Научный семинар
Центра образовательных программ топ-уровня в сфере ИИ «ВиртУм»

Высокопроизводительные вычисления, параллельные алгоритмы и как это работает в нашем университете

М.Л. Цымблер

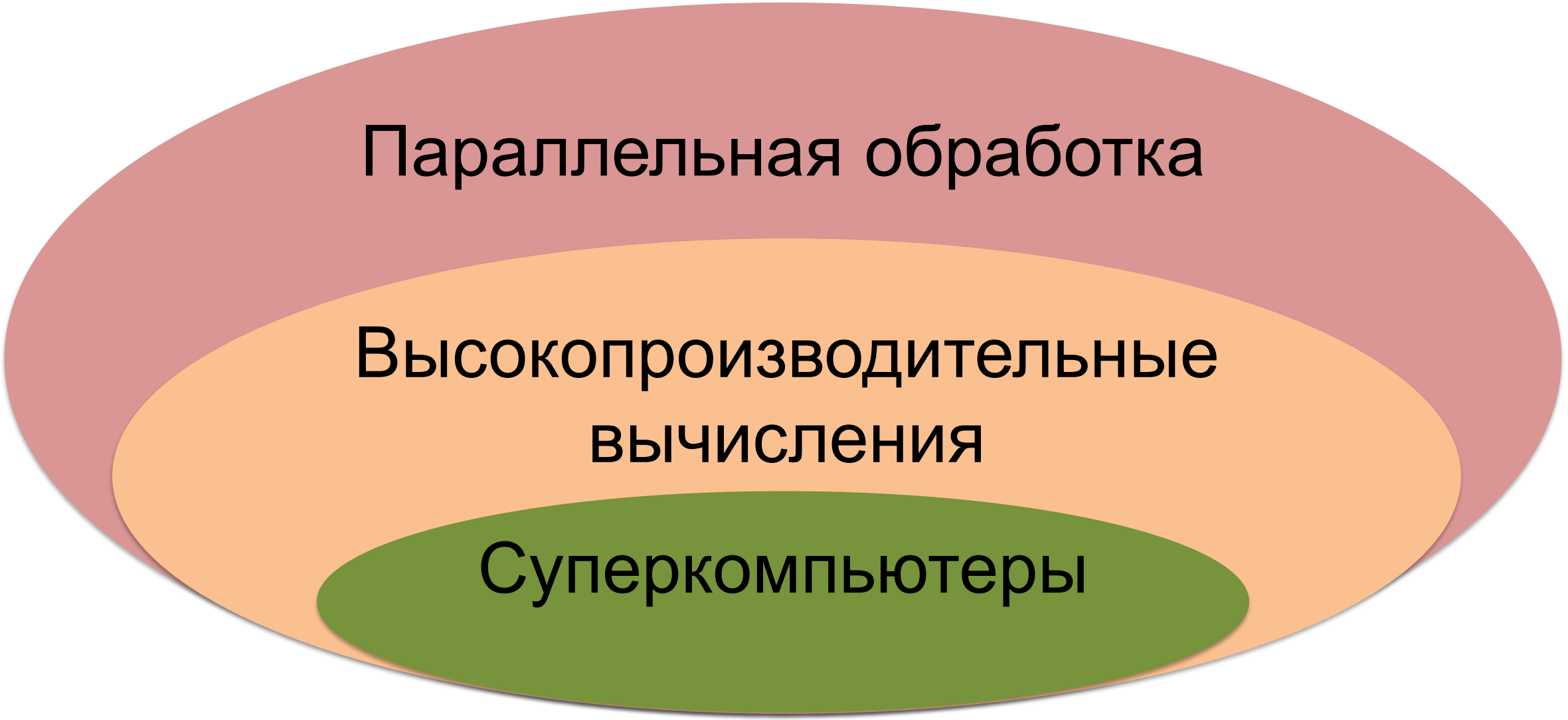
mzym@susu.ru

ЮУрГУ, Челябинск
29 апреля 2026 г.

Содержание

- Три кита: параллельная обработка, HPC, суперкомпьютеры
- Реализация параллелизма в языке программирования
- Суперкомпьютерный центр ЮУрГУ: люди, техника, задачи

Главные понятия



Параллельная обработка

- Способ организации вычислений, когда несколько операций выполняются одновременно
- Не зависит от железа и масштаба задачи

Центральный процессор
Intel Core i7

Графический процессор
NVIDIA A100

Вычислительный кластер
(Хемницкий техн. университет, ФРГ)

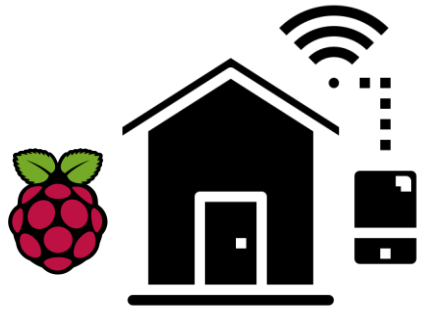
Последовательная обработка

Псевдопараллельная обработка

Параллельная обработка

Высокопроизводительные вычисления (HPC, High-Performance Computing)

- Область деятельности, где параллельная обработка нужна для решения задач, требующих огромных вычислительных ресурсов
- Включает в себя железо, параллельные алгоритмы, библиотеки, методы
- Не всегда параллельная обработка – это HPC

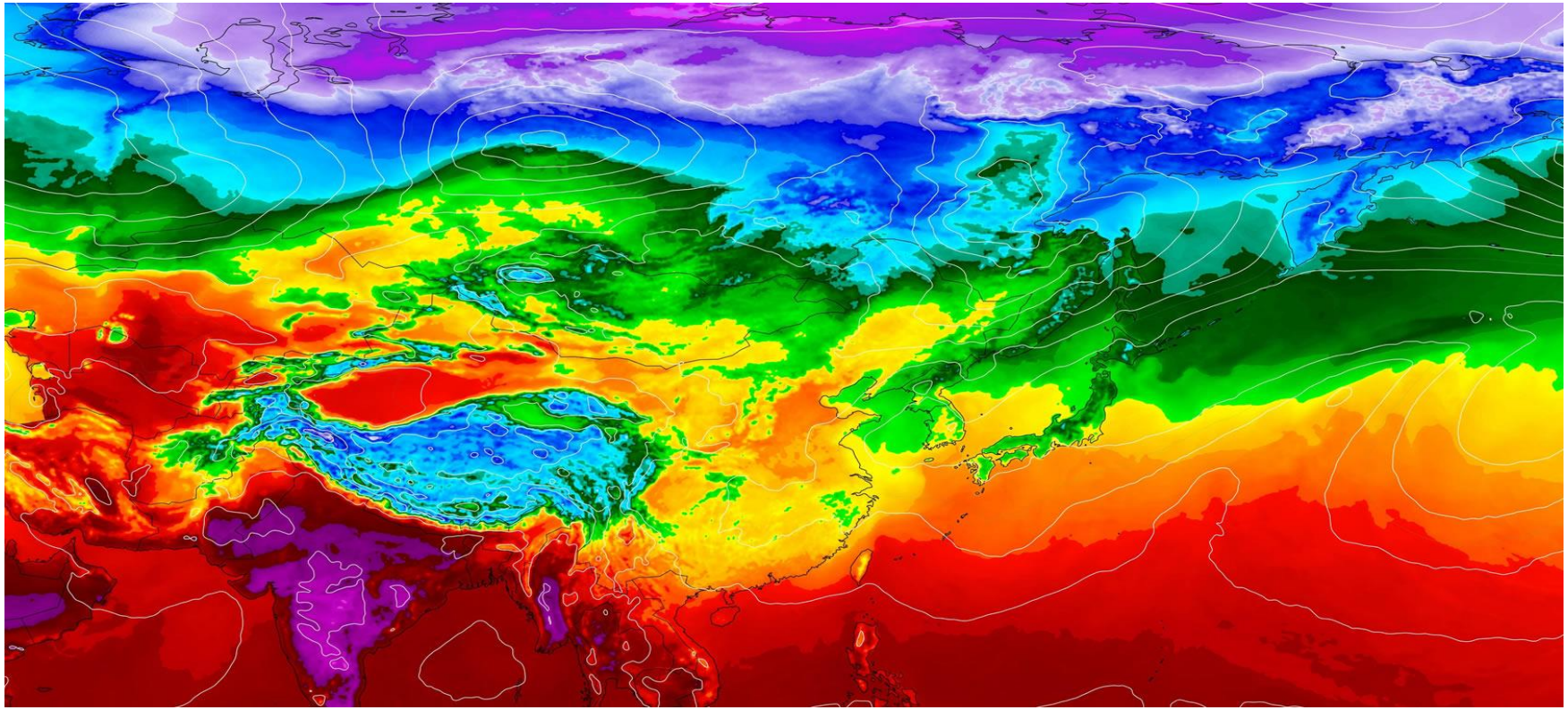


Система умного дома
на основе Raspberry Pi

Смартфон
Apple iPhone 17

Одна из задач HPC: моделирование климата Земли

- **Зачем?** Оценка последствий изменения климата, предупреждение катастроф, планирование сельского хозяйства
- **Как?** На Земной шар накладывается сетка. Для каждой ячейки в каждом шаге по времени решаются уравнения гидродинамики, переноса излучения и др.



Одна из задач HPC: моделирование климата Земли

- Параметры вычислений
  - Разрешение сетки: 1 км (5×10^8 ячеек)
  - Шаг по времени: 1 мин (из-за быстрых процессов в атмосфере)
  - Горизонт прогноза: 100 лет (наиболее достоверное моделирование)
  - Переменные на одну ячейку сетки: 30 (давление, влажность, температура и др.)
  - Операции на одну переменную на один шаг: 500
- Количество операций

5×10^8 ячеек × 30 переменных × 500 операций × 100 лет × 365 дней × 24 час × 60 мин ≈ **4×10^{20}**

- **Сколько?** Если операция – песчинка, то объем вычислений
  - «погода на Земле на 100 лет»: **150000 пирамид Хеопса**
  - «погода в Париже на 1 мин»: 1 стакан (200 г)

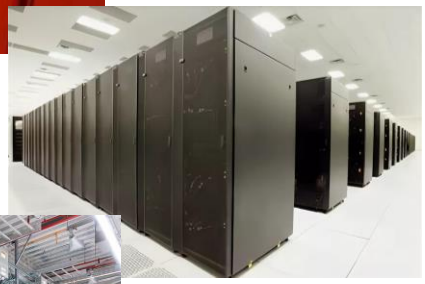
Суперкомпьютеры

- Инструмент для HPC: физические машины, содержащие от тысяч до миллионов процессорных ядер, объединенных высокоскоростной сетью
- https://top500.org – мировой рейтинг-лист суперкомпьютеров
  - Измерение производительности: **Флопс** (FLOPS, Floating-point Operations Per Second) – количество операций с вещественными числами в секунду
  - Тест производительности: **Linpack** – решение плотной СЛАУ, измерение пиковой производительности на векторизуемых операциях

Вехи производительности суперкомпьютеров

Порог	Суперкомпьютер	Год(ы)
1 Мегафлопс (10^6)	CDC 6600	1960-е
1 ГигаФлопс (10^9)	Cray-1	1976
1 ТераФлопс (10^{12})	Intel ASCI Red	1997
1 ПетаФлопс (10^{15})	IBM Roadrunner	2008
1 ЭкзаФлопс (10^{18})	Frontier	2022
1 ЗеттаФлопс (10^{21})	**?**	**≈2030-е**




Суперкомпьютер № 1: El Capitan

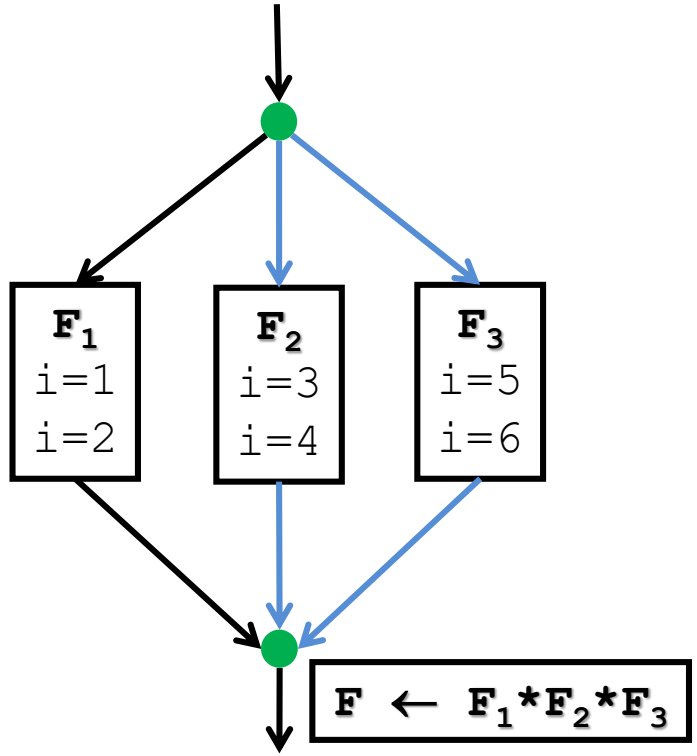
Если бы каждый из 8 млрд жителей Земли делал одно вычисление в секунду, потребовалось бы **4000 лет**, чтобы выполнить работу, которую El Capitan делает за **1 секунду**

Ноутбук
0.5 ГФлопс

- Место: Ливерморская нац. лаборатория, США
- Производитель: Hewlett Packard
- Производительность: **1.809 экзафлопс**
  (квинтиллионов=10^{18}=миллиард миллиардов операций в сек)

Параллельный ЯП: OpenMP, общая память, процессор

```
long Factorial (int N)
{
   long  i, F;
   F = 1;
// Разбить диапазон 1..N на отрезки по нитям
// Вычислить на каждой нити свой отрезок
// Собрать результаты от всех нитей и перемножить

#pragma omp parallel for reduction(* : F)
   for (i = 1; i<=N; i++)
       F *=  i;
   return F;
}
```



Параллельный ЯП: MPI, распределенная память, кластер

```
int Factorial (int N, int myrank, int size) {// номер текущего процесса, общее к-во процессов
    int  start, end;
    long loc_prod, glob_prod;
    if (N <= 1) return 1;

  // Разбить диапазон 1..N на отрезки по процессам
   chunk = N / size;
   start = myrank * chunk + 1;
   end = (myrank == size - 1) ? N : (myrank + 1) * chunk;

  // Вычислить на каждом процессе свой отрезок
   if (start <= N) loc_prod = range_mult (start, end);

 // Собрать результаты от всех процессов на процессе 0 и перемножить
   MPI_Reduce (&loc_prod, &glob_prod, 1, MPI_LONG, MPI_PROD, 0, MPI_COMM_WORLD);
  return glob_prod;
}
```

```
// Вычислить произведение чисел отрезка
long range_mult (int start, int end) {
    long res = 1;
    for (int i = start; i <= end; i++) {
        res *= i;
    }
    return res;
}
```

Параллельный ЯП: CUDA, графический процессор

```
int Factorial (int N, int threads = 256) {// размер блока нитей задается при запуске, штатно 256
   if (N <= 1) return 1;
   // Разбить диапазон 1..N на отрезки по блокам нитей
   int blocks = (N + threads - 1) / threads;

    // Вычислить на каждом блоке нитей свой отрезок (на GPU)
    long* gpu_block_results;
    cudaMalloc (&gpu_block_results, blocks * sizeof(long));
    block_mult_kernel<<<blocks, threads, threads * sizeof(long)>>> (N, gpu_block_results, threads);

    // Собрать результаты от всех блоков нитей (на CPU) и перемножить
    long* cpu_block_results = new long[blocks];
    cudaMemcpy (cpu_block_results, gpu_block_results, blocks * sizeof(long), cudaMemcpyDeviceToHost);
    F = 1;
    for (int i = 0; i < blocks; i++)
        F *= cpu_block_results[i];
    return F;
}
```

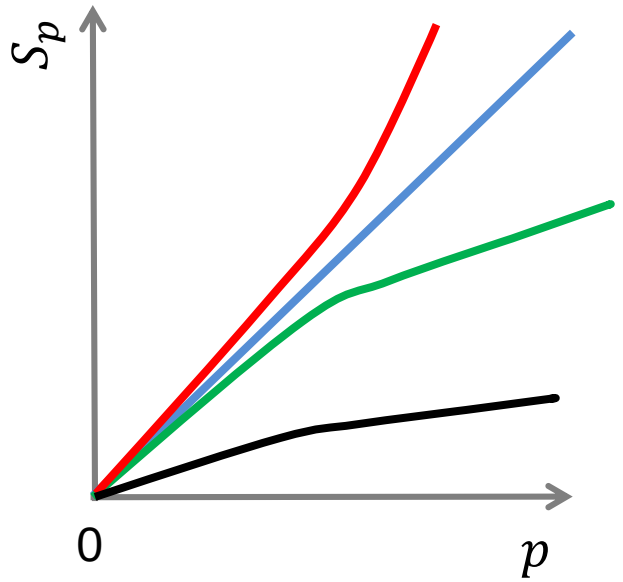
Параллельный ЯП: CUDA, графический процессор

```
// Вычислить произведение чисел отрезка
__global__ void block_mult_kernel (int N, int threads, long* block_results) {
    // Разделяемая память для быстрого перемножения внутри блока нитей
    extern __shared__ long shared_data[];
    int tid = threadIdx.x;

    // Каждая нить загружает одно число из своего отрезка
    int idx = blockIdx.x * threads + tid + 1;
    shared_data[tid] = (idx <= N) ? idx : 1;
    __syncthreads(); // Синхронизация, чтобы все нити успели записать свои числа

    // Перемножить числа внутри блока нитей (свертка)
    for (int s = threads / 2; s > 0; s >>= 1) {
        if (tid < s) shared_data[tid] *= shared_data[tid + s];
        __syncthreads(); // Синхронизация, чтобы все нити успели умножить свои числа
    }

    // Первая нить блока сохраняет результат блока
    if (tid == 0) block_results[blockIdx.x] = shared_data[0];
}
```

Чего хотят параллельные программисты …

- **Ускорение (speedup) параллельного алгоритма**
  на p вычислительных элементах (ядрах, процессах, узлах)

$$S_p = \frac{T_1}{T_p}$$

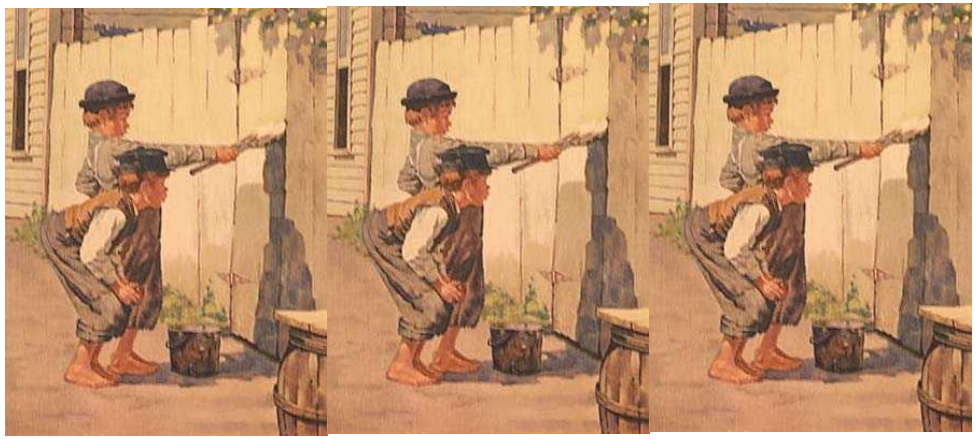


T_1, T_p – время выполнения
на одном и p элементах соответственно

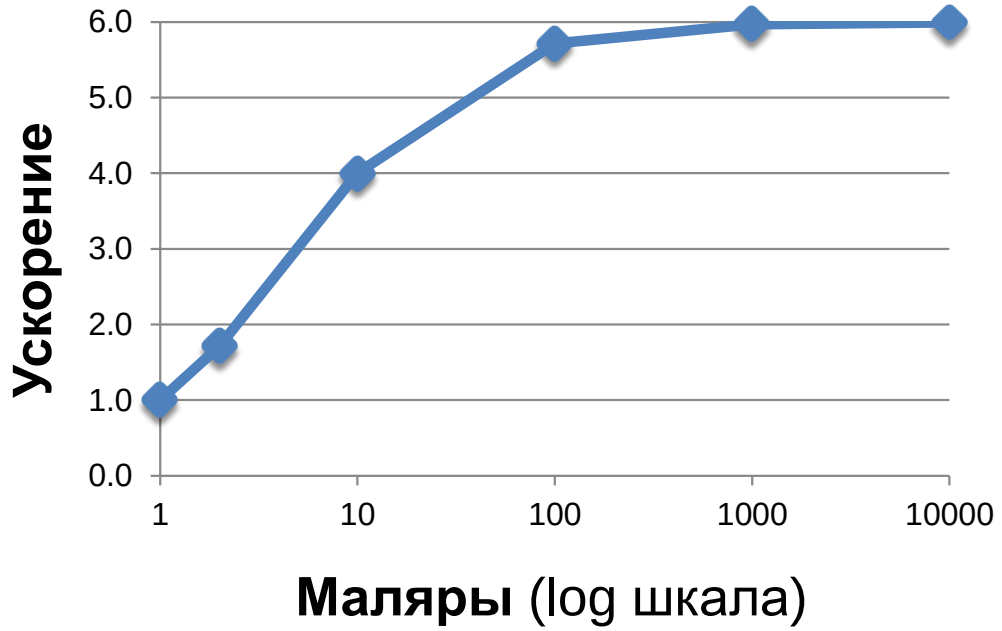
- Какое ускорение нам нужно?
  - **Идеальное ускорение**: $S_p = p$ (недостижимо)
  - **Линейное ускорение**: $S_p \to p$, $S_p < p$ (**масштабируемый алгоритм**)
  - **Сверхлинейное ускорение**: $S_p > p$ (некорректные эксперименты)
  - **Деградация**: $S_p \ll p$ (плохо масштабируемый алгоритм)

… и что им мешает (*последовательная часть алгоритма*)

- Покраска забора (300 досок)
  - *Подготовка* 30 мин
  - *Покраска* (одной доски) 1 мин
  - *Уборка* 30 мин

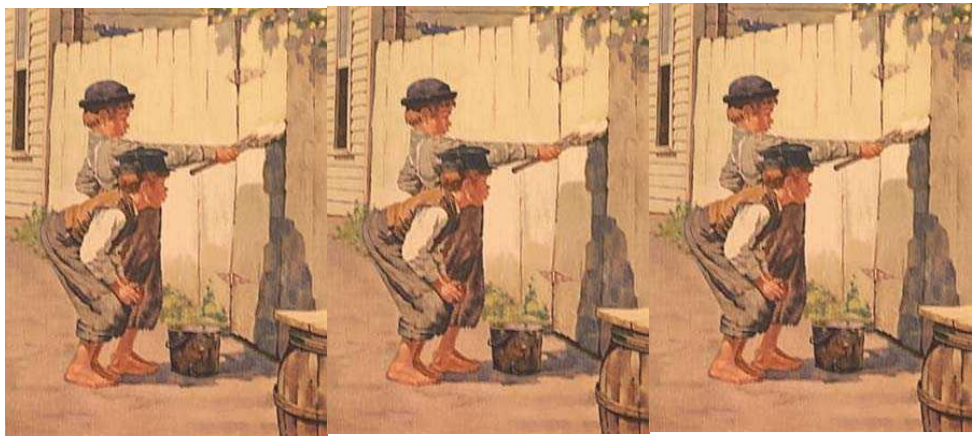


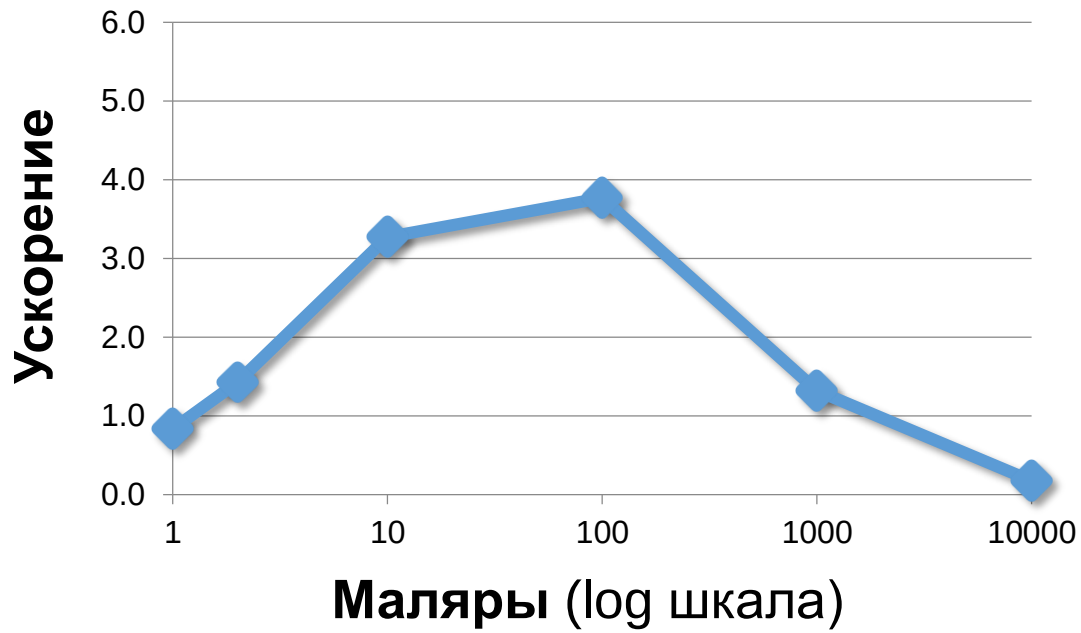
Количество маляров	Время покраски
1	30 + 300/1 + 30 = 360
2	30 + 300/2 + 30 = 210
10	30 + 300/10 + 30 = 90
100	30 + 300/100 + 30 = 63
1000	30 + 300/1000 + 30 ≈ 60
10000	30 + 300/10000 + 30 ≈ 60



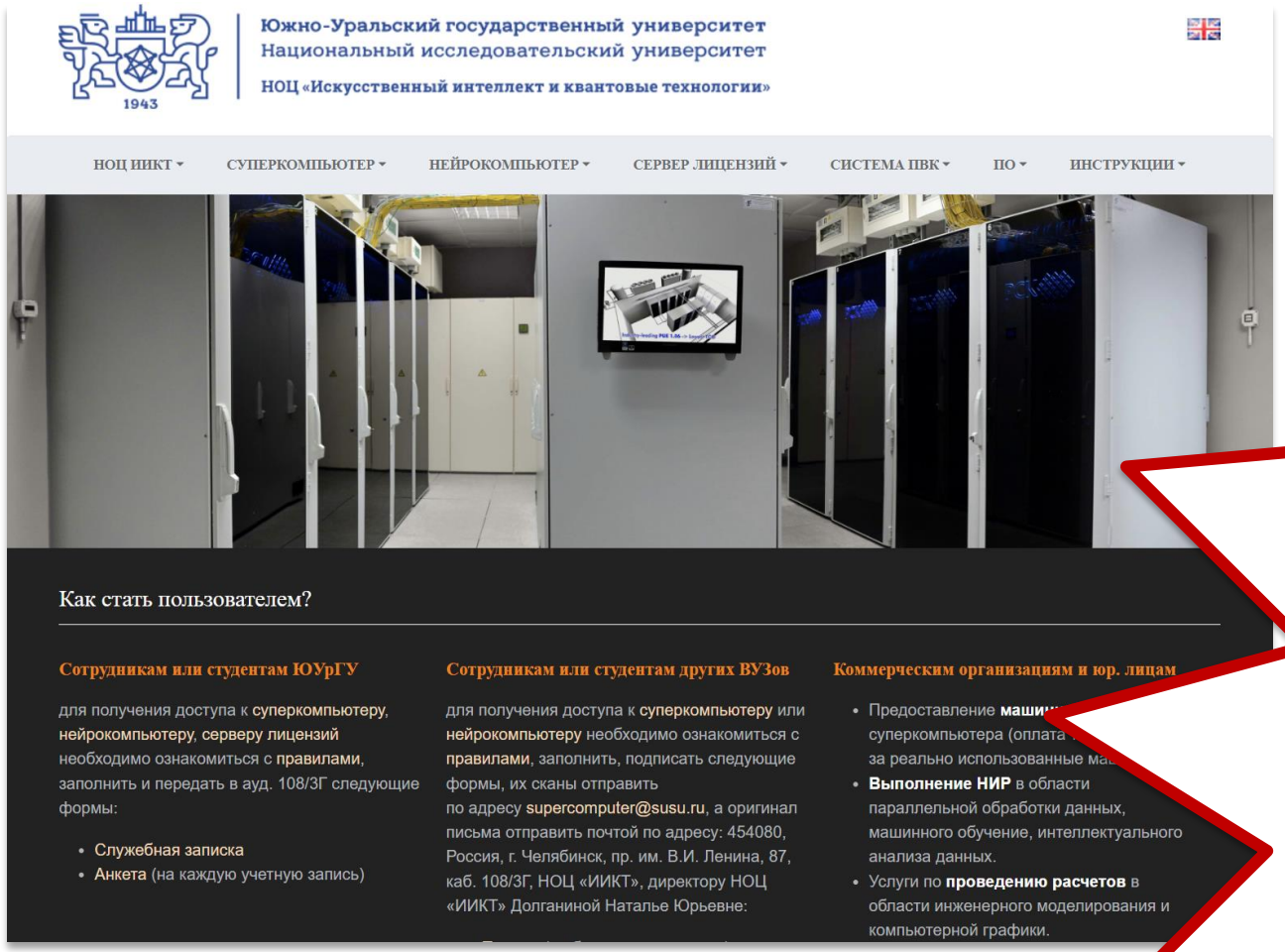
… и что им мешает (*обмены данными по сети*)

- Покраска забора (300 досок)
  - *Подготовка* 30 мин
  - *Покраска* (одной доски) 1 мин
  - *Уборка* 30 мин
- При покраске маляр должен потратить *5 сек на общение* с каждым из двух соседей слева и справа, чтобы выровнять цвет





НОЦ ИИКТ ЮУрГУ: https://supercomputer.susu.ru/



Директор НОЦ «ИИКТ»
Долганина Наталья Юрьевна
кандидат технических наук
тел.: (351) 267-90-06 доб. 108
dolganinani@su...ru

Директор СКЦ,
Начальник отдела поддержки и обучения
Рекачинский Александр Игоревич
тел.: (351) 267-90-06 доб. 102
Alexander.Rekachinsky@susu.ru

Программист
Сейфер Анн
тел.: (351) 2
seiferav@su

Лаборант
Дерябин Даниил А...андрович
тел.: (351) 267... доб. 103
deriabind...

Вы можете отправить резюме на адрес
dolganinani@susu.ru
(не забудьте указать
Ваш номер
моб. телефона)

...ович
...105

...евич
...105

Программист
...чев Андрей Игоревич
...351) 267-90-06 доб. 115
...shevai@susu.ru

Лаборант
Суркова Анна Валерьевна
тел.: (351) 267-90-06 доб. 111
Surkovaavi@susu.ru

- Администрирование системы
- Настройка системного и прикладного ПО
- Техподдержка пользователей
- Техобслуживание и ремонт

- Проведение экскурсий
- Исследования
- Подготовка науч конф.
- …

Суперкомпьютеры ЮУрГУ: эволюция

Physics
0.001 Терафлопс
2000 г.

Intel Pentium 3 0,8 GHz

Infinity
0.3 Терафлопс
2004 г.
TOP50: 9

Intel Xeon64 DP 3,2 GHz

СКИФ Урал
16 Терафлопс
2008 г.
TOP500: 283
TOP50: 4

Intel Xeon E5472 4x3 GHz

СКИФ Аврора
117 Терафлопс
2011 г.
TOP500: 87
TOP50: 3

Intel Xeon X5680 6x3,33 GHz

Торнадо ЮУрГУ
473 Терафлопс
2012 г.
TOP500: 128
TOP50: 4

Intel Xeon X5680 6x3,33 GHz
Intel Xeon Phi 61x1,1 GHz

Суперкомпьютер «Торнадо»

- Вычислительных узлов: **480**
  - процессоров **Intel Xeon**: **960**,
  - сопроцессоров **Intel Xeon Phi**: **384**
  - ядер: **29184**

5000 × 

- Пиковая производительность: **473 Терафлопс**

10000 × 

- Оперативная память: **17 Терабайт**

1000 × 

- Дисковая память: **177 Терабайт**

1.77 × 

- Коммуникационная сеть: **InfiniBand 40 Гбит/с**

1 с × 3 × 

- Потребляемая мощность: **≈300 кВт**

1000 × 

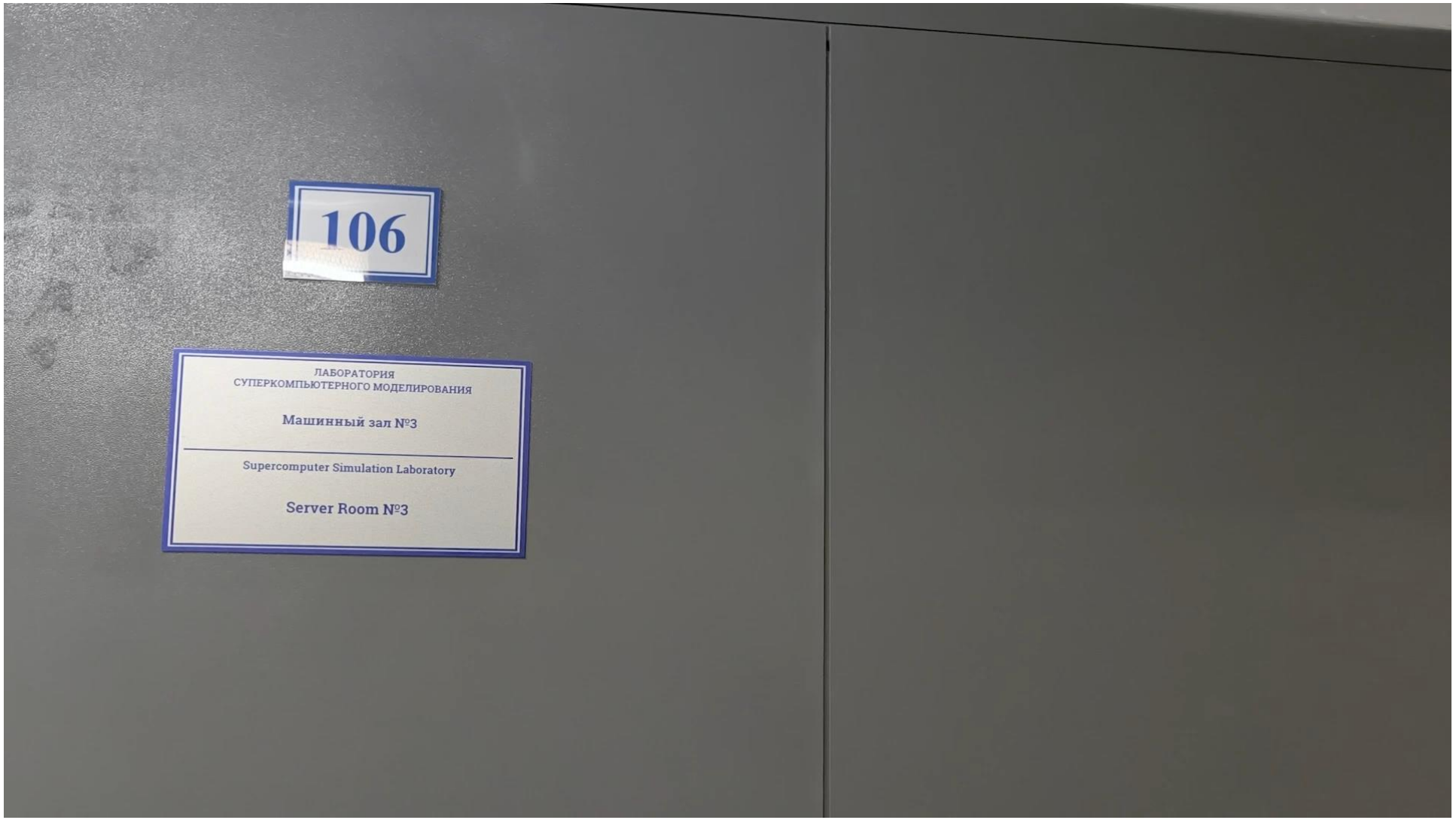
- Энергия за месяц: **≈216 000 кВт·ч**

12 мес × 60 × 

1 × 

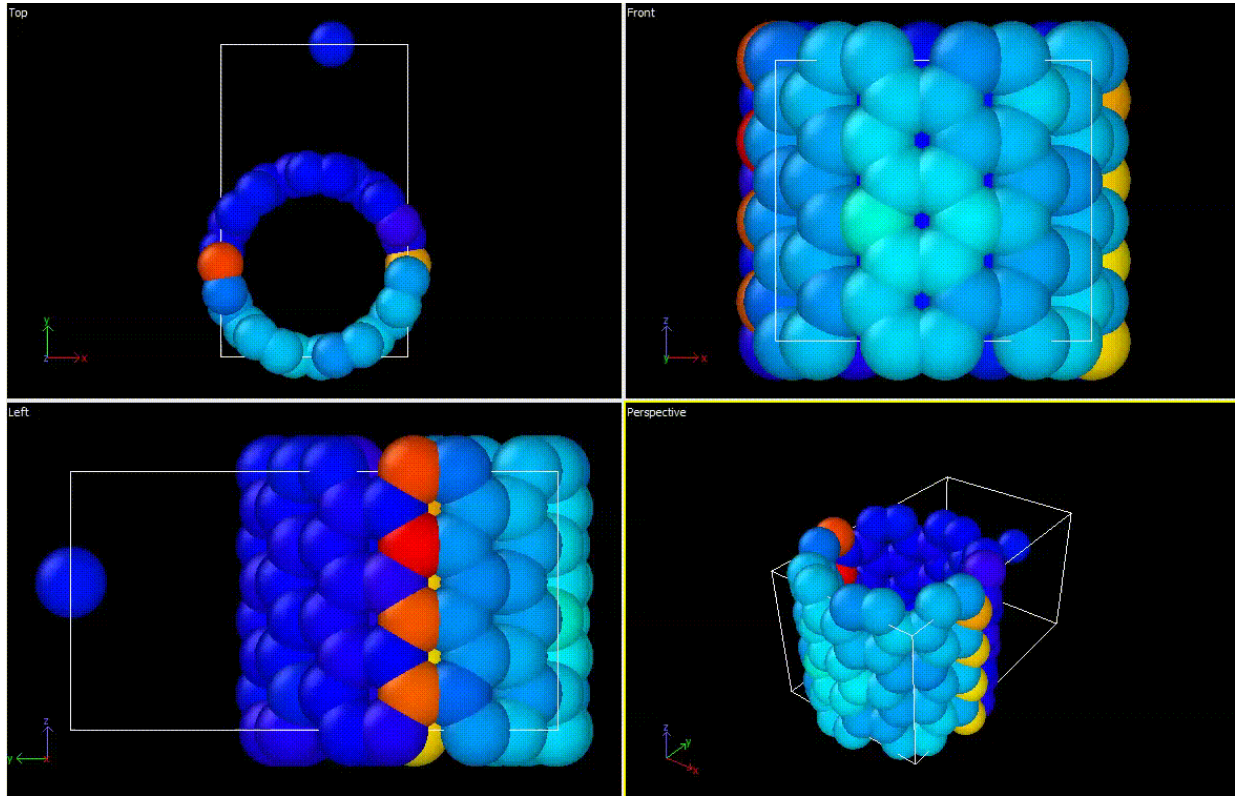
- Вес: **≈5 тонн**

Торнадо: виртуальная экскурсия

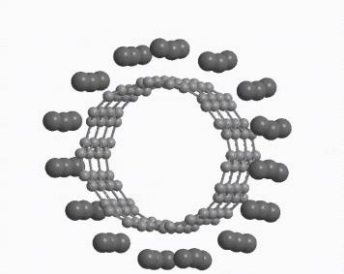


Поиск перспективных материалов для электродов литиевых батарей

- Углеродные нанотрубки (УНТ) – сверхпрочные «цилиндры» из атомов углерода
- УНТ можно «обогатить» атомами лития – АКБ смартфонов и электро-мобилей станут прочнее и долговечнее
- Чтобы понять, как литий ведет себя в УНТ, нужно вычислить силы взаимодействия для сотен тысяч атомов: часы на «Торнадо», недели на обычном компьютере



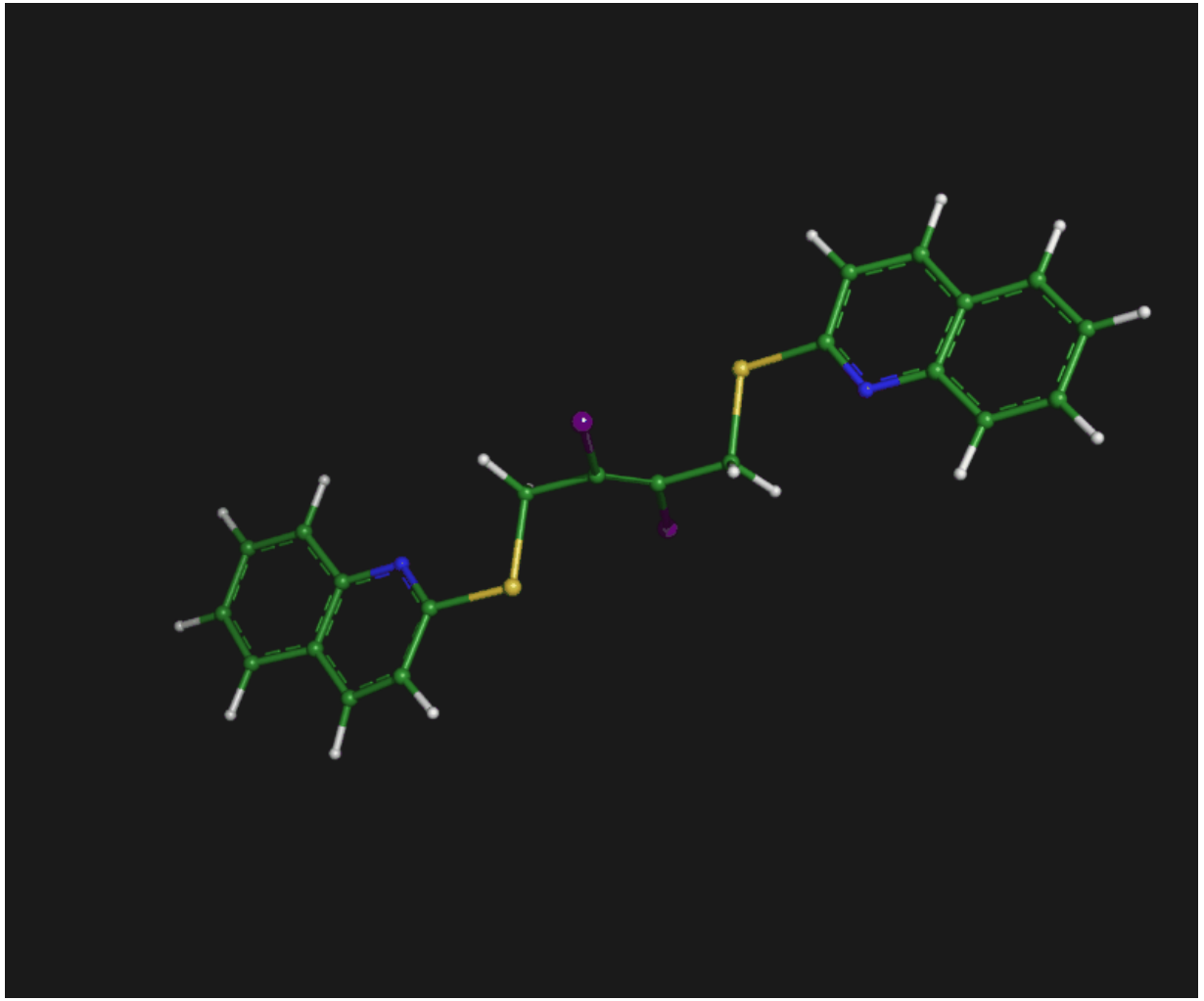
Процесс проникновения атома лития через стенку углеродной нанотрубки



Модель углеродной нанотрубки
из 112 атомов углерода и 45 атомов лития,
адсорбированных на внешней поверхности трубки

Компьютерный дизайн кристаллов для гибкой электроники

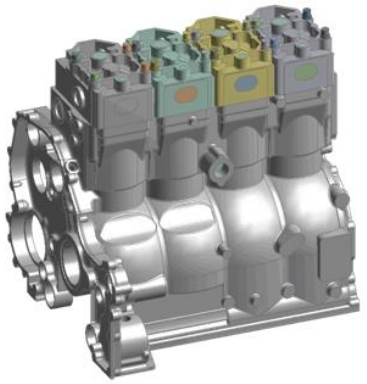
- Конформеры – молекулы, содержащие йод, серу и азот, могут существовать в тысячах различных 3-мерных вариаций
- Из устойчивых конформеров (с минимальной энергией) можно вырастить кристаллы – основу гибких проводящих пленок для носимой электроники
- Чтобы найти устойчивые конформеры, нужно менять углы поворота атомных групп и расстояния между фрагментами молекулы, вычислять полную энергию: часы на «Торнадо», годы на обычном компьютере



Основные конформеры 2-[(E)-2,3-дииод-4-хинолин-2-илсульфанилбут-2-енил] сульфанилхинолина

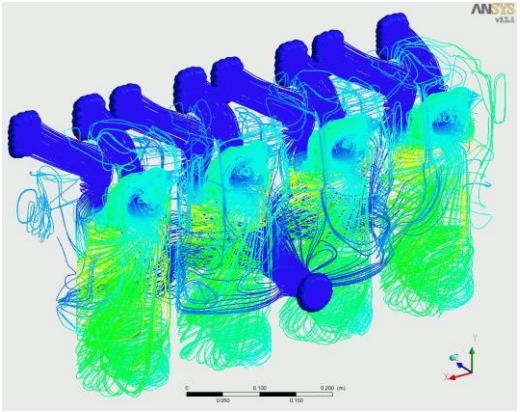
Моделирование работы дизеля для устранения неисправностей

- Дизель 4Т 371с турбонаддувом, который устанавливается на промышленных и с/х тракторах, при работе дает задиры в 4-м цилиндре, выводящие мотор из строя
- Чтобы найти слабые места в конструкции и изменить форму деталей для устранения задиров, нужна суперкомпьютерная модель
- Модель, которая вычисляет, как горячие газы движутся внутри цилиндра и под их давлением деформируются стенки и поршень: часы на «Торнадо», годы на обычном компьютере

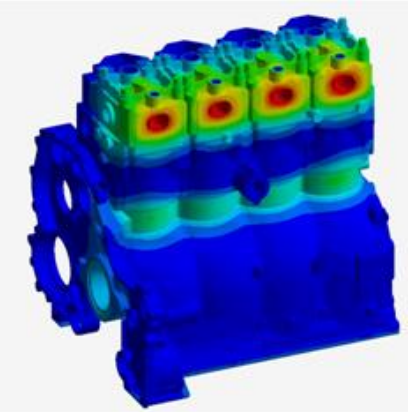


CAD модель

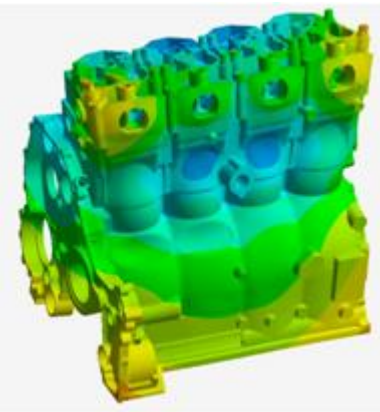
Задиры поршня четвертого цилиндра



Поля скоростей и давлений в потоке

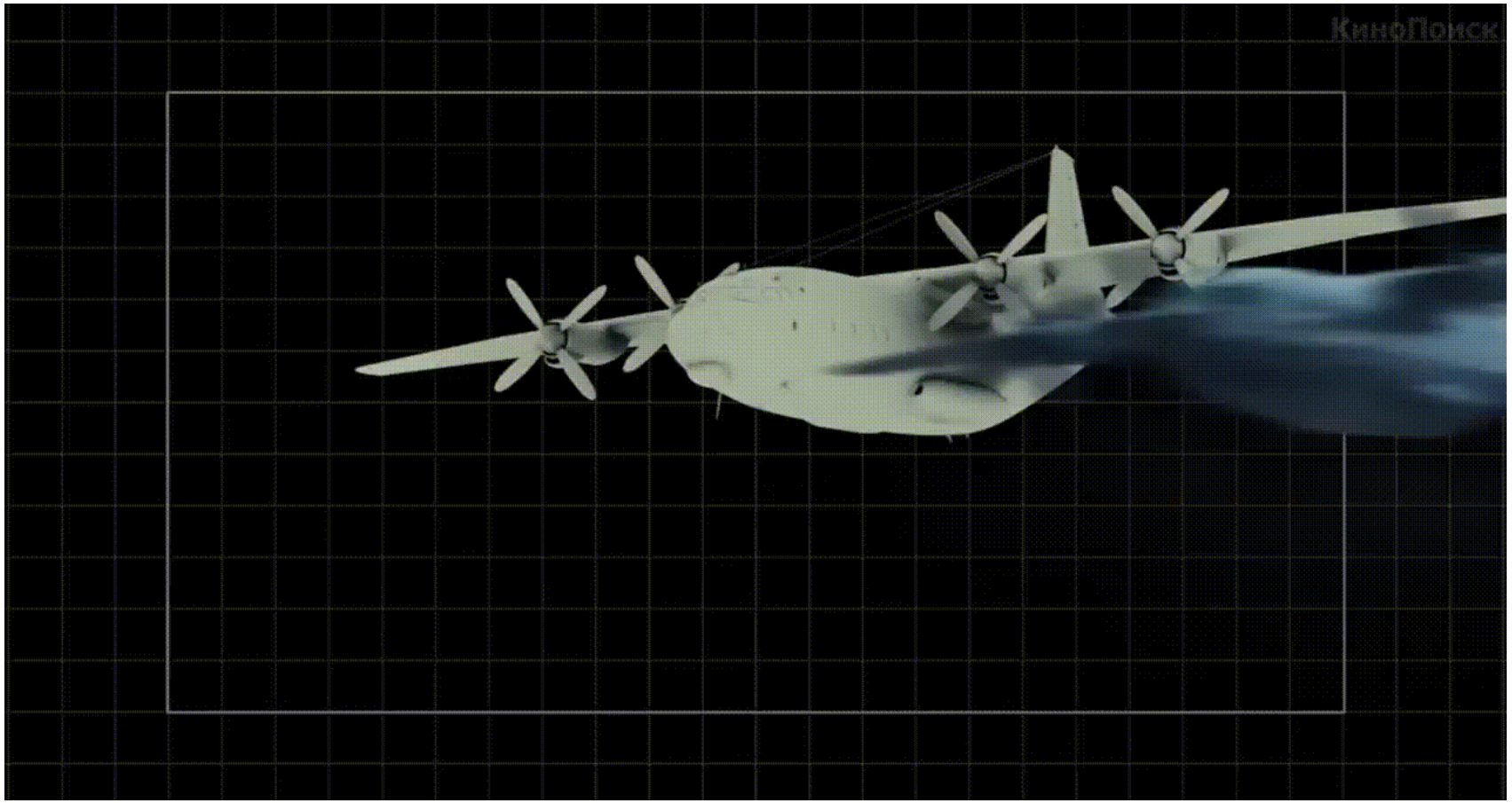


Распределение температур

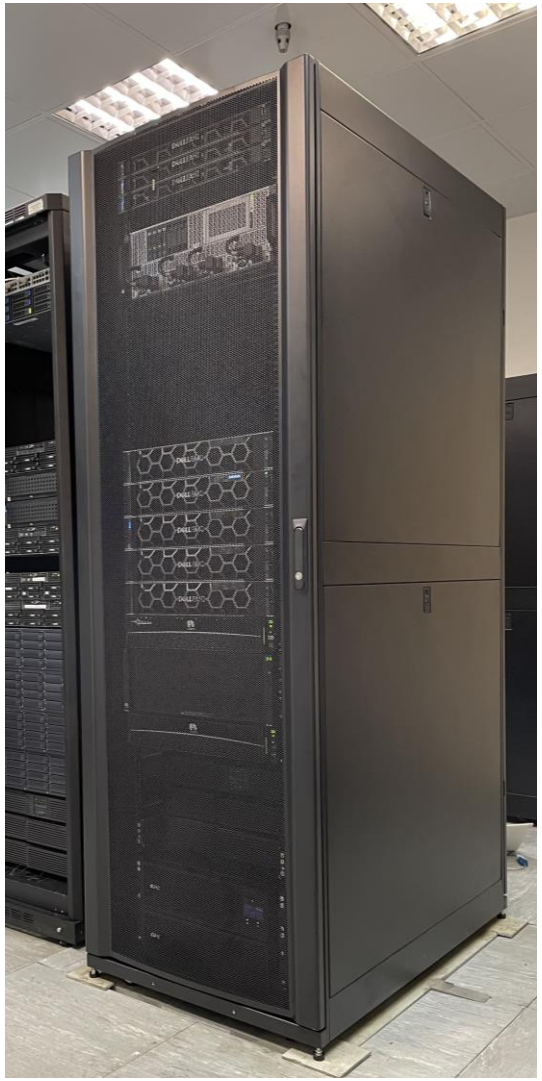


Деформации

Рендеринг спецэффектов кинофильма



Вычислительный комплекс «Нейрокомпьютер»



- Пиковая производительность: **276 Терафлопс**
- Оперативная память: **1.9 Терабайт**
- Система хранения данных (SSD): **46 Терабайт**
- Система хранения данных (HDD): **700 Терабайт**
- Процессор Intel Xeon Gold: **2 шт.**
- Процессор Intel Xeon Silver: **16 шт.**
- Графич. процессор NVIDIA Ampere A100: **4 шт.**
- Графич. процессор NVIDIA Ampere A30: **6 шт.**
- Графич. процессор NVIDIA Tesla V100: **8 шт.**

200 × 

46000 × 

7 × 

квадриллион (10^{15}, миллион миллиардов) матричных умножений за 0.6 с

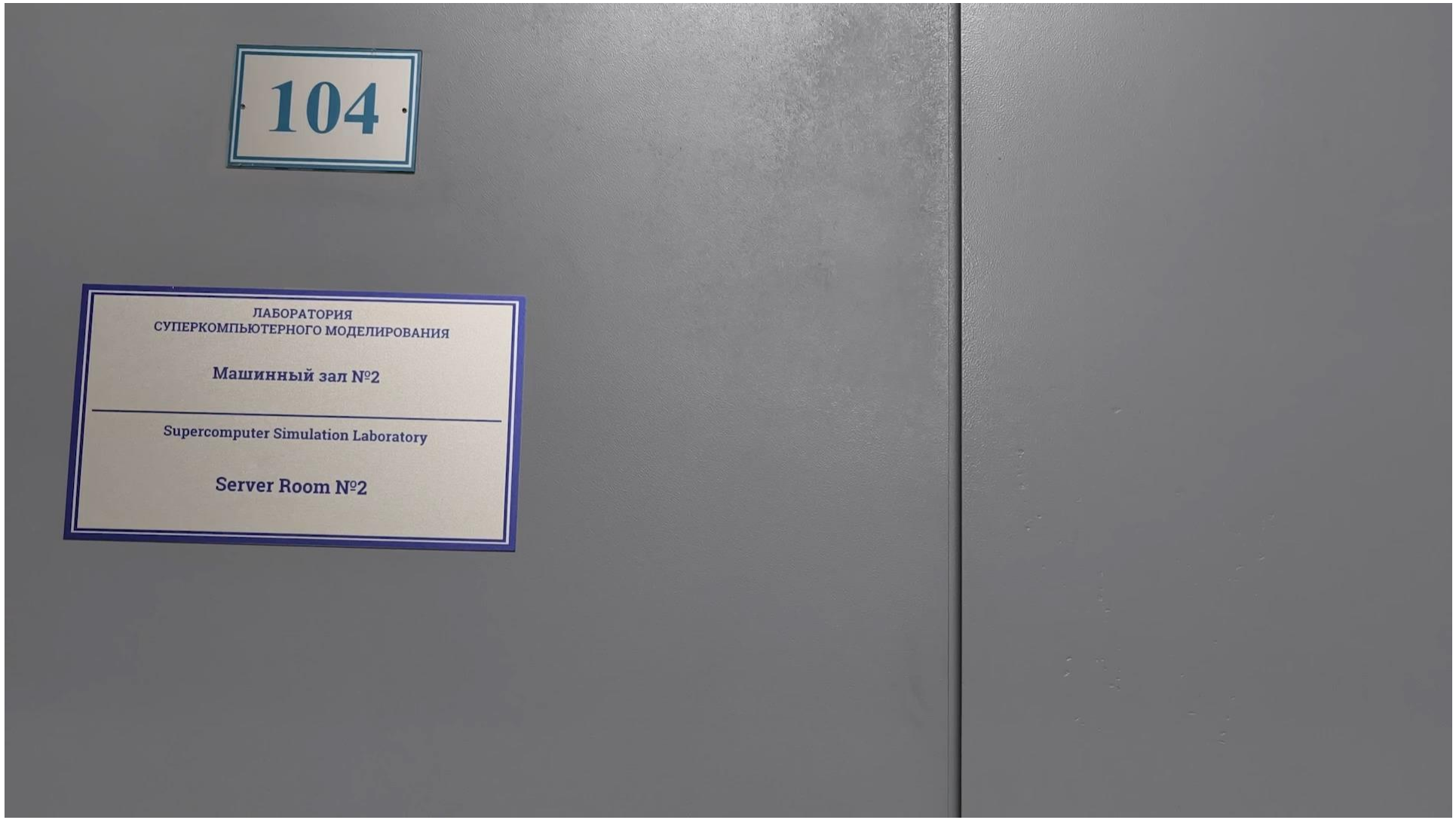
за 3 мин на 

Обучение нейросети (1.5 млрд параметров) за 1 неделю

GPT-2

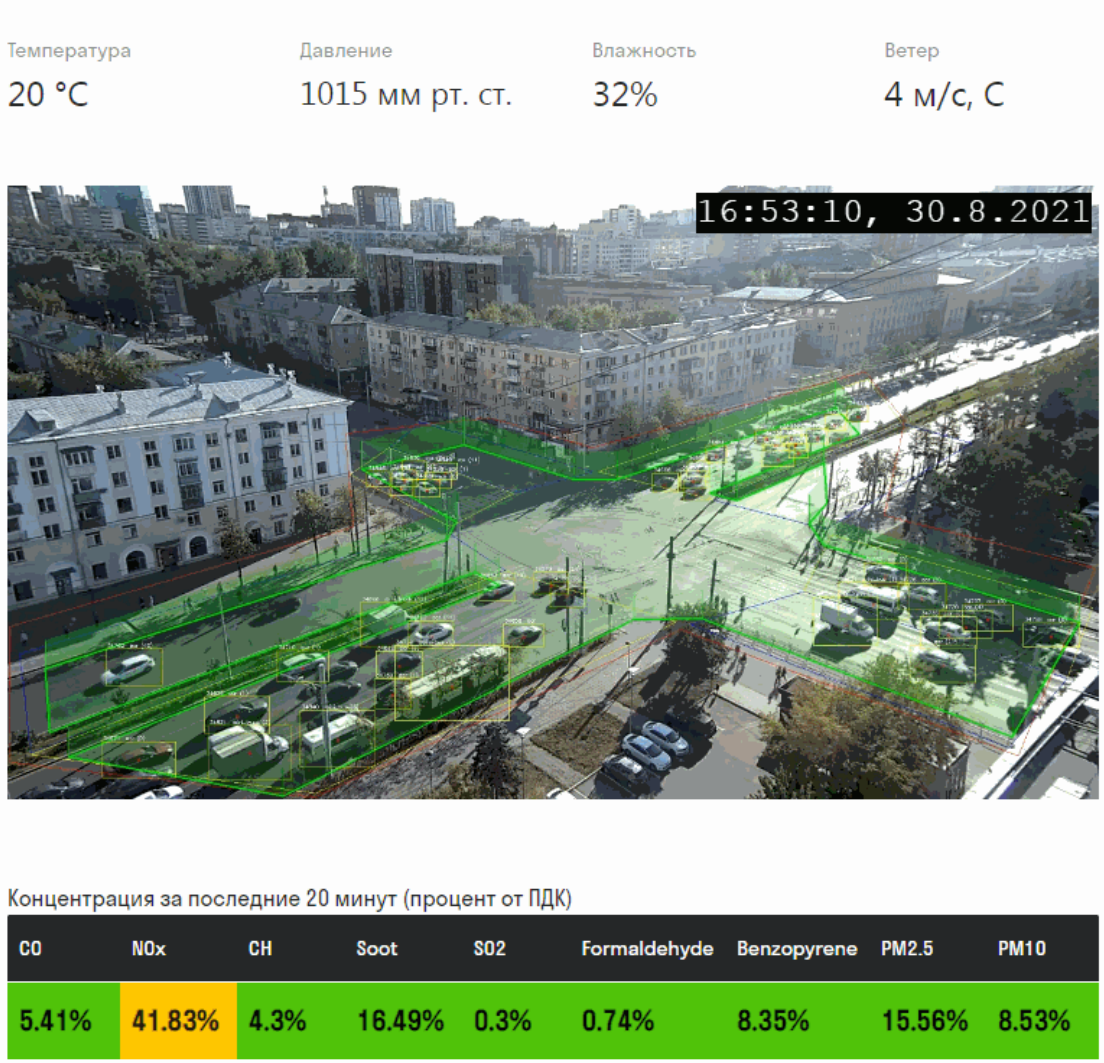
за 1 год на 

Нейрокомпьютер: виртуальная экскурсия



Мониторинг загрязнения воздуха от автотранспорта

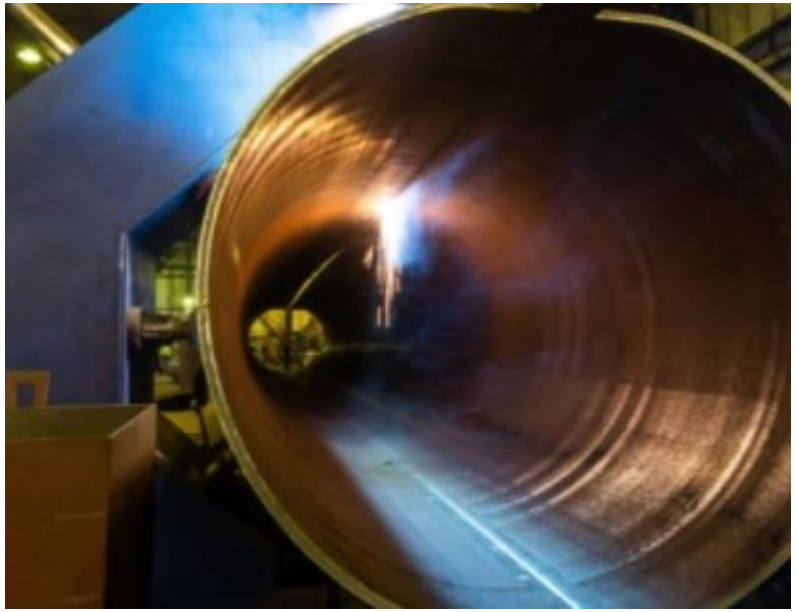
- Обучение нейросетей, которые обнаруживают, отслеживают движение и классифицируют транспортные средства (10 видов) для мониторинга количества и концентрации выбросов загрязняющих веществ (9 видов) от транспортных потоков в реальном времени
- Вычисление приземной концентрации загрязняющих веществ в атмосфере с учетом городской застройки в режиме реального времени



Пересечение пр. Ленина и ул. Энгельса г. Челябинск

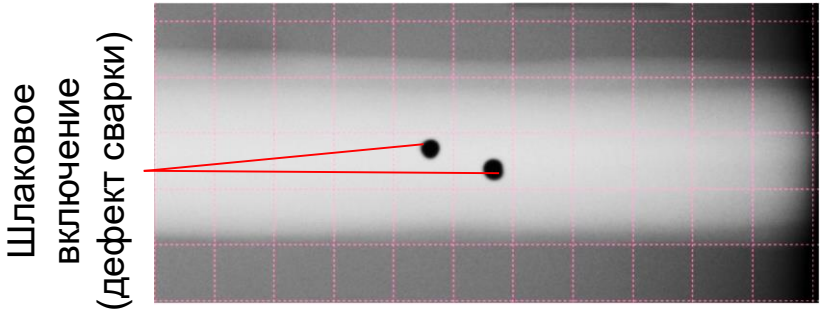
Нейросетевая дефектоскопия сварных швов труб большого диаметра

- Обнаружение дефектов сварки замедляет технический процесс на 10-30 мин
- Показания 20+ датчиков сварочной установки в течение сварки и данные рентген-контроля использованы для обучения нейросети, предсказывающей дефекты
- Нейросеть обрабатывает показания датчиков в реальном времени и предсказывает дефекты шва без рентгена и человеческого фактора
- В экспериментах нейросеть нашла дефекты, пропущенные экспертом



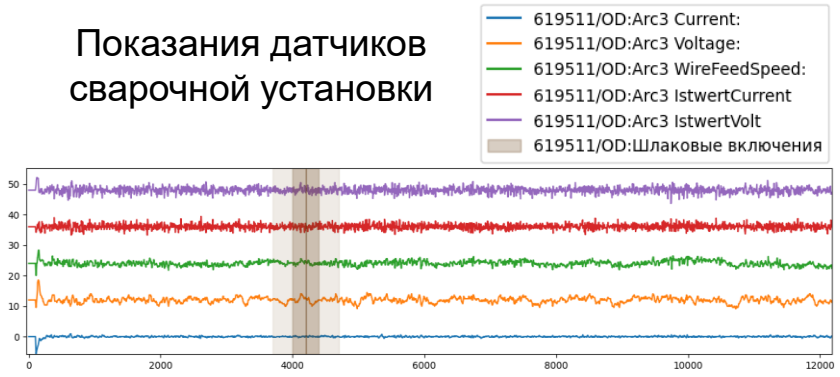
Сварочный процесс

Сварной шов трубы
без видимых дефектов

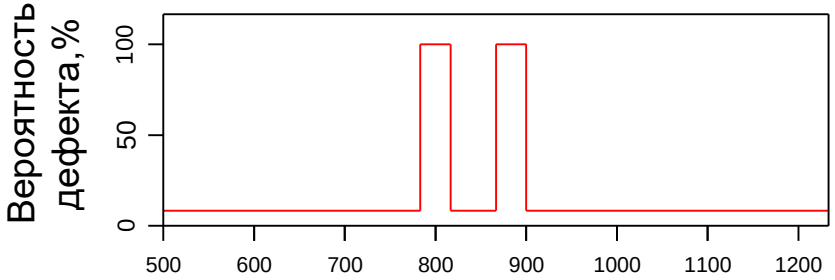


Рентгеновский снимок сварного шва

Показания датчиков сварочной установки



Предсказание дефекта

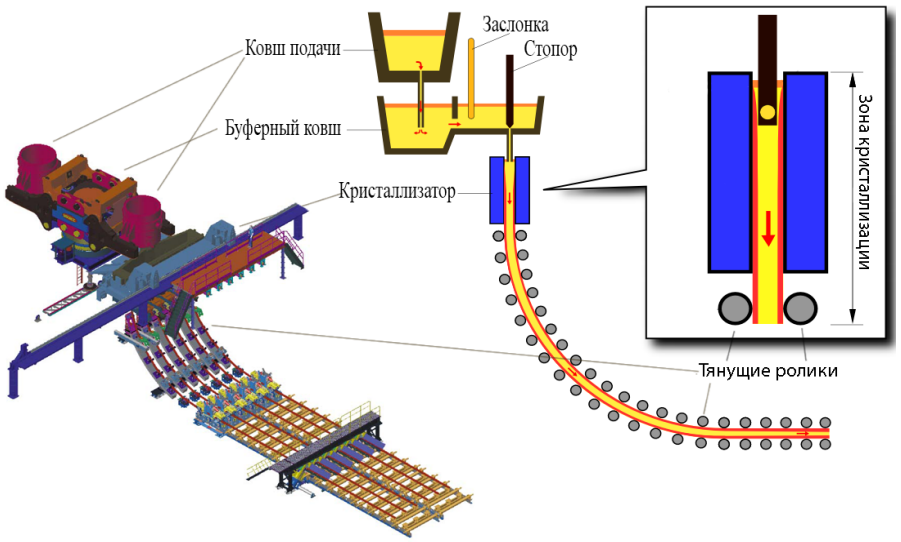


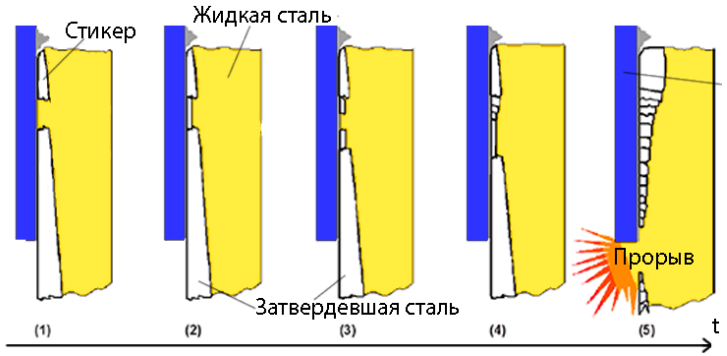
Оценка интенсивности трафика по данным камер видеонаблюдения

- Разработан нейросетевой метод классификации подсчета транспортных средств
- Метод позволяет определять направление движения в часы пик и в будние дни с погрешностью менее 10%

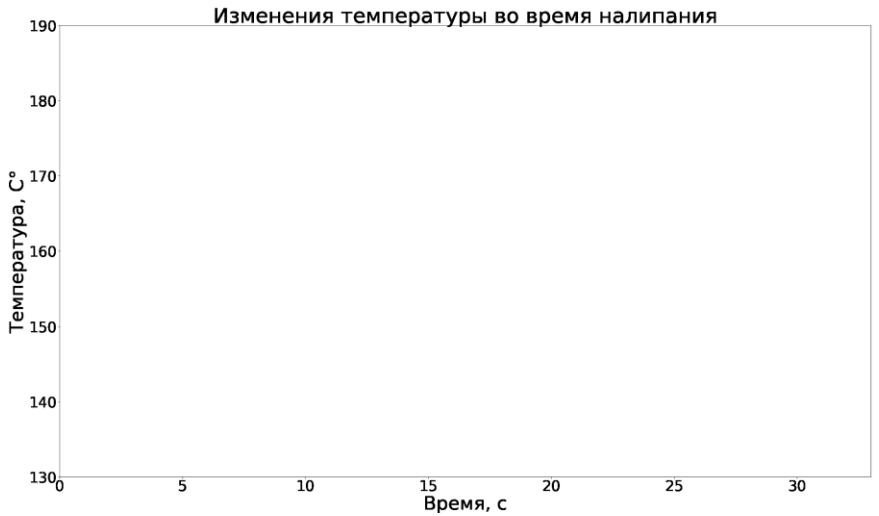
Пересечение пр. Победы и ул. Молодогвардейцев

Предсказание налипания в процессе непрерывной разливки стали



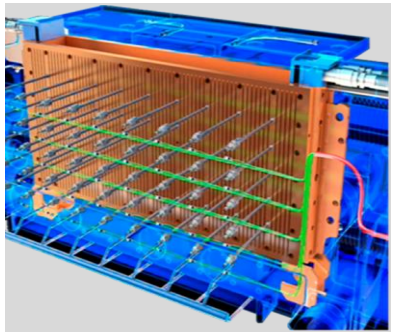


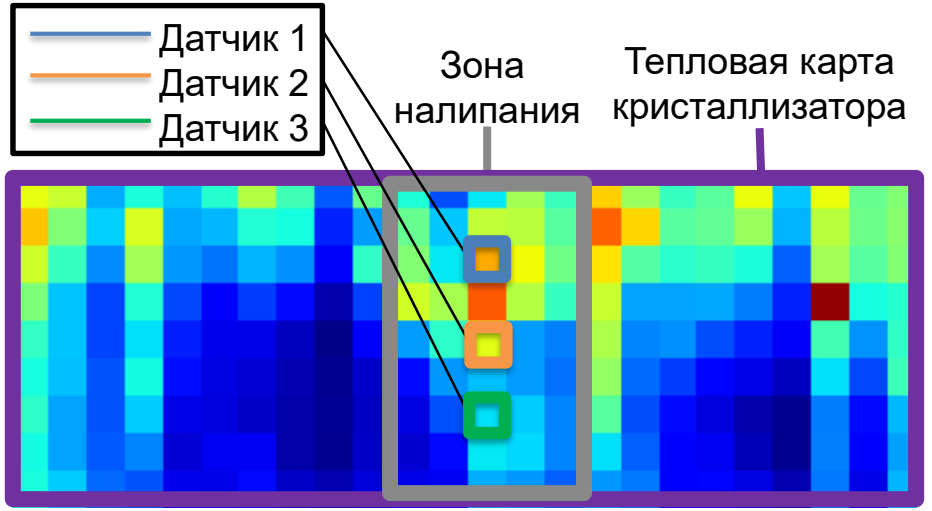
- Часть затвердевшей стали налипает на стенку кристаллизатора. Оболочка под налипанием тоньше, чем нужно для удержания жидкой стали в центре
- Если тонкий участок доходит до края кристаллизатора, сталь пробивает оболочку и выливается на оборудование (**ущерб €250K**)



- Система предсказания налипаний останавливает процесс разливки для предотвращения ущерба, но имеет много ложных срабатываний (**ущерб от ложного срабатывания €10K**)
- Предсказательная нейросетевая модель внедрена в систему предсказания налипаний и позволила сократить ложные срабатывания в 2 раза

576 оптоволоконных датчиков температуры





Спасибо за внимание! Пожалуйста, задавайте вопросы