

# Второе и третье задание курса 'Суперкомпьютерное моделирование и технологии программирования'

Чаплыгин Андрей Викторович  
ВМК МГУ, группа 603.

2018  
Ноябрь

## 1 Описание задачи

**Вариант 10.**

В прямоугольнике  $\Omega = [0, 2] \times [0, 1]$  с границами:

$$\gamma_R = \{(2, y), 0 \leq y \leq 1\}$$

$$\gamma_L = \{(0, y), 0 \leq y \leq 1\}$$

$$\gamma_T = \{(x, 1), 0 \leq x \leq 2\}$$

$$\gamma_B = \{(x, 0), 0 \leq x \leq 2\}$$

рассматривается уравнение Пуассона:

$$-\Delta u = -\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = F(x, y)$$

с граничными условиями:

$$\gamma_R : u(2, y) = \phi(2, y) = 1 + \cos(2\pi y)$$

$$\gamma_L : \frac{\partial u}{\partial x}_{x=0} = \psi(0, y) = 0$$

$$\gamma_T : u(x, 1) = \phi(x, 1) = 1 + \cos(\pi x)$$

$$\gamma_B : \frac{\partial u}{\partial y}_{y=0} = \psi(x, 0) = 0$$

И правой частью  $F(x, y) = \cos(\pi xy)((\pi y)^2 + (\pi x)^2)$ .

Аналитическое решение этой задачи известно:

$$u(x, y) = 1 + \cos(\pi xy)$$

## 2 Численное решение

Определим равномерную прямоугольную сетку с шагами по пространству  $h_x, h_y$ . Количество узлов сетки  $M, N$ . Тогда разностная схема решения выглядит следующим образом:

$$-\frac{1}{h_x^2}(u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}) - \frac{1}{h_y^2}(u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}) = F_{i,j}, i = \overline{1, M-1}, j = \overline{1, N-1}$$

$$-\frac{1}{h_x^2}(u_{i+1,0} - 2u_{i,0} + u_{i-1,0}) - \frac{2}{h_y^2}(u_{i,1} - u_{i,0}) = F_{i,0} - \frac{2}{h_y}\psi_{i,0}, i = \overline{1, M-1}, j = 0$$

$$-\frac{2}{h_x^2}(u_{1,j} - u_{0,j}) - \frac{1}{h_y^2}(u_{0,j+1} - 2u_{0,j} + u_{0,j-1}) = F_{0,j} - \frac{2}{h_x}\psi_{0,j}, i = 0, j = \overline{1, N-1}$$

$$-\frac{2}{h_x^2}(u_{1,0} - u_{0,0}) - \frac{1}{h_y^2}(u_{0,1} - u_{0,0}) = F_{0,0} - (\frac{2}{h_x} + \frac{2}{h_y})\psi_{0,0}$$

$$u_{M,j} = \phi_{M,j}, j = \overline{0, N}$$

$$u_{i,N} = \phi_{i,N}, i = \overline{0, M}$$

Полученную систему линейных уравнений предлагается решать методом наименьших невязок.

### 3 Описание последовательной версии

Представим нашу разностную схему в матричном виде:

$$Lu = G$$

Заметим, что размерность  $L \in R^{MN \times MN}$ , т.к. на границах  $\gamma_R, \gamma_T$  задаются условия Дирихле и узлы на этой границе можно исключить из системы.

Т.к. в методе наименьших невязок только требуется вычислять  $Lv$  для вообще говоря произвольного  $v$  - то в программе реализован безматричный вариант метода (matrix-free). Вместо построения матрицы оператора  $L$  задается функция, вычисляющая  $Lv$  по заданному вектору  $v$  (matvec).

В качестве критерия остановки итерационного процесса использовался критерий:

$$\|r_k\| = \|Lu_k - G\| < \epsilon$$

Последовательная версия лежит в git репозитории: <https://github.com/Andrcraft9/laplace2D-solver>, ветка master

### 4 Описание параллельной версии (MPI и OpenMP)

При параллельной реализации использовался метод декомпозиции области. Область делилась в двух направлениях: по  $x$  и по  $y$ . Для каждой подобласти добавлялась внерасчетная граница (halo points), с помощью которой происходила синхронизация между процессорами. В качестве функций пересылок использовались MPI блокирующие вызовы MPI\_Sendrecv, MPI\_Send, MPI\_Recv.

С помощью директив OpenMP были распараллелены главные циклы программы.

MPI версия программы лежит в git репозитории: <https://github.com/Andrcraft9/laplace2D-solver>, ветка pure\_mpi

Гибридная MPI/OpenMP версия программы лежит в git репозитории: <https://github.com/Andrcraft9/laplace2D-solver>, ветка parallel\_mpi

## 5 Тестирование последовательной программы и параллельной программы

### 5.1 Тестирование на персональном компьютере

Тестирование проводилось на персональном компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz,  $\epsilon = 10^{-6}$ .

Приведем сначала результаты последовательной программы.

1 Mesh	Time (sec)	Iterations	Error (L2)	Error (C)
20 x 20	0.005695	570	0.040182	0.005018
40 x 40	0.147708	4949	0.019857	0.001262
80 x 80	1.393880	33370	0.009860	0.000316
160 x 160	23.535339	153615	0.004905	0.000079

Из таблицы четко видно, что при увеличении сетки в два раза ошибка в норме L2 падает в 2 раза, а в норме C в 4 раза. Приведем рисунки как ведет себя численное решение на итерациях для двух сеток.

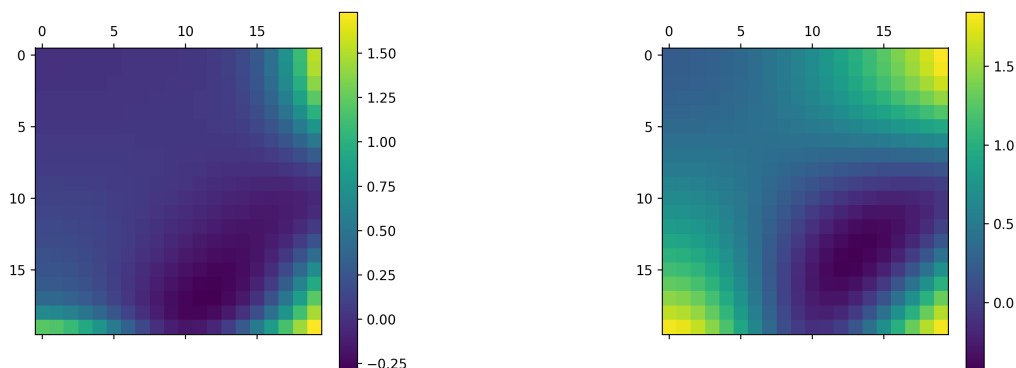


Рис. 1: Решение для сетки 20 на 20: слева на 10 итерации; справа на 100 итерации

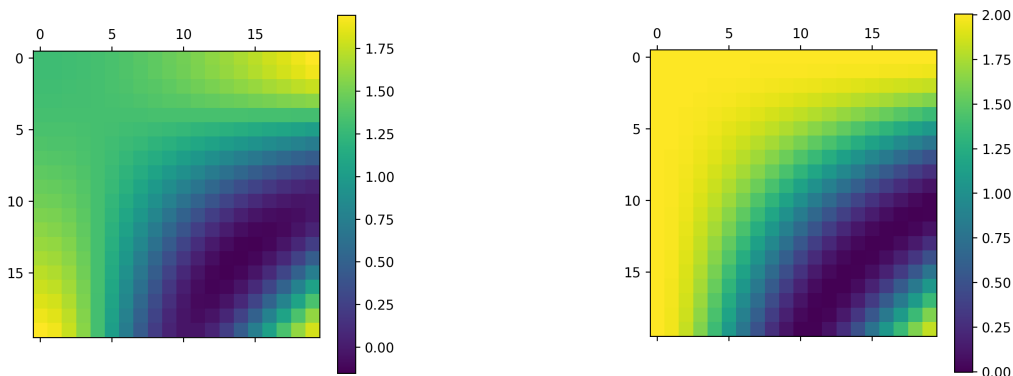


Рис. 2: Решение для сетки 20 на 20: слева на 300 итерации; справа финальное (570 итерация)

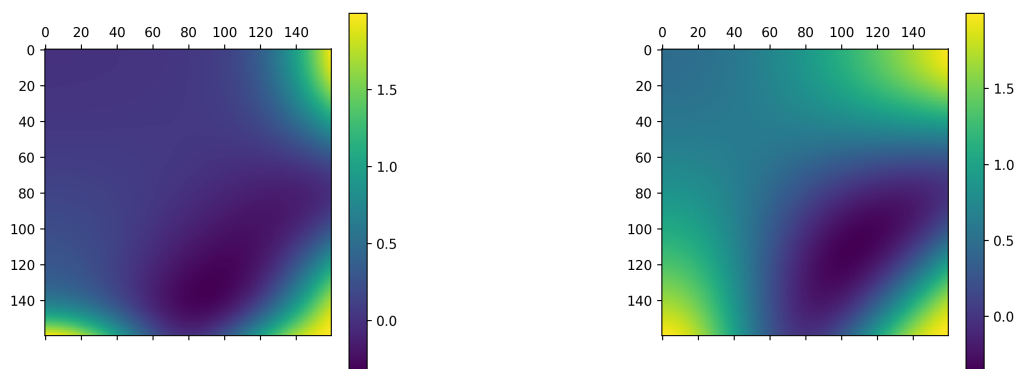


Рис. 3: Решение для сетки 160 на 160: слева на 1000 итерации; справа на 10000 итерации

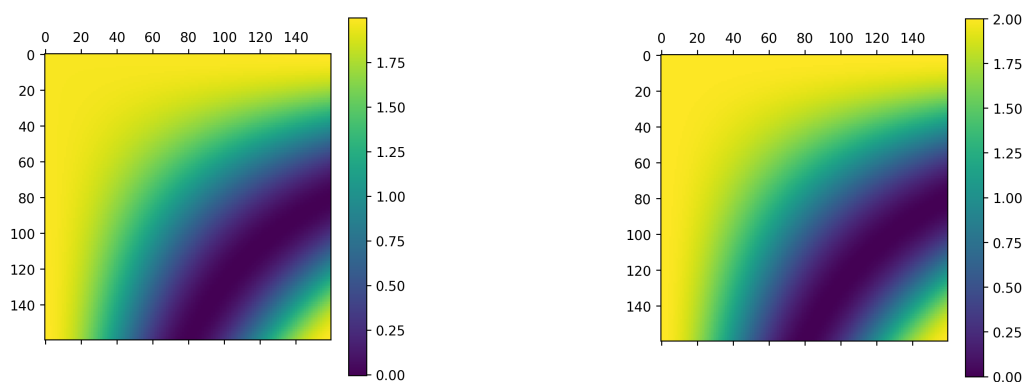


Рис. 4: Решение для сетки 160 на 160: слева на 50000 итерации; справа финальное (153615 итерация)

Cores	Threads	Mesh	Time (sec)	Iterations	Error (L2)	Error (C)
4	1	20 x 20	0.017169	518	0.040182	0.005018
4	1	40 x 40	0.188739	5007	0.019857	0.001262
4	1	80 x 80	0.816082	33397	0.009860	0.000316
4	1	160 x 160	7.892072	153611	0.004905	0.000079

Параллельная программа была протестирована на таких же сетках и было проведено сравнение с последовательной версией. В таблице представлены результаты для параллельной версии. Видно что ошибки получаются такие же, как для последовательной версии.

## 5.2 Тестирование на Blue Gene

Приведем результаты тестирования на суперкомпьютере Blue Gene (<http://hpc.smc.msu.ru/bgp>).

В первой таблице показаны результаты тестирования MPI версии программы в режиме VN (режим виртуальных вычислительных узлов). Программа компилировалась компилятором IBM XL: `mpixlcxx -O3 -qarch=450 -qtune=450`.

Cores	Threads	Mesh	Time (sec)	Iterations	Error (L2)	Error (C)	SpeedUp
128	1	512 x 512	736.060111	1676500	0.001499	0.000008	1.00
256	1	512 x 512	464.799801	1676433	0.001499	0.000008	1.58
512	1	512 x 512	340.541092	1675964	0.001499	0.000008	2.16
128	1	1024 x 1024	1419.707980	1000001	192.841024	0.375063	1.00
256	1	1024 x 1024	770.141615	1000001	192.841055	0.375063	1.84
512	1	1024 x 1024	437.776311	1000001	192.841038	0.375063	3.24

Во второй таблице показаны результаты тестирования гибридной MPI/OpenMP версии программы в режима SMP (режим симметричного мультипроцессора). Программа компилировалась компилятором IBM XL: `mpixlcx_r -O3 -qsmp=omp -qarch=450 -qtune=450`.

Cores	Threads	Mesh	Time (sec)	Iterations	Error (L2)	Error (C)	SpeedUp
128	4	512 x 512	685.643375	1675906	0.001499	0.000008	1.00
256	4	512 x 512	613.482150	1676433	0.001499	0.000008	1.11
512	4	512 x 512	593.274514	1675964	0.001499	0.000008	1.15
128	4	1024 x 1024	669.6818	1000001	192.841024	0.375063	1.00
256	4	1024 x 1024	498.4438	1000001	192.841024	0.375063	1.34
512	4	1024 x 1024	410.2103	1000001	192.841024	0.375063	1.63

Для задачи 1024 на 1024 пришлось поставить ограничение на 10000000 итераций, иначе задача не успевала посчитаться за лимит по времени (15 минут), за 10000000 итераций норма невязки успела упасть до 0.82. Для задачи 512 на 512 невязка упала до  $\epsilon = 10^{-6}$ . Ускорение считалось относительно времени на 128 ядрах.

Видно, что для версии MPI - ускорение получается близкое к линейному для задачи 1024 на 1024 узлов. Для гибридной версии ускорение получается похуже - возможно это связано с особенностями реализации OpenMP для C++.

### 5.3 Тестирование на Polus

Приведем результаты тестирования на кластере Polus (<http://hpc.smc.msu.ru/polus>).

Из-за лимита тестирования по времени на кластере Polus использовалось ограничение по итерациям: 1000000 для задачи 512 на 512 и 100000 для задачи 1024 на 1024.

Приведем результаты тестирования MPI версии программы. Компилирование проводилось с использованием компилятора IBM (mpixlC) и флагами: -O3 -qstrict -qarch=pwr8 -qtune=pwr8. Тестирование проводилось вплоть до максимального лимита по количеству возможных ядер на polus - 64 ядра. Ускорение считалось относительно времени на 4 ядрах.

Cores	Threads	Mesh	Time (sec)	Iterations	Error (L2)	Error (C)	SpeedUp
4	1	512 x 512	1417.981806	1000001	0.070567	0.000275	1.00
16	1	512 x 512	393.908352	1000001	0.070561	0.000275	3.60
32	1	512 x 512	232.955863	1000001	0.070569	0.000275	6.09
64	1	512 x 512	209.950782	1000001	0.070571	0.000275	6.75
4	1	1024 x 1024	568.089891	100001	1173.411148	1.971368	1.00
16	1	1024 x 1024	153.858860	100001	1173.411148	1.971368	3.69
32	1	1024 x 1024	79.389629	100001	1173.411148	1.971368	7.15
64	1	1024 x 1024	63.293906	100001	1173.411148	1.971368	8.97

## 5.4 Профайлинг MPI версии

Для задачи 1024 на 1024 точек на суперкомпьютере Blue Gene был проведен профайлинг MPI версии программы для 512 ядер, результаты представлены на рисунке. Также приведено значения ускорения для разных частей параллельной версии по сравнению с последовательной.

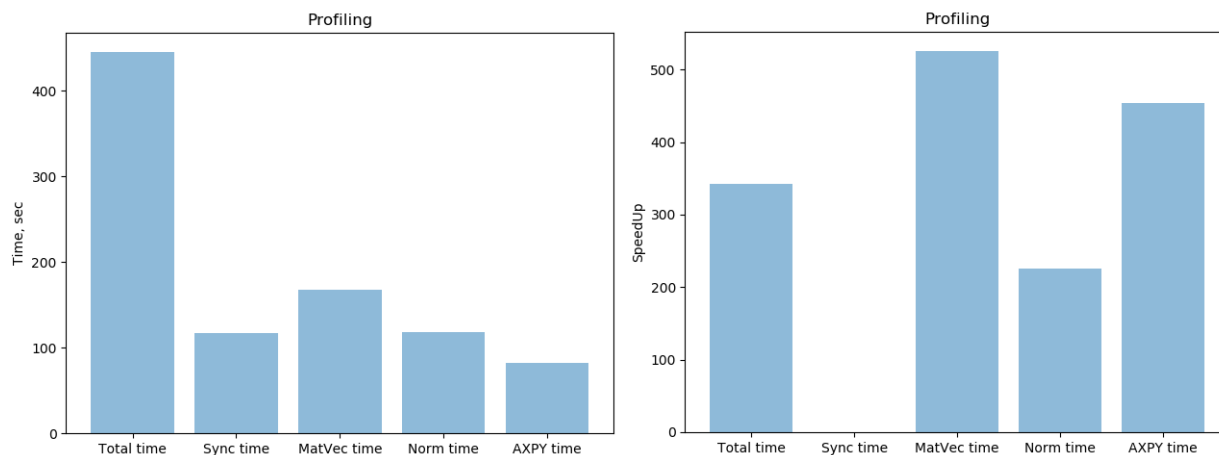


Рис. 5: Слева - время разных частей в программе для параллельной версии на 512 ядрах; справа - ускорение по сравнению последовательной версией. Total - общее время; sync - время синхронизаций между процессорами; matvec - время расчета функции "матрица на вектор"; norm - время расчета нормы; AXPY - время расчета всех функций вида  $y = a \cdot x + y$

Видно, что для операций MatVec и AXPY получается линейное ускорение, расчет нормы ускоряется хуже в связи с необходимой редукцией для ее расчета.



## 6 CUDA/MPI версия, описание

Реализована параллельная версия программы CUDA/MPI. В качестве базовой библиотеки использовался Thrust.

- Процедура `matvec` была распараллелена как и с использованием библиотеки Thrust (с помощью функции `transform`), так и без (чистый вызов CUDA ядра). Обе версии `matvec` показывают примерно одинаковое время, поэтому в дальнейших результатах рассматривается только реализация с помощью Thrust.
- Вычисление скалярного произведения реализовано с помощью функции `inner_product` из библиотеки Thrust, причем за один ее вызов вычисляются сразу три скалярных произведения:  $(r, r)$ ,  $(Ar, r)$ ,  $(Ar, Ar)$  - это реализовано с помощью `zip_iterator` и функтора работающего с типом `tuple`.
- Вычисление  $x = x + \tau r_k$  реализовано с помощью `transform` из библиотеки Thrust.
- Было реализовано два механизма синхронизаций между процессорами. Первый, это перед каждой синхронизацией выкачивать данные границ с device на host, синхронизировать данные на host, а затем выкачивать эти данные с host на device. Второй механизм - это использование технологии CUDA-Aware MPI (CAM), т.е. прямая пересылка данных с device на device, без участия host. В дальнейших результатах рассматривается только CAM подход.

CUDA/MPI версия программы лежит в Git репозитории <https://github.com/Andrcraft9/laplace2D-solver>, ветка `cuda_mpi`.

## 7 CUDA/MPI версия, тестирование

### 7.1 Тестирование на персональном компьютере версии CUDA/MPI

Тестирование проводилось на персональном компьютере (ноутбуке) с процессором Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz и с одним графическим процессором: мобильная версия Nvidia GeForce GTX 1050.

Проводилось тестирование на тех же параметрах задачи, которые были при тестировании MPI версии на персональном компьютере.

Mesh	Time (sec)	Iterations	Error (L2)	Error (C)
20 x 20	0.056550	586	0.040182	0.005018
40 x 40	0.452956	5034	0.019857	0.001262
80 x 80	8.282090	33426	0.009860	0.000316
160 x 160	65.153768	153700	0.004905	0.000079

Хоть задачи с такими размерностями решаются абсолютно неэффективно на GPU - эти результаты дают понимание корректности работы кода CUDA/MPI версии программы. Из таблицы видно что ошибки для CUDA/MPI версии получаются такие же, как для последовательной версии и параллельной MPI версии. Все также при увеличении сетки в два раза ошибка в норме L2 падает в 2 раза, а в норме C в 4 раза.

Также на персональном компьютере проводилось сравнение скорости работы CUDA/MPI с последовательной версией. Результаты в таблице:

CPU cores	GPU	Mesh	Time (sec)	Iterations	Error (L2)	Error (C)	SpeedUp
1	no	1024 x 1024	8.073405	1001	1427.296464	1.999997	1.0
1	yes	1024 x 1024	2.176046	1001	1427.296464	1.999997	3.71
1	no	2048 x 2048	32.832434	1001	2879.683993	2.000000	1.0
1	yes	2048 x 2048	7.429329	1001	2879.683993	2.000000	4.42
1	no	4096 x 4096	134.003438	1001	5783.992871	2.000000	1.0
1	yes	4096 x 4096	29.628920	1001	5783.992871	2.000000	4.52

Видно, что даже мобильная версия GPU сильно выигрывает по скорости у CPU.

## 7.2 Тестирование на Polus версии CUDA/MPI

Приведем результаты тестирования на кластере Polus (<http://hpc.cmc.msu.ru/polus>). На каждом узле Polus стоит по две NVIDIA Tesla P100, всего 5 узлов. На кластере используется планировщик IBM LSF. Из-за лимита тестирования по времени на кластере Polus использовалось ограничение по итерациям: **везде 1000 итераций**. Компилирование проводилось с использованием компиляторов nvcc и IBM (mpixlC) и флагами: -arch=sm\_60 -O3.

Результаты тестирования приведены в таблицах. В таблицах представлены времена разных участков программы:

- Time - общее время
- sync - время синхронизаций между процессорами
- matvec - время расчета функции "матрица на вектор"
- dots - время расчета скалярных произведений
- axpy - время расчета  $y = y + ax$

Проводилось тестирование для 1 GPU. В таблице сравнение CUDA с последовательной версией:

GPUs	Mesh	Time (sec)	sync time	matvec time	dots time	axpy time	SpeedUp
no	2048 x 2048	96.097268	0.0	67.071	22.3073	6.58307	1.0
yes	2048 x 2048	1.504904	0.0	0.45744	0.79716	0.19642	63.9
no	4096 x 4096	385.12730	0.0	271.284	87.1523	26.0375	1.0
yes	4096 x 4096	3.463741	0.0	1.73823	0.856855	0.747246	111.2
yes	8192 x 8192	12.384794	0.0	6.85102	2.2232	2.91634	

Также приведем для сравнения результаты параллельной MPI версии программы:

CPUs	Mesh	Time (sec)	sync time	matvec time	dots time	axpy time	
16	2048 x 2048	6.229078	0.294685	4.11808	1.81851	0.393033	15.4
16	4096 x 4096	27.423719	0.986056	16.4701	7.00203	3.80796	14.1
16	8192 x 8192	104.022733	8.17988	64.2579	25.8242	13.6579	

Видно, что в MPI версии для операций MatVec и AXPY получается линейное ускорение, расчет нормы ускоряется хуже в связи с необходимой редукцией для ее расчета. Также видно, что CUDA версия программы работает гораздо быстрее даже на одном GPU, чем MPI программа на 16 ядрах (2 узла), и тем более быстрее последовательной программы.

Было проведено тестирование на нескольких GPUs на кластере Polus. Тестирование проводилось двумя стратегиями запуска. Если запуск задачи проводить с параметрами: `#BSUB -gpu num=1:mode=exclusive_process`, то получим следующие результаты:

GPUs	Mesh	Time (sec)	sync time	matvec time	dots time	axpy time	SpeedUp
1	16384 x 16384	47.536385	0.0	26.4198	8.00402	11.6291	1.0
2	16384 x 16384	24.787495	0.375951	13.3697	4.45567	5.83096	1.92

Видно, что в CUDA/MPI версии для двух GPU операции MatVec и AXPY ускоряются линейно, как и в MPI версии. Общее время уменьшается почти линейно.

Если же запуск задачи проводить с параметрами:

`#BSUB -gpu num=1:mode=shared:j_exclusive=yes`, то получим следующее:

GPUs	Mesh	Time (sec)	sync time	matvec time	dots time	axpy time
1	16384 x 16384	47.536385	0.0	26.4198	8.00402	11.6291
2	16384 x 16384	50.933575	1.95222	28.4863	8.7351	11.7283
4	16384 x 16384	52.460710	12.5627	24.3382	13.819	11.809
8	16384 x 16384	51.597300	16.7023	20.6803	20.5726	11.935
16	16384 x 16384	25.459411	17.0641	7.50136	10.4961	3.42491

Отметим, что в этом режиме запуска время выполнения скачет из раза в раз довольно сильно - по всей видимости это связано с тем, как и на какие узлы планировщик ставит задачи. В таблице представлены наиболее адекватные результаты запусков для этого режима.

## 8 Заключение

В рамках данной работы была реализована программа, решающая уравнение Пуассона в прямоугольнике с граничными условиями типа Дирихле и Неймана на границах. Были реализованы последовательная, параллельная MPI, гибридная MPI/OpenMP и CUDA/MPI версии программы. Все версии программ были протестированы и показано, что при увеличении сетки в 2 раза ошибка в норме  $C$  падает в 4 раза и в норме  $L_2$  в 2 раза, как и должно быть согласно теории. Параллельные версии были протестированы на суперкомпьютере Blue Gene и кластере Polus. Для MPI версии на обеих платформах было получено хорошее ускорение, близкое к линейному.

Для CUDA/MPI версии показано, что даже на одном GPU считает в разы быстрее чем последовательная и MPI версии. Наблюдается линейное масштабирование CUDA/MPI версии при запуске с параметрами `-gpu num=1:mode=exclusive_process`

При запуске `-gpu num=1:mode=shared:j_exclusive=yes` время ведет себя по разному - по всей видимости это связано с планировщиком задач на кластере Polus.