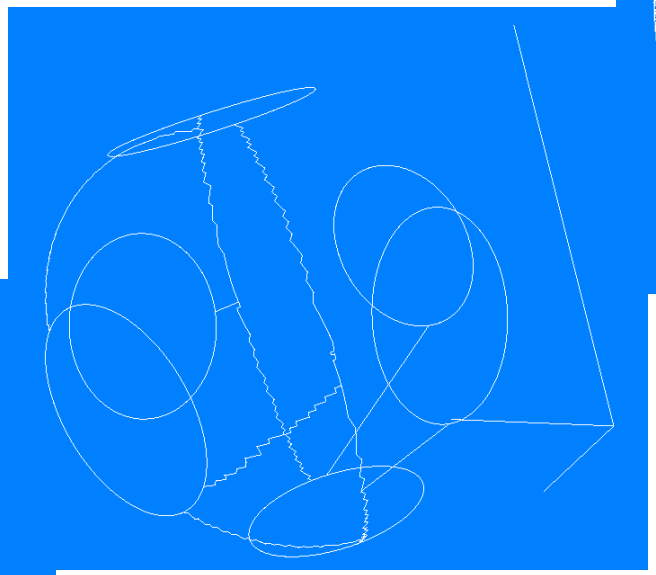


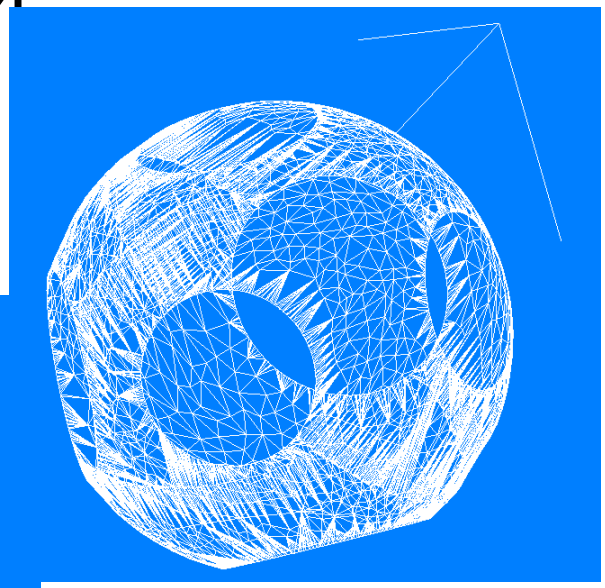
Уточнение топологии

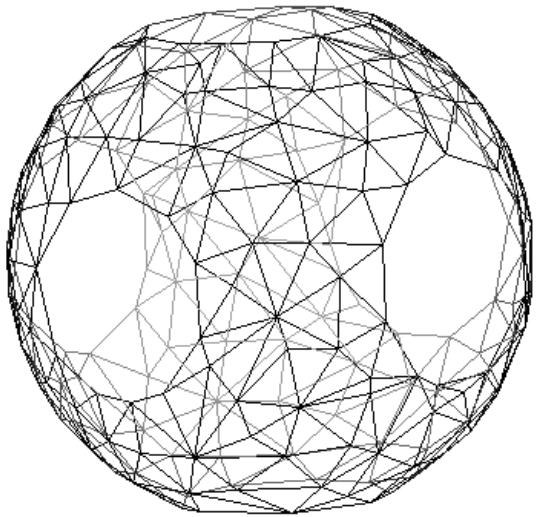


Аппроксимация изоповерхностей



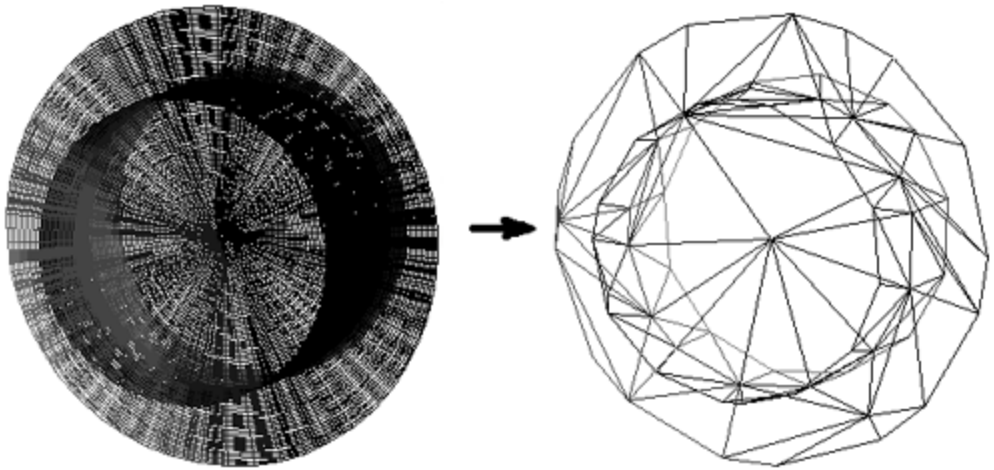


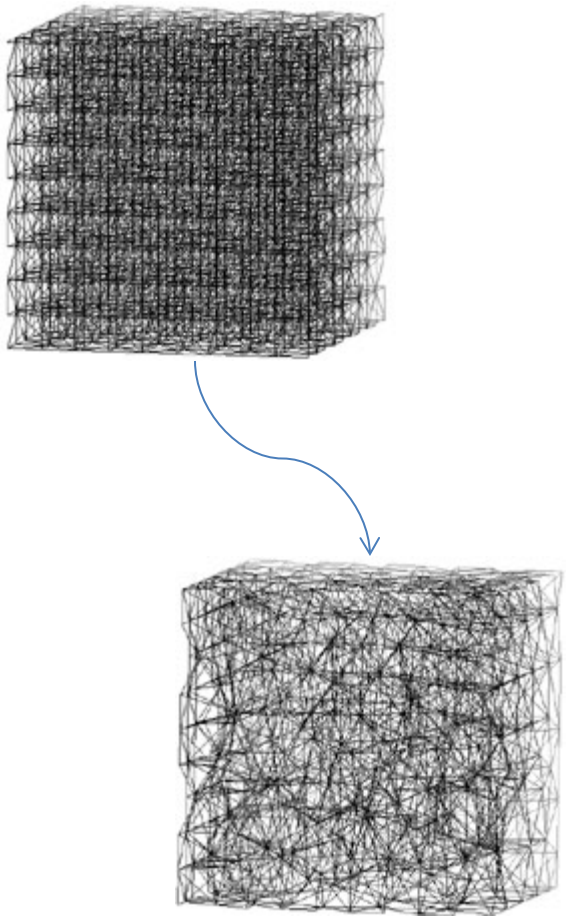




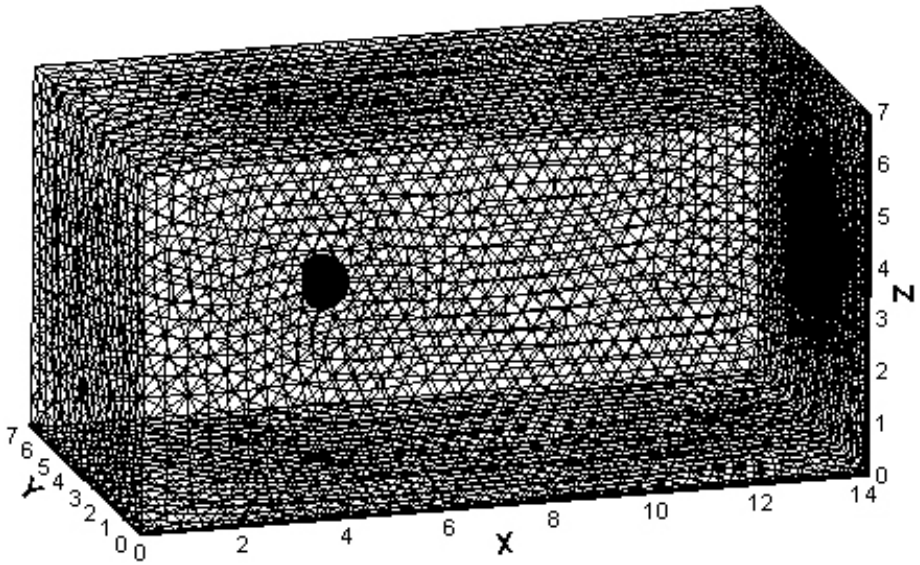
Изоповерхности

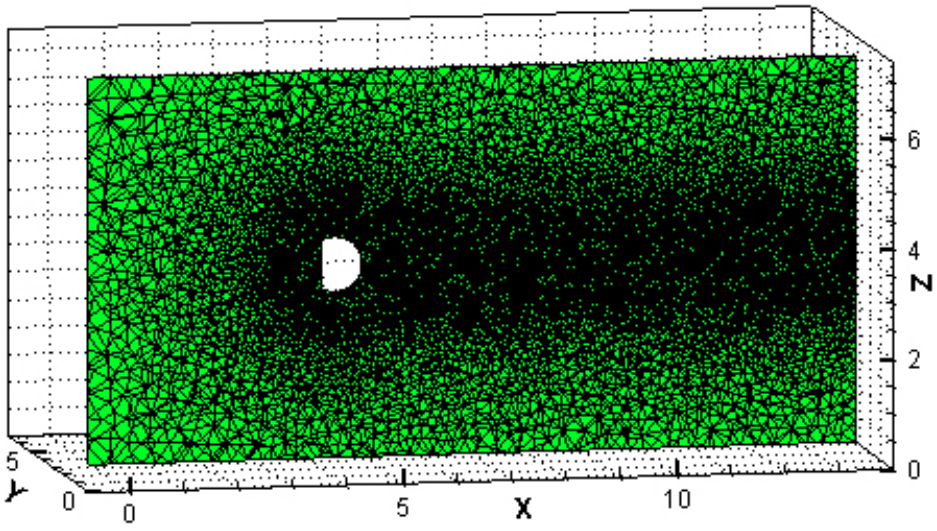
Ошибка аппроксимации 5%

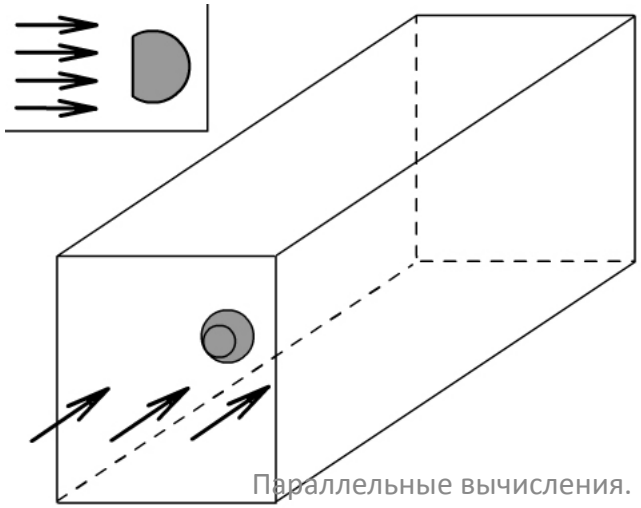




Расчетная сетка

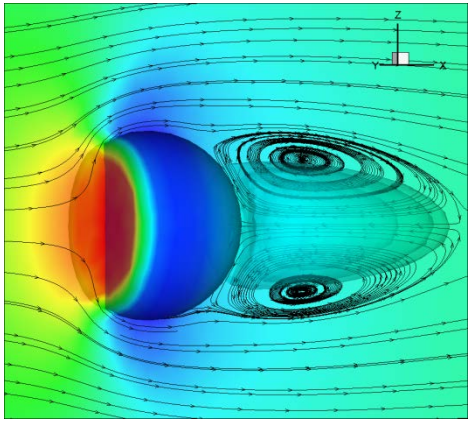




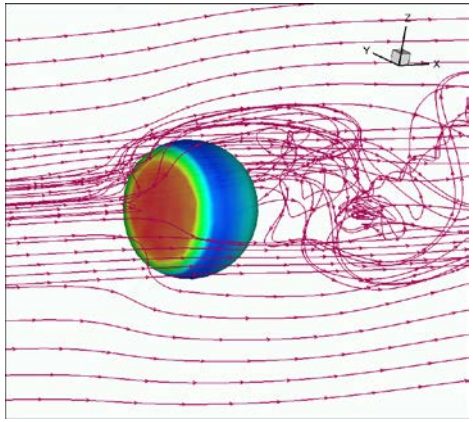


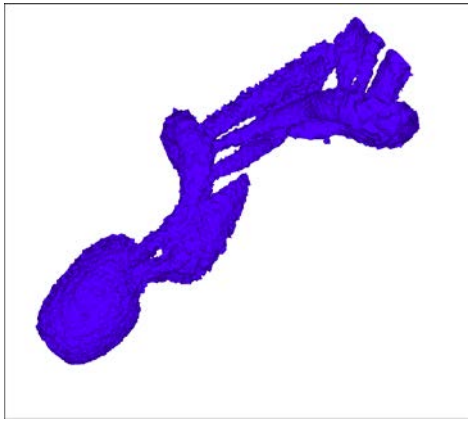
Моделирование обтекания тел сферической формы

Стационарное обтекание скошенной сферы
M = 0.8 Re = 100

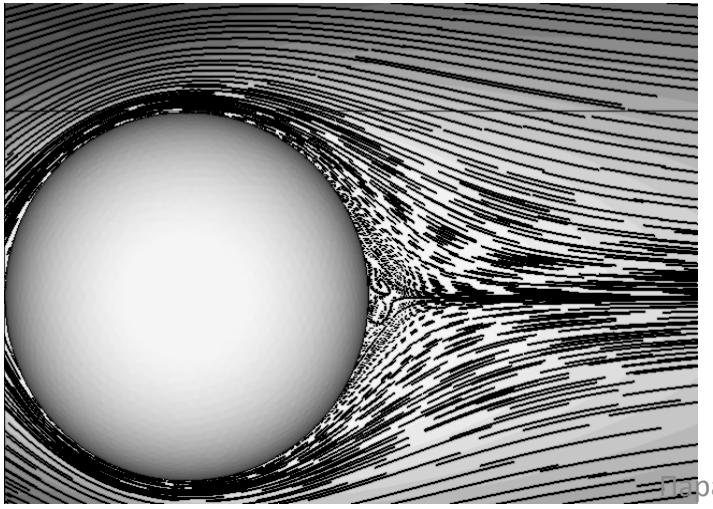


Нестационарное обтекание скошенной сферы
M = 0.8 Re = 100000

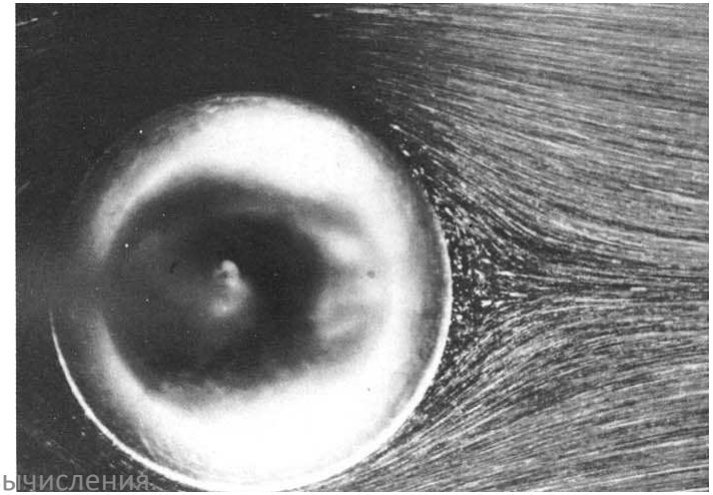




Стационарное обтекание сферы M = 0.1 Re = 25



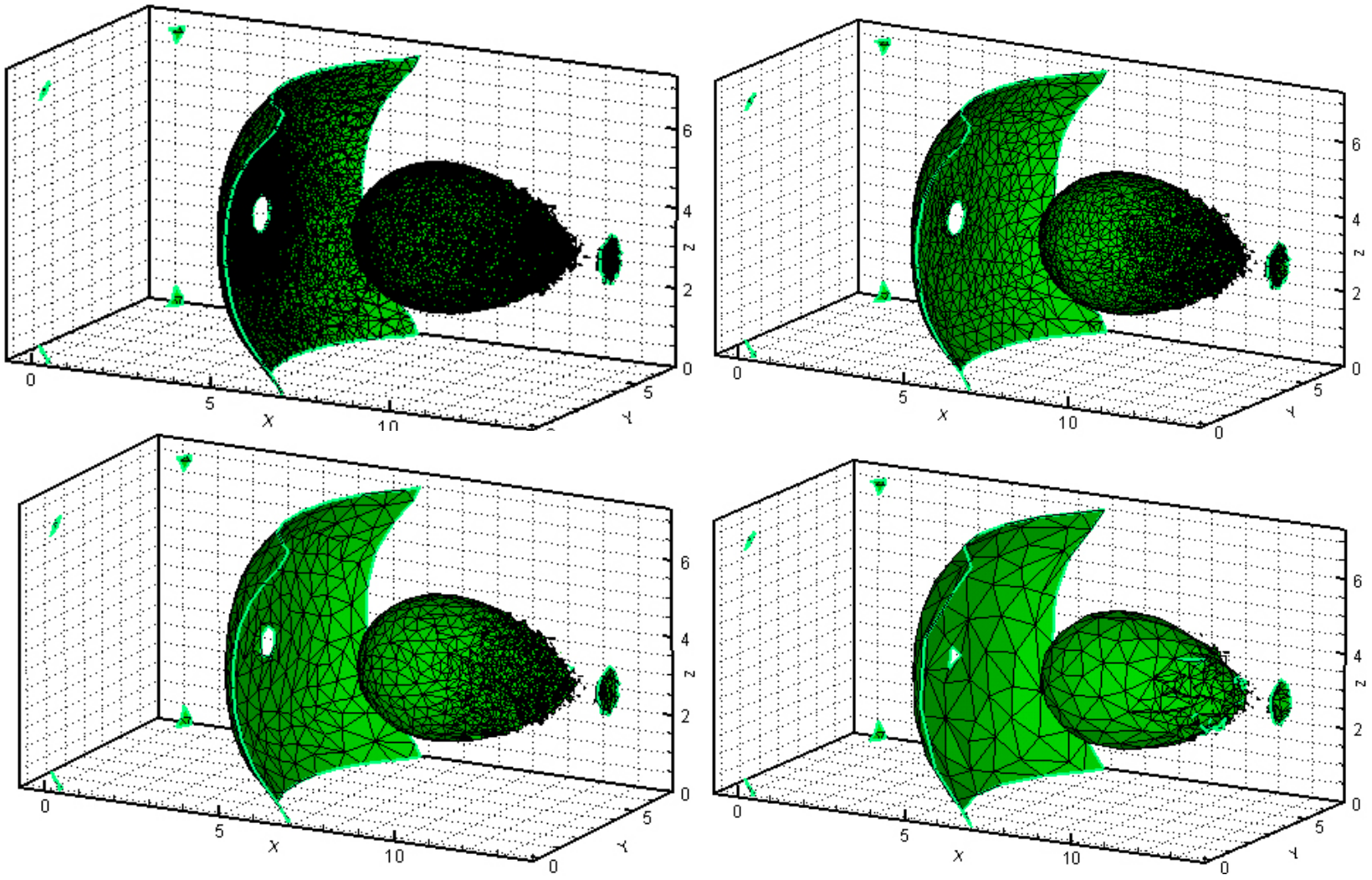
Рассчитанные траектории отмеченных частиц. Re=25



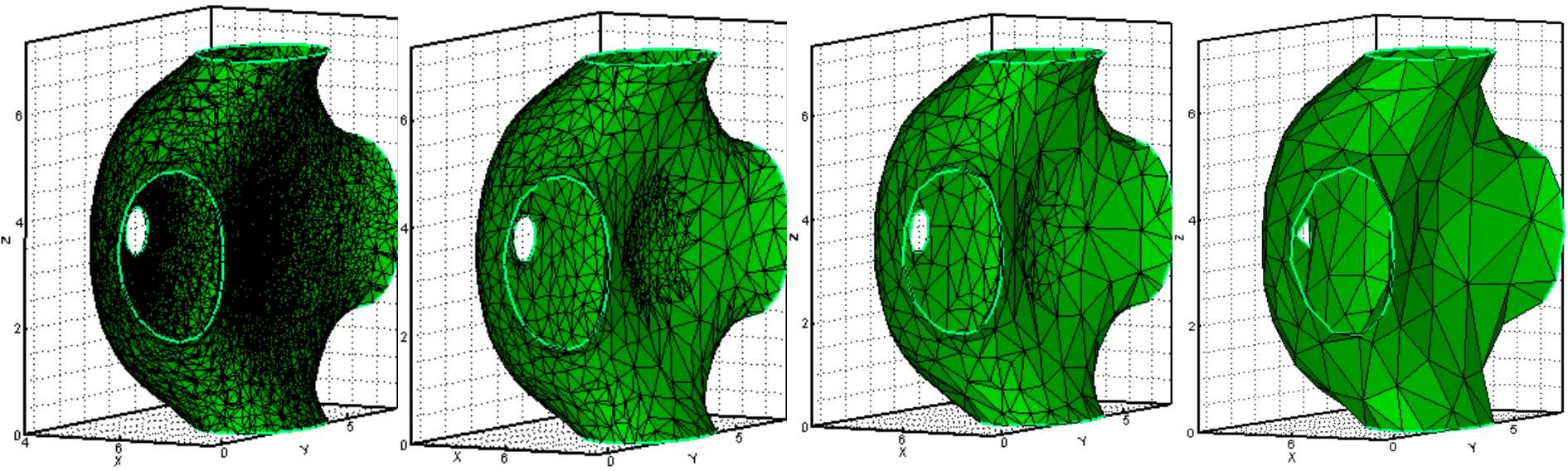
Эксперимент. Re=26.8 (Ван-Дайк М., 1986)

© Якобовский М.В.

Огрубление поверхностей

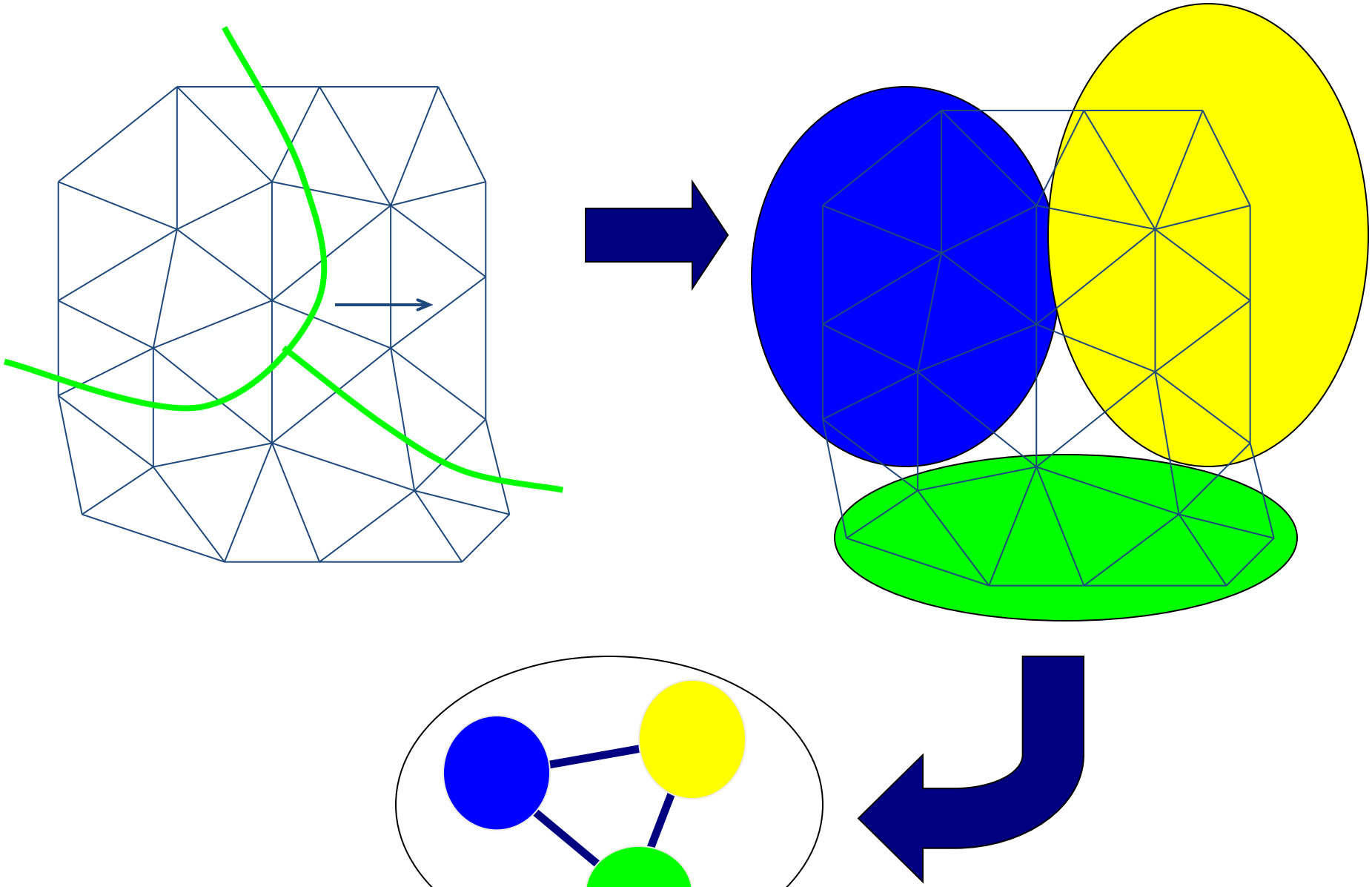


Огрубление поверхностей



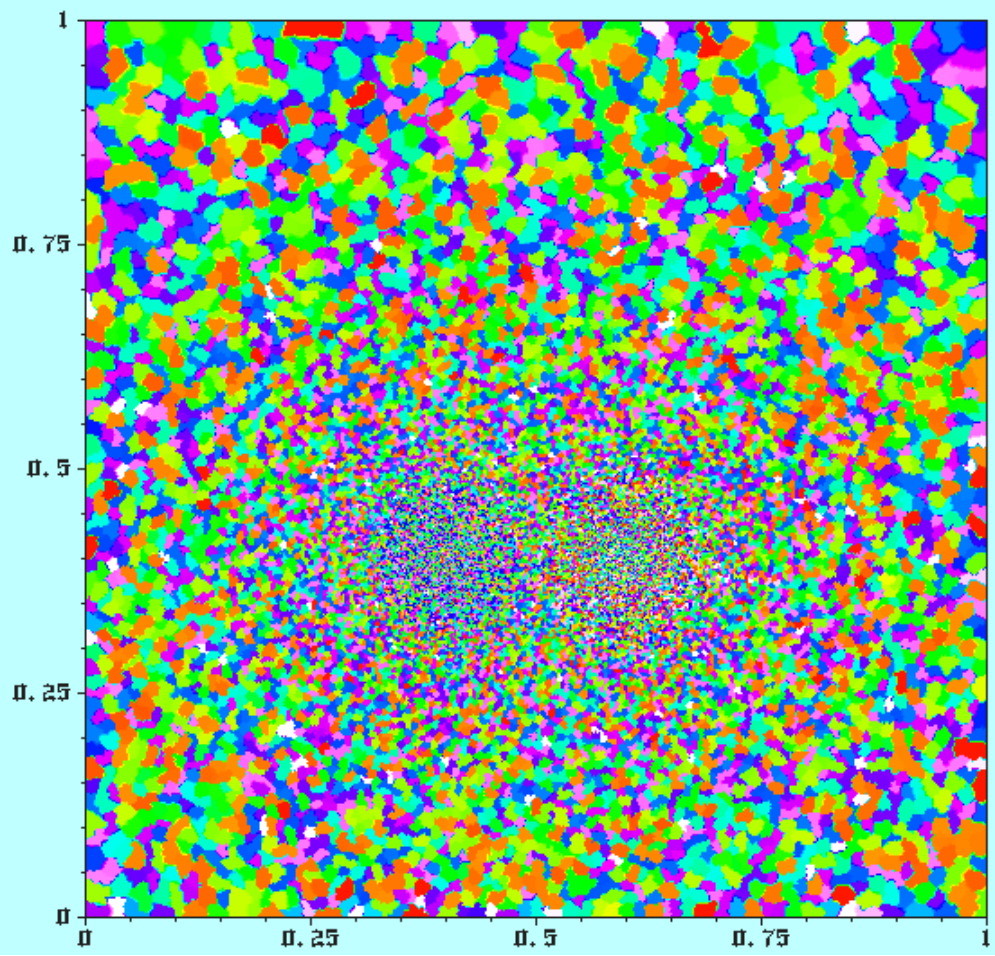
Ошибка	Количество точек	Количество треугольников	Коэффициент сжатия
0%	13800	27357	-
0,1%	1120	2117	12,9
0,2%	447	808	33,9
0,5%	175	304	90,0

Формирование макрографа



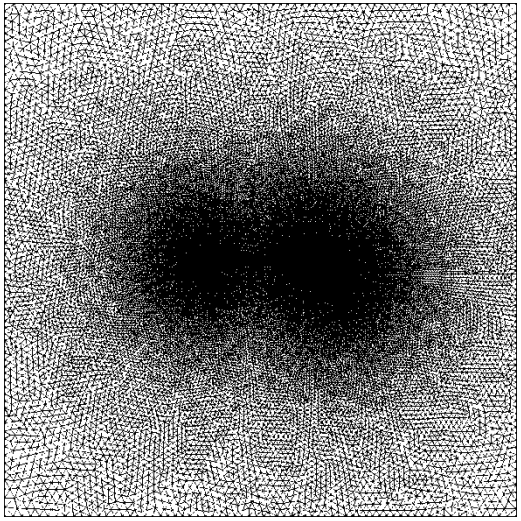
Сетка микродоменов

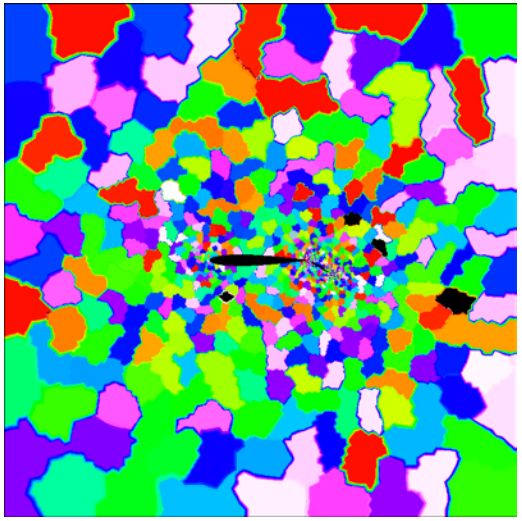
вес	число	% отн. число
12	3	0.01%
13	3	0.01%
14	15	0.03%
15	33	0.06%
16	228	0.44%
17	1 373	2.66%
18	5 433	10.54%
19	11 713	22.73%
20	14 218	27.59%
21	11 069	21.48%
22	5 737	11.13%
23	1 505	2.92%
24	192	0.37%
25	13	0.03%
26	2	0.00%
27	1	0.00%

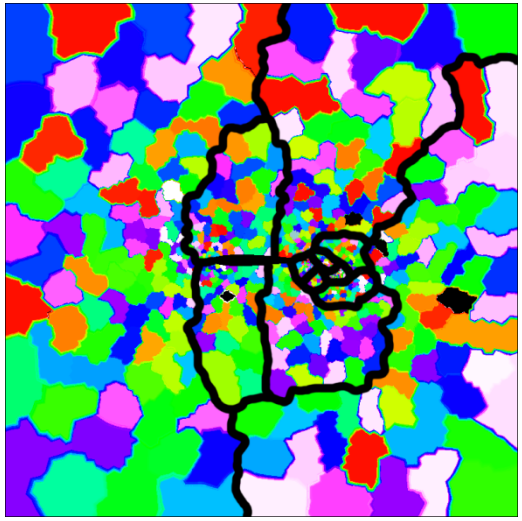


51 538 микродомен

Двухуровневое разбиение







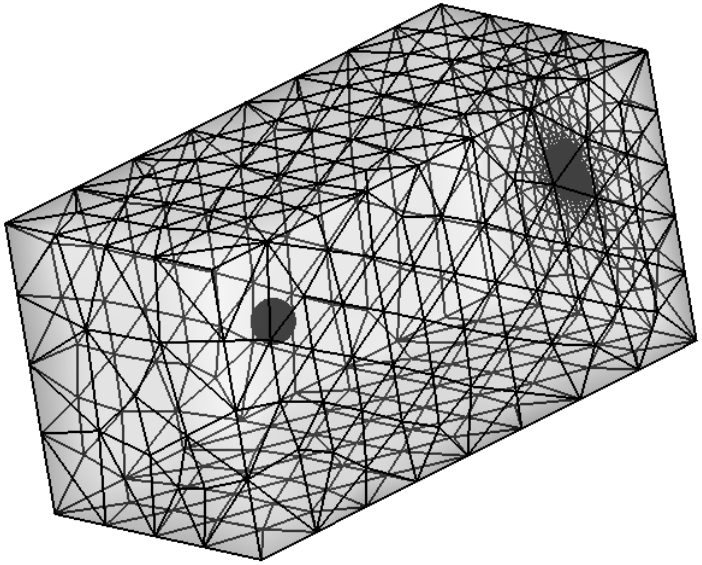
I

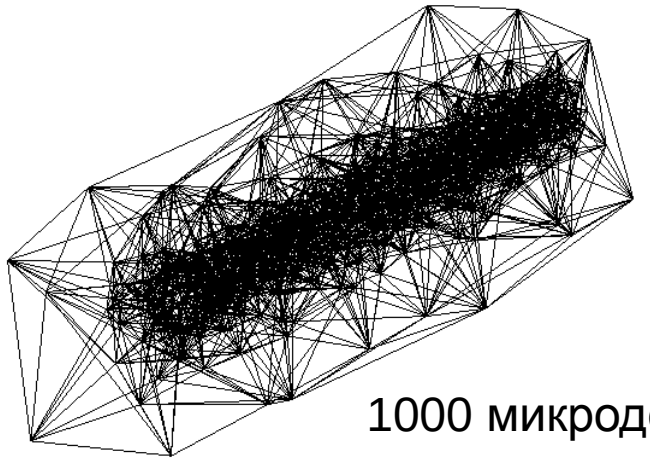
II

Сетка предварительно разбивается на большое число *микродоменов,* образующих *макрограф*

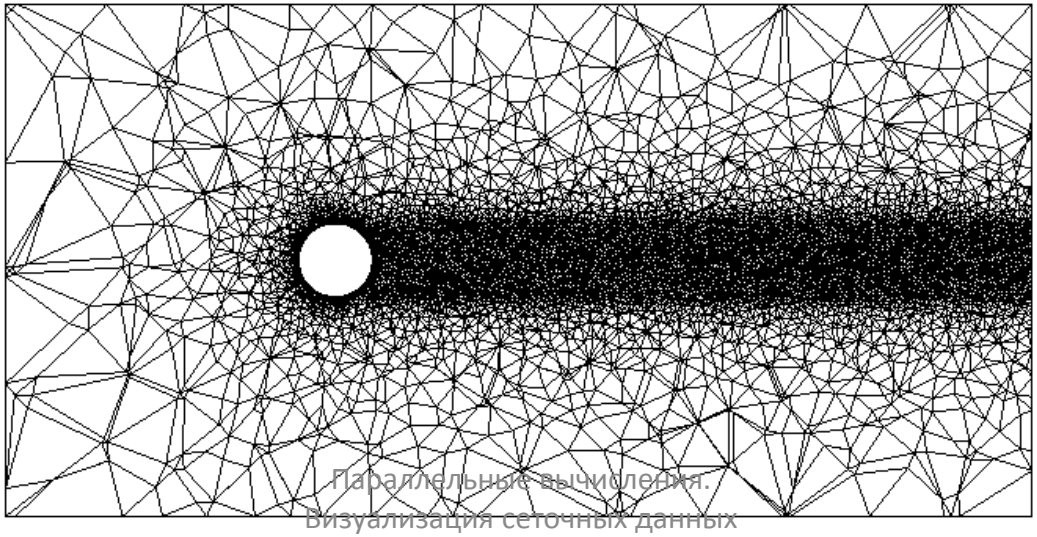
Вершины макрографа распределяются по процессорам

Обтекание сферы





1000 микродоменов



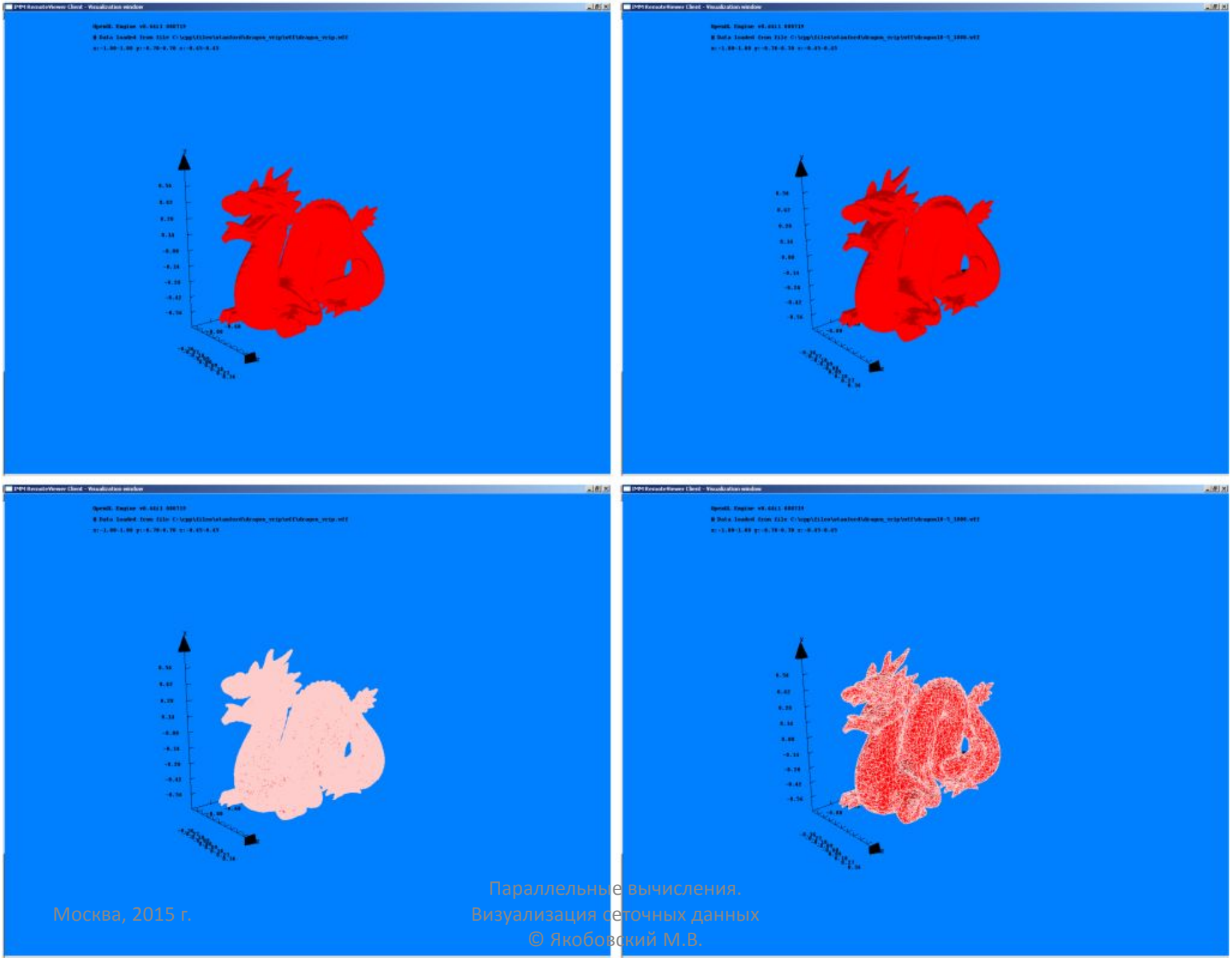
Потоковая обработка

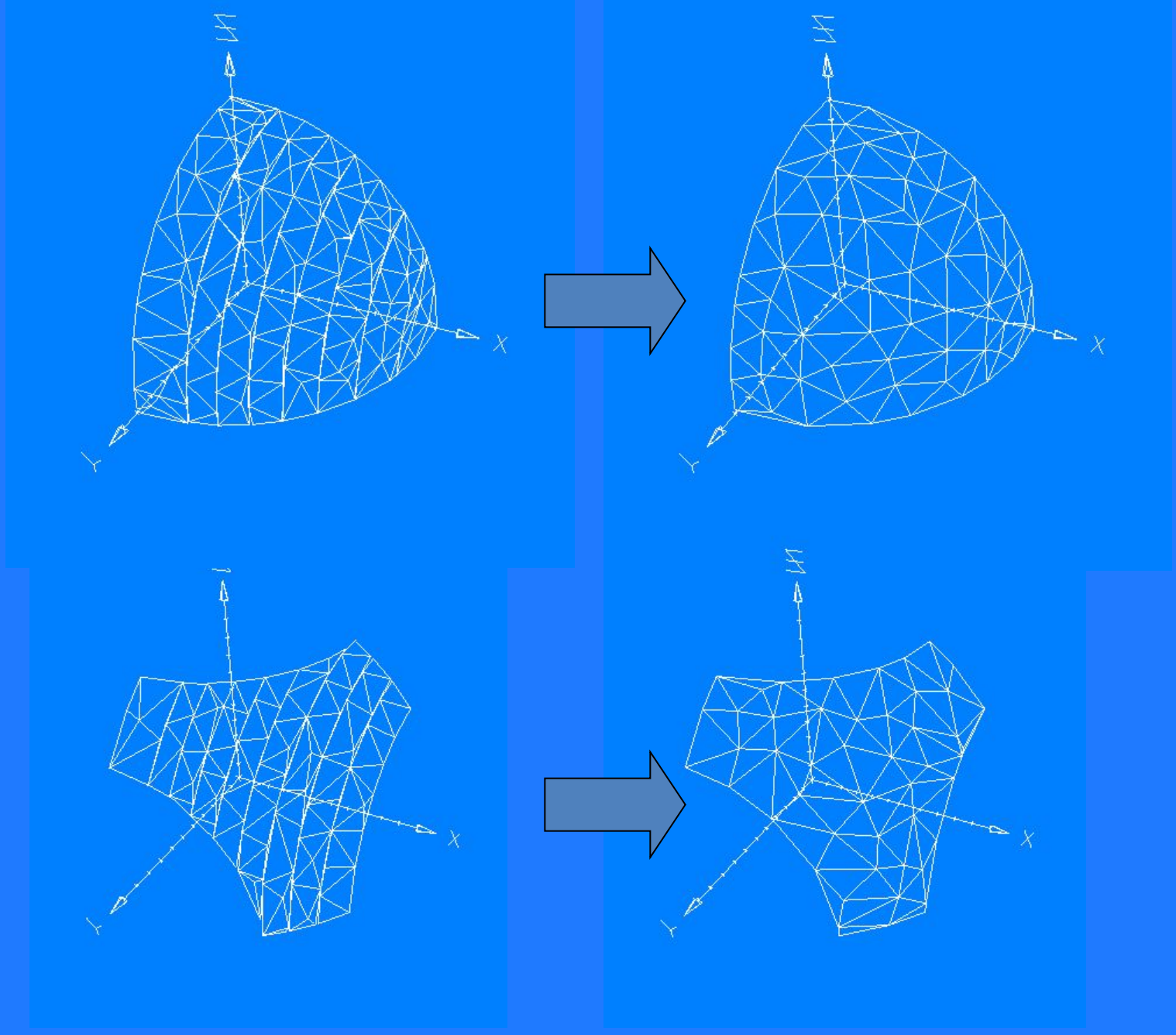
40 процессоров, полное чтение файла

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

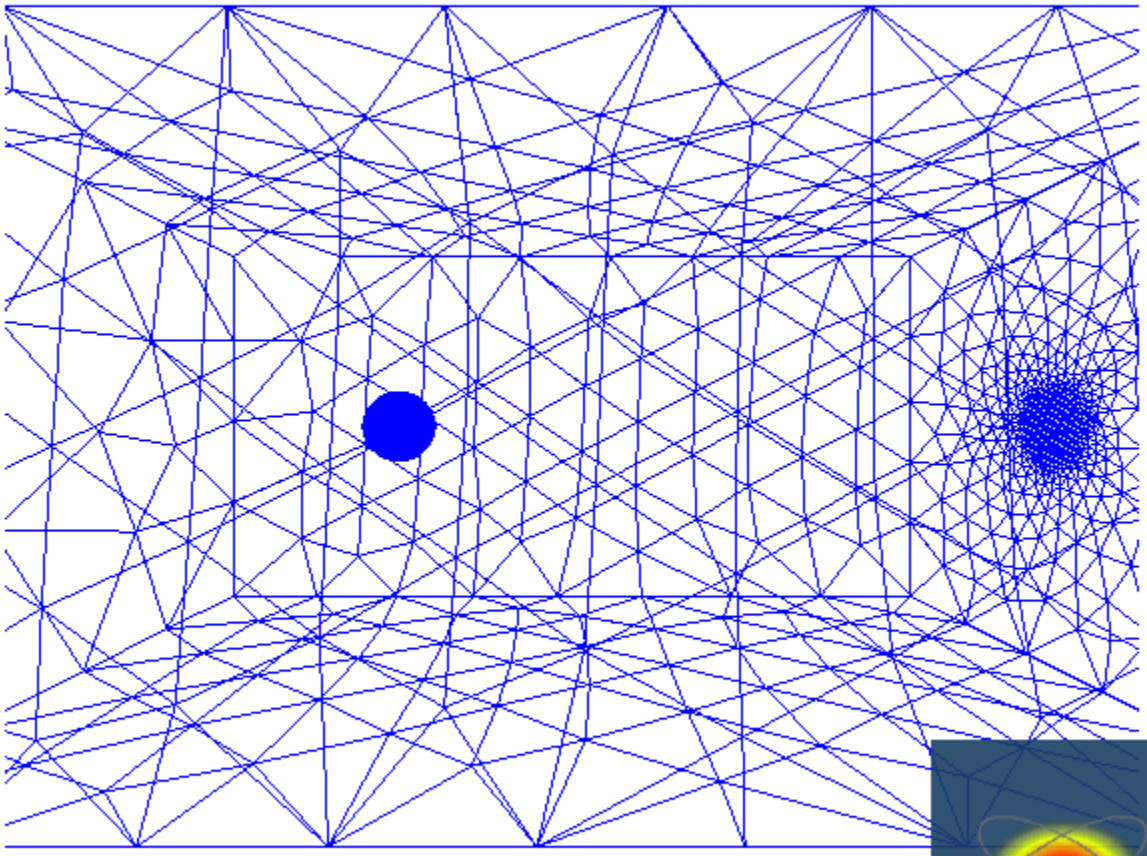
Кол-во исходных точек регулярной сетки	Число фрагментов, на которые разбивался каждый файл	Общее время работы, мин:сек	Кол-во полученных точек изоповерхности
252 млн.	1	24:51	2 997
252 млн.	8	4:20	5 891
252 млн.	64	0:14	11 198
512 млн.	8	41:40	7 996
512 млн.	27	0:25	10 997
512 млн.	64	0:26	14 026
1000 млн.	64 - ***56:54***	83:25	19 534
1000 млн.	27	0:45	16 171
1000 млн.	8	2:34	13 218



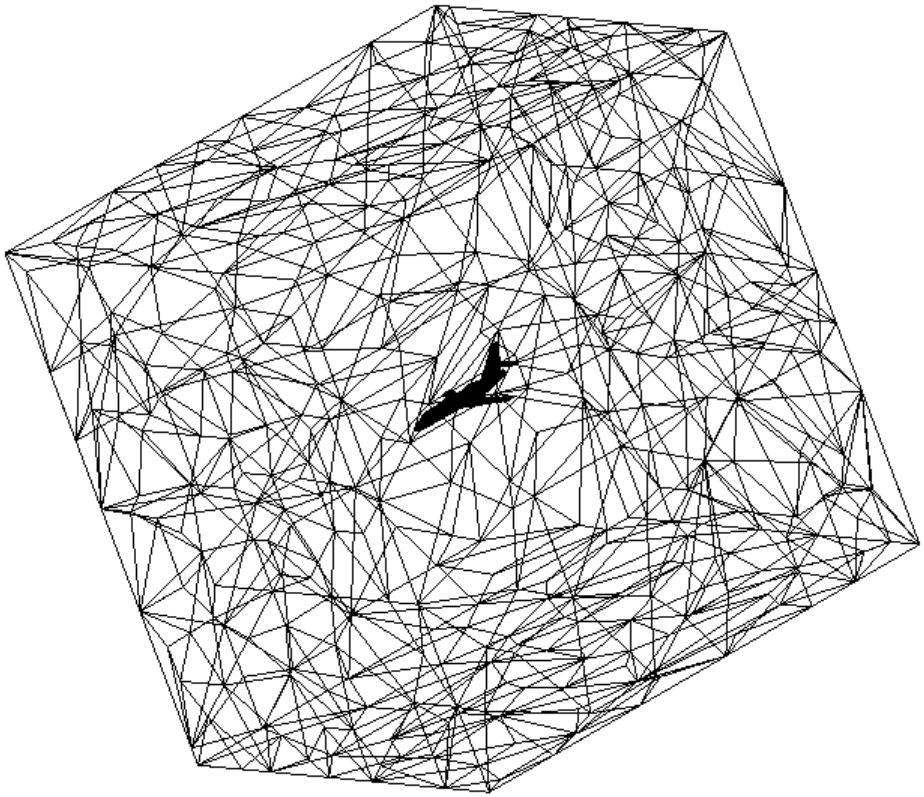


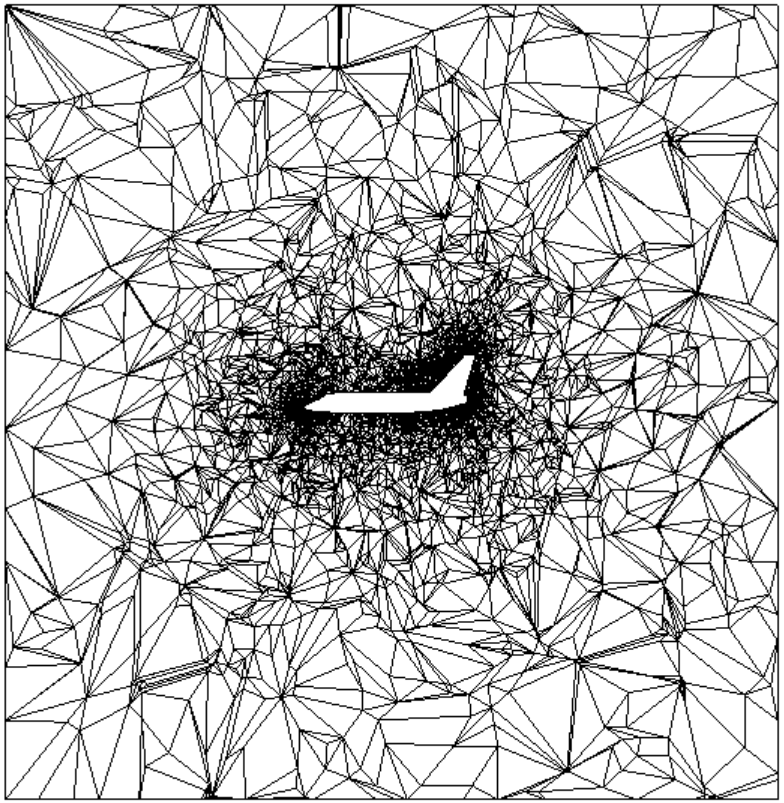
Многоуровневое огрубление больших сеток

Траектории невесомых частиц

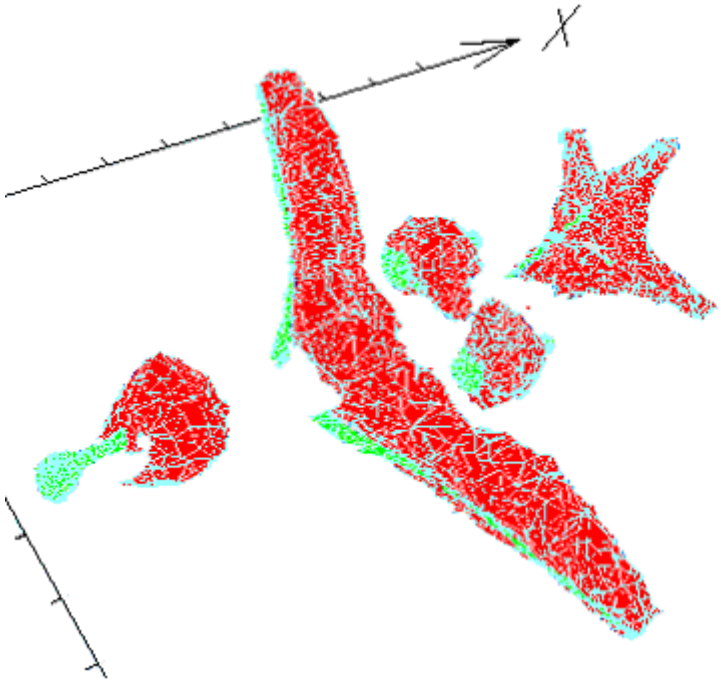


Моделирование течения вокруг летательного аппарата

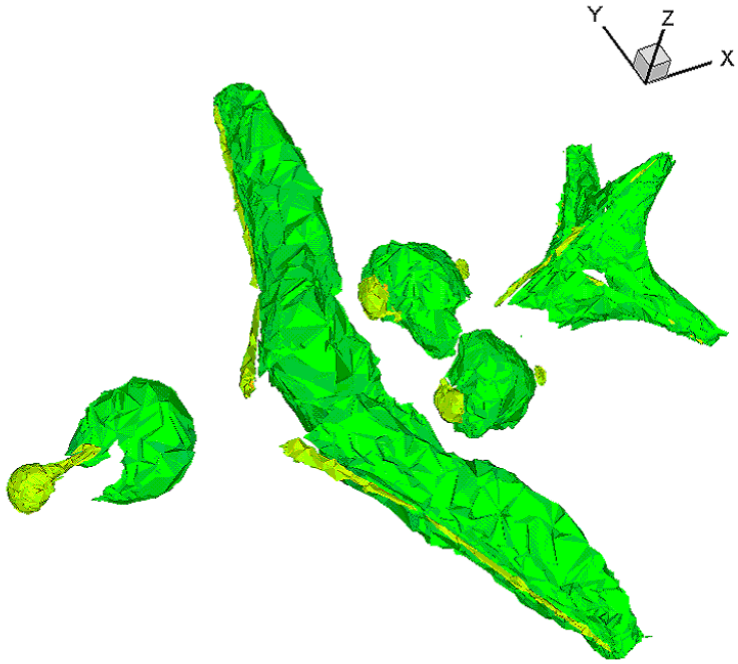




Изоповерхности поля плотности

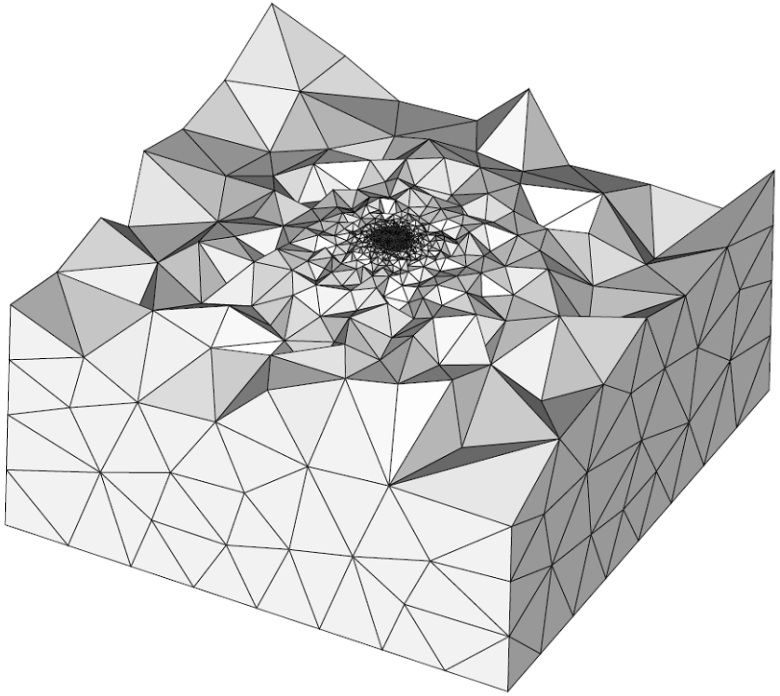


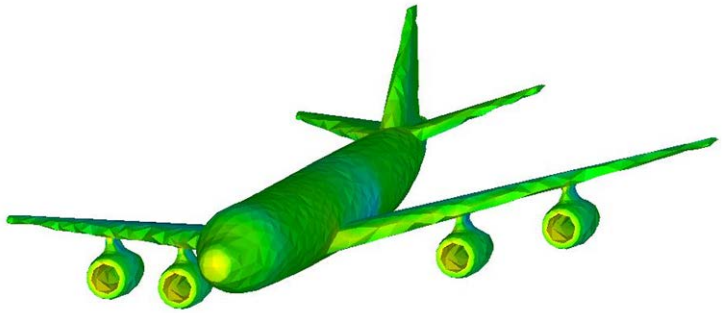
RemoteViewer

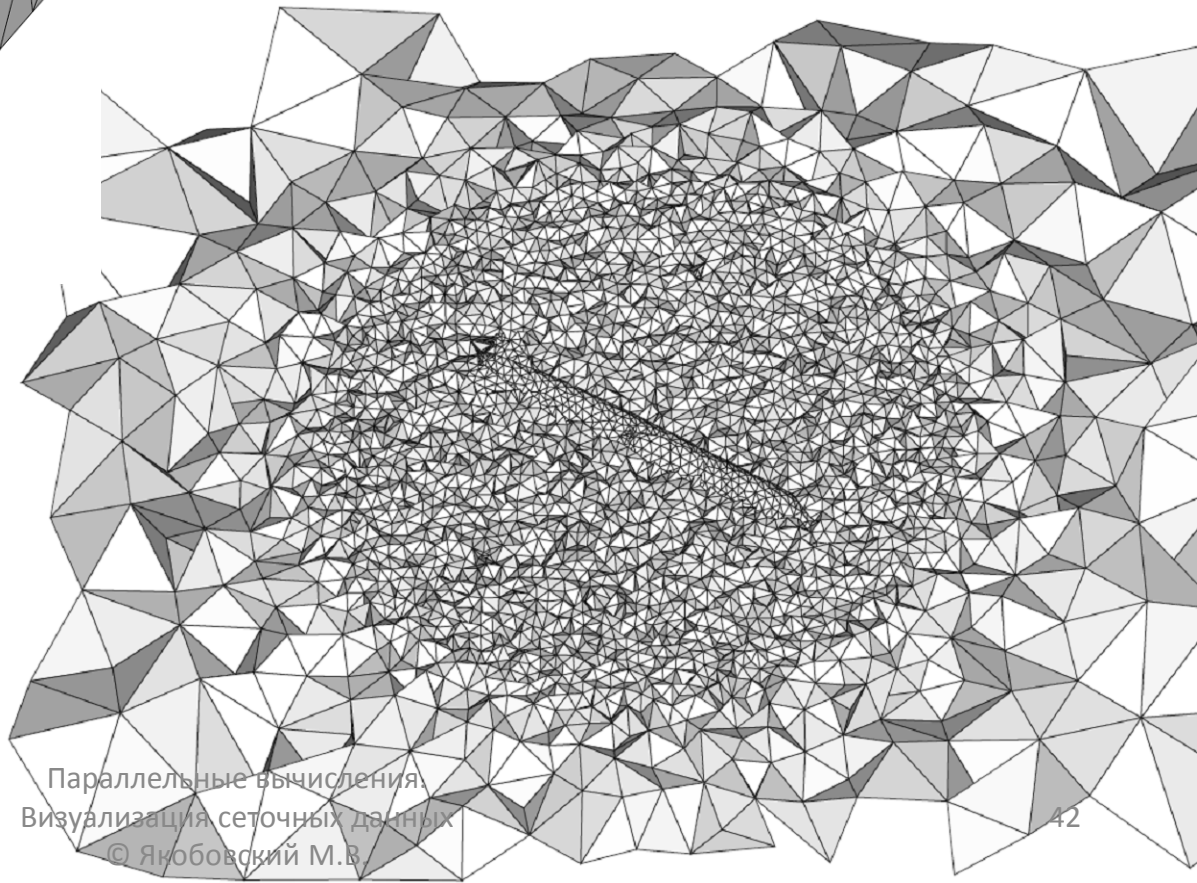


Tecplot

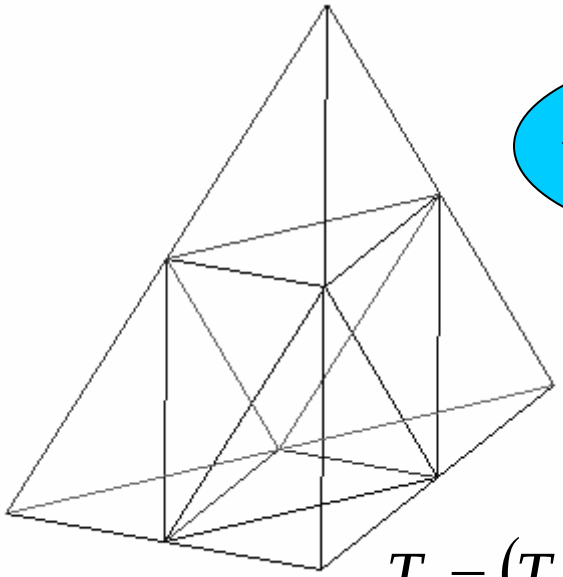
Тетраэдральные сетки 10^8 узлов

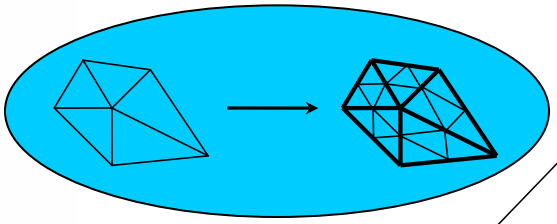


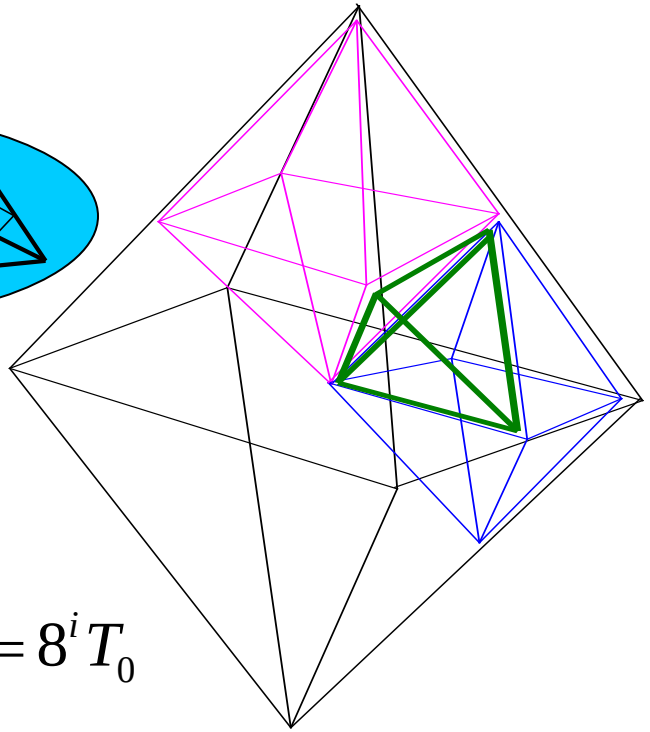




Измельчение тетраэдральной сетки



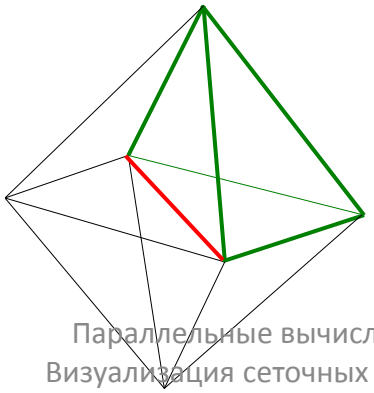




$$T_i = (T_0, 0)\begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 8 & 6 \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \end{pmatrix} = 8^i T_0$$

Разбиение тетраэдра:

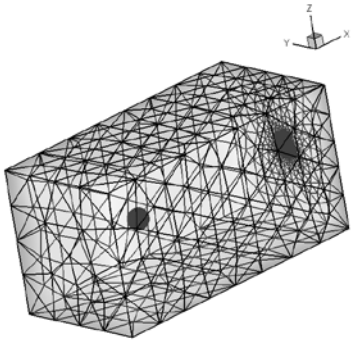
- 4 пирамиды
- 1 октаэдр

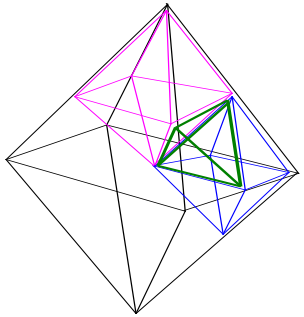


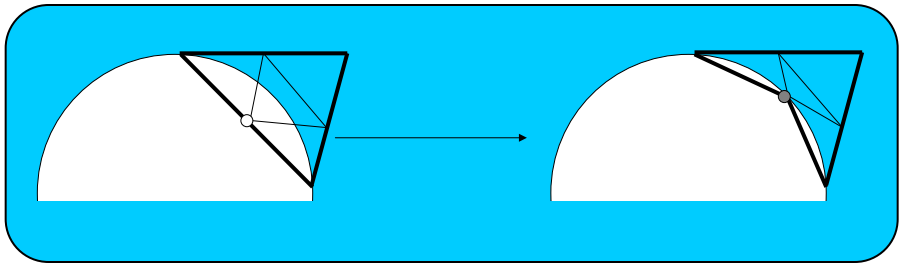
Разбиение октаэдра:

- 8 пирамид
- 6 октаэдров

Тетраэдральная сетка







70 300 -> 34 422 954 узлов

401 819 * 8^3 -> 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

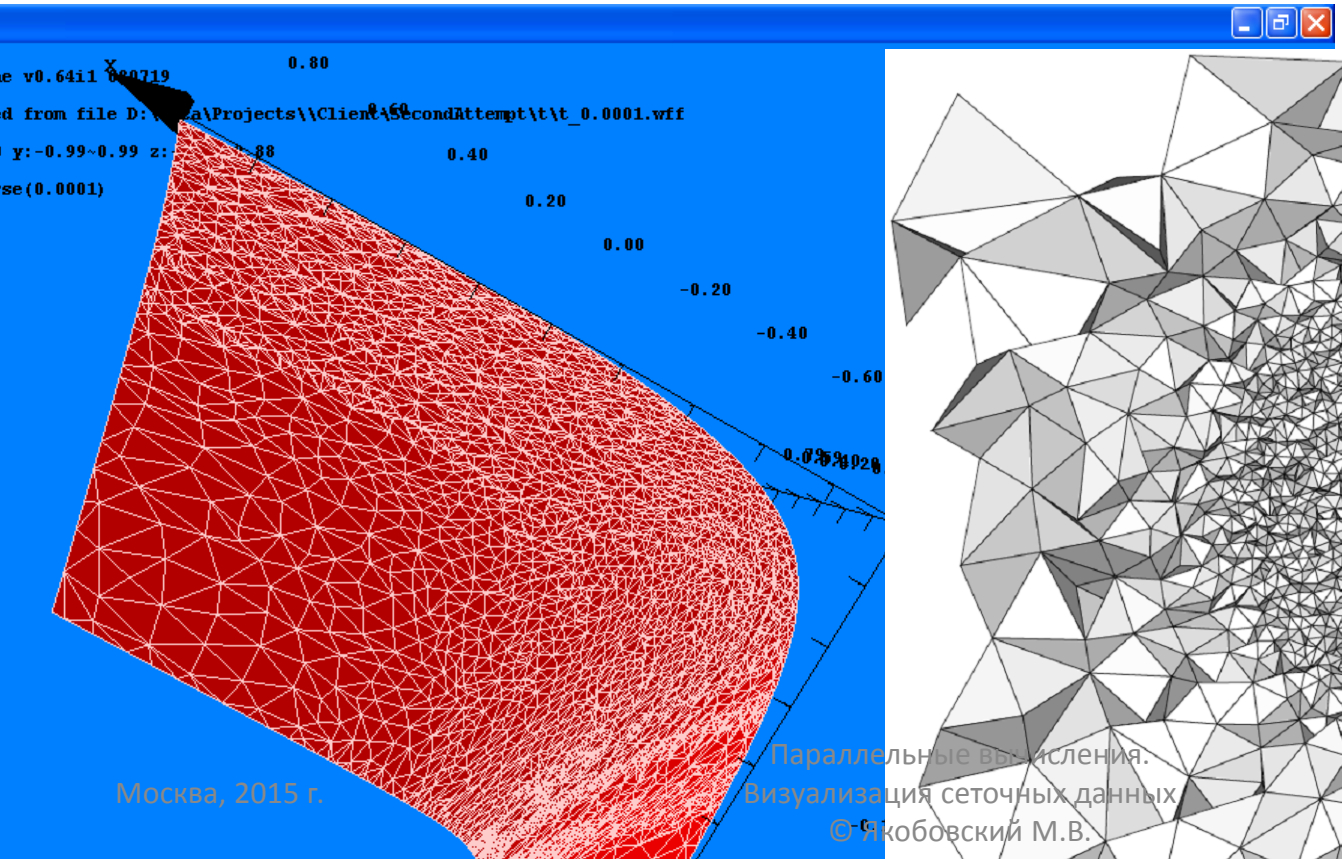
- 23 секунды

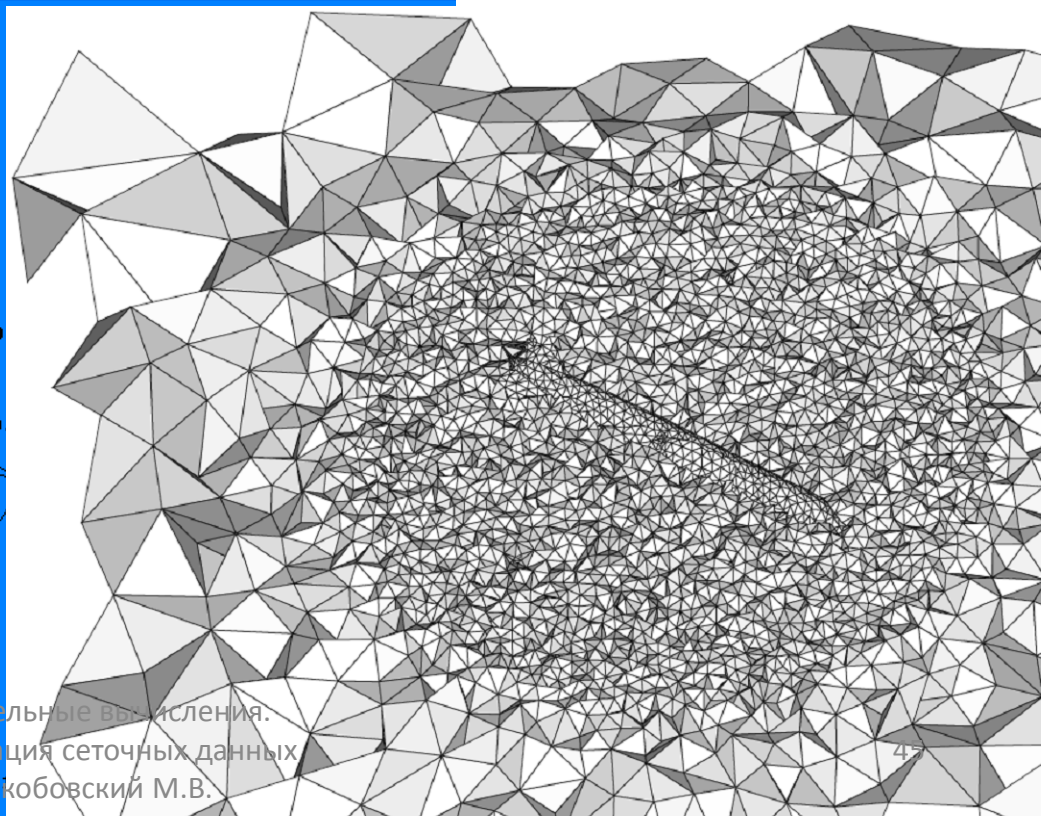
Время чтения данных – 20 секунд

Параметры сетки

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

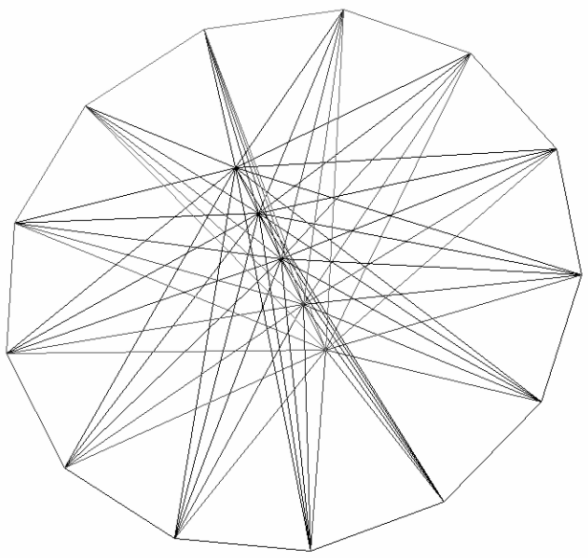
Сколько пирамид в 3D в среднем опирается на один узел?

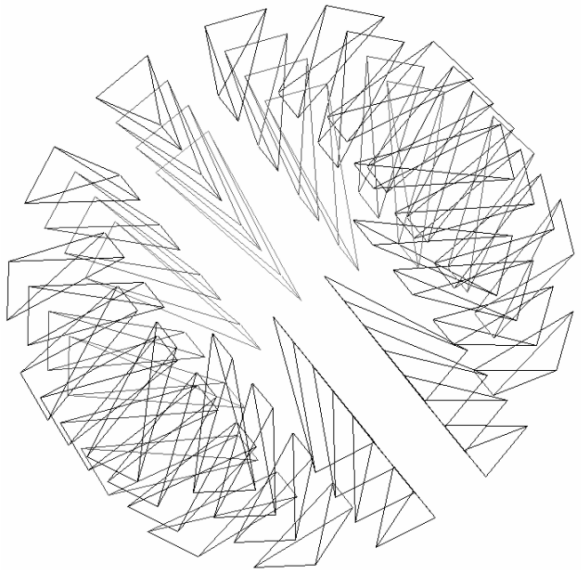




Заполнение пространства пирамидами

- На каждую из 2n точек в среднем опирается 2n пирамид
- Число пирамид ~ n^2



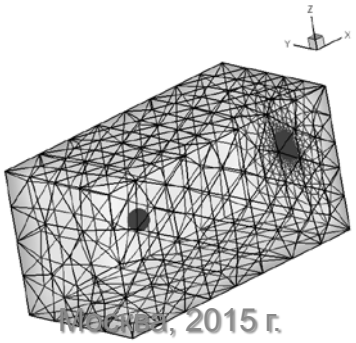


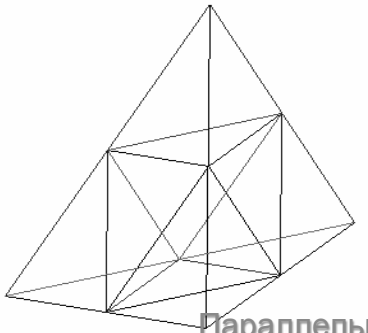
Зависимость объема хранимых данных от числа микродоменов

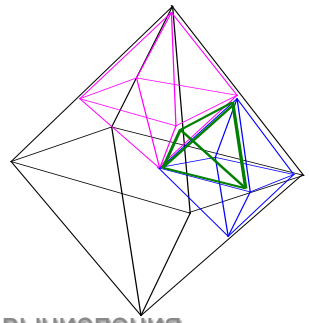
Число микродоменов	1	50	1000	1500	2000	2500	3000
Размер описания (МБ)	124	127	145	152	158	163	168

38 350 -> 2 356 196 узлов

219 034 * 8^2 -> 14 018 176 тетраэдров

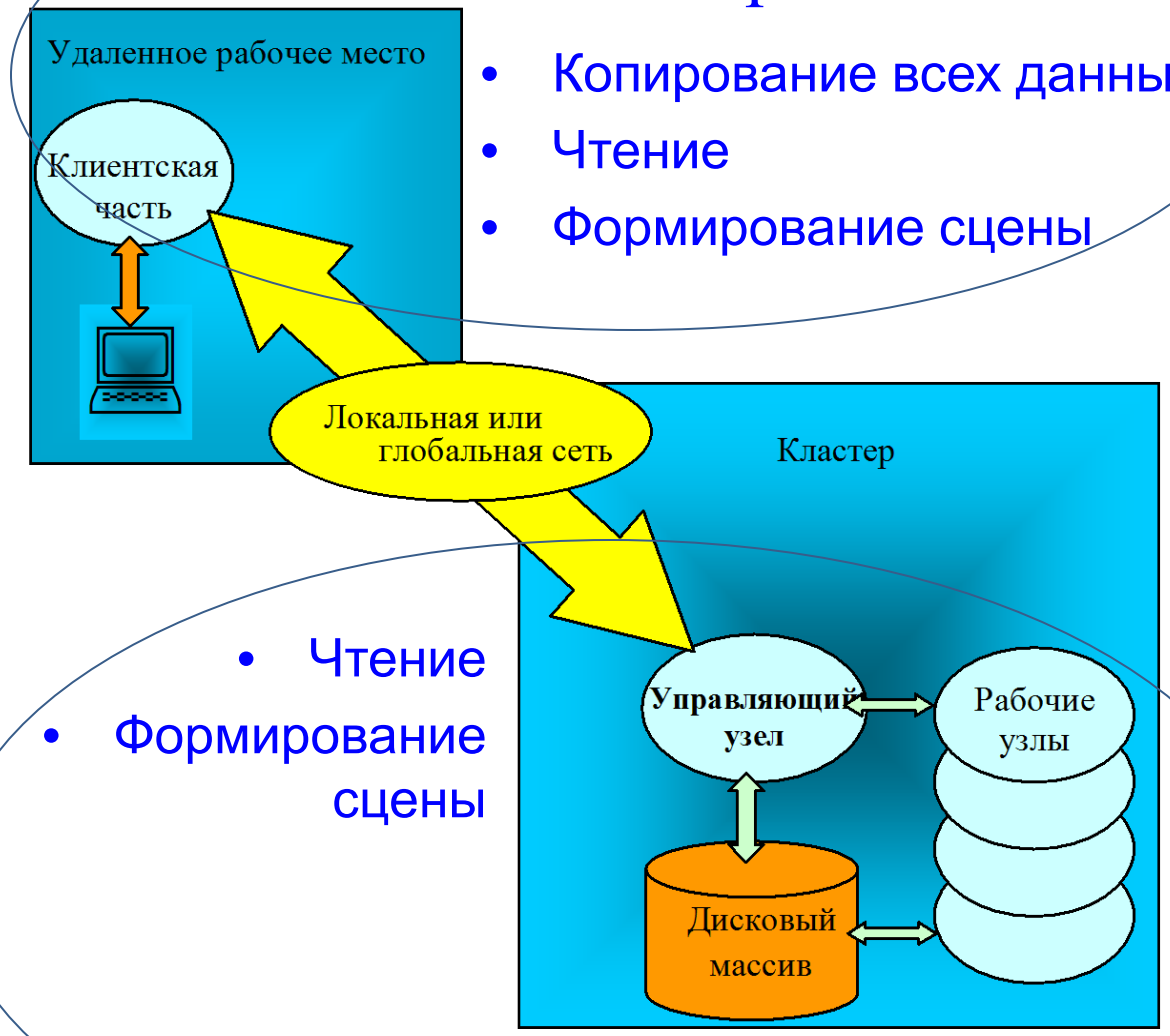






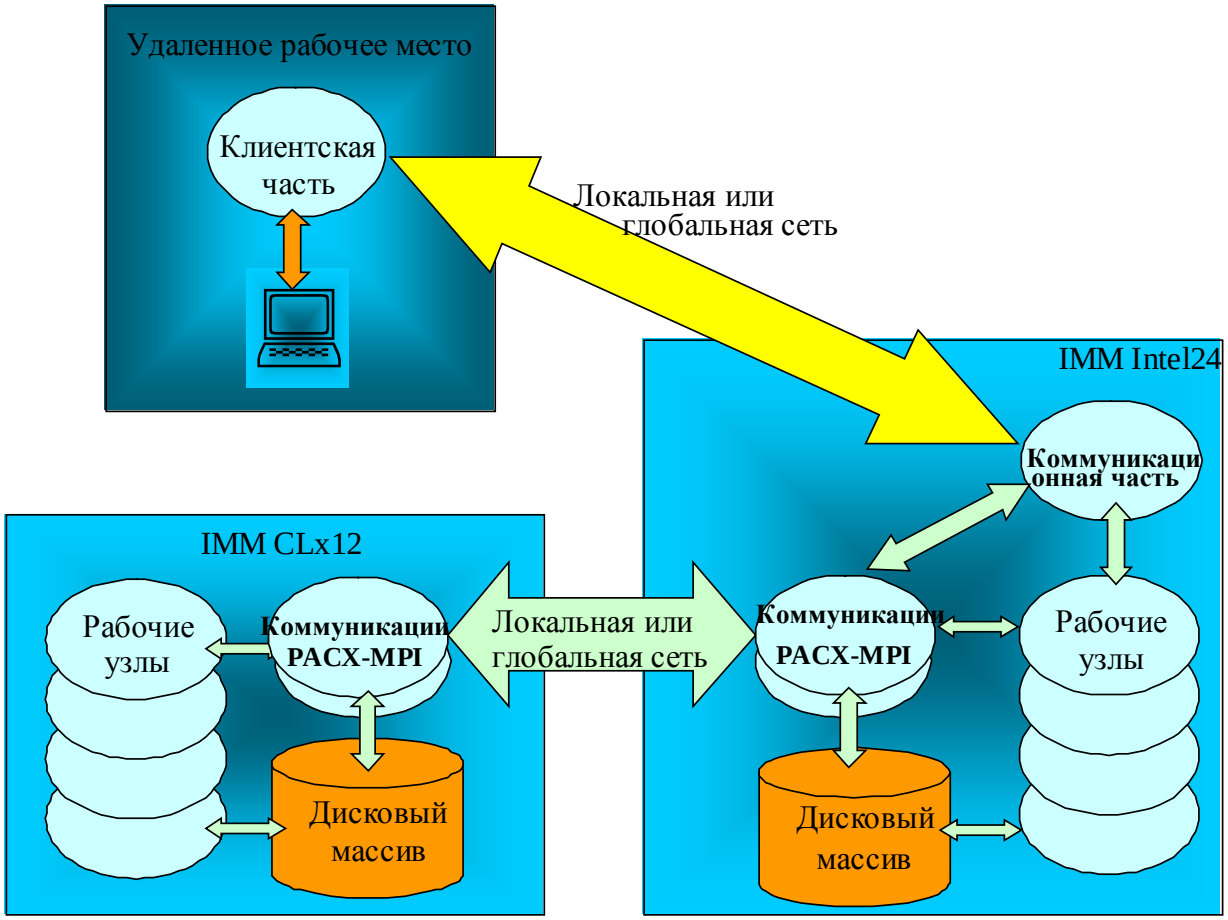
На 35% больше чем 124

- Отображение
- Расчет
- Запись результатов

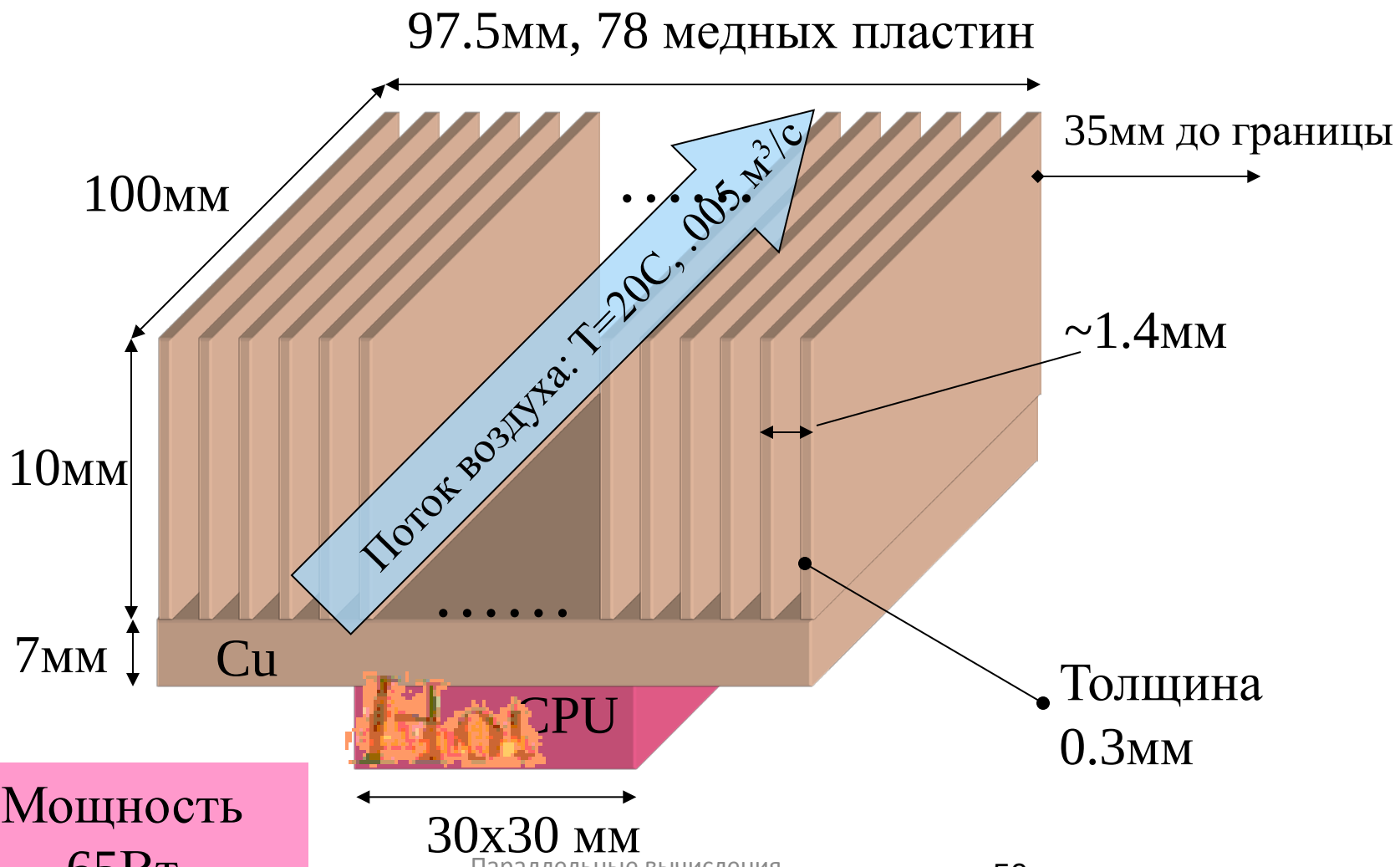


TecPlot
Origin
VISIT ParaView
EnSight OpenDX

Распределенная визуализация

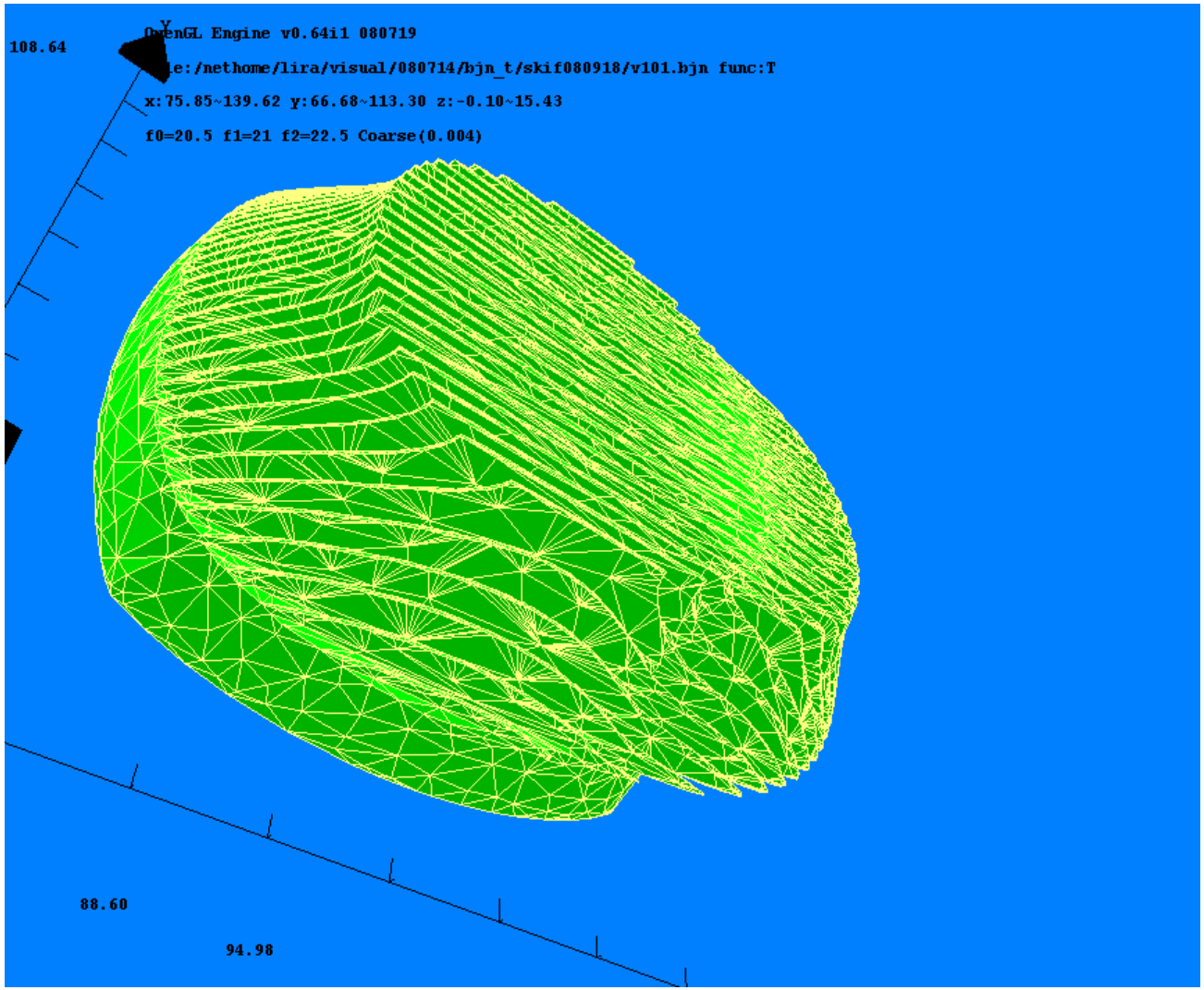


Охлаждение процессора медным радиатором



Мощность
65Вт

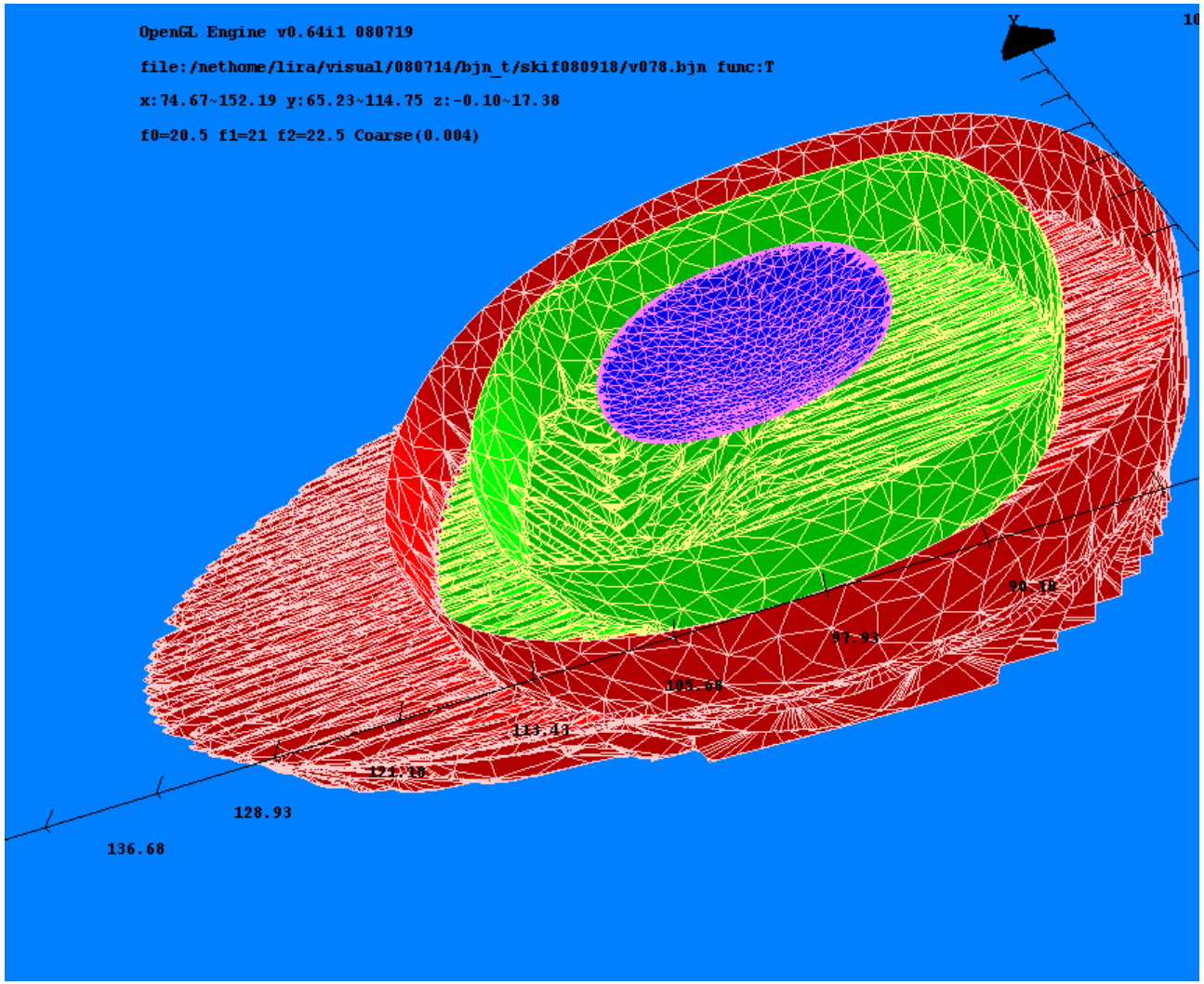
Температура над радиатором изоповерхность 20.5 ºC

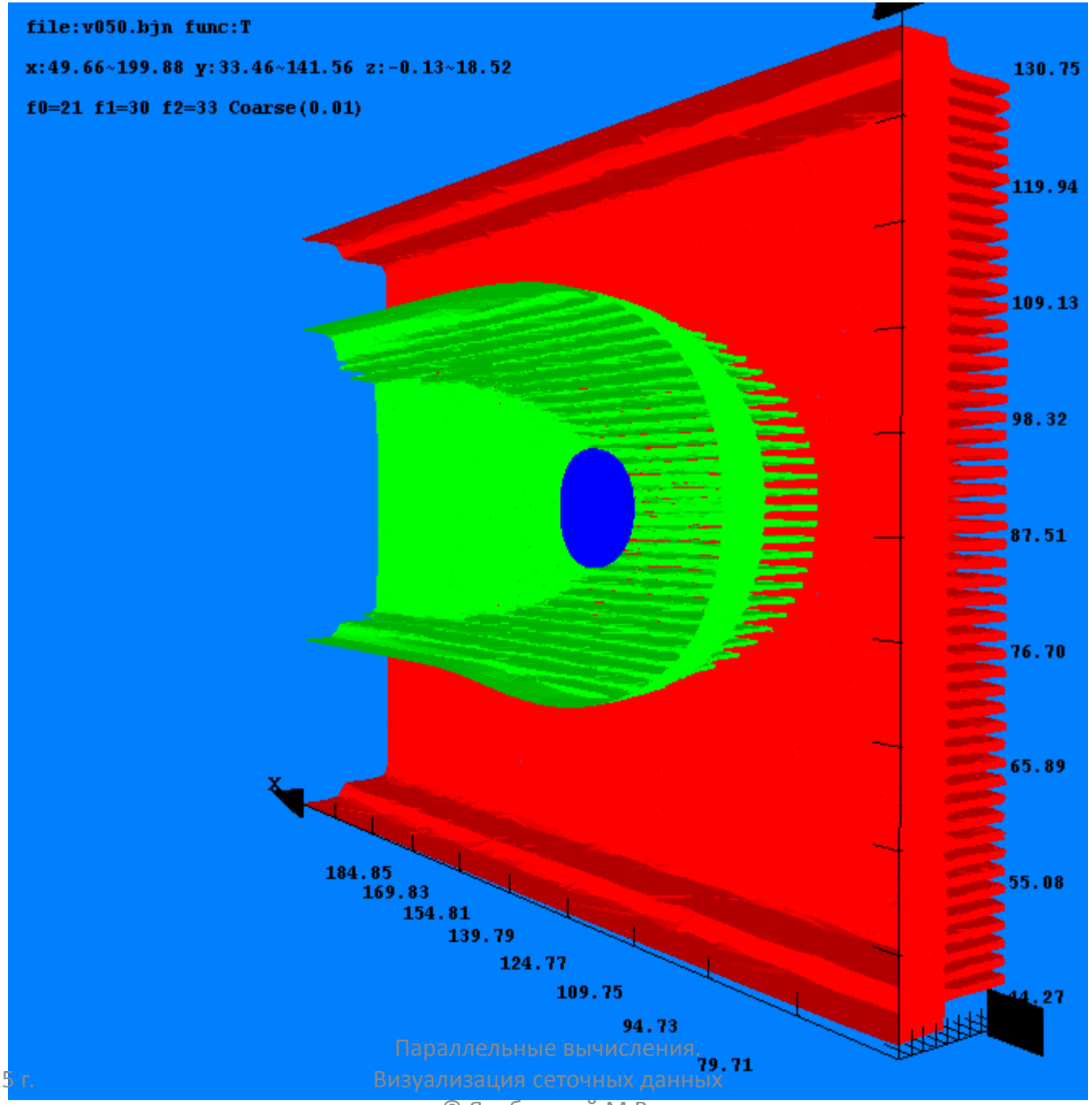


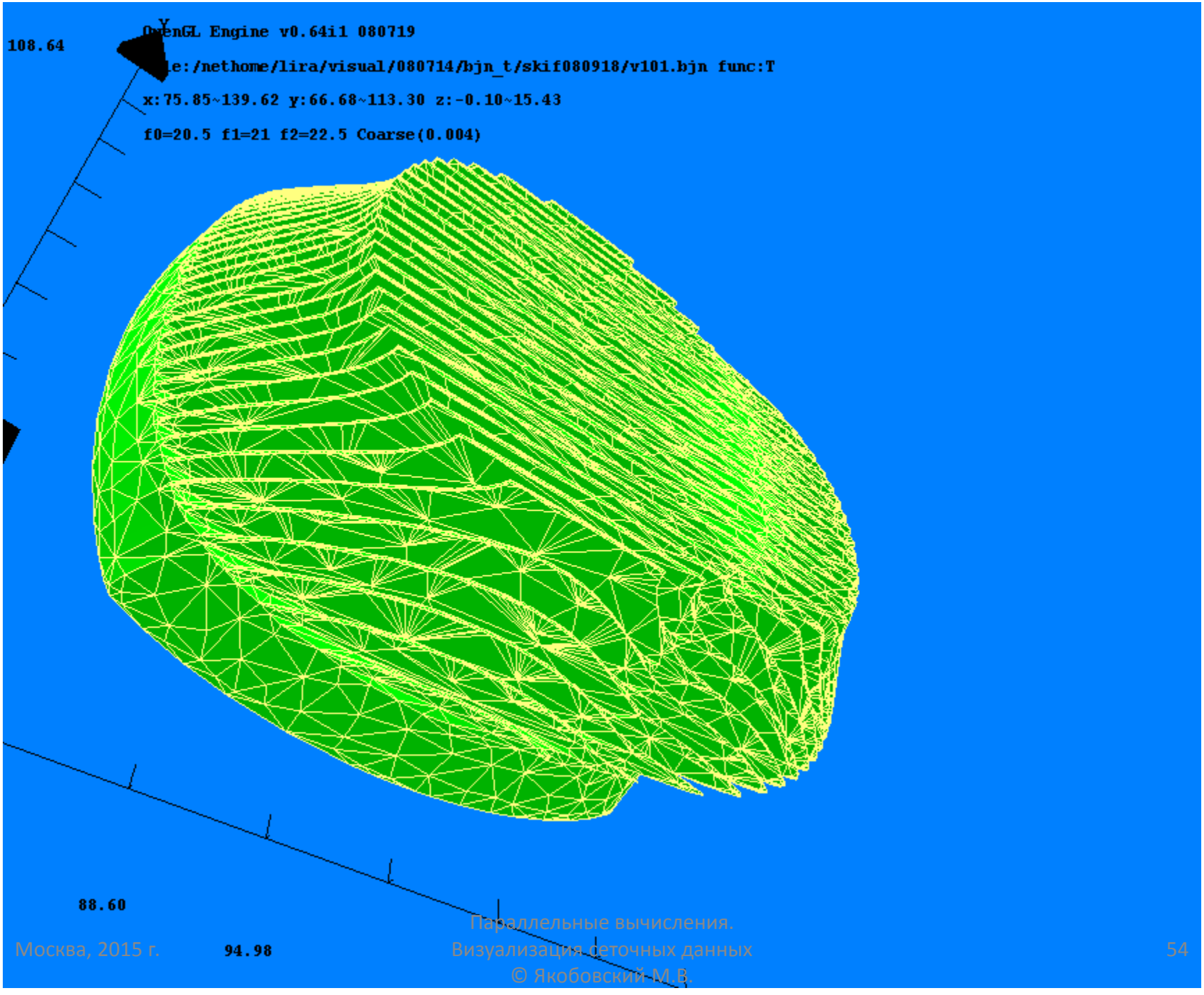
Изоповерхности температуры: T=20.5, 21, 22.5 C
сетка 800*700*120=67,2 млн. узлов

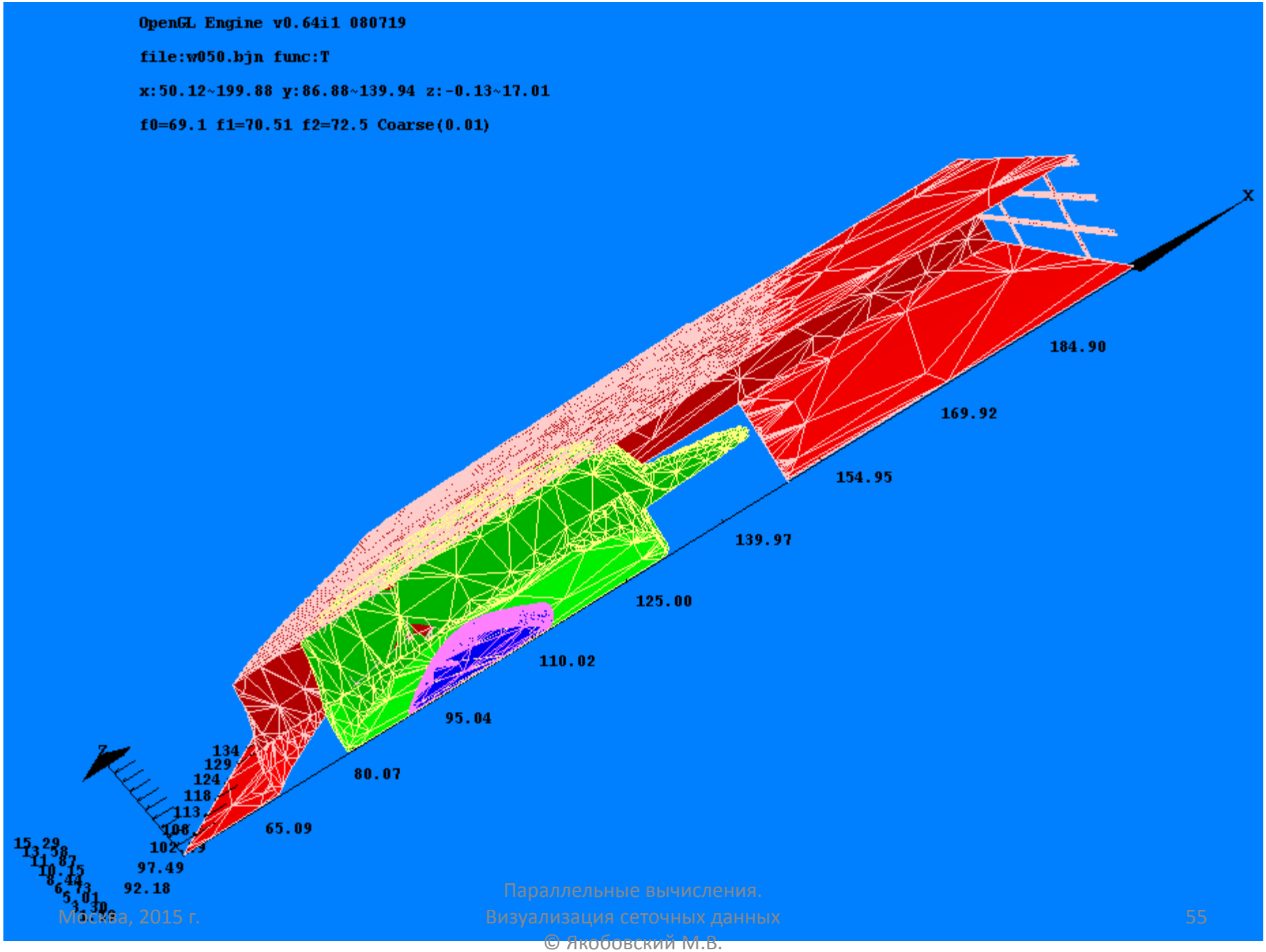
Показано, что радиаторы рассматриваемой конструкции должны иметь не менее 25 ребер для предохранения процессора от перегрева.

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 ºC.

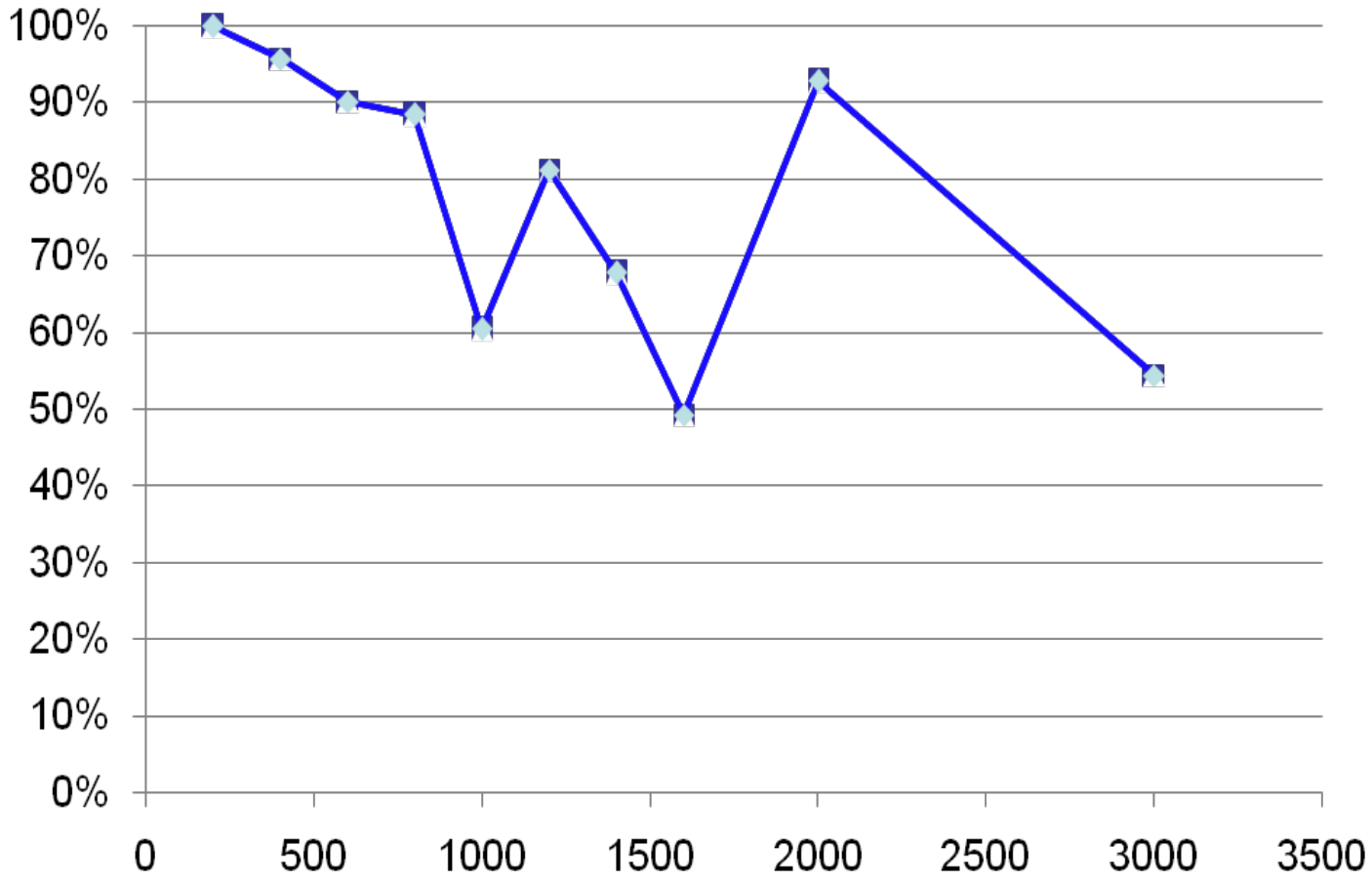



file:v050.bjn func:T
x:49.66~199.88 y:33.46~141.56 z:-0.13~18.52
f0=21 f1=30 f2=33 Coarse(0.01)
130.75
119.94
109.13
98.32
87.51
76.70
65.89
55.08
44.27
184.85
169.83
154.81
139.79
124.77
109.75
94.73
79.71


Y
OpenGL Engine v0.64i1 080719
e:/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)
108.64
88.60
94.98


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)
X
Z
184.90
169.92
154.95
139.97
125.00
110.02
95.04
80.07
65.09
134.
129.
124.
118.
113.
106.
102.
97.49
92.18

Зависимость эффективности от числа ядер



Конфигурация: 78 тонких ребер (0.3 мм) на радиаторе

Сетка: 1000 x 3500 x 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 решетке процессов для согласования величин на внутренних границах

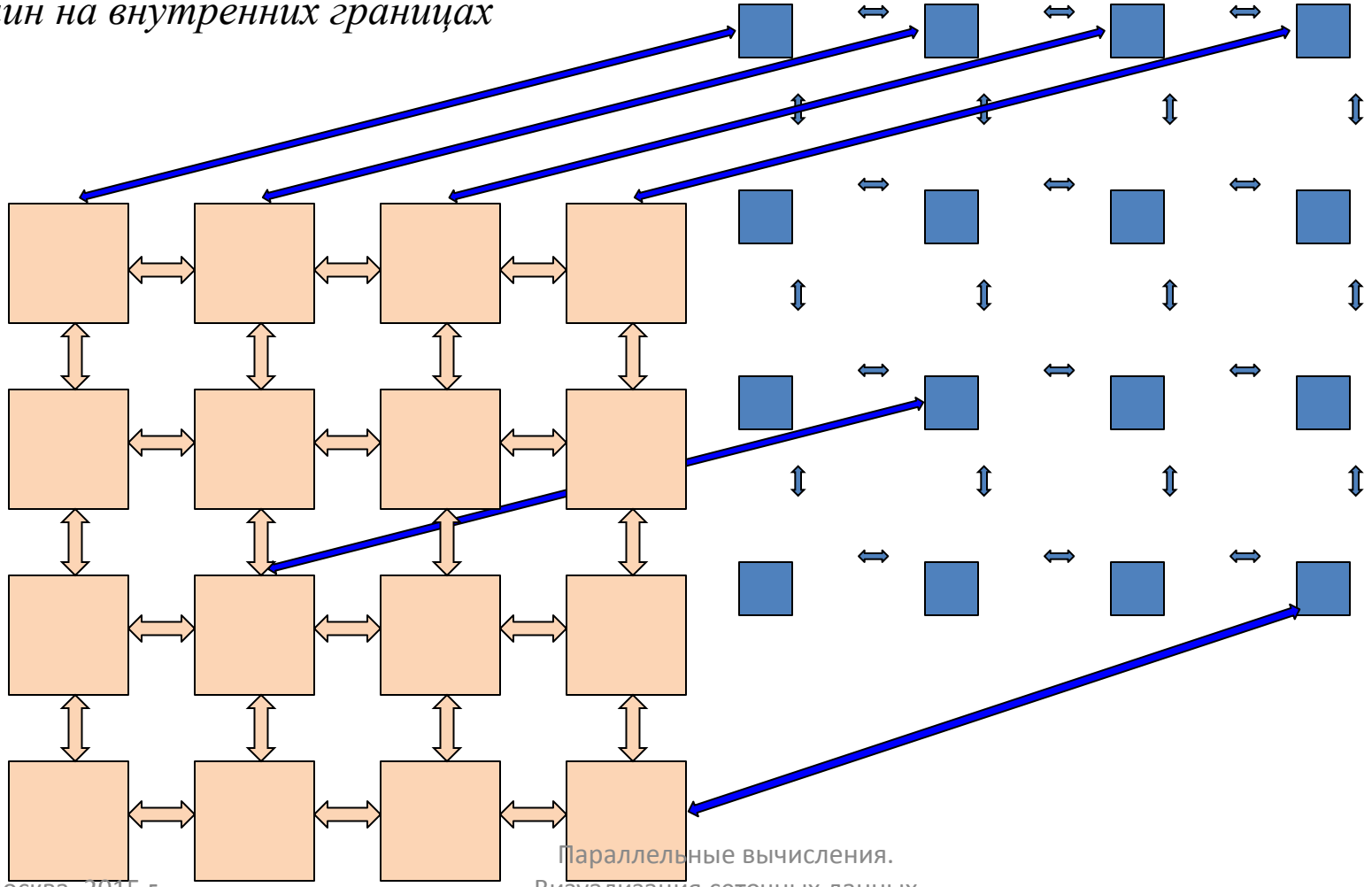
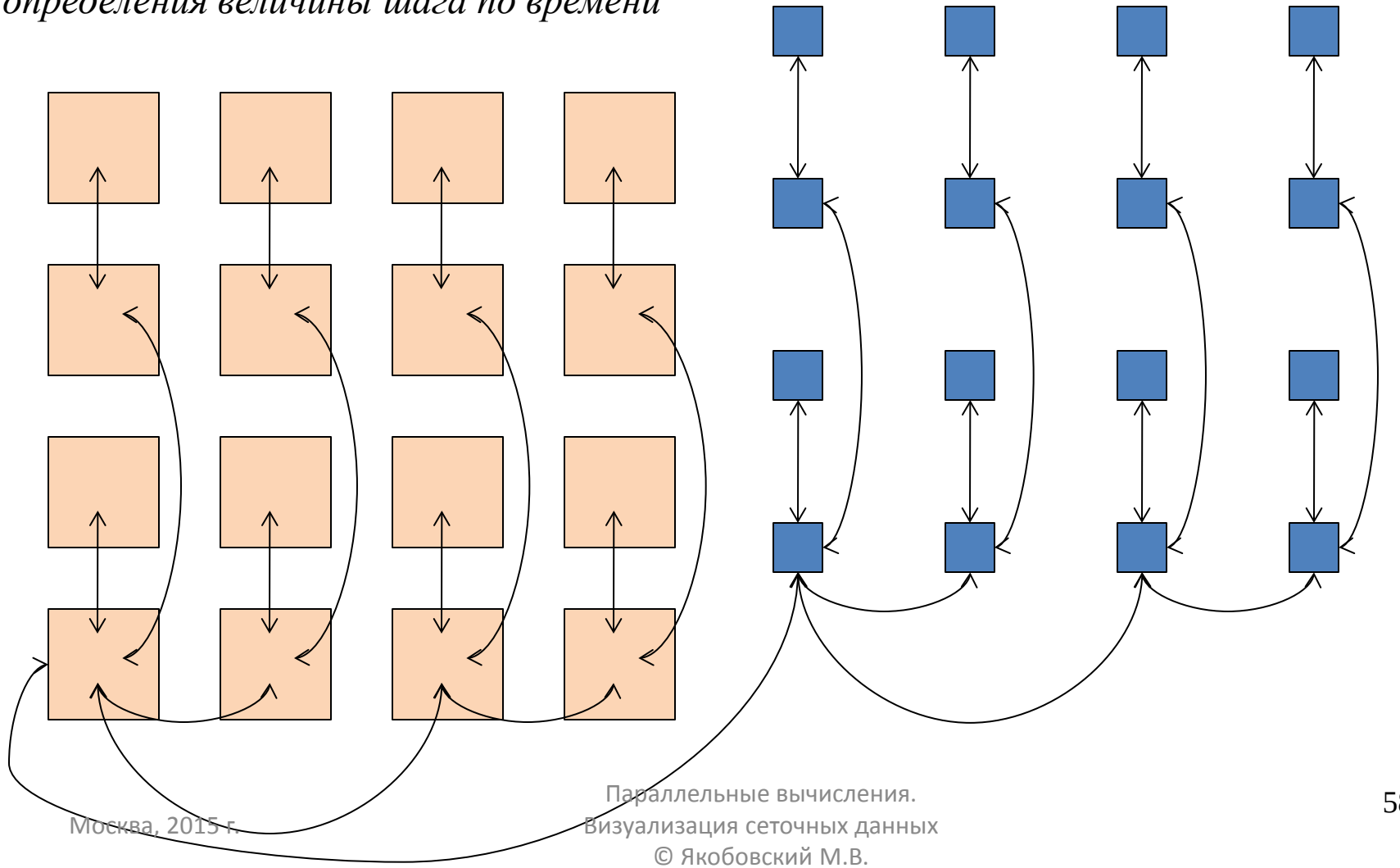


Схема обменов соответствует типичным итерационным методам на компактных шаблонах: на каждом шаге обмен с ближайшими и коллективная операция

- *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

Сетка, узлов	Ядер	Время, сек	Ускорение	Эффективность
525 000 000	1	11.6767	1	100.00 %
525 000 000	7728	0.00161	7274.7	94.13 %
1 050 000 000	1	24.285	1	100.00 %
1 050 000 000	7728	0.003161	**7683.72**	**99.43 %**

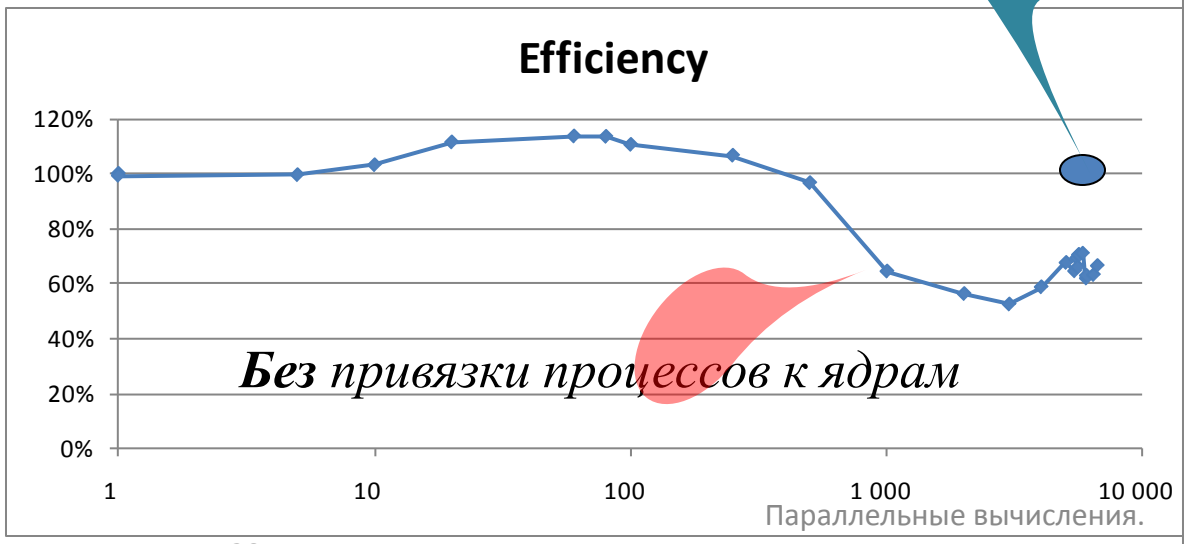
Результаты тестирования производительности

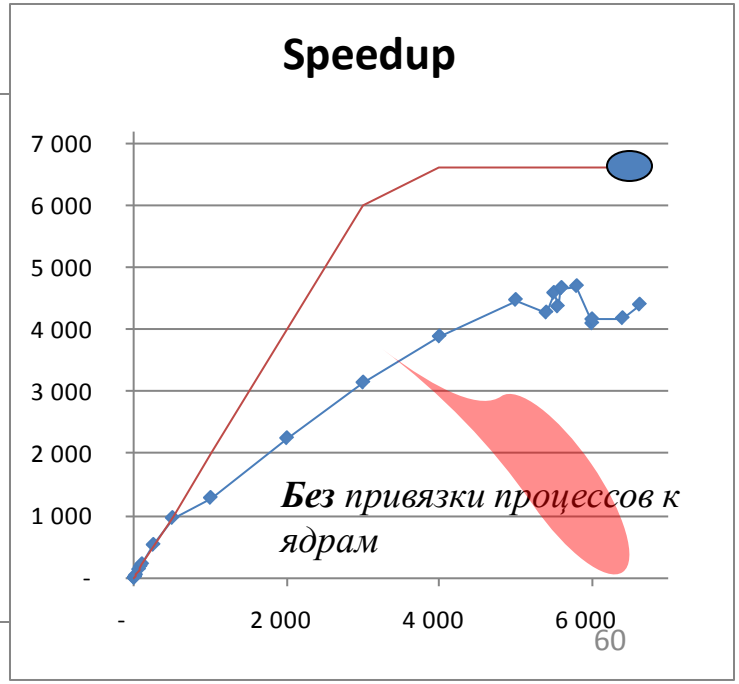
- *асинхронные обмены,*
- *коллективные операции редуцирования*
- ***привязка MPI-процессов к ядрам** процессоров*

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

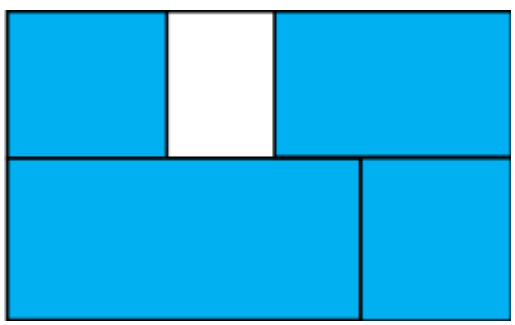
- *компактном шаблоне*
- *сетке 1 миллиард узлов*
- *7728 ядрах*

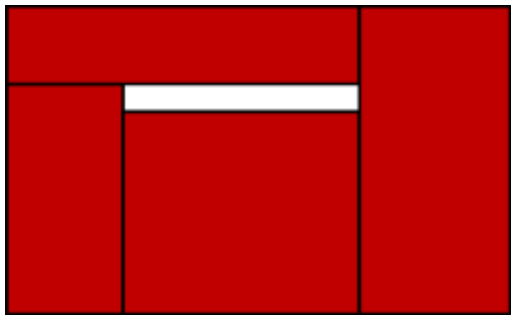
***Без** привязки процессов к ядрам эффективность расчетов на числе процессов, большем чем число узлов, падает до величины порядка 70%.*

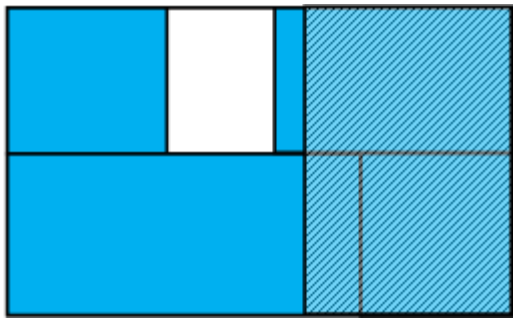


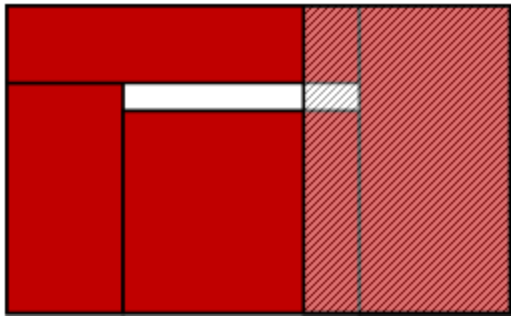


Записи двух сеточных 2d функций



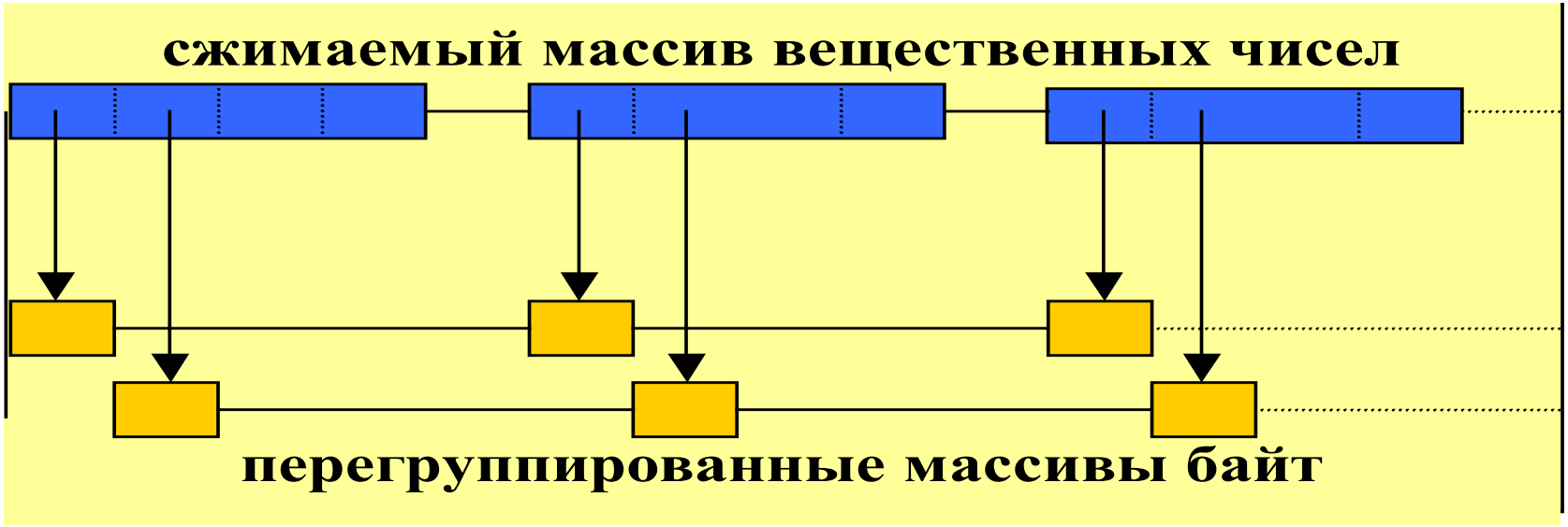






Групповое сжатие вещественных чисел

Обнуление младших бит мантиссы

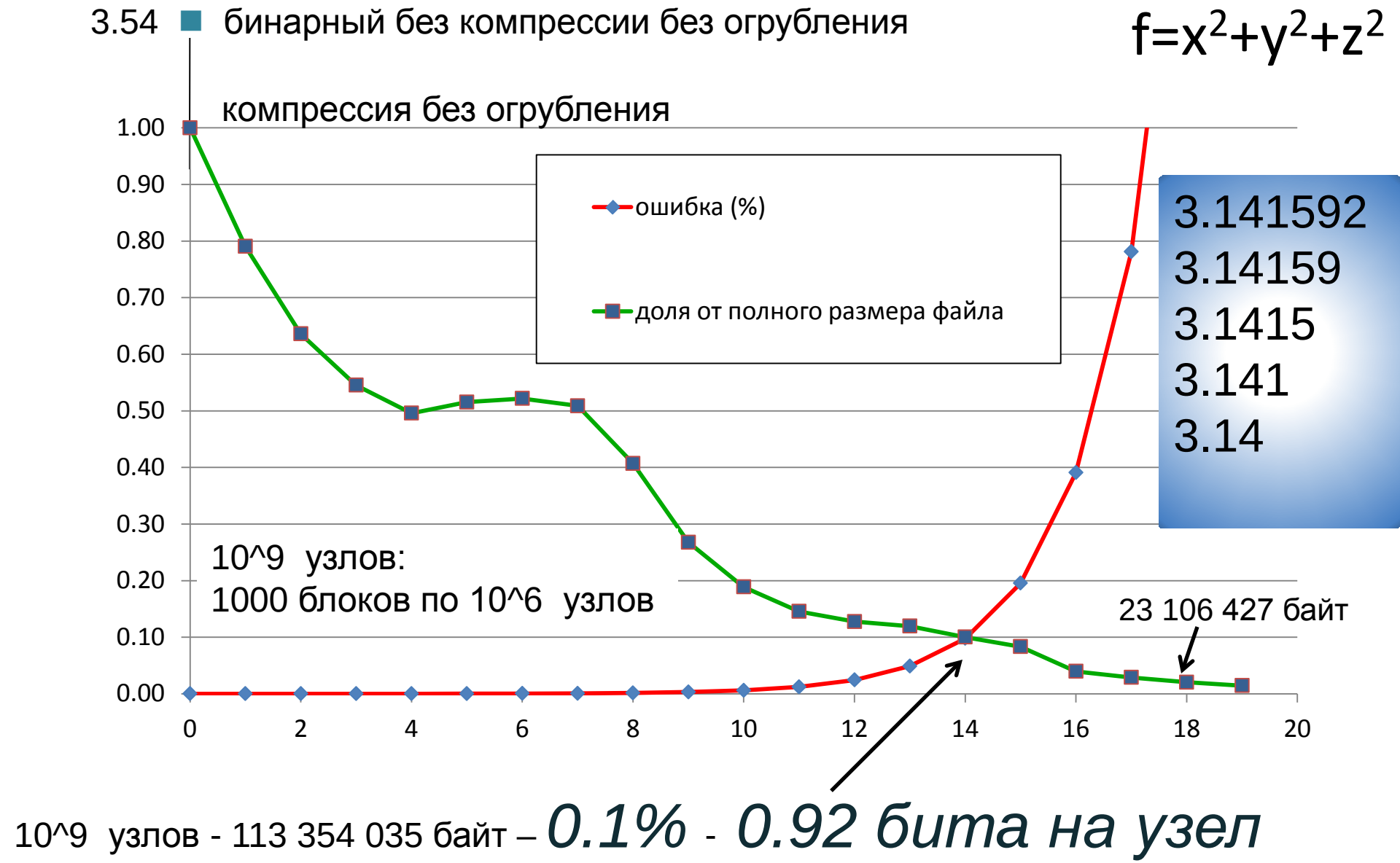


Перегруппировка байт

Сжатие байт стандартной библиотекой zlib

Хранение сеточных данных

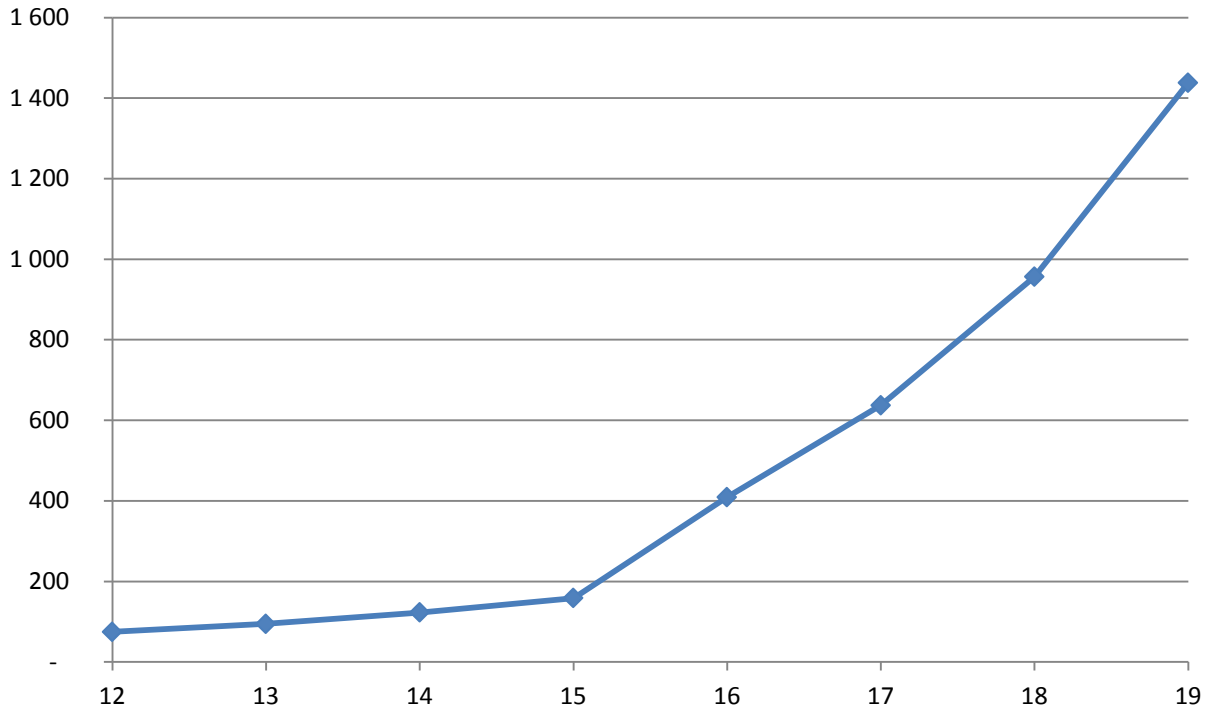
Отсечение младших бит мантиссы



10^9 узлов - 113 354 035 байт – *0.1% - 0.92 бита на узел*

Зависимость коэффициента сжатия от числа усеченных бит

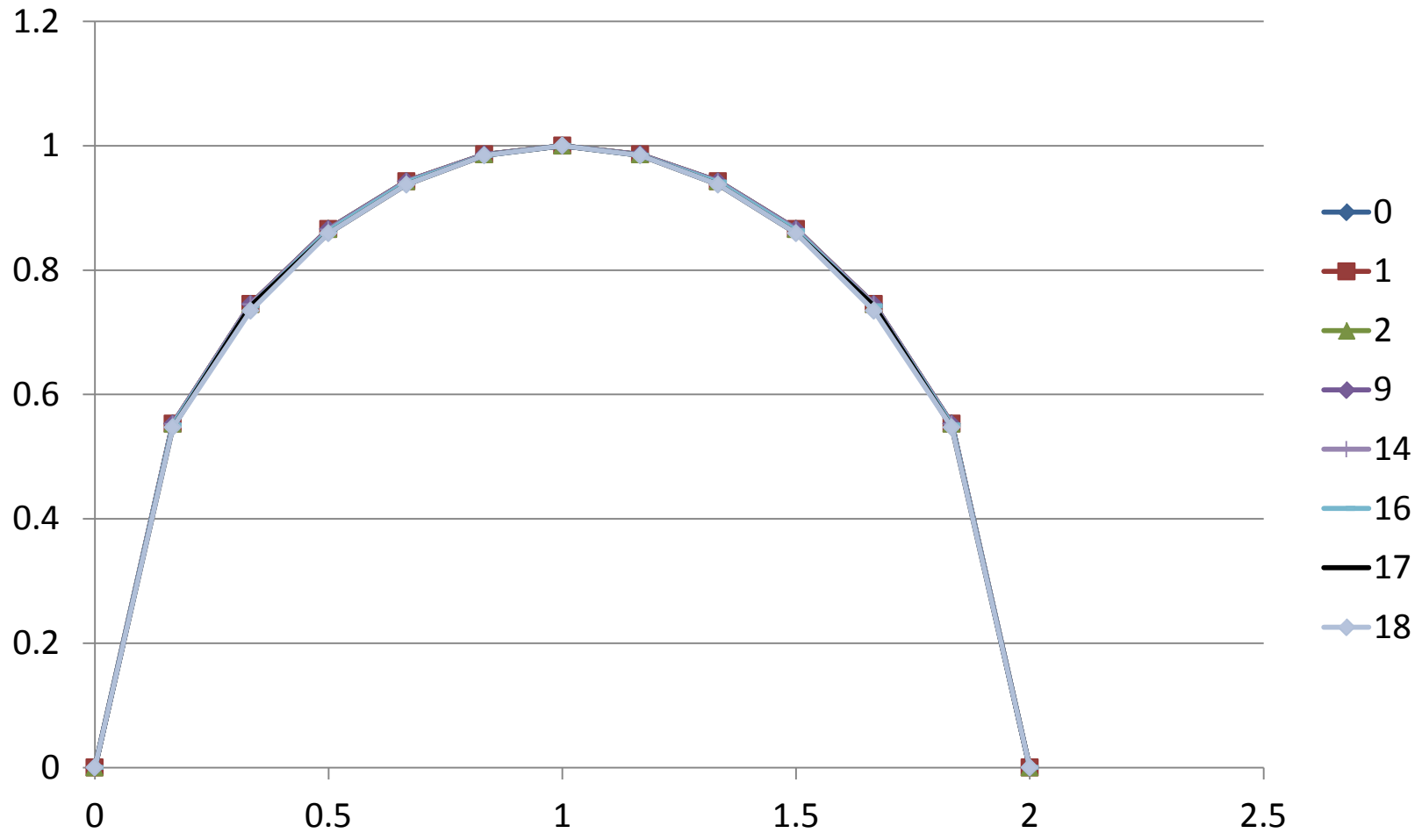
Сетка: 1000 x 3500 x 150 = 525 млн узлов




```
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. Якобовский 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. *Якобовский М.В.* Библиотека ввода/вывода сеточных данных. 2007, http://lira.imamod.ru/BjnIO_3D.html

© Якобовский М.В.