

# Анализ масштабируемости параллельных приложений на основе технологий суперкомпьютерного кодизайна

Теплов Алексей Михайлович

м.н.с. НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель:

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. проф. Воеводин Вл.В.

# План доклада

- Обзор существующих подходов к анализу масштабируемости
- Актуальность исследований
- Постановка задачи
- Обобщение понятия масштабируемость параллельных приложений
- Применение данных системного мониторинга для анализа масштабируемости
- Сравнение масштабируемости реальных вычислительных ядер

# Масштабируемость параллельной программы

«Показателем масштабируемости является способность приложения **работать** на системах **разных масштабов**»

«Под масштабируемостью параллельной программы понимают **изменение** оценки **ускорения** в зависимости **от числа параллельных процессоров**»

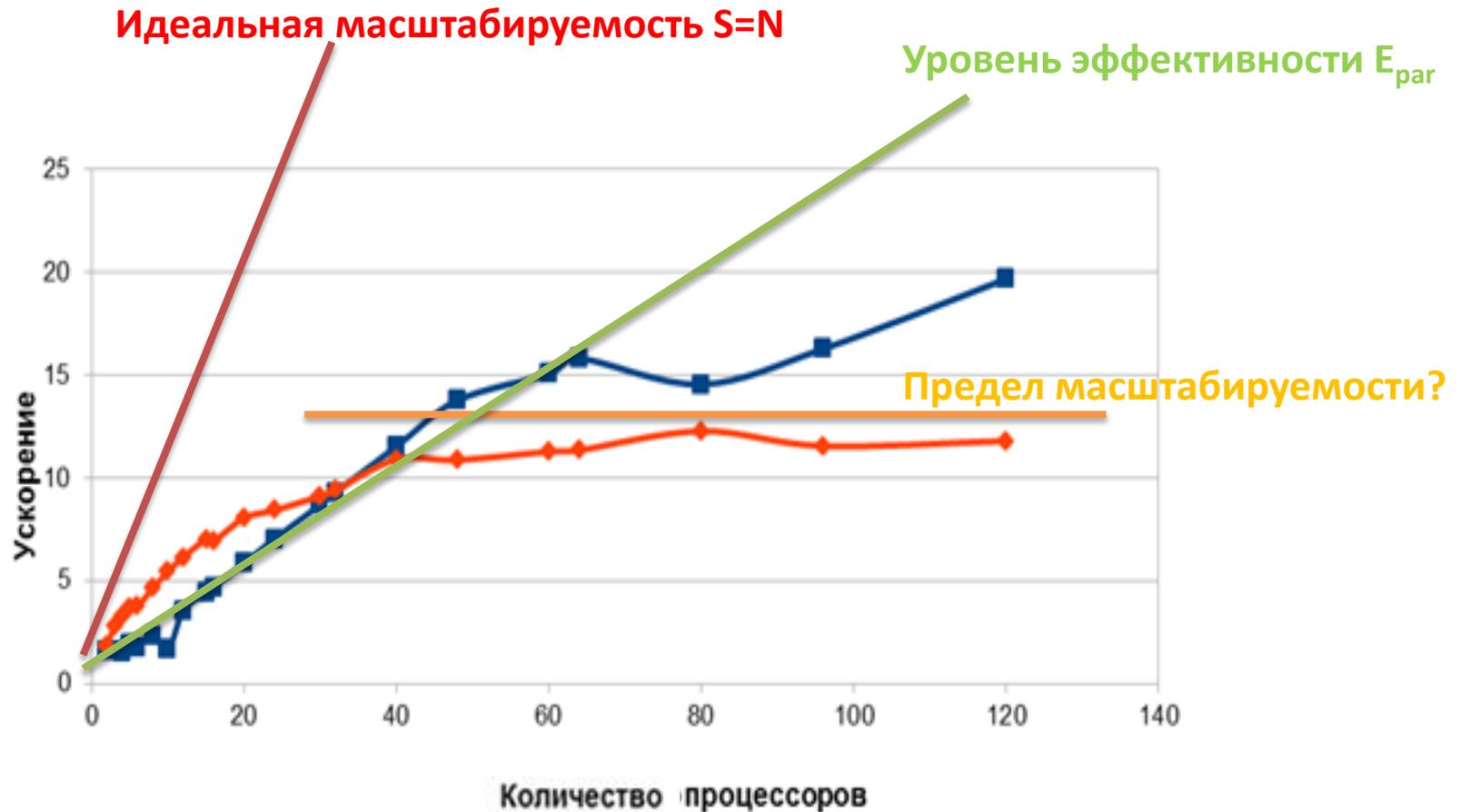
«Под масштабируемостью программного обеспечения понимают **способность** к пропорциональному **увеличению производительности** при **увеличении аппаратных ресурсов**»

«Параллельный алгоритм называется **масштабируемым**, если **при росте числа процессоров** он обеспечивает **увеличение ускорения** при **сохранении** постоянного уровня **эффективности** использования процессоров»

# Масштабируемость параллельной программы

- Сильная масштабируемость, где вычислительная сложность  $W = \text{const}$
- Слабая масштабируемость, где  $W/N = \text{const}$
- Масштабируемость вширь, где  $N = \text{const}$
- Характеристики:
  - $S = \frac{T_1}{T_N}$  - ускорение;
  - $E_{par} = \frac{S}{N}$  - эффективность распараллеливания;
  - $E_{real} = \frac{R_{max}}{R_{peak}}$  - эффективность реализации;

# Масштабируемость параллельной программы



# Суперкомпьютерный кодизайн

**Согласование особенностей  
всех этапов разработки  
и выполнения программы**



# Актуальность исследований

- Масштабируемость – одно из основных свойств параллельных программ, изучаемое на суперкомпьютерных вычислительных системах, отражающее особенности параллельной программы и их влияние на выполнение программы
- Технологии суперкомпьютерного кодизайна позволяют анализировать влияние и согласованность между собой всех этапов разработки и выполнения
- Анализ масштабируемости параллельных программ связан с поиском причин изменения характеристик выполнения программ

# Цель и постановка задачи

Цель: Разработка подхода к анализу масштабируемости параллельных программ с использованием технологий суперкомпьютерного кодизайна

Задачи:

- разработка подхода к анализу масштабируемости параллельных приложений с использованием технологий суперкомпьютерного кодизайна
- разработка подхода к анализу факторов, ограничивающих масштабируемость параллельных приложений на основе данных системного мониторинга
- разработка метода сравнения масштабируемости параллельных приложений
- провести апробацию предложенных в работе подходов и методов

# План доклада

- Обзор существующих подходов к анализу масштабируемости
- Актуальность исследований
- Постановка задачи
- **Обобщение понятия масштабируемость параллельных приложений**
- Применение данных системного мониторинга для анализа масштабируемости
- Сравнение масштабируемости реальных вычислительных ядер

# Используемые понятия

- **Параметром запуска** параллельной программы будем называть любые параметры, оказывающие влияние на выполнение параллельной программы

Параметры запуска  Аппаратные - параметры аппаратуры

- характеристики процессора:  
тип, архитектура, характеристики ядра, характеристики кэш-памяти ...
- характеристики оперативной памяти:  
тип памяти, объем памяти, частота работы, пропускная способность ...
- характеристики вычислительного узла:  
число процессоров, соединение процессоров на узле, число модулей памяти...
- характеристики интерконнекта:  
тип сети, топология соединения узлов, скорость передачи, латентность ...

# Используемые понятия

- **Параметром запуска** параллельной программы будем называть любые параметры, оказывающие влияние на выполнение параллельной программы



- настройки запуска задачи:  
число ядер для запущенной задачи, число ядер на узел, параметры ввода-вывода ...
- настройки компиляции:  
тип компилятора, версия, опции компиляции, тип использованных библиотек, их версии и настройки
- настройки вычислительной системы  
тип операционной системы и ее версия, системные настройки аппаратуры, значения переменных окружения, настройки и версия ядра операционной системы..

# Используемые понятия

- **Параметром запуска** параллельной программы будем называть любые параметры, оказывающие влияние на выполнение параллельной программы



- Входные данные задачи
- настройки работы с данными  
объем данных, их формат, параметры вывода данных...
- параметры, являющиеся настройками вычислительного алгоритма  
параметры для логических ветвлений, различные параметры для алгоритма...

**Конфигурация запуска** – совокупность всех параметров запуска

# Используемые понятия

- **Динамическими характеристиками** параллельной программы будем называть любые показатели выполнения параллельной программы.

Динамические  
характеристики



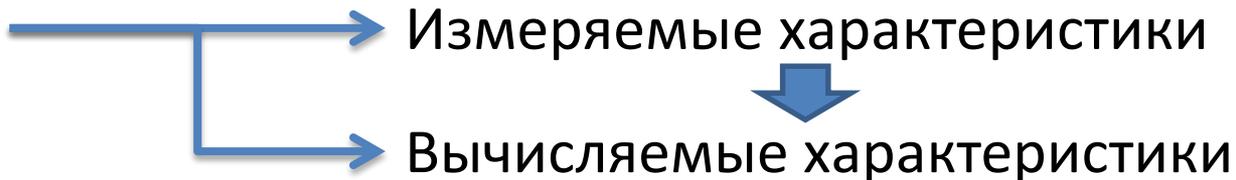
Измеряемые характеристики

время выполнения, количество кэш-промахов, количество переданных байт по сети, количество обращений в память за время работы...

# Используемые понятия

- **Динамическими характеристиками** параллельной программы будем называть любые показатели выполнения параллельной программы.

Динамические  
характеристики



время выполнения, количество кэш-промахов, количество переданных байт по сети, количество обращений в память за время работы...

ускорение, производительность, скорость передачи данных, число кэш-промахов в секунду, моментальная и средняя эффективность...

# Обобщение понятия масштабируемость

- **Масштабируемость** - свойство параллельной программы, характеризующее зависимость изменения динамических характеристик работы этой программы от изменения параметров ее запуска.

- $(a, b, c, d, \dots) \rightarrow (t, S, E, P, \dots)$  **Многомерность!**  
  
Конфигурация запуска    Динамические характеристики

# Масштабируемость параллельной программы

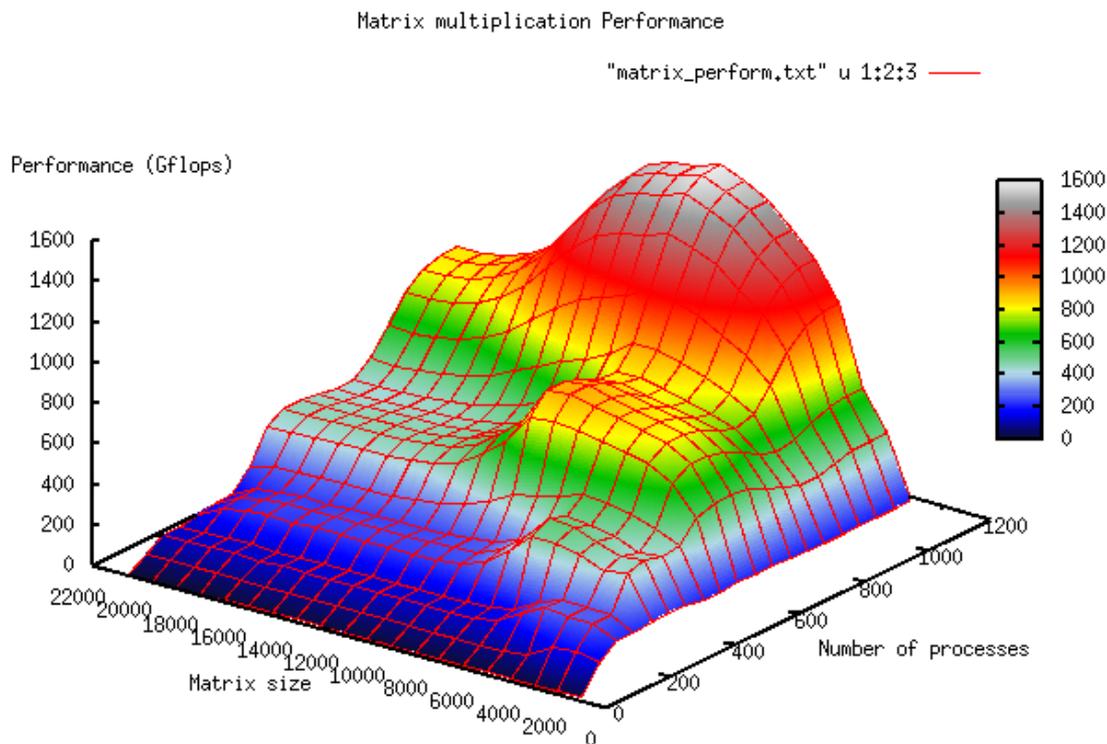
- *Представима в виде:*
  - *Функции (аргументы = параметры запуска, значение = вектор характеристик)*
  - *Таблицы значений*
  - *Базы данных*

| CPU type | Compiler   | Compiler Options | Processes number | Launch params | ... | Time  | Ops num | Cache misses | Speed b/s | ... |
|----------|------------|------------------|------------------|---------------|-----|-------|---------|--------------|-----------|-----|
| x5570    | Intel 11.0 | -O3              | 16               | -npp 2        |     | 13,53 | 911G    | 86M          | 18Mb/s    |     |
| x5570    | Intel 11.0 | -O3              | 64               | -npp 2        |     | 8,32  | 930G    | 20M          | 63Mb/s    |     |
| x5570    | Intel 11.0 | -O3              | 128              | -npp 2        |     | 5,53  | 980G    | 17M          | 91Mb/s    |     |

Конфигурация запуска

Динамические характеристики

# Связь с классическими определениями масштабируемости

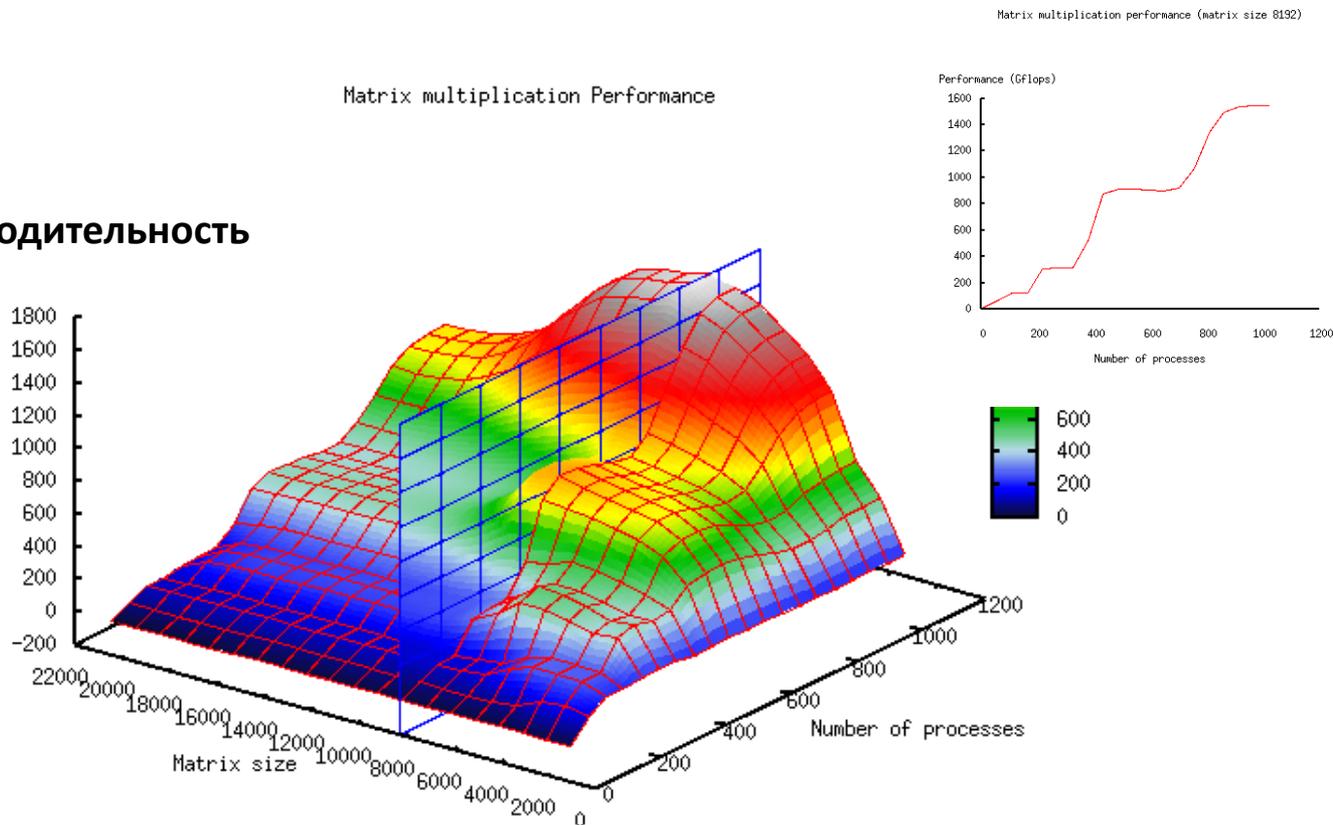


**Частный случай: Зависимость от двух параметров  
(Число процессов и размер матрицы)**

# Связь с классическими определениями масштабируемости

**W=const**

**Производительность**



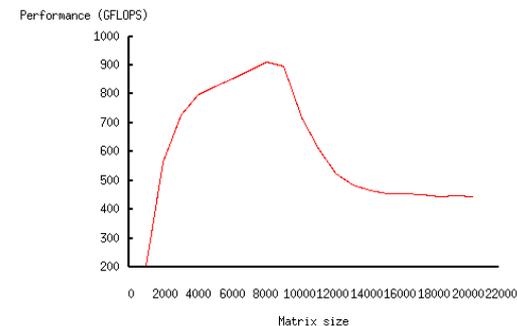
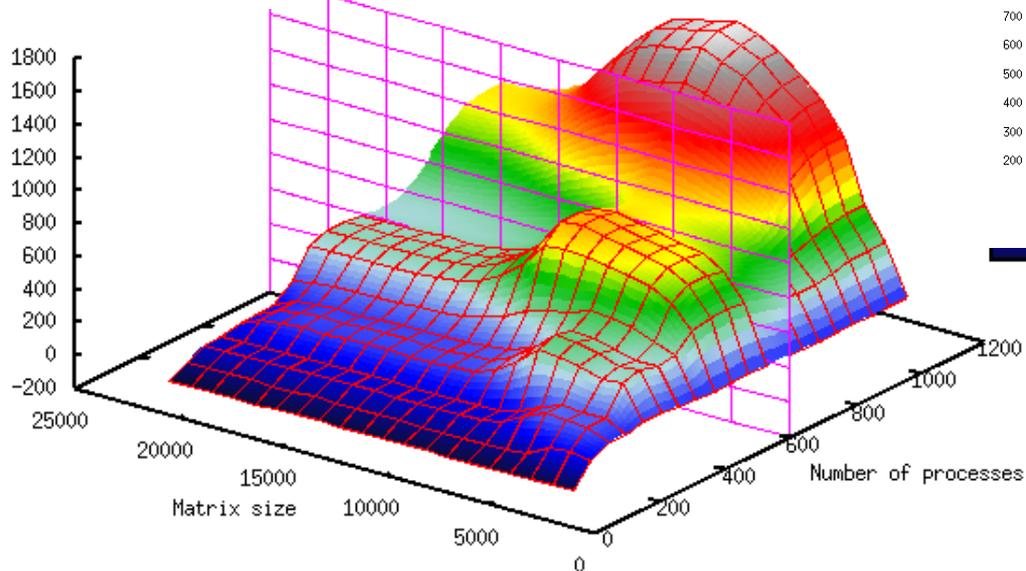
**Сильная масштабируемость**  
– при фиксированной вычислительной сложности задачи

# Связь с классическими определениями масштабируемости

Matrix multiplication Performance

Matrix multiplication performance 512 processes

Производительность



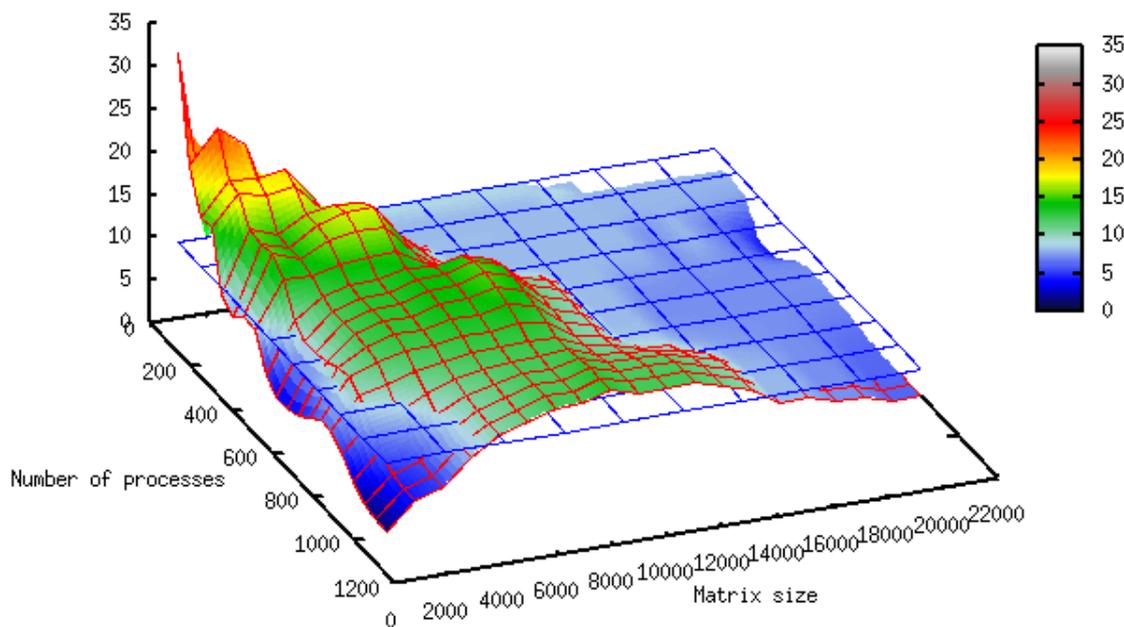
**N=const**

**Масштабируемость вширь**  
– при фиксированном числе процессов

# Связь с классическими определениями масштабируемости

Matrix multiplication Efficiency

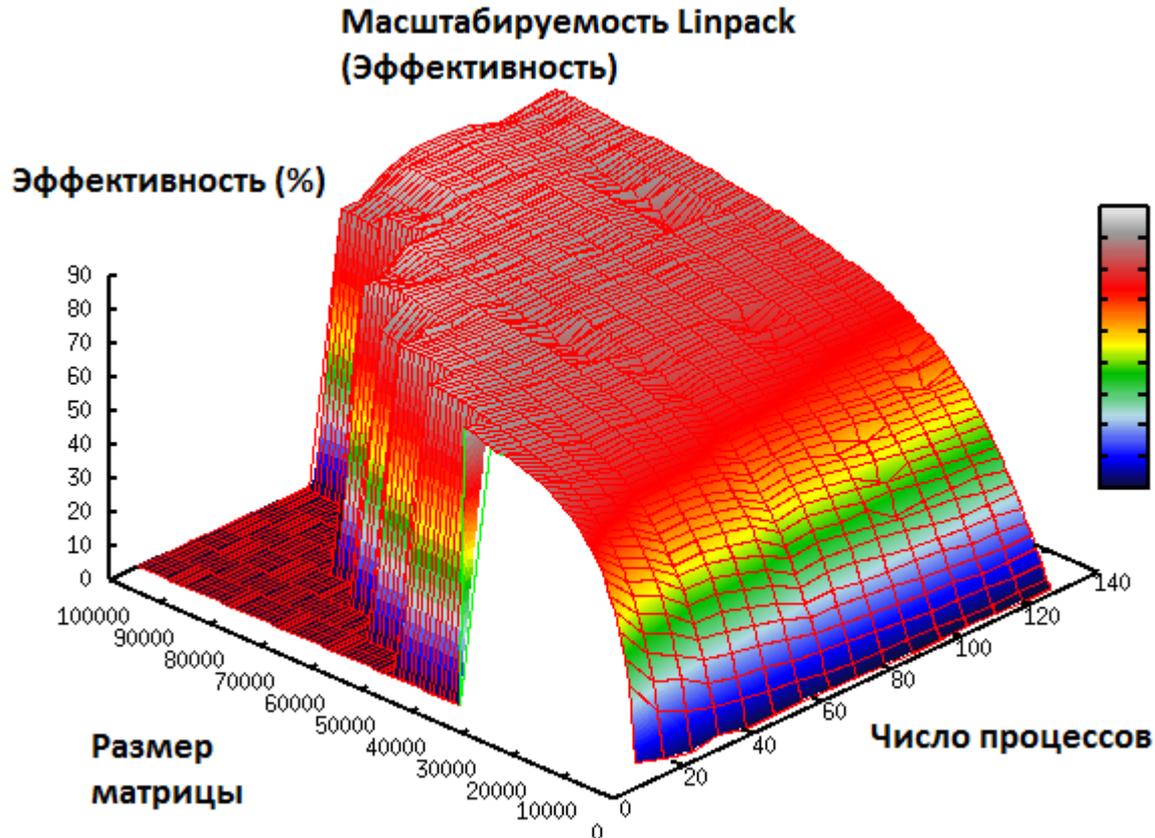
Эффективность



$E_{\text{real}} = \text{const}$

**Функция изоэффективности –  
зависимость числа процессов от размера задачи  
при сохранении постоянного уровня эффективности**

# Использование параметров запуска



Конфигурация узла

Интерконект

Библиотеки

Компиляторы

Опции компиляции

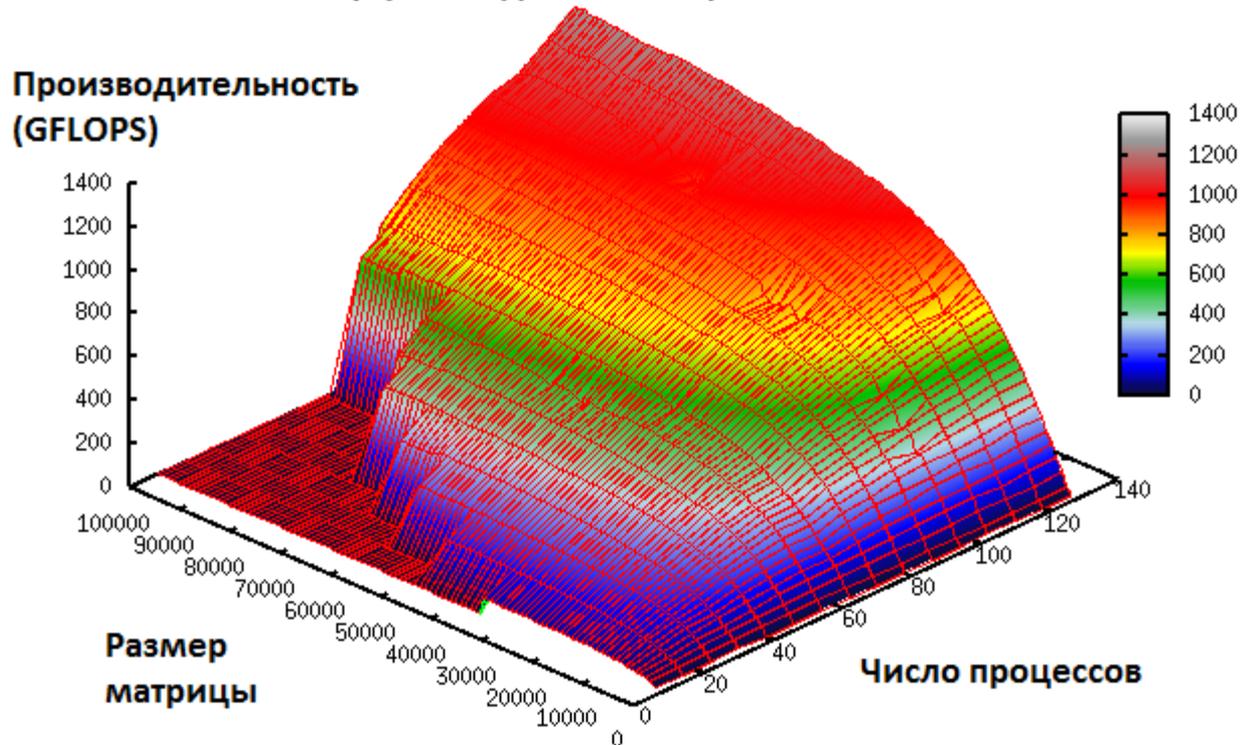
Число процессов  
на узел

Размер блока

...

# Проведение анализа масштабируемости программ

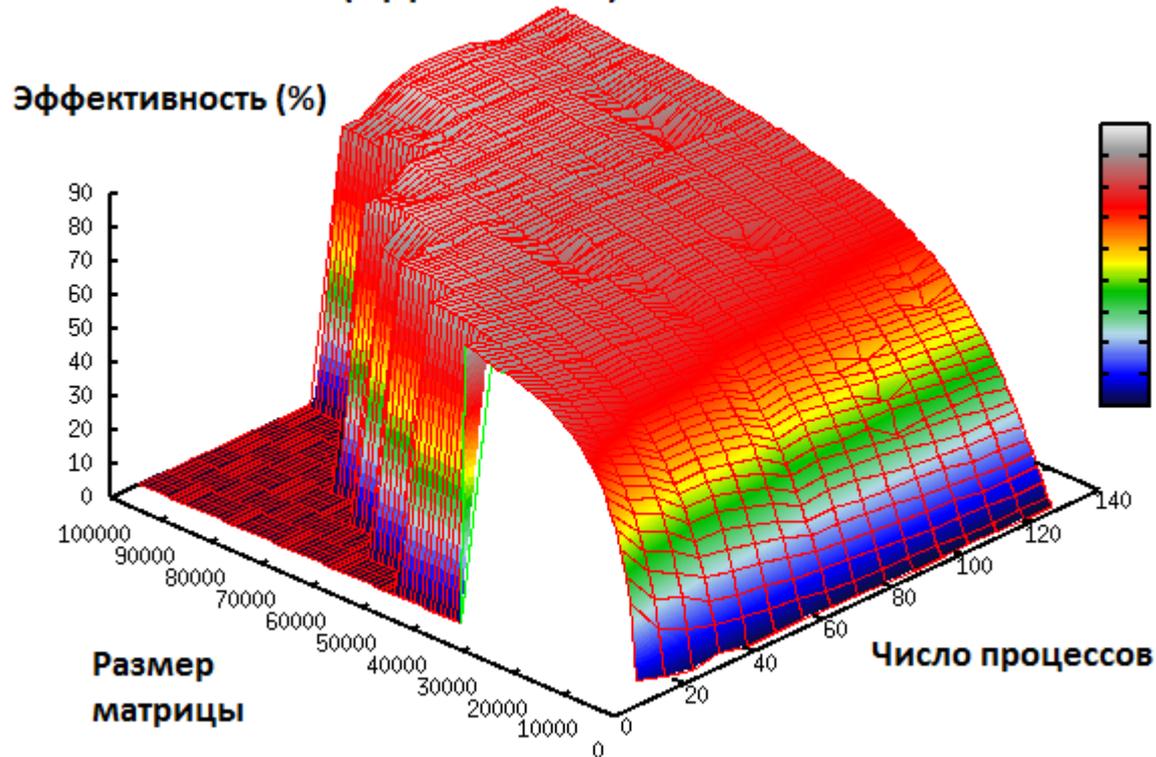
Масштабируемость Linpack  
(Производительность)



Параметры запуска:  
Число процессоров  
Размер матрицы  
Характеристики:  
**Производительность**  
Эффективность  $E_{\text{real}}$   
Производит. 1 ядра  
Число кэш-промахов,  
Работа с памятью,  
Интенсивность работы с Infiniband.

# Проведение анализа масштабируемости программ

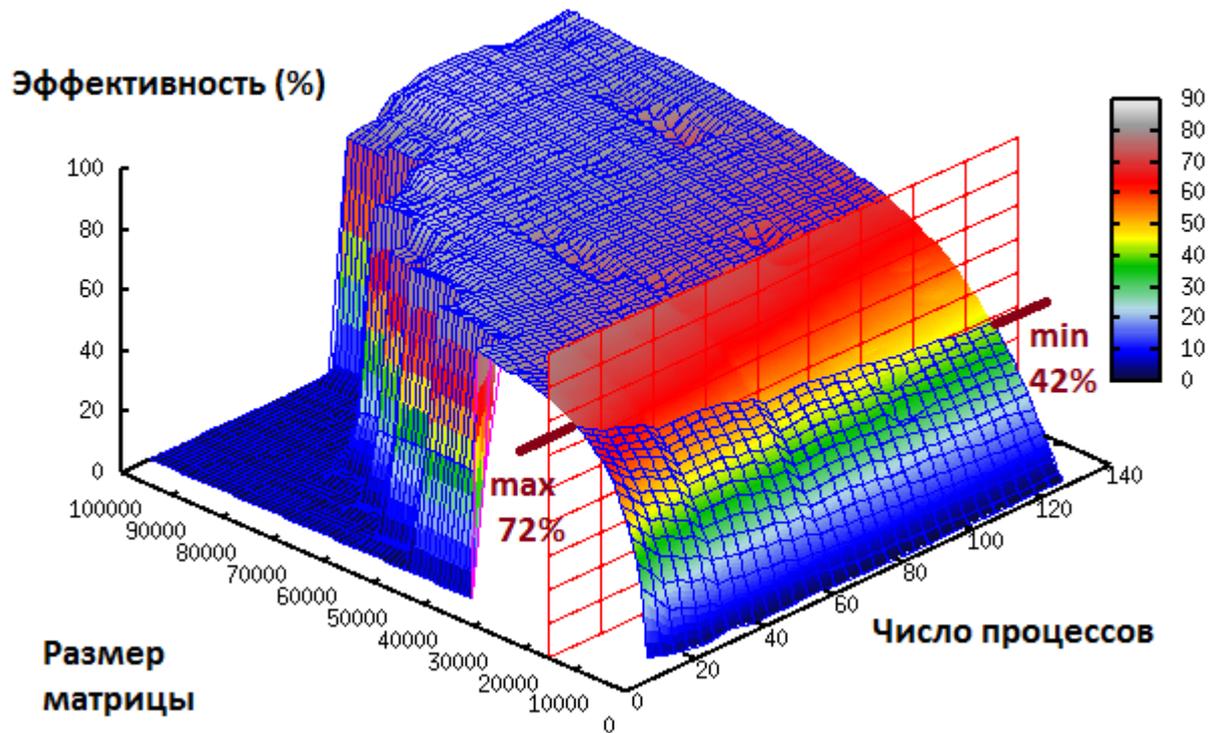
Масштабируемость Linpack  
(Эффективность)



Параметры запуска:  
Число процессоров,  
Размер матрицы.  
Характеристики:  
Производительность.  
Эффективность  $E_{real}$ ,  
Производит. 1 ядра  
Число кэш-промахов,  
Работа с памятью,  
Интенсивность работы  
с Infiniband.

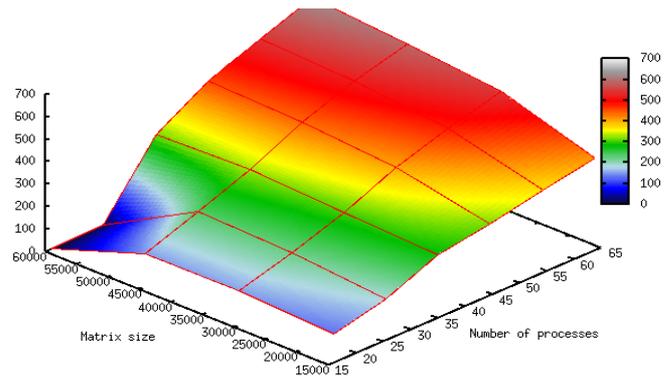
# Проведение анализа масштабируемости программ

Масштабируемость Linpack  
(Эффективность)

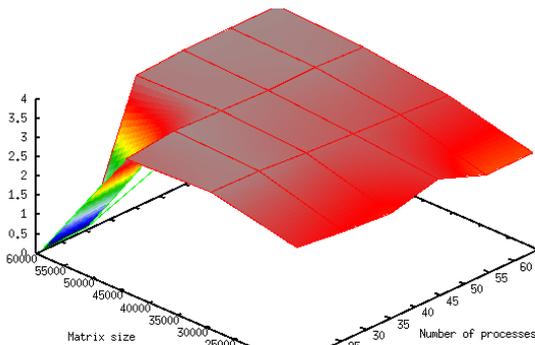


**Параметры запуска:**  
Число процессоров,  
Размер матрицы.  
**Характеристики:**  
Производительность.  
**Эффективность  $E_{real}$**   
Производит. 1 ядра  
Число кэш-промахов,  
Работа с памятью,  
Интенсивность работы  
с Infiniband.

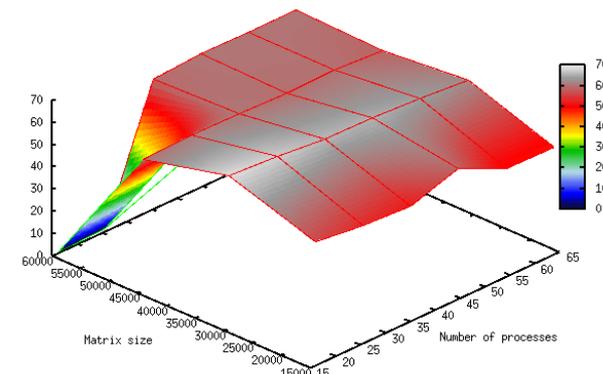
Общая производительность (Gflops)



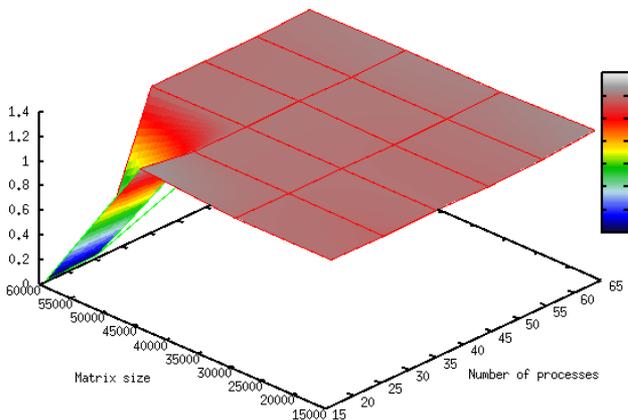
Производительность 1 ядра



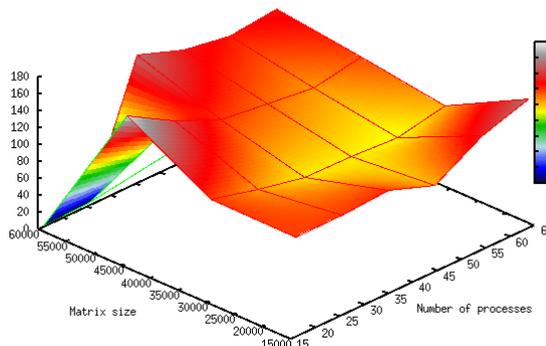
Кэш-промахи L1 (млн/сек)



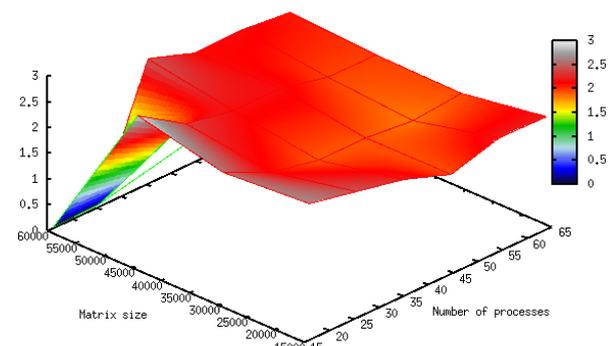
Операции чтения из памяти (млрд/сек)



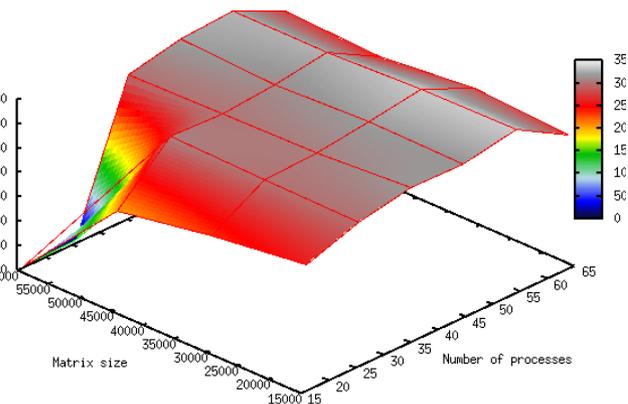
Операции записи в память (млн/сек)



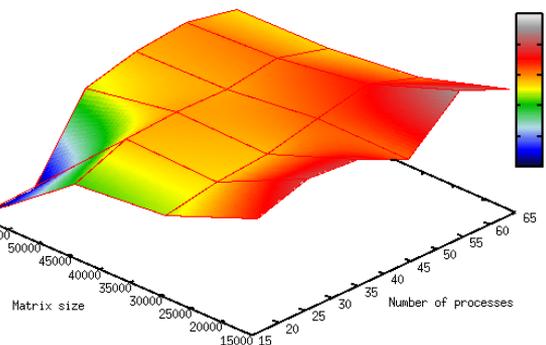
Кэш-промахи L3 (млн/сек)



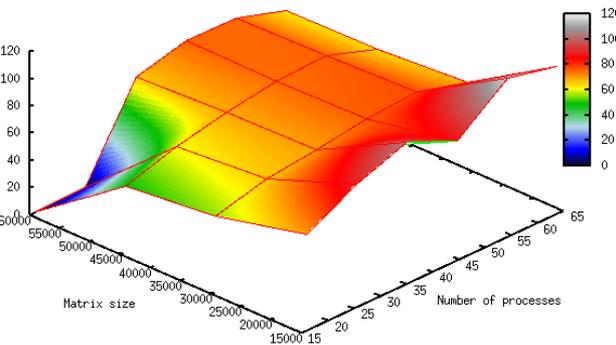
Максимальная скорость передачи (МБ/сек)



Средняя скорость передачи (МБ/сек)

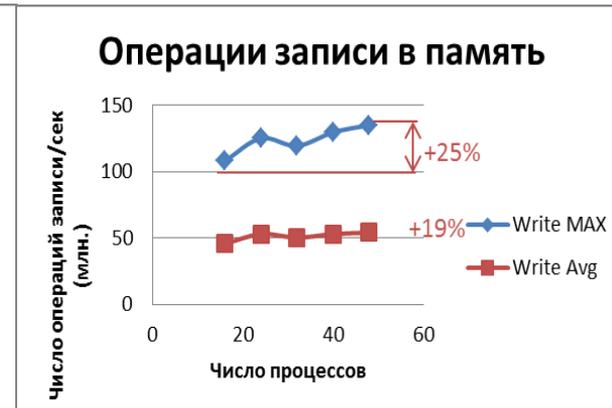
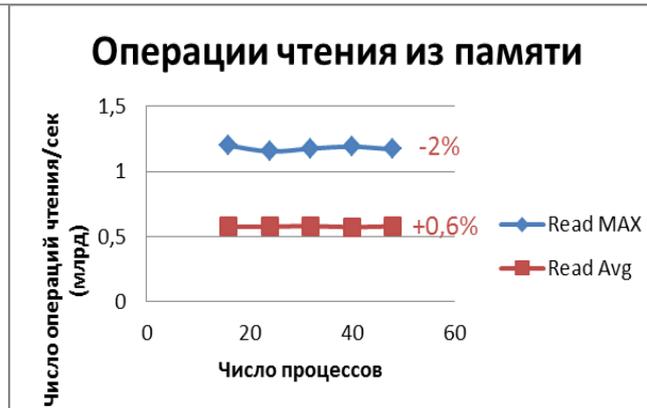
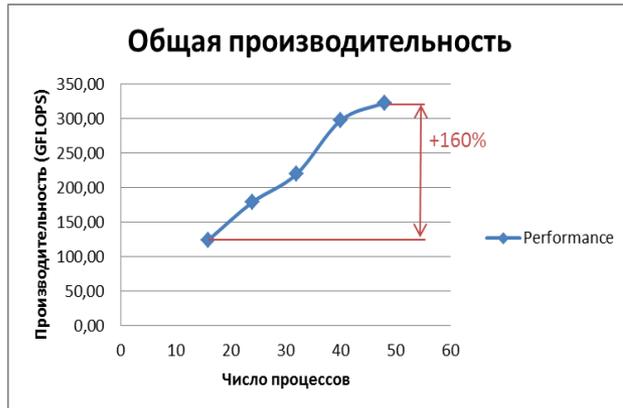
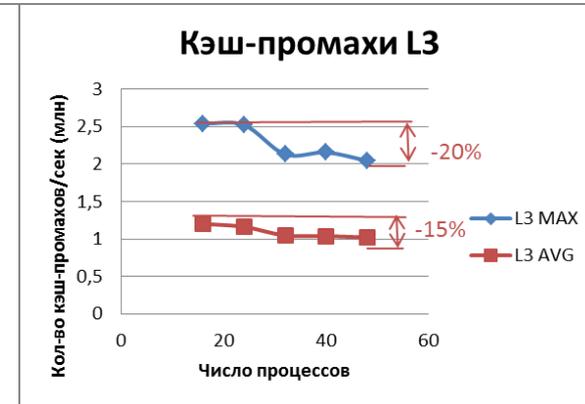
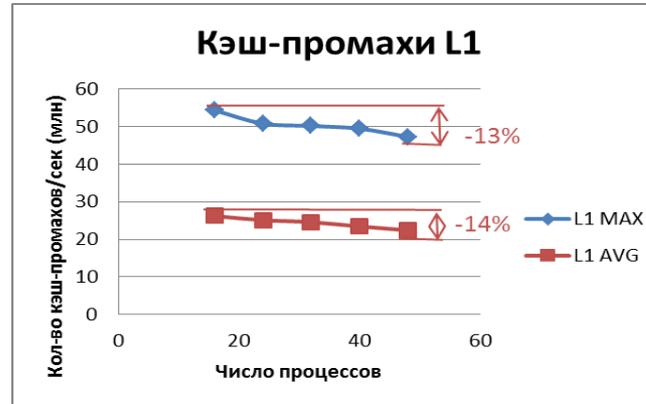
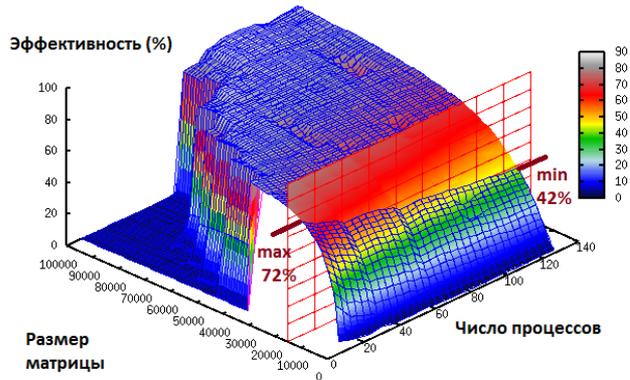


Скорость передачи (тыс. Пакетов/сек)



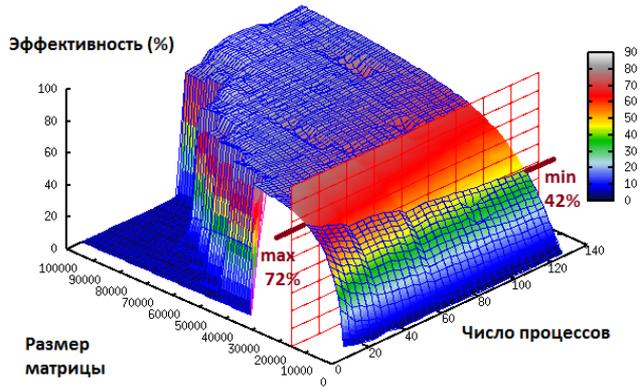
# Проведение анализа масштабируемости программ

Масштабируемость Linpack (Эффективность)

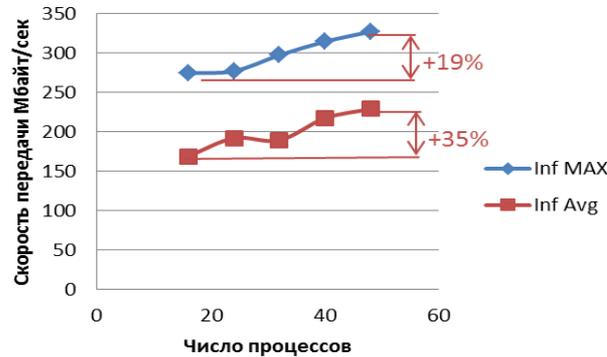


# Проведение анализа масштабируемости программ

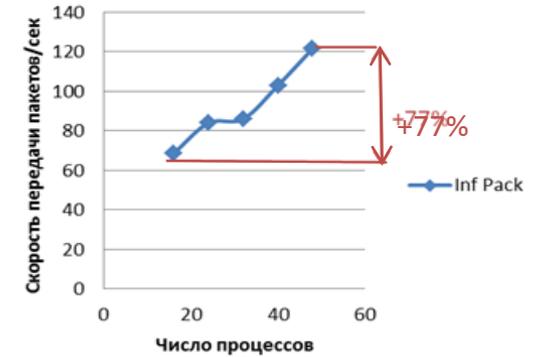
Масштабируемость Linpack (Эффективность)



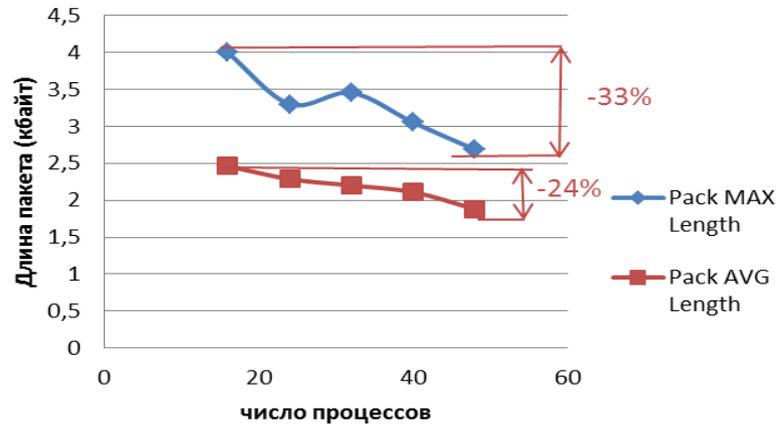
Скорость передачи по Infiniband Байт/сек



Скорость передачи по Infiniband пакетов/сек



Длина пакета

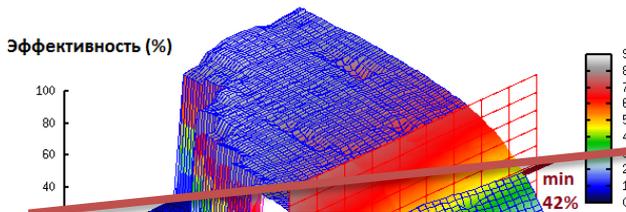


**Сильный рост загруженности коммуникационной сети!**

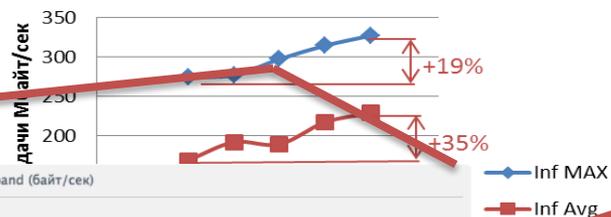
**Основной ограничивающий фактор – латентность сети**

# Проведение анализа масштабируемости программ

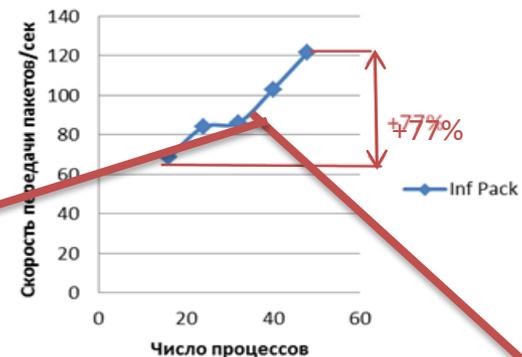
Масштабируемость Linpack (Эффективность)



Скорость передачи по Infiniband Байт/сек



Скорость передачи по Infiniband пакетов/сек



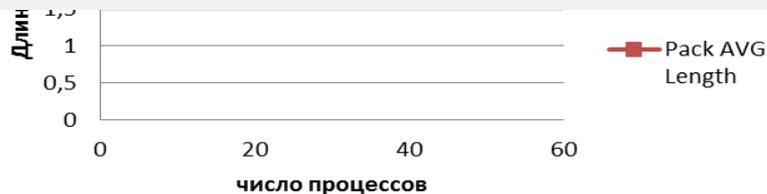
Скорость передачи данных по сети Infiniband (байт/сек)



Скорость передачи данных по сети Infiniband (пакетов/сек)



Скорость передачи данных по сети Infiniband (пакетов/сек)



**Сильный рост загруженности коммуникационной сети!**

**Основной ограничивающий фактор – латентность сети**

# План доклада

- Обзор существующих подходов к анализу масштабируемости
- Актуальность исследований
- Постановка задачи
- Обобщение понятия масштабируемость параллельных приложений
- Применение данных системного мониторинга для анализа масштабируемости
- Сравнение масштабируемости реальных вычислительных ядер

# Используемый при анализе инструментарий

- Система построения отчетов JobDigest
  - Прореживание и агрегация данных с аппаратных датчиков на узлах при работе приложения
  - Отсутствие необходимости инструментирования приложения
  - Построение отчета о работе сразу после выполнения приложения
- Анализатор WEKA
  - Алгоритмы кластеризации и анализа данных
  - Визуализация результатов анализа
  - Открытый исходный код
- Использованные для анализа программы
  - Тесты моделирующие специфическую нагрузку
  - Типовые вычислительные ядра алгоритмов
  - Приложения из потока задач суперкомпьютерного комплекса

# Факторы, влияющие на масштабируемость

- Коммуникационная сеть
  - Латентность коммуникационной сети
  - Пропускная способность коммуникационной сети
  - Топология коммуникационной сети
- Компоненты вычислительного узла
  - Использование при работе жёсткого диска
  - Характеристики оперативной памяти
  - Объём и характеристики кэш-памяти
- Характеристики используемого алгоритма
  - Дисбаланс вычислений
  - Ограниченный параллелизм алгоритма
  - Предел декомпозиции данных



Параметры запуска

# Анализ использования коммуникационной сети

- Пропускная способность коммуникационной сети
  - Тест «Butterfly», длина сообщений 1

**Минимальная скорость передачи 110 Мбайт/сек**



**Скорость миллионов байт/сек: Тест1 – 110.**

# Анализ использования коммуникационной сети

- Пропускная способность коммуникационной сети
  - Тест «Butterfly», длина сообщений 1 000 000

**Минимальная скорость передачи 820 Мбайт/сек**



**Скорость миллионов байт/сек: Тест1 – 110; Тест 2 – 820.**

# Анализ использования коммуникационной сети

- Пропускная способность коммуникационной сети
  - Тест «Butterfly», длина сообщений 100 000 000

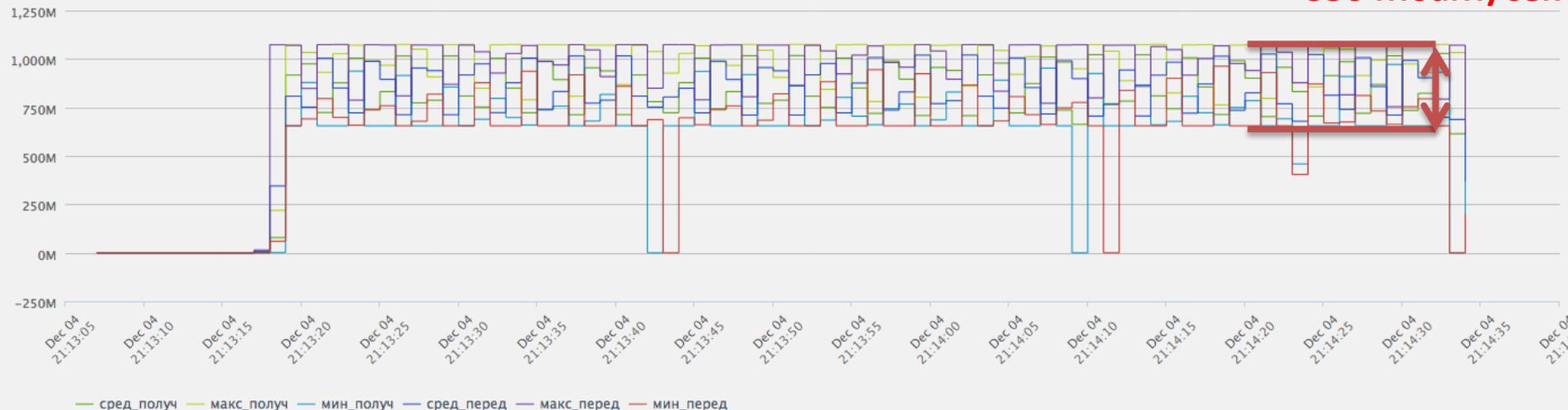
**Минимальная скорость передачи 690 Мбайт/сек**

Скорость передачи данных по сети Infiniband (байт/сек)

analyze\_ib\_tpl8\_test-1386191586-35672.csv 00:00:11.806 (41.166 lines/sec) transform make\_clean

Скорость передачи данных по сети Infiniband (байт/сек)

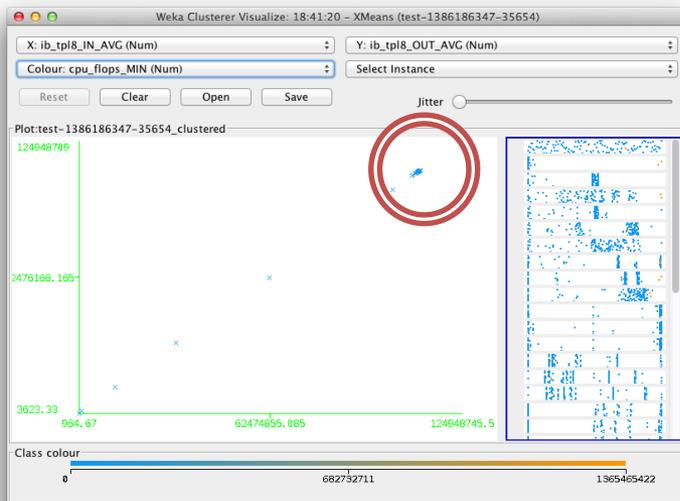
**350 Мбайт/сек**



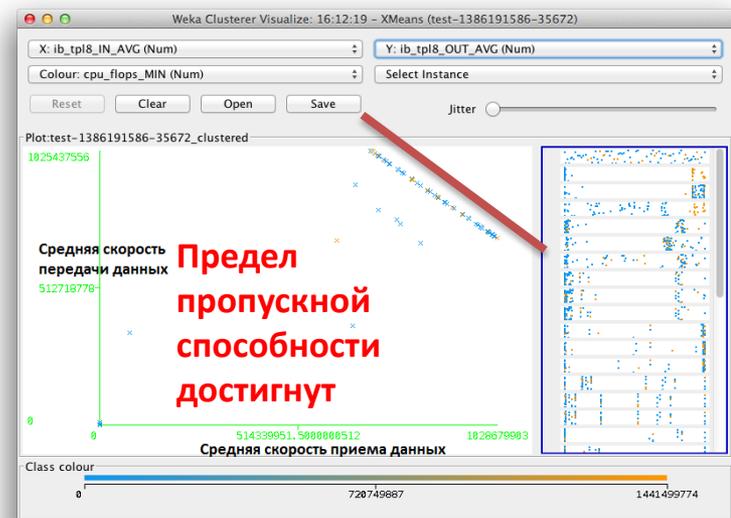
**Скорость миллионов байт/сек: Тест1 – 110; Тест 2 – 820; Тест 3 – 690.**

# Анализ использования коммуникационной сети

- Пропускная способность коммуникационной сети
  - Тест «Butterfly», длина сообщений 100 000 000
  - Зависимость средней скорости приема данных от средней скорости передачи данных



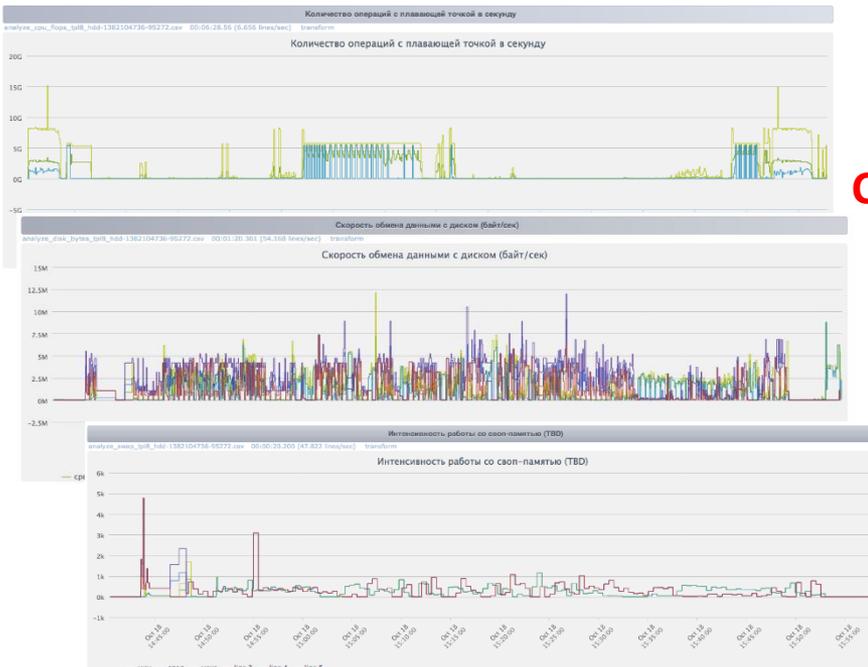
Длина сообщений 1 000 0000



Длина сообщений 100 000 0000

# Анализ использования компонент вычислительного узла

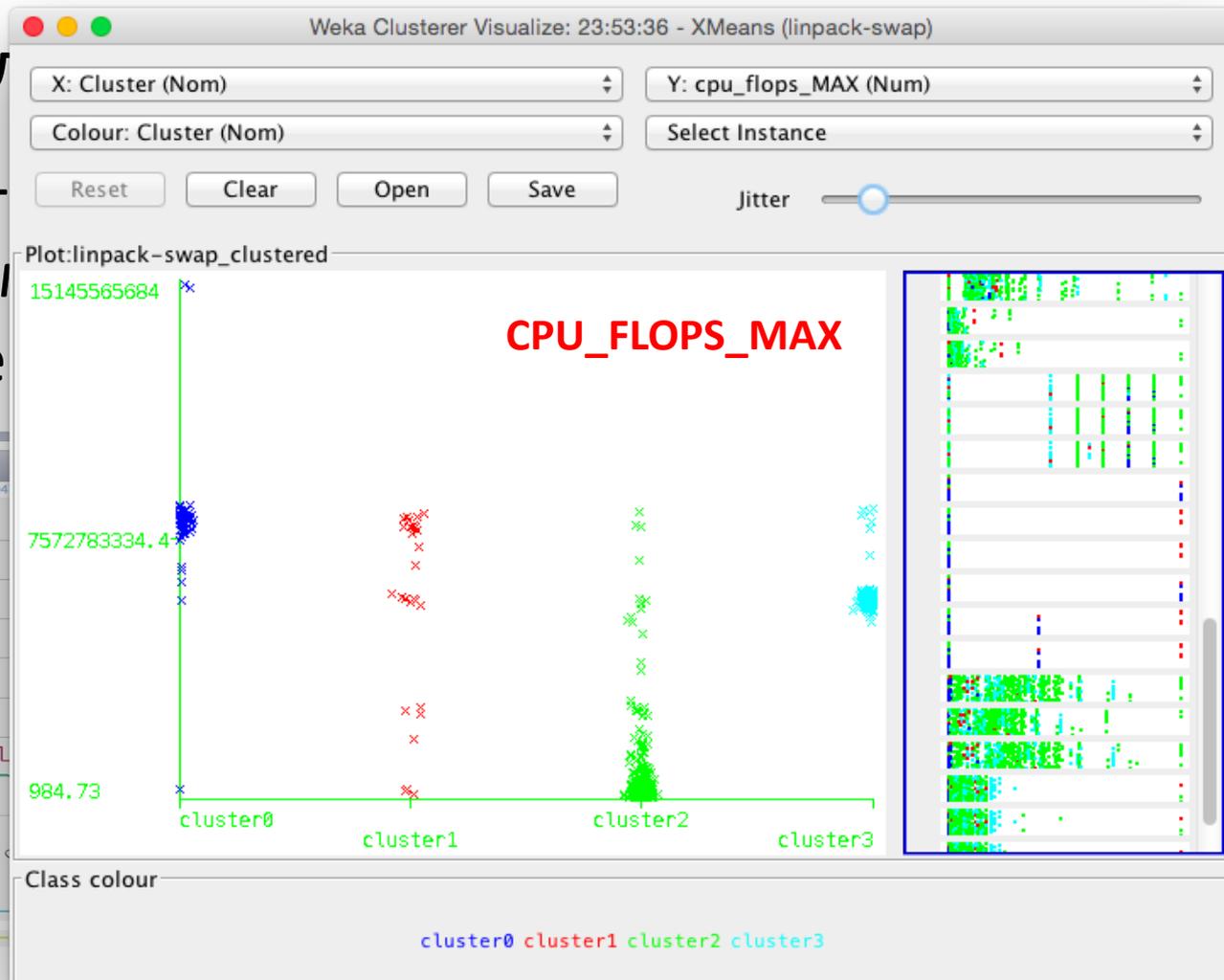
- Использование при работе своп-памяти
  - HPL
  - Размер задачи заведомо превышающий объем оперативной памяти на узлах.



Сложность визуального анализа зависимостей

# Анализ использования компонент вычислительного узла

- Исполнение
- HPL
- Различные операции

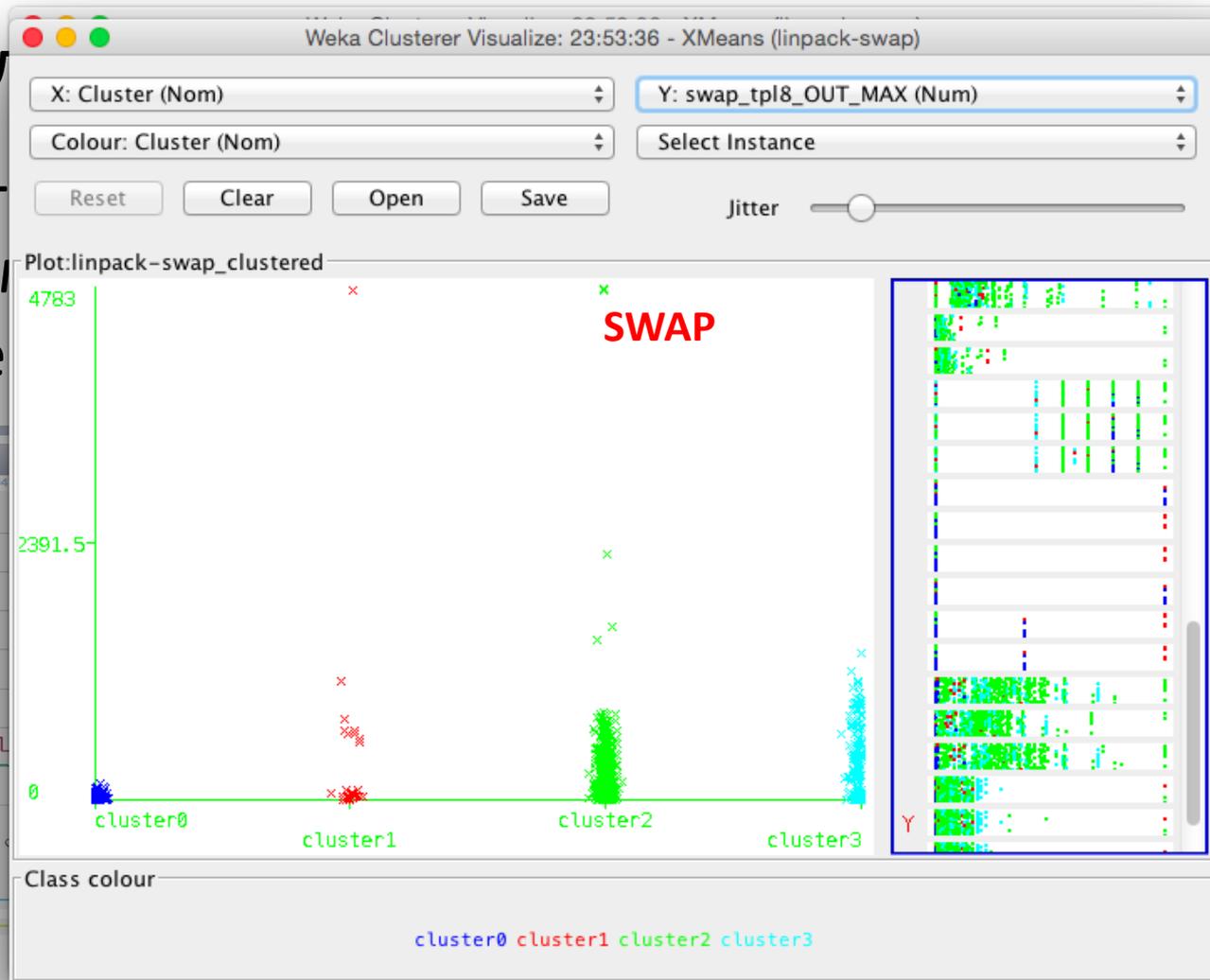


тем

гей

# Анализ использования компонент вычислительного узла

- Исполнение
- НРЛ
- Раз
- опе

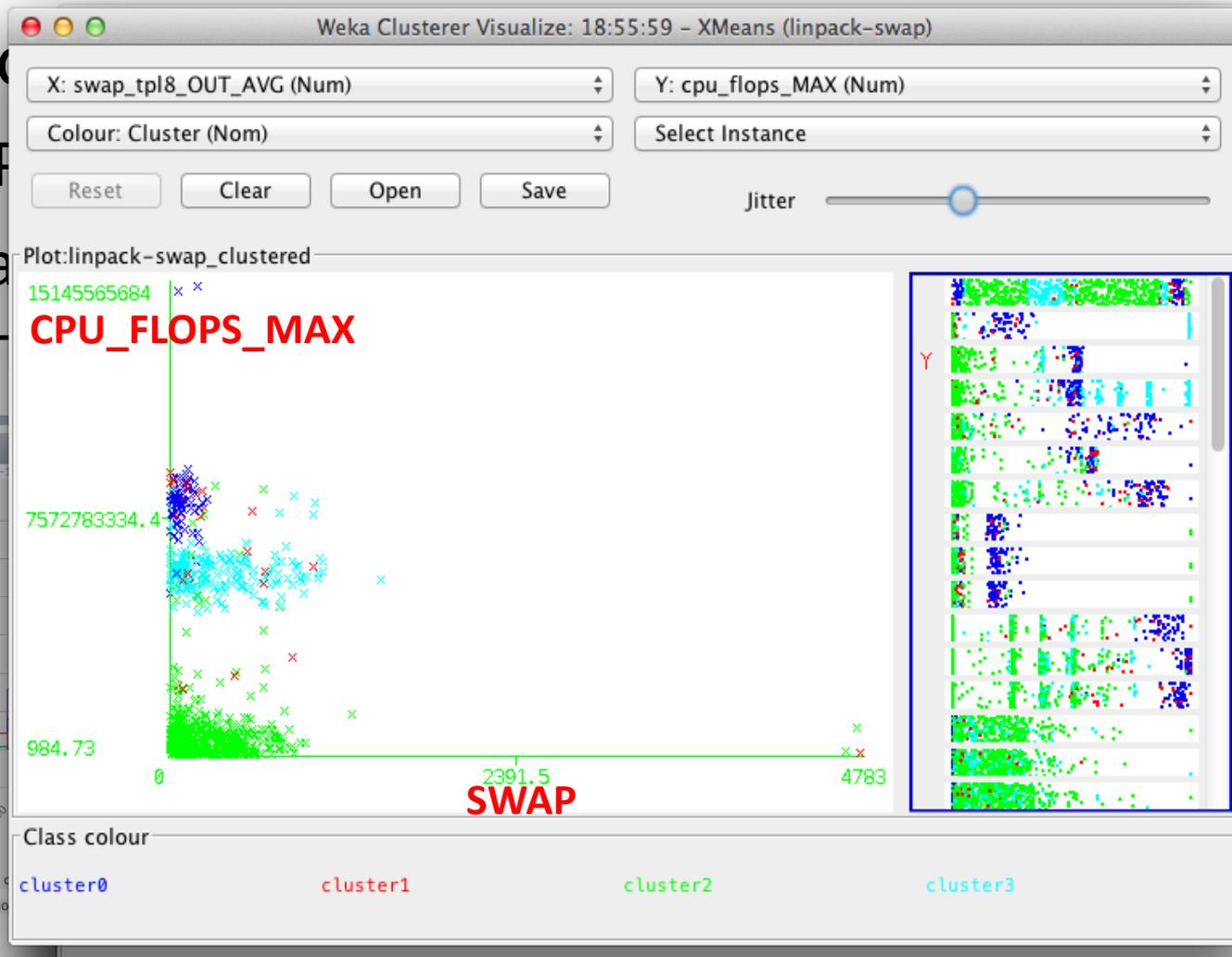


ъем

гей

# Анализ использования компонент вычислительного узла

- Исполнение
- НР
- Ра
- ог

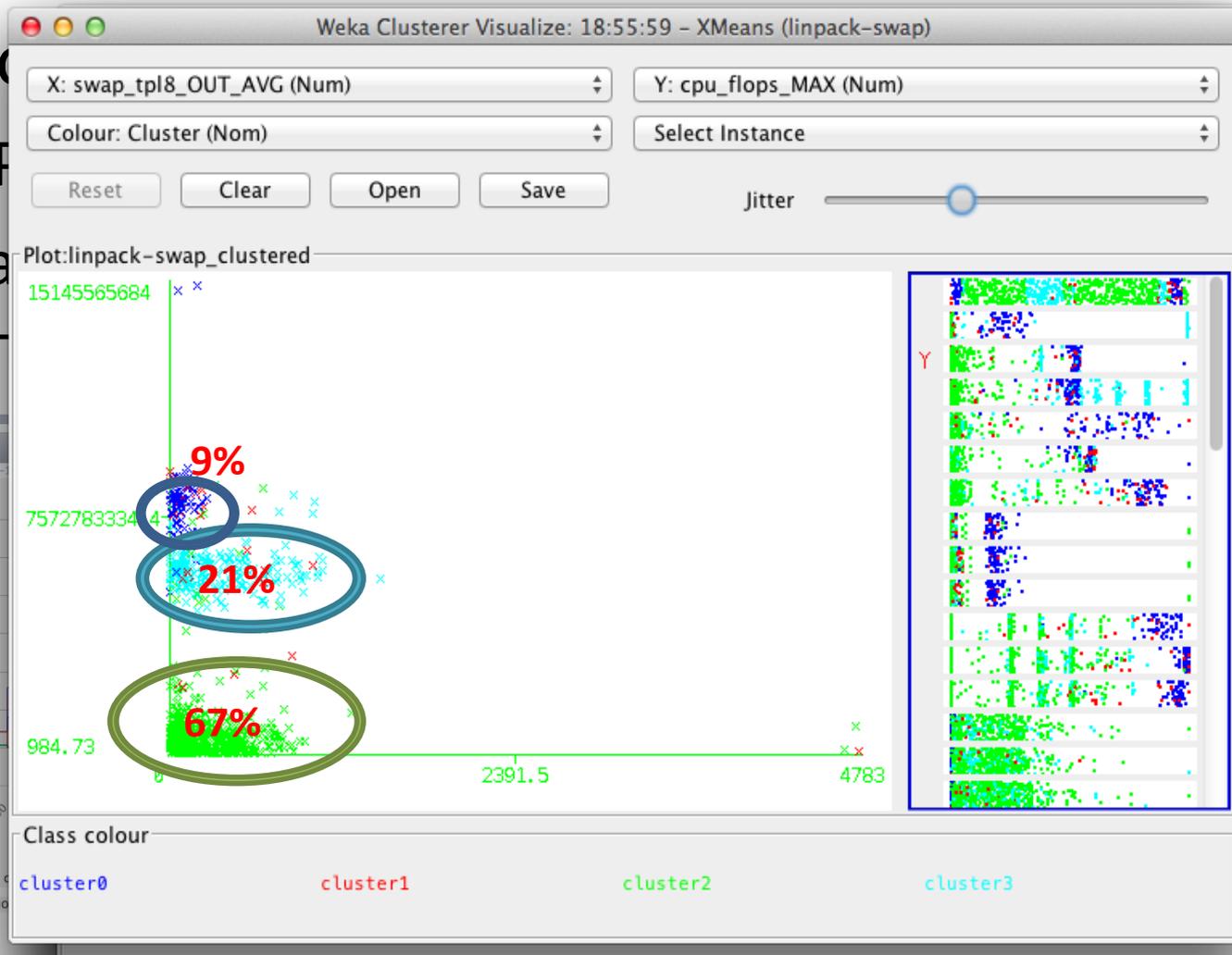


ъем

гей

# Анализ использования компонент вычислительного узла

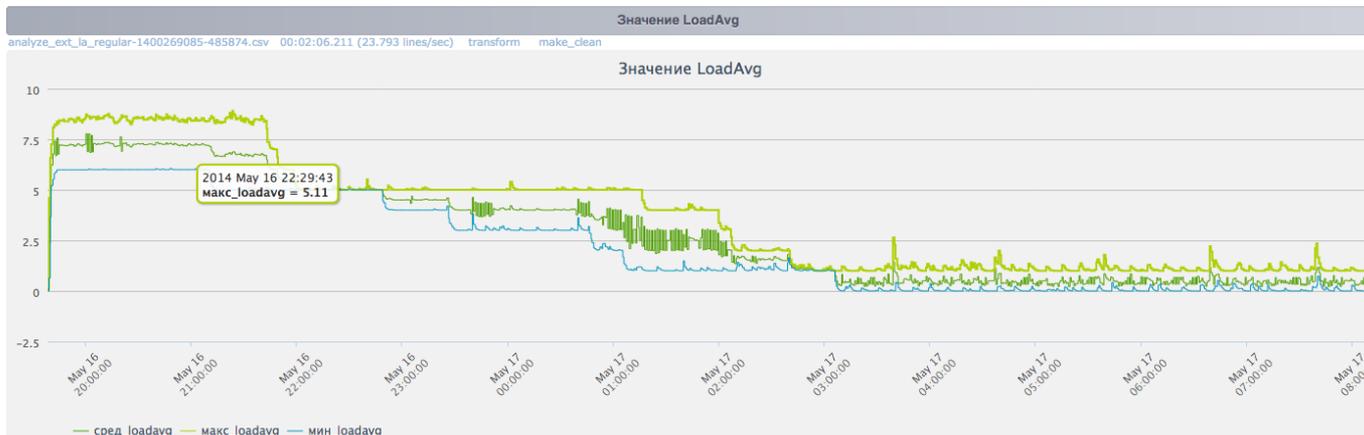
- Исполнение
- НР
- Ра
- оп



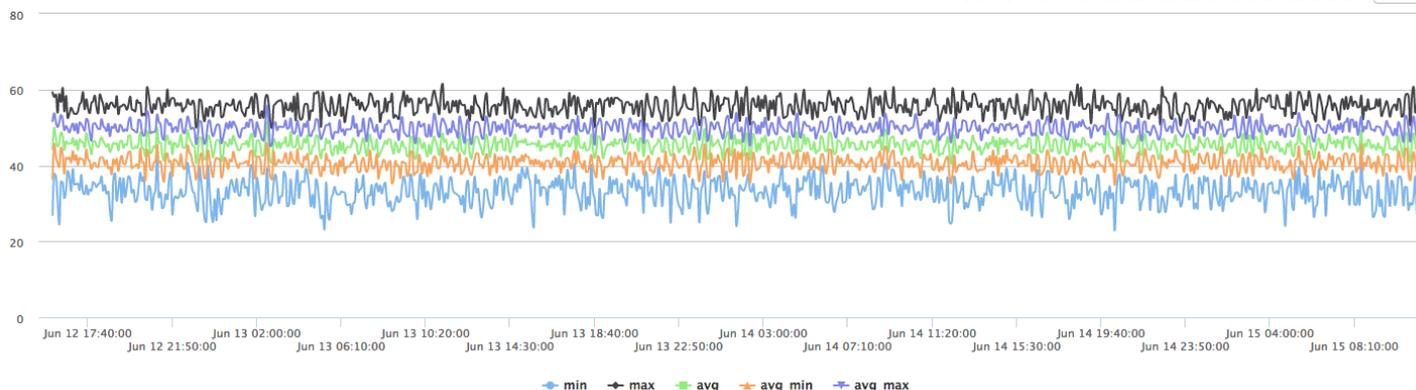
ъем

# Ограниченный ресурс параллелизма алгоритма

- Анализ задач из реального потока



loadavg



**Можно выделять проблемные задачи из потока автоматически**

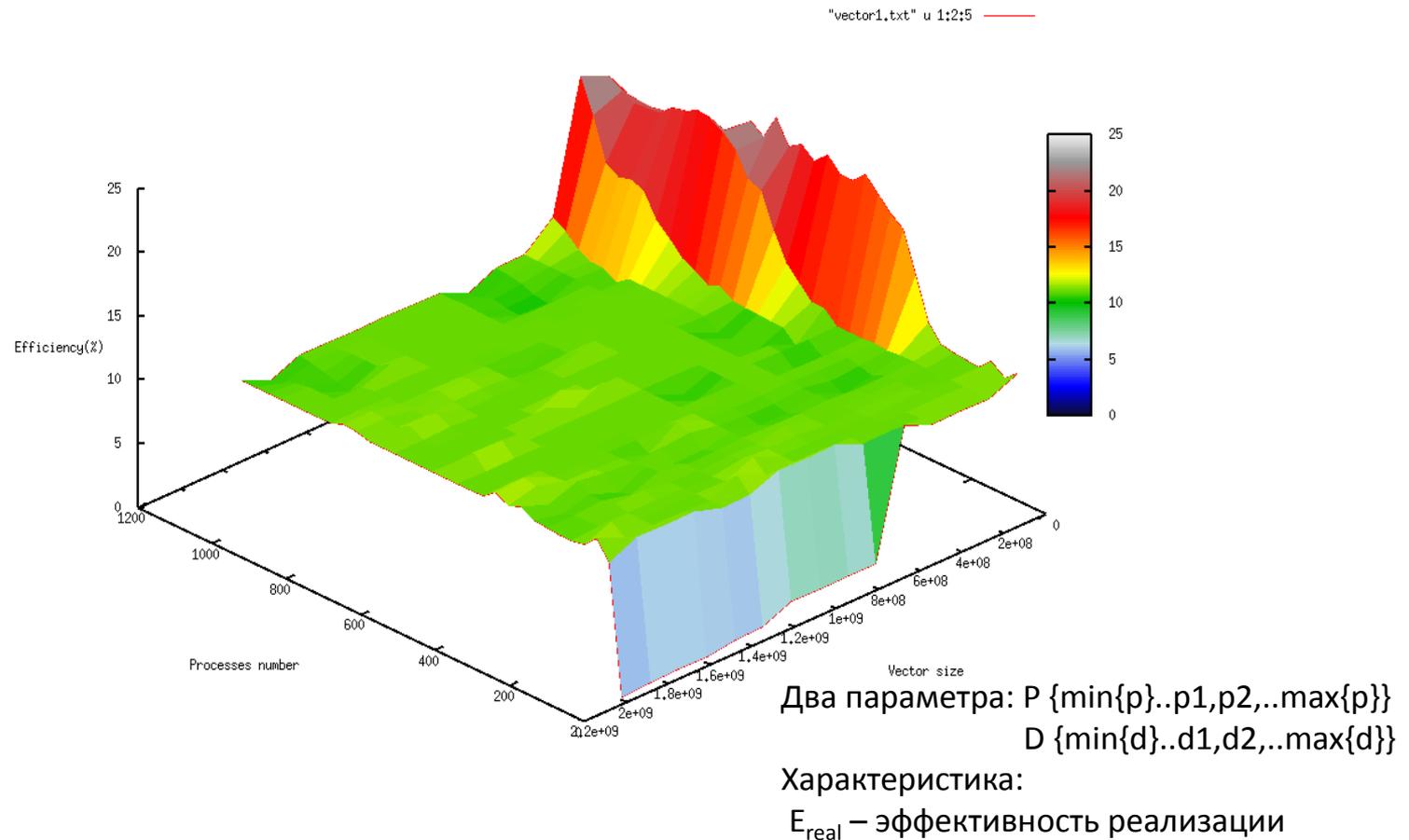
# План доклада

- Обзор существующих подходов к анализу масштабируемости
- Актуальность исследований
- Постановка задачи
- Обобщение понятия масштабируемость параллельных приложений
- Применение данных системного мониторинга для анализа масштабируемости
- Сравнение масштабируемости реальных вычислительных ядер

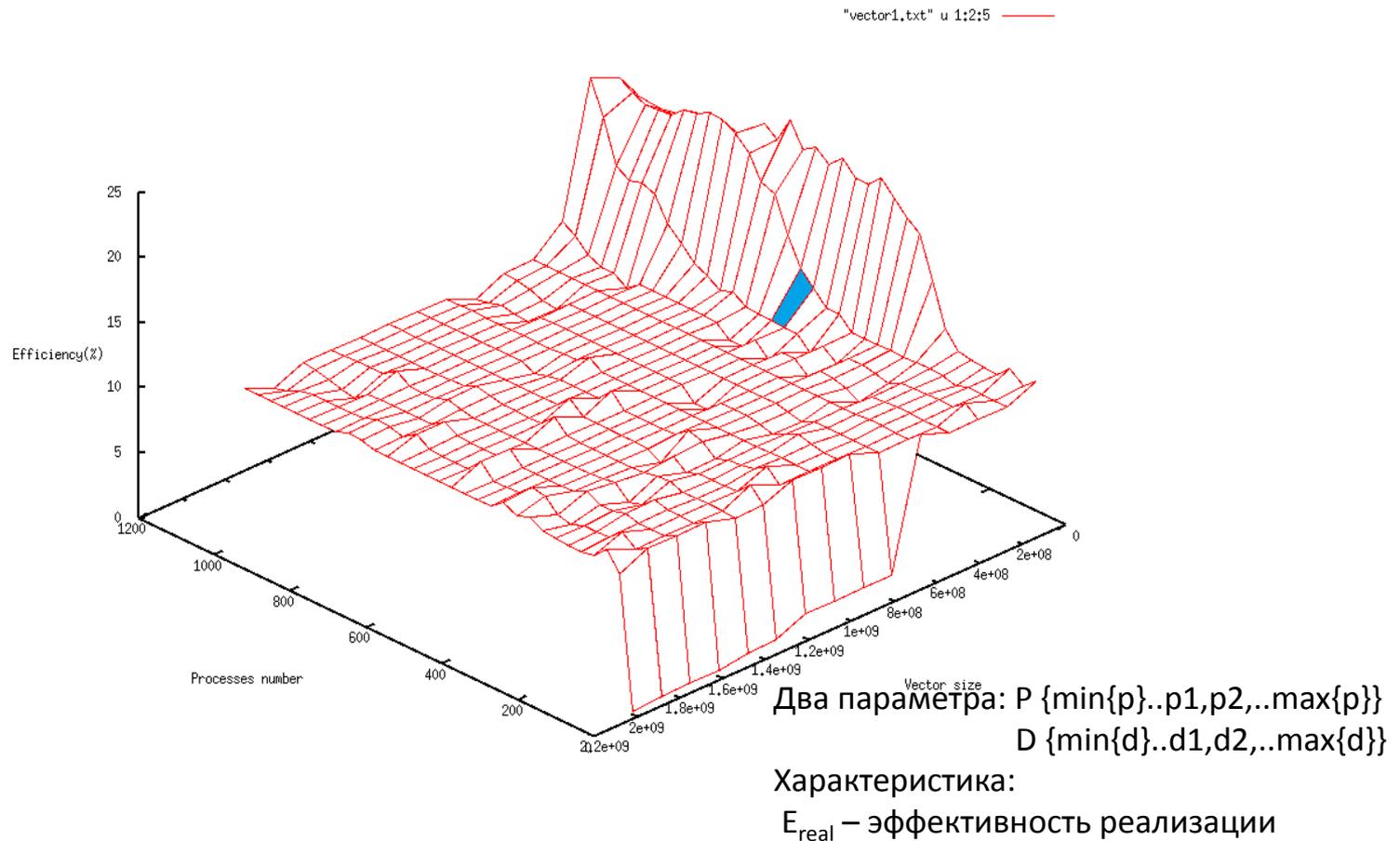
# Разработка принципов сравнения масштабируемости приложений

- Необходимость оценивать вносимые изменения
- Выведение оценки и метрики масштабируемости
- Анализ количественного изменения эффективности при изменении каждого параметра запуска
- Критерий для сравнения масштабируемости программ – эффективность реализации  $E_{real}$ 
  - Увеличение эффективности – положительный вклад в оценку
  - Эффективность постоянна – нейтральный вклад
  - Снижение эффективности – отрицательный вклад

# Вывод оценки масштабируемости для двух параметров запуска



# Вывод оценки масштабируемости для двух параметров запуска



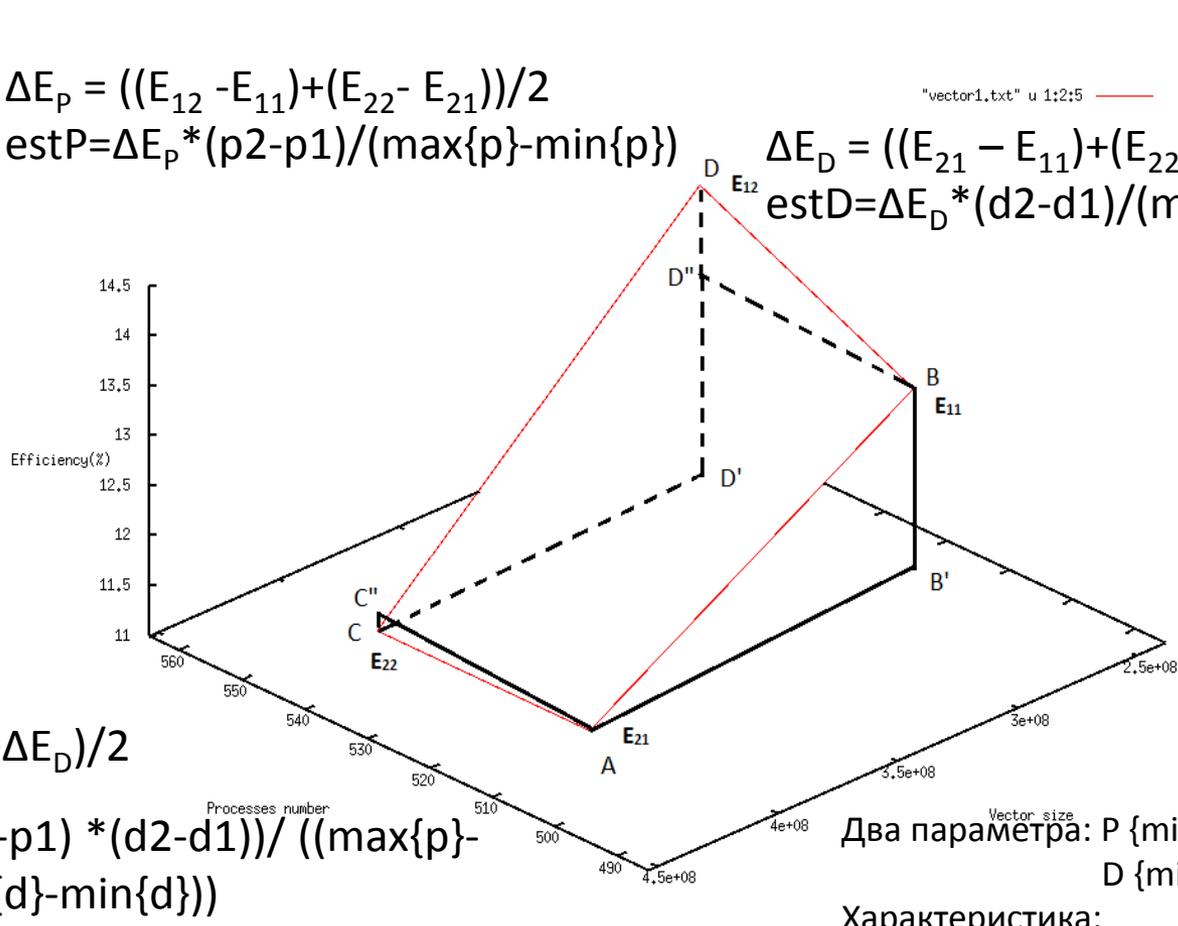
# Вывод оценки масштабируемости для двух параметров запуска

$$\Delta E_P = ((E_{12} - E_{11}) + (E_{22} - E_{21})) / 2$$

$$\text{estP} = \Delta E_P * (p_2 - p_1) / (\max\{p\} - \min\{p\})$$

$$\Delta E_D = ((E_{21} - E_{11}) + (E_{22} - E_{12})) / 2$$

$$\text{estD} = \Delta E_D * (d_2 - d_1) / (\max\{d\} - \min\{d\})$$



$$\Delta E_A = (\Delta E_P + \Delta E_D) / 2$$

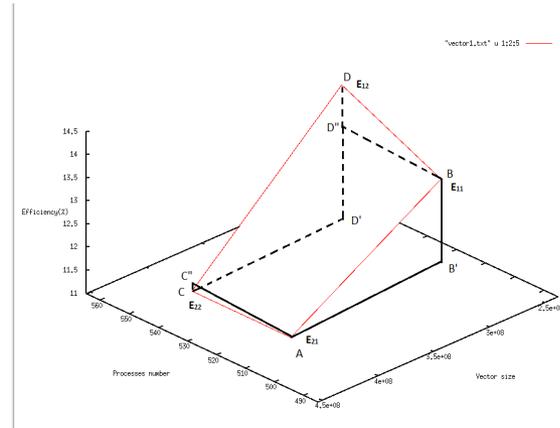
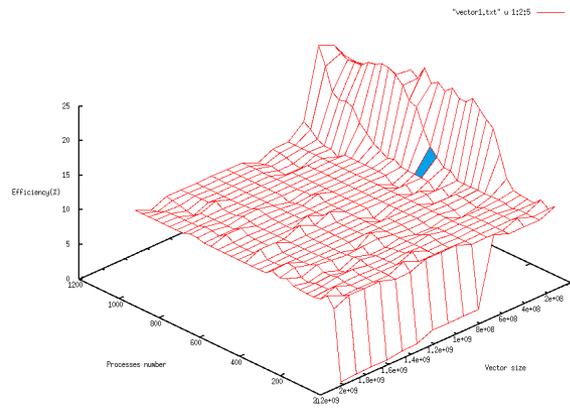
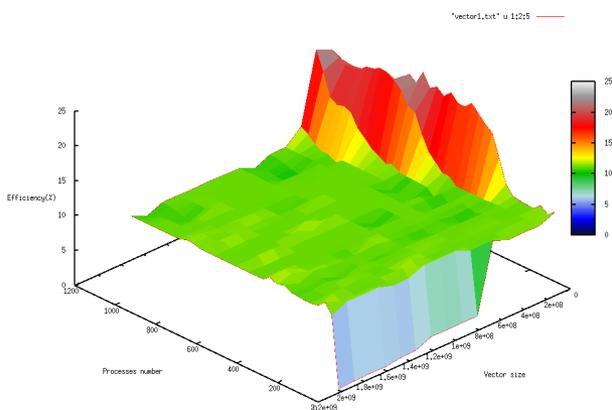
$$\text{estA} = \Delta E_A * ((p_2 - p_1) * (d_2 - d_1)) / ((\max\{p\} - \min\{p\}) * (\max\{d\} - \min\{d\}))$$

Два параметра: P {min{p}..p1,p2,..max{p}}  
D {min{d}..d1,d2,..max{d}}

Характеристика:

$E_{\text{real}}$  – эффективность реализации

# Вывод оценки масштабируемости для двух параметров запуска



- $EstP = (estP_1 + estP_2 + \dots + estP_N) / N$
- $EstD = (estD_1 + estD_2 + \dots + estD_N) / N$
- $EstAll = (estA_1 + estA_2 + \dots + estA_N) / N$

Два параметра: P {min{p}..p1,p2,..max{p}}  
D {min{d}..d1,d2,..max{d}}

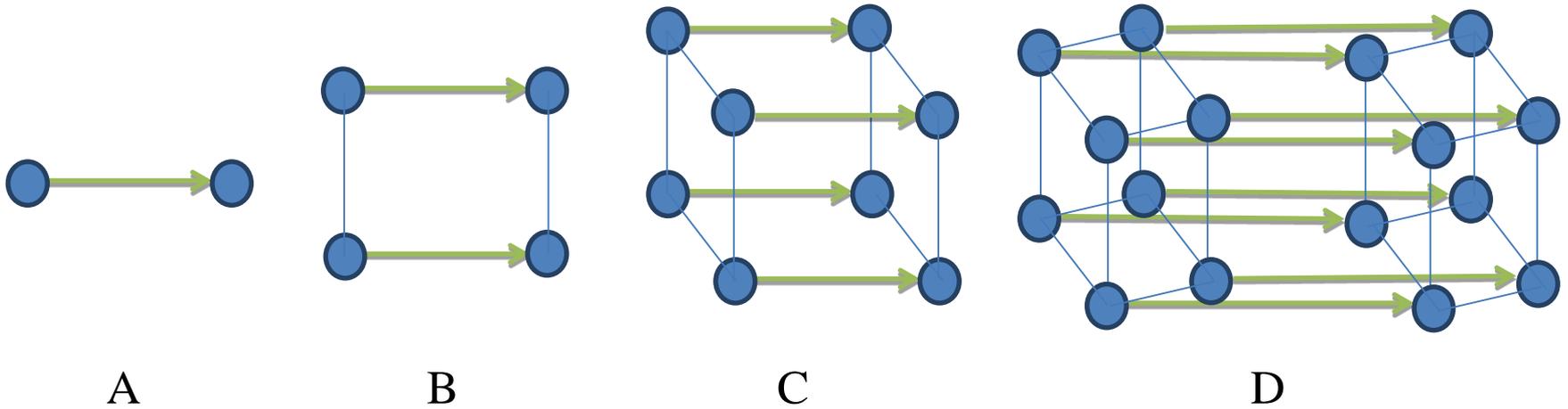
Характеристика:

$E_{real}$  – эффективность реализации

# Метрика масштабируемости

- $\min\{p_n\}, \min\{d_n\}, \max\{p_n\}, \max\{d_n\}, \max\{E_n\}, \min\{E_n\},$   
 $EstP, EstD, EstAll$ , где:
  - $\min\{p_n\}, \min\{d_n\}, \max\{p_n\}, \max\{d_n\}$  – границы значений параметров запуска;
  - $\max\{E_n\}, \min\{E_n\}$  – границы изменения эффективности на рассмотренной области параметров запуска;
  - $EstP$ ;
  - $EstD$ ;
  - $EstAll$ .

# Вывод оценки масштабируемости для M параметров



$$\Delta E_{P_i} = \frac{\sum_{j_1, j_2, \dots, j_{(i-1)}, j_{(j+1)}, \dots, j_M=1}^2 (E(\{P1\}_{j_1}, \{P2\}_{j_2}, \dots, \{P_i\}_{j_i}, \dots, \{P_M\}_{j_M}) - E(\{P1\}_{j_1}, \{P2\}_{j_2}, \dots, \{P_i\}_{j_1}, \dots, \{P_M\}_{j_M}))}{2^{(M-1)}}$$

$$\Delta E_{P_i} = \frac{\sum_{j=1}^{2^{M-1}} (E(K_{j_2}) - E(K_{j_1}))}{2^{M-1}}$$

# Вывод оценки масштабируемости для M параметров

Вклад одного элемента по параметру  $P_i$

$$Est1P_i = \frac{\Delta E_{P_i} * (\{P_i\}_2 - \{P_i\}_1)}{(\max_j \{P_i\}_j - \min_j \{P_i\}_j)}$$

Приращение эффективности одного элемента

$$\Delta E_A = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta E_{P_i}}{M}$$

Вклад одного элемента по всем параметрам

$$Est1A = \frac{\Delta E_A * \prod_{j=1}^M (\{P_j\}_{i+1} - \{P_j\}_i)}{\prod_{j=1}^M (\max_i \{P_j\}_i - \min_i \{P_j\}_i)}$$

Общая оценка масштабируемости по параметру  $P_i$  и по всем параметрам

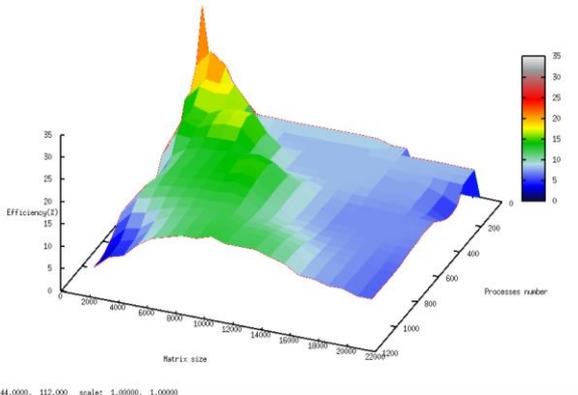
$$EstP_i = \frac{\sum_{j=1}^N \{Est1P_i\}_j}{N} \qquad EstAll = \frac{\sum_{j=1}^N Est1A_j}{N}$$

Метрика масштабируемости:

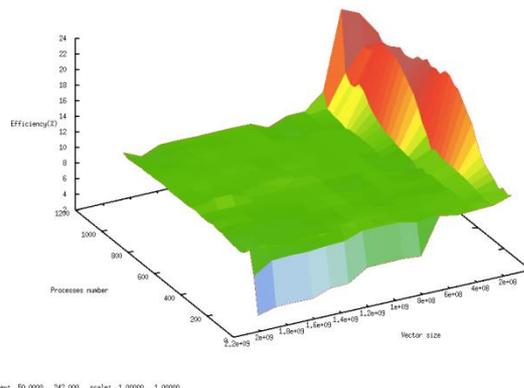
$$(\min_i \{P_1\}_i, \dots, \min_i \{P_M\}_i; \max_i \{P_1\}_i, \dots, \max_i \{P_M\}_i; EstP_1, \dots, EstP_M, EstAll; \max\{E\}, \min\{E\})$$

# Апробация сравнения масштабируемости параллельных приложений

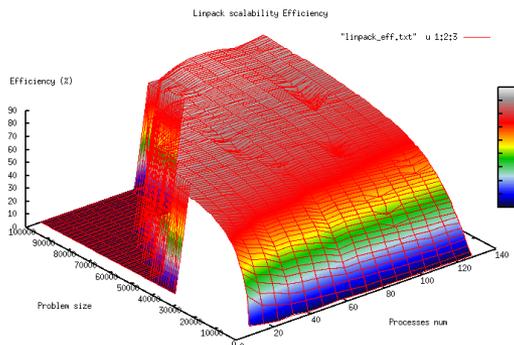
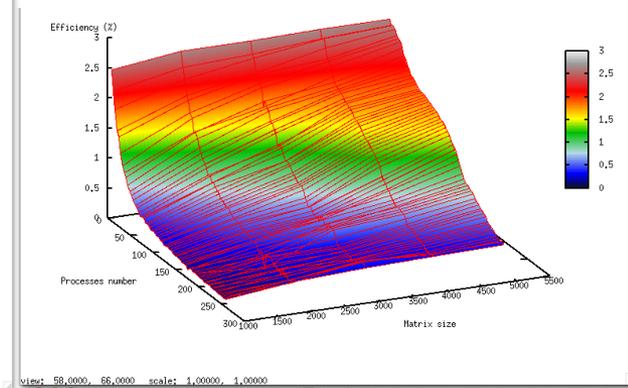
MMmult EstProcs -0,04365  
 EstSize -0,02551  
 EstAll -0,00097



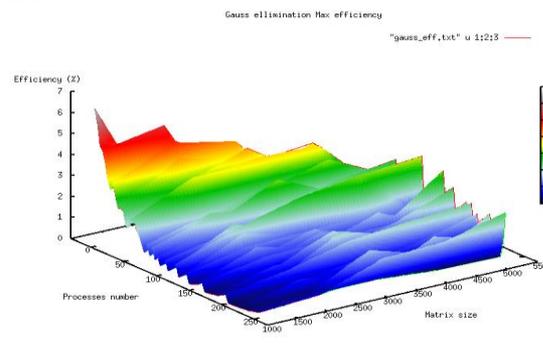
ScalarVVMult EstProcs 0,00414  
 EstSize -0,01385  
 EstAll -0,00017



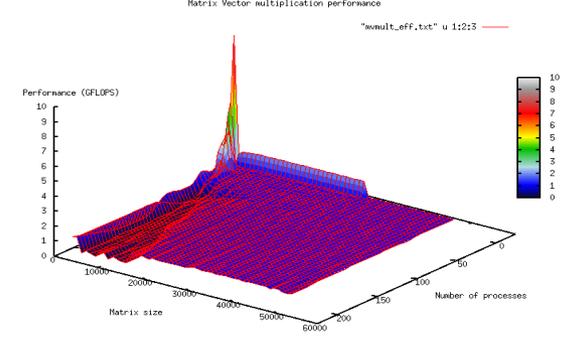
Cholesky EstProcs -0,00059  
 EstSize 0,06017  
 EstAll 0,000403



Linpack EstProcs -0,06125  
 EstSize 0,01013  
 EstAll 2,84E-05



Gauss EstProcs -0,00012  
 EstSize -0,00674  
 EstAll -6,62E-05



MVMult EstProcs -0,01517  
 EstSize -0,0014  
 EstAll -0,00015

# Результаты сравнения масштабируемости

По числу процессов

По размеру задачи

По двум параметрам

| EstProcs    | Программа                       | EstData     | Программа                       | EstAll      | Программа                       |
|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 0,00414873  | Скалярное произведение векторов | 0,0601765   | Разложение Холецкого            | 0,0004031   | Разложение Холецкого            |
| -0,00000943 | Суммирование элементов вектора  | 0,0101347   | Linpack Benchmark               | 0,0000284   | Linpack Benchmark               |
| -0,00003062 | Схема сдваивания                | 0,00000188  | Суммирование элементов вектора  | -0,00000008 | Умножение матрицы на вектор     |
| -0,00011244 | Метод Гаусса, прямой ход        | 0,00000006  | Схема сдваивания                | -0,00000014 | Суммирование элементов вектора  |
| -0,00059871 | Разложение Холецкого            | -0,00141853 | Умножение матрицы на вектор     | -0,0000662  | Схема сдваивания                |
| -0,01517846 | Умножение матрицы на вектор     | -0,00674239 | Метод Гаусса, прямой ход        | -0,0001549  | Метод Гаусса, прямой ход        |
| -0,04363625 | Перемножение матриц             | -0,01385542 | Скалярное произведение векторов | -0,0001775  | Скалярное произведение векторов |
| -0,06125683 | Linpack Benchmark               | -0,0255234  | Перемножение матриц             | -0,0009735  | Перемножение матриц             |

# Публикации по теме работы

## Из списка ВАК:

1. Теплов А.М. Об одном подходе к сравнению масштабируемости параллельных программ // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). — 2014. — Т. 15, № 4. — С. 697–711.
2. Антонов А.С., Теплов А.М. Использование данных системного мониторинга для определения факторов, уменьшающих масштабируемость приложения // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2014. — № 12 (161). — С. 90–101.
3. Антонов А.С., Жуматий С.А., Никитенко Д.А. и др. Исследование динамических характеристик потока задач суперкомпьютерной системы. // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии (Электронный научный журнал). — 2013. — Т. 14, № 2. — С. 104–108.

## В других изданиях:

1. Антонов А.С., Воеводин В. В., Воеводин В. В. и др. Первая версия Открытой энциклопедии свойств алгоритмов // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2015): труды международной научной конференции (31 марта - 2 апреля 2015 г., г. Екатеринбург). — Издательский центр ЮУрГУ Челябинск, 2015. — С. 31–42.
2. А.В. Фролов, В.В. Воеводин, И.Н. Коньшин, А.М. Теплов. Исследование структурных свойств алгоритма разложения Холецкого: от давно известных фактов до новых выводов. In *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2015): труды международной научной конференции (31 марта - 2 апреля 2015 г., г. Екатеринбург)*, pages 320–331. Издательский центр ЮУрГУ Челябинск, 2015
3. Антонов А.С., Теплов А.М. Использование данных системного мониторинга для определения факторов, уменьшающих масштабируемость приложения // Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (22-27 сентября 2014 г., г. Новороссийск). — Изд-во МГУ Москва, 2014. — С. 87–96.
4. Антонов А.С., Теплов А.М. О практической сложности понятия масштабируемости параллельных программ // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах (НПС 2014): Материалы XIV Международной конференции (г.Пермь, 10-12 ноября 2014 г.). — Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета Пермь, 2014. — С. 20–27.
5. Антонов А.С., Теплов А.М. Исследование масштабируемости программ с использованием инструментов анализа параллельных приложений на примере модели атмосферы nh3d // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Вычислительная математика и информатика". — 2013. — Т. 2, № 1. — С. 5–16.
6. Антонов А.С., Теплов А.М. Исследование масштабируемости программ с использованием данных трассировщика и анализатора intel trace analyzer and collector на примере модели атмосферы nh3d // Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений. Труды Всероссийской научной конференции (17-22 сентября 2012 г., г.Новороссийск). — Изд-во МГУ М., 2012. — С. 121–129.

# Основные результаты

1. Предложен и обоснован подход к анализу масштабируемости параллельных приложений на основе технологий суперкомпьютерного кодизайна.
2. Предложен подход к анализу факторов, ограничивающих масштабируемость параллельных приложений на основе данных системного мониторинга.
3. Предложен метод сравнения масштабируемости параллельных приложений, основанный на анализе изменения эффективности реализации.
4. Предложенные в работе подходы и методы прошли успешную апробацию в рамках анализа параллельных тестовых программ, типовых вычислительных ядер и пользовательских программ из потока задач Суперкомпьютерного комплекса Московского университета.

**Спасибо за внимание!**

Вопросы?