ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯ И ИНФОРМАТИКИ»

КАФЕДРА ПМиК

Расчетно-графическая работа
по дисциплине «Программирование графических процессоров»

Выполнил: студент 3-го курса,
группы ИП-013
Копытина Т.А

Проверил: Старший преподаватель
Кафедры прикладной математики и кибернетики
Нужнов А.В.

Новосибирск, 2023

Оглавление

Постановка задачи

Текст задания: *Сравнение производительности программы на основе Open GL - вычислительных шейдеров.*

Цель данного проекта – провести сравнительный анализ производительности программ, реализованных на алгоритмах линейной алгебры с использованием шейдеров Open GL.

- Изучить основные принципы работы вычислительных шейдеров OpenGL.
- Реализовать несколько алгоритмов линейной алгебры с использованием вычислительных шейдеров.
- Провести тестирование разработанных программ на различных объемах данных и сравнить полученные результаты в терминах времени выполнения операций линейной алгебры.
- Проанализировать полученные результаты и сделать выводы о производительности каждого подхода и эффективности использования вычислительных шейдеров OpenGL.

Для решения поставленных задач будут реализованы две программы на вычислительных шейдерах, которые выполняют операции линейной алгебры: умножение матрицы на вектор и транспонирование матрицы.

Описание архитектуры вычислительных шейдеров OpenGL.

Шейдеры — это небольшие программы, выполняемые на графическом ускорителе. Эти программы выполняются для каждого конкретного участка графического конвейера. Если описывать шейдеры наиболее простым способом, то шейдеры — это не более чем программы преобразующие входы в выходы. Шейдеры обычно изолированы друг от друга, и не имеют механизмов коммуникации между собой кроме упомянутых выше входов и выходов.

Вычислительные шейдеры работают совсем по-другому. "Пространство", с которым работает вычислительный шейдер, в значительной степени абстрактно; каждый вычислительный шейдер сам решает, что означает это пространство. Количество выполнений вычислительного шейдера определяется функцией, используемой для выполнения вычислительной операции. Самое важное из всего, что вычислительные шейдеры не имеют определяемых пользователем входных данных и вообще никаких выходных данных. Встроенные входные данные определяют только то, где в "пространстве" выполнения находится конкретный вызов вычислительного шейдера.

Описание реализации

Данная программа представляет собой реализацию операций над матрицами, таких как транспонирование и умножение матрицы на вектор.

Для проверки правильности транспонирования и умножения, программа включает шейдеры transpose.comp и multiply.comp, которые показывают результаты выполнения соответствующих операций.

Для транспонирования матрицы используется шейдер transpose.comp, в нем описывается следующее:

- `layout (local_size_x = 20, local_size_y = 20) in;` Задание размеров матрицы и точка входа в программу;
- `layout (std430, binding = 0) buffer InBuffer { float matrixA[];};`
  `layout (std430, binding = 1) buffer OutBuffer {float matrixB[];};`
  создание буферов под матрицы, чтобы копировать с CPU на GPU;
- Далее идет функция `void main()`, где выполняется само транспонирование.

Далее в файле main.cpp происходит вычислительный процесс и замер времени операции:

- В классе `class Transposing: public GPUAlgorithm` мы вызываем функцию `Transposing()`, в которой открываем наш шейдер *transpose.comp* , затем создаем новый шейдер внутри главной программы. Далее проверяем что компиляция шейдера прошла успешно. С помощью `CreateProgramm()` создаем новую программу где будут выполняться все действия.
- Далее вызываем функцию `void GetResult()` где выводится результат работы функции транспонирования.
- Затем вызывается функция `void Transpose()` в ней уже проходит заполнение матрицы, работа шейдера, замер времени с помощью

`chrono::high_resolution_clock::time_point start = wtime()` копирование результата в буфер, затем очищение буфера.

Для умножения матрицы на вектор мы используем второй вычислительный шейдер multiply.comp, происходит следующее:

- Сначала задаем размеры матрицы `layout (local_size_x = 20, local_size_y = 20) in;`. Затем мы создаем три буфера на графическом процессоре для: матрицы, вектора и результата.
- Далее идет функция `void main()`, где выполняется умножение матрицы на вектор.

Далее в файле main.cpp происходит вычислительный процесс и замер времени операции:

- В классе `class Multiplication : public GPUAlgorithm` мы вызываем функцию `Multiplication()` в которой открываем шейдер multiply.comp, затем создаем новый шейдер внутри главной программы. Далее проверяем что компиляция шейдера прошла успешно. С помощью `CreateProgramm()` создаем новую программу где будут выполняться все действия.
- Далее вызываем функцию `void GetResult()` где выводится результат работы функции транспонирования.
- Затем вызывается функция `void Multiply()` в ней уже проходит заполнение матрицы, работа шейдера, замер времени с помощью `chrono::high_resolution_clock::time_point start = wtime()` копирование результата в буфер, затем очищение буфера.

Так же в основном файле main.cpp есть класс `class Controller`, в котором мы вызываем следующие функции:

- `Controller(), void InitGLFW()` с помощью этих функций мы создаем окно в которое мы выводим работу наших шейдеров и программ и их результаты.
- В функции `void Compute()` мы выводим результаты работы программ транспонирования и умножения матрицы на вектор.

Скриншоты процесса работы программы

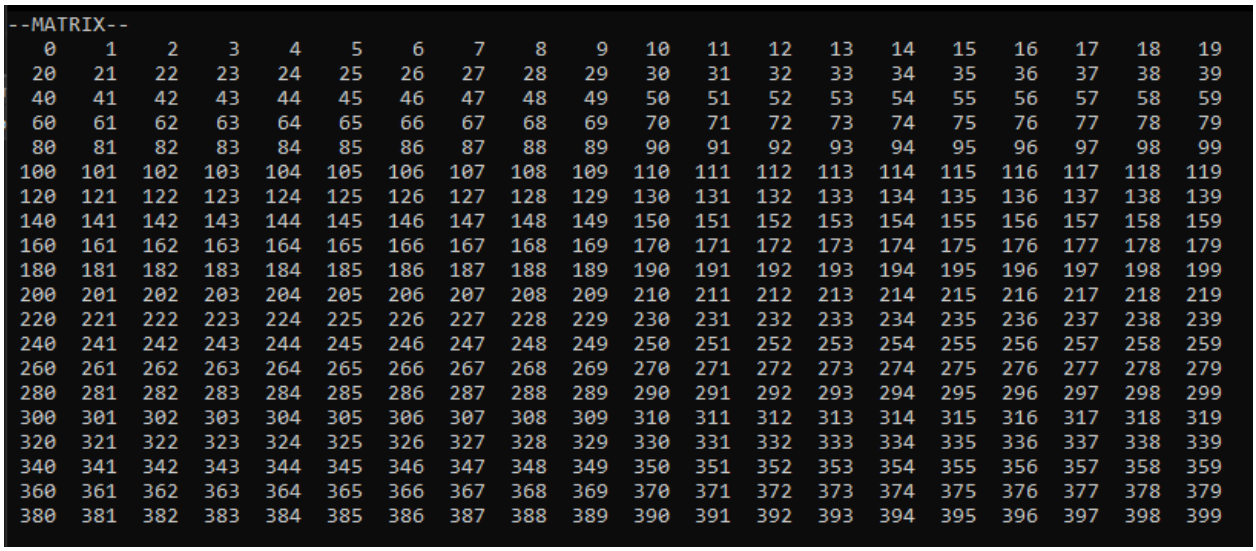


Рис.1 Матрица до преобразования размера 20x20.

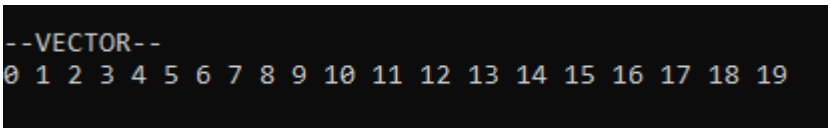


Рис.2 Вектор размера 20x1

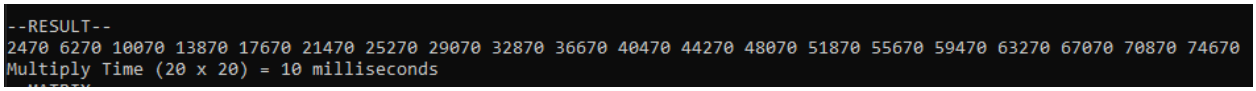


Рис.3 Результат умножения и замер времени данной операции.

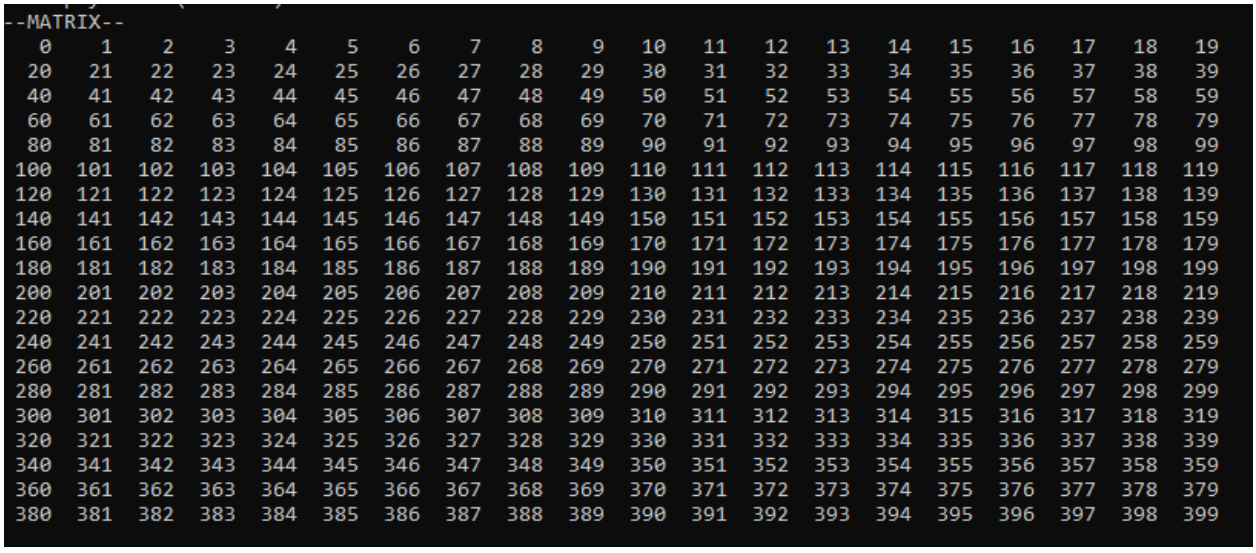


Рис.4 Матрица до преобразования размера 20x20.

```
--RESULT--
  0   20   40   60   80  100  120  140  160  180  200  220  240  260  280  300  320  340  360  380
  1   21   41   61   81  101  121  141  161  181  201  221  241  261  281  301  321  341  361  381
  2   22   42   62   82  102  122  142  162  182  202  222  242  262  282  302  322  342  362  382
  3   23   43   63   83  103  123  143  163  183  203  223  243  263  283  303  323  343  363  383
  4   24   44   64   84  104  124  144  164  184  204  224  244  264  284  304  324  344  364  384
  5   25   45   65   85  105  125  145  165  185  205  225  245  265  285  305  325  345  365  385
  6   26   46   66   86  106  126  146  166  186  206  226  246  266  286  306  326  346  366  386
  7   27   47   67   87  107  127  147  167  187  207  227  247  267  287  307  327  347  367  387
  8   28   48   68   88  108  128  148  168  188  208  228  248  268  288  308  328  348  368  388
  9   29   49   69   89  109  129  149  169  189  209  229  249  269  289  309  329  349  369  389
 10   30   50   70   90  110  130  150  170  190  210  230  250  270  290  310  330  350  370  390
 11   31   51   71   91  111  131  151  171  191  211  231  251  271  291  311  331  351  371  391
 12   32   52   72   92  112  132  152  172  192  212  232  252  272  292  312  332  352  372  392
 13   33   53   73   93  113  133  153  173  193  213  233  253  273  293  313  333  353  373  393
 14   34   54   74   94  114  134  154  174  194  214  234  254  274  294  314  334  354  374  394
 15   35   55   75   95  115  135  155  175  195  215  235  255  275  295  315  335  355  375  395
 16   36   56   76   96  116  136  156  176  196  216  236  256  276  296  316  336  356  376  396
 17   37   57   77   97  117  137  157  177  197  217  237  257  277  297  317  337  357  377  397
 18   38   58   78   98  118  138  158  178  198  218  238  258  278  298  318  338  358  378  398
 19   39   59   79   99  119  139  159  179  199  219  239  259  279  299  319  339  359  379  399
```

Рис.5 Результат: транспонированная матрица

```
Transpose Matrix Time (20 x 20) = 75 milliseconds
```

Рис.6 Замер времени транспонирования.

```
--MATRIX--
  0   1   2   3   4   5   6   7   8   9
 10  11  12  13  14  15  16  17  18  19
 20  21  22  23  24  25  26  27  28  29
 30  31  32  33  34  35  36  37  38  39
 40  41  42  43  44  45  46  47  48  49
 50  51  52  53  54  55  56  57  58  59
 60  61  62  63  64  65  66  67  68  69
 70  71  72  73  74  75  76  77  78  79
 80  81  82  83  84  85  86  87  88  89
 90  91  92  93  94  95  96  97  98  99

--VECTOR--
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

--RESULT--
285 735 1185 1635 2085 2535 2985 3435 3885 4335
Multiply Time (10 x 10) = 8 milliseconds
```

Рис7. Матрица размера 10x10, вектор размера 10x1, результат умножения и замер времени.

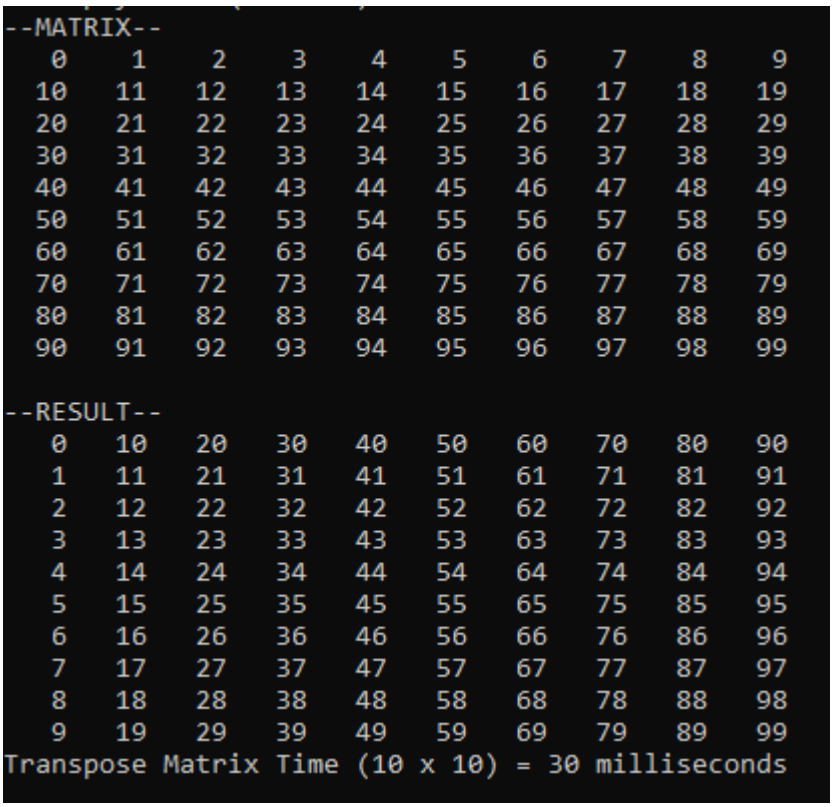


Рис.8 Матрица размера 10x10, транспонированная матрица размера 10x10 и замер времени выполнения операции.

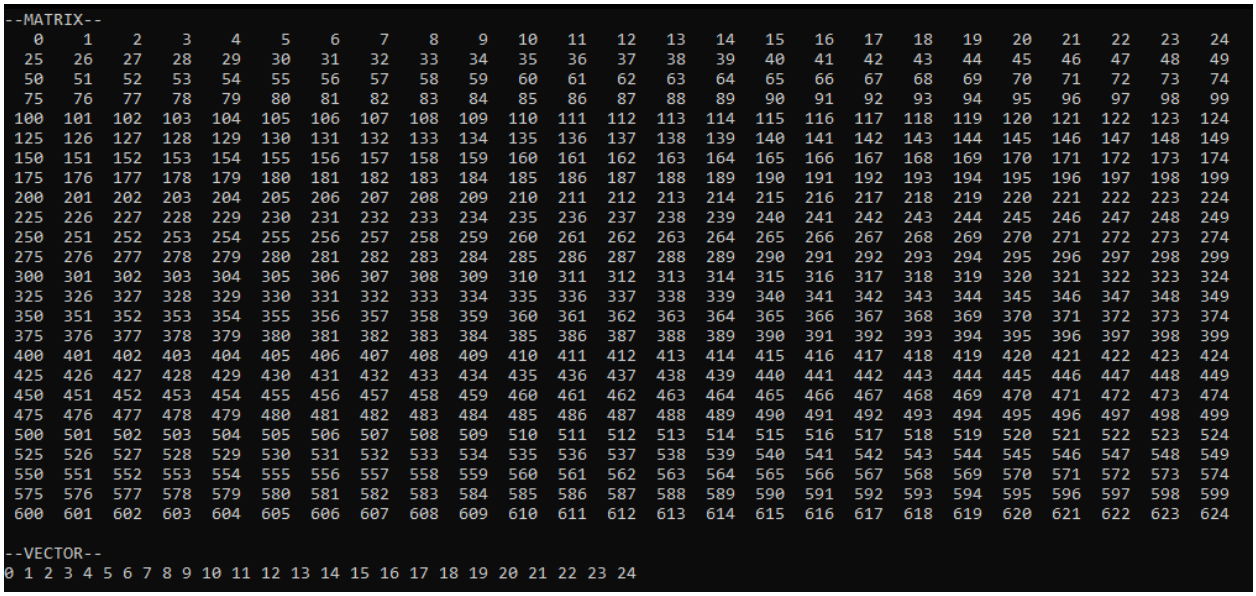


Рис.9 Матрица размером 25x25, вектор размером 25x1

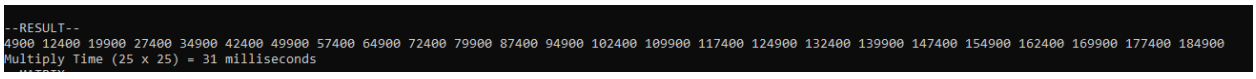


Рис.10 результат умножения матрицы на вектор и замер времени.

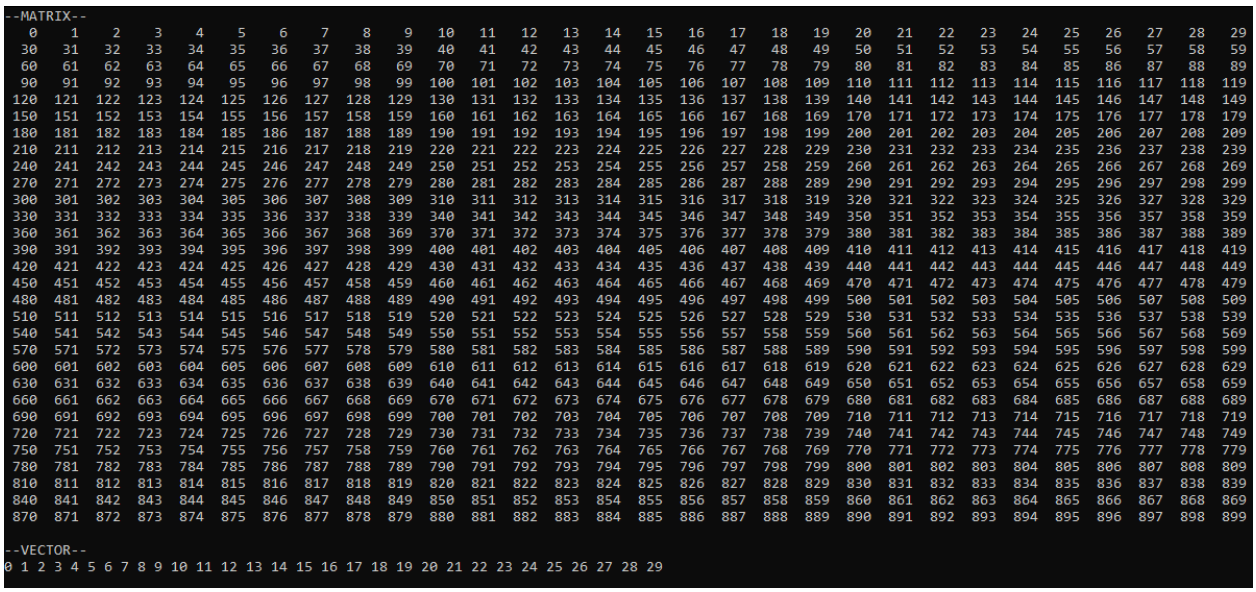


Рис.11 матрица размером 30x30, вектор размером 30x1

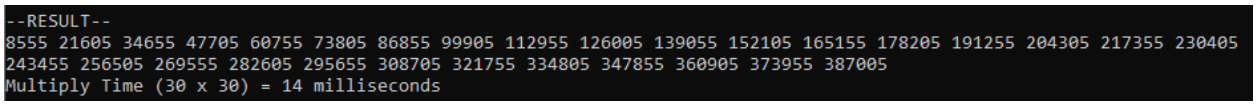


Рис.12 Результат умножения и замер времени.

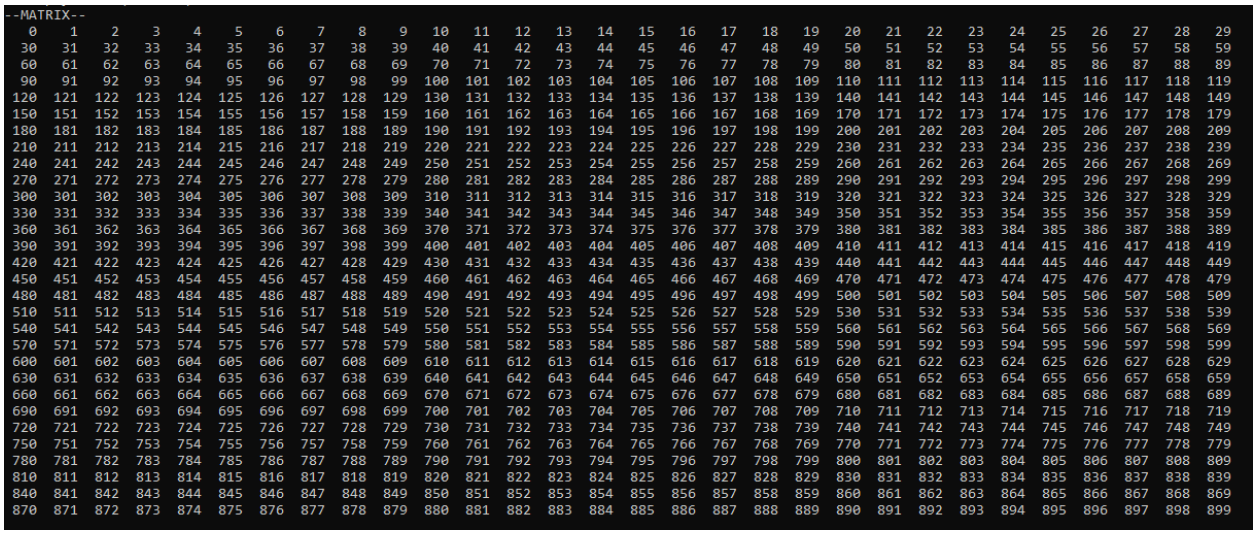
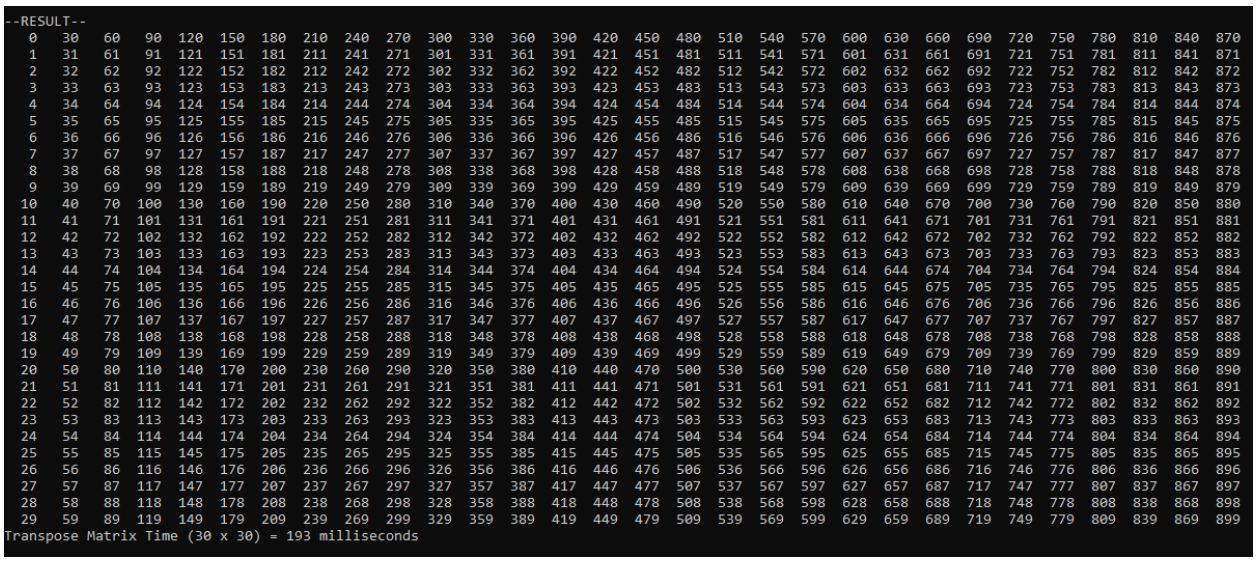


Рис.13 Матрица до изменения размера 30x30



```
--RESULT--
  0   30   60   90  120  150  180  210  240  270  300  330  360  390  420  450  480  510  540  570  600  630  660  690  720  750  780  810  840  870
  1   31   61   91  121  151  181  211  241  271  301  331  361  391  421  451  481  511  541  571  601  631  661  691  721  751  781  811  841  871
  2   32   62   92  122  152  182  212  242  272  302  332  362  392  422  452  482  512  542  572  602  632  662  692  722  752  782  812  842  872
  3   33   63   93  123  153  183  213  243  273  303  333  363  393  423  453  483  513  543  573  603  633  663  693  723  753  783  813  843  873
  4   34   64   94  124  154  184  214  244  274  304  334  364  394  424  454  484  514  544  574  604  634  664  694  724  754  784  814  844  874
  5   35   65   95  125  155  185  215  245  275  305  335  365  395  425  455  485  515  545  575  605  635  665  695  725  755  785  815  845  875
  6   36   66   96  126  156  186  216  246  276  306  336  366  396  426  456  486  516  546  576  606  636  666  696  726  756  786  816  846  876
  7   37   67   97  127  157  187  217  247  277  307  337  367  397  427  457  487  517  547  577  607  637  667  697  727  757  787  817  847  877
  8   38   68   98  128  158  188  218  248  278  308  338  368  398  428  458  488  518  548  578  608  638  668  698  728  758  788  818  848  878
  9   39   69   99  129  159  189  219  249  279  309  339  369  399  429  459  489  519  549  579  609  639  669  699  729  759  789  819  849  879
 10   40   70  100  130  160  190  220  250  280  310  340  370  400  430  460  490  520  550  580  610  640  670  700  730  760  790  820  850  880
 11   41   71  101  131  161  191  221  251  281  311  341  371  401  431  461  491  521  551  581  611  641  671  701  731  761  791  821  851  881
 12   42   72  102  132  162  192  222  252  282  312  342  372  402  432  462  492  522  552  582  612  642  672  702  732  762  792  822  852  882
 13   43   73  103  133  163  193  223  253  283  313  343  373  403  433  463  493  523  553  583  613  643  673  703  733  763  793  823  853  883
 14   44   74  104  134  164  194  224  254  284  314  344  374  404  434  464  494  524  554  584  614  644  674  704  734  764  794  824  854  884
 15   45   75  105  135  165  195  225  255  285  315  345  375  405  435  465  495  525  555  585  615  645  675  705  735  765  795  825  855  885
 16   46   76  106  136  166  196  226  256  286  316  346  376  406  436  466  496  526  556  586  616  646  676  706  736  766  796  826  856  886
 17   47   77  107  137  167  197  227  257  287  317  347  377  407  437  467  497  527  557  587  617  647  677  707  737  767  797  827  857  887
 18   48   78  108  138  168  198  228  258  288  318  348  378  408  438  468  498  528  558  588  618  648  678  708  738  768  798  828  858  888
 19   49   79  109  139  169  199  229  259  289  319  349  379  409  439  469  499  529  559  589  619  649  679  709  739  769  799  829  859  889
 20   50   80  110  140  170  200  230  260  290  320  350  380  410  440  470  500  530  560  590  620  650  680  710  740  770  800  830  860  890
 21   51   81  111  141  171  201  231  261  291  321  351  381  411  441  471  501  531  561  591  621  651  681  711  741  771  801  831  861  891
 22   52   82  112  142  172  202  232  262  292  322  352  382  412  442  472  502  532  562  592  622  652  682  712  742  772  802  832  862  892
 23   53   83  113  143  173  203  233  263  293  323  353  383  413  443  473  503  533  563  593  623  653  683  713  743  773  803  833  863  893
 24   54   84  114  144  174  204  234  264  294  324  354  384  414  444  474  504  534  564  594  624  654  684  714  744  774  804  834  864  894
 25   55   85  115  145  175  205  235  265  295  325  355  385  415  445  475  505  535  565  595  625  655  685  715  745  775  805  835  865  895
 26   56   86  116  146  176  206  236  266  296  326  356  386  416  446  476  506  536  566  596  626  656  686  716  746  776  806  836  866  896
 27   57   87  117  147  177  207  237  267  297  327  357  387  417  447  477  507  537  567  597  627  657  687  717  747  777  807  837  867  897
 28   58   88  118  148  178  208  238  268  298  328  358  388  418  448  478  508  538  568  598  628  658  688  718  748  778  808  838  868  898
 29   59   89  119  149  179  209  239  269  299  329  359  389  419  449  479  509  539  569  599  629  659  689  719  749  779  809  839  869  899
Transpose Matrix Time (30 x 30) = 193 milliseconds
```

рис.14 Матрица после транспонирования размера 30x30 и замер времени выполнения операции.

Анализ результатов программы

Таблица результатов для разной размерности матрицы:

	Транспонирование	Умножение матрицы на вект
матрица 10x10	30	8
матрица 20x20	75	10
матрица 25x25	122	31
матрица 30x30	193	14

Рис.15 Таблица результатов транспонирования и умножения матрицы на вектор.

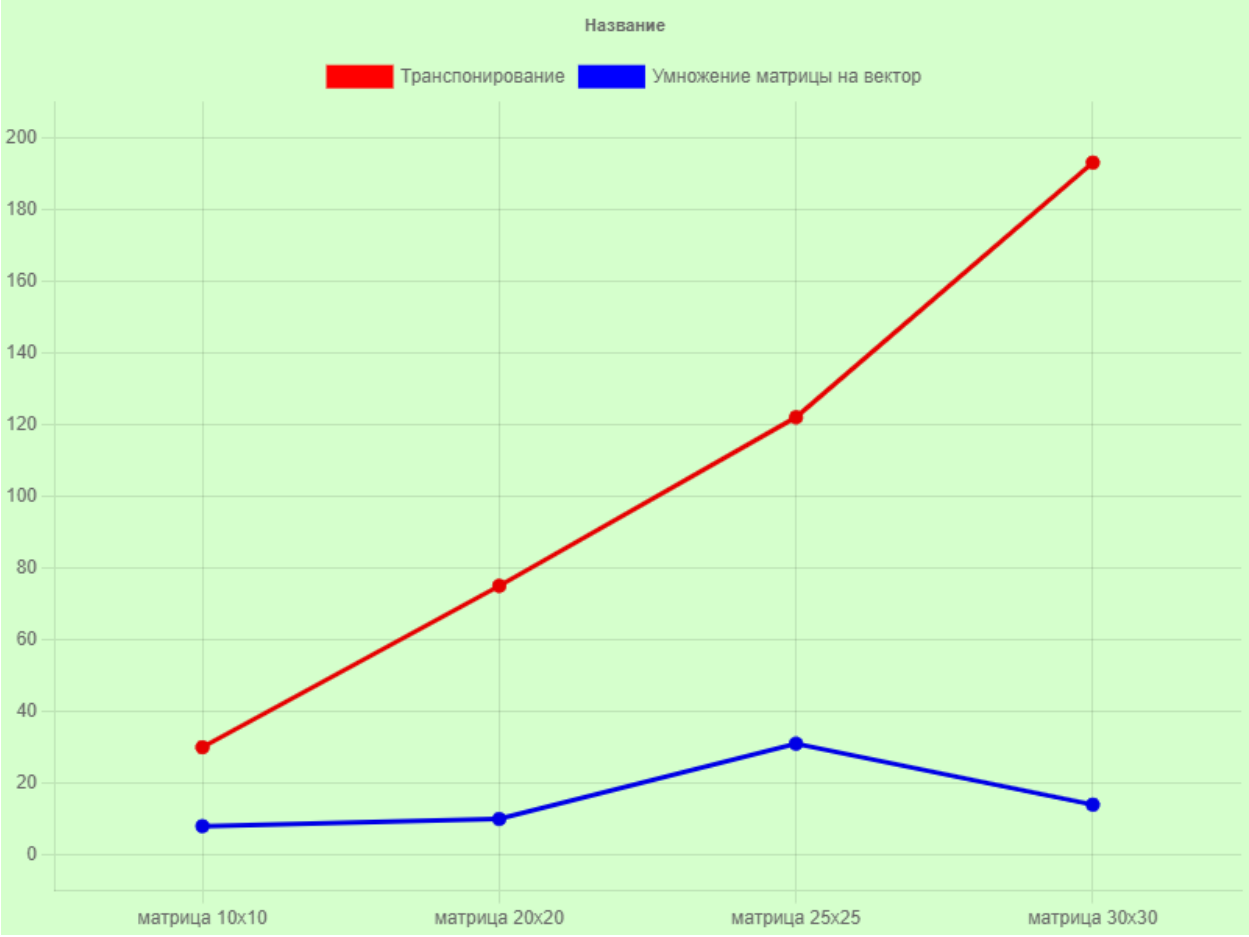


рис.16 Сравнение результатов транспонирования и умножения.

Результаты показывают, что использование вычислительных шейдеров OpenGL помогают значительно ускорить выполнение операций с матрицами на GPU.

В целом использование специализированных библиотек таких как OpenGL, может значительно упростить и ускорить разработку и выполнение с матрицами на GPU. При выборе инструментов для работы с матрицами стоит учитывать размеры матриц и тип операций, которые нужно выполнить.

Листинг программы

transpose.comp

```
#version 430


layout (local_size_x = 30, local_size_y = 30) in;

layout (std430, binding = 0) buffer InBuffer { float matrixA[];};

layout (std430, binding = 1) buffer OutBuffer {float matrixB[];};


void main()

{

    uint glindex = gl_GlobalInvocationID.y * gl_WorkGroupSize.x +
gl_GlobalInvocationID.x;


    uint lengthLine = 30;

    uint i = glindex / lengthLine;

    uint j = glindex % lengthLine;


    uint newIndex = j * lengthLine + i;

    matrixB[newIndex] = matrixA[glindex];

}
```

multiply.comp

```
#version 430

layout (local_size_x = 30, local_size_y = 30) in;

layout (std430, binding = 0) buffer MatrixBuffer {
    float matrix[];
};

layout (std430, binding = 1) buffer VectorBuffer {
    float vector[];
};

layout (std430, binding = 2) buffer ResultBuffer {
    float result[];
};

uniform uint matrixRows;
uniform uint matrixColumns;

void main() {
    uint globalIndex = gl_GlobalInvocationID.y * gl_WorkGroupSize.x + 
gl_GlobalInvocationID.x;

    uint rowIndex = globalIndex / matrixColumns;

    float dotProduct = 0.0;
    for (uint i = 0; i < matrixColumns; i++) {
        float matrixValue = matrix[rowIndex * matrixColumns + i];
        float vectorValue = vector[i];
        dotProduct += matrixValue * vectorValue;
    }

    result[rowIndex] = dotProduct;
}
```

Main.cpp

```
#include <GL/glew.h>
#include <cstdlib>
#include <iostream>
#include <sstream>
#include <fstream>
#include <vector>
#include <ctime>
#include <GLFW/glfw3.h>
#include <GL/gl.h>
#include <chrono>
#include <iomanip>
using namespace std;

chrono::high_resolution_clock::time_point wtime() {
	return chrono::high_resolution_clock::now();
}

void errorCallback(int error, const char* description) {
	cerr << "GLFW ERROR " << error << ": " << description << endl;
}

class GPUAlgorithm
{
protected:
	const char* shaderString;
	GLuint shader;
	GLint compileTrue;
	GLuint program;
	GLuint N;
	double time;
	GLuint matrixBuffer;
	GLuint vectorBuffer;
	GLuint resultBuffer;
public:
```

```
void SetSize(GLuint N)
{
	this->N = N;
}
void CreateProgramm()
{
	program = glCreateProgram();
	glAttachShader(program, shader);
	glLinkProgram(program);
}
void InitMatrix(vector<float>& matrix)
{
	for (GLuint i = 0; i < N * N; i++) {
		matrix.push_back(i);
	}
}
void InitVector(vector<float>& vector)
{
	for (GLuint i = 0; i < N; i++) {
		vector.push_back(i);
	}
}
void PrintMatrix(vector<float>& matrix)
{
	cout << "--MATRIX--\n";
	for (int i = 0; i < N * N; ++i) {
		cout << setw(4) << matrix[i] << ' ';
		if (i > 0 && i % N == N - 1) cout << endl;
	}
}
void PrintVector(vector<float>& vector)
{
	cout << "\n--VECTOR--\n";
	for (int i = 0; i < N; ++i) {
		cout << vector[i] << ' ';
```

```
            }
            cout << endl;
      }
      double GetTime()
      {
            return time;
      }
};
class Transposing: public GPUAlgorithm
{
private:
public:
      Transposing()
      {
            ifstream shaderFiles("transpose.comp");
            string shaderFile((istreambuf_iterator<char>(shaderFiles)),
istreambuf_iterator<char>());
            shaderString = shaderFile.c_str();
            shader = glCreateShader(GL_COMPUTE_SHADER);
            glShaderSource(shader, 1, &shaderString, nullptr);
            glCompileShader(shader)

;
            glGetShaderiv(shader, GL_COMPILE_STATUS, &compileTrue);

            if (!compileTrue)
            {
                  cout << "Transposing Shader ERROR" << endl;
                  glDeleteShader(shader);
            }
            CreateProgramm();
      }
      void GetResult()
      {
            float* resultData = new float[N * N];
```

```
            glBindBuffer(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, resultBuffer);
            glGetBufferSubData(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, 0, N * N *
sizeof(float), resultData);

            cout << "--RESULT--\n";
            for (int i = 0; i < N * N; ++i) {
                  cout << setw(4) << resultData[i] << ' ';
                  if (i > 0 && i % N == N - 1) cout << endl;
            }

            delete[] resultData;
      }
      void Transpose()
      {
            vector<float> matrixA;
            InitMatrix(matrixA);
            PrintMatrix(matrixA);
            cout << endl;

            chrono::high_resolution_clock::time_point start = wtime();

            GLuint matrixBufferBinding = 0;
            GLuint resultBufferBinding = 1;

            glGenBuffers(1, &matrixBuffer);
            glBindBuffer(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, matrixBuffer);
            glBufferData(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, N * N * sizeof(float),
matrixA.data(), GL_DYNAMIC_COPY);
            glBindBufferBase(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, 0, matrixBuffer);

            glGenBuffers(1, &resultBuffer);
            glBindBuffer(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, resultBuffer);
            glBufferData(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, N * N * sizeof(float),
nullptr, GL_DYNAMIC_COPY);
            glBindBufferBase(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, 1, resultBuffer);
            glUseProgram(program);
```

```
            glDispatchCompute(1, 1, 1);
            glMemoryBarrier(GL_SHADER_STORAGE_BARRIER_BIT);
            GetResult();

            glDeleteBuffers(1, &matrixBuffer);
            glDeleteBuffers(1, &vectorBuffer);
            glDeleteBuffers(1, &resultBuffer);

            chrono::high_resolution_clock::time_point end = wtime();
            chrono::milliseconds timer =
std::chrono::duration_cast<chrono::milliseconds>(end - start);
            time = timer.count();

            glDeleteProgram(program);
            glDeleteShader(shader);
      }
};
class Multiplication : public GPUAlgorithm
{
private:
public:
      Multiplication()
      {
            ifstream shaderFiles("multiply.comp");
            string shaderFile((istreambuf_iterator<char>(shaderFiles)),
istreambuf_iterator<char>());
            shaderString = shaderFile.c_str();
            shader = glCreateShader(GL_COMPUTE_SHADER);
            glShaderSource(shader, 1, &shaderString, nullptr);
            glCompileShader(shader);
            glGetShaderiv(shader, GL_COMPILE_STATUS, &compileTrue);

            if (!compileTrue)
            {
                  cout << "Multiplication Shader ERROR" << endl;
                  glDeleteShader(shader);
```

```
		}
		CreateProgramm();
	}
	void GetResult()
	{
		float* resultData = new float[N];
		glBindBuffer(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, resultBuffer);
		glGetBufferSubData(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, 0, N * sizeof(float),
resultData);

		cout << "--RESULT--\n";
		for (int i = 0; i < N; i++) {
			cout << resultData[i] << " ";
		}
		delete[] resultData;
	}
	void Multiply()
	{
		vector<float> matrix;
		vector<float> vector;



		InitMatrix(matrix);


		InitVector(vector);


		PrintMatrix(matrix);
		PrintVector(vector);
		cout << endl;


		chrono::high_resolution_clock::time_point start = wtime();


		GLuint matrixBufferBinding = 0;
		GLuint vectorBufferBinding = 1;
		GLuint resultBufferBinding = 2;
```

```
            glGenBuffers(1, &matrixBuffer);
            glBindBuffer(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, matrixBuffer);
            glBufferData(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, N * N * sizeof(float),
matrix.data(), GL_DYNAMIC_COPY);
            glBindBufferBase(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, 0, matrixBuffer);


            glGenBuffers(1, &vectorBuffer);
            glBindBuffer(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, vectorBuffer);
            glBufferData(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, N * sizeof(float),
vector.data(), GL_DYNAMIC_COPY);
            glBindBufferBase(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, 1, vectorBuffer);


            glGenBuffers(1, &resultBuffer);
            glBindBuffer(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, resultBuffer);
            glBufferData(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, N * N * sizeof(float),
nullptr, GL_DYNAMIC_COPY);
            glBindBufferBase(GL_SHADER_STORAGE_BUFFER, 2, resultBuffer);




            GLuint matrixRowsLocation = glGetUniformLocation(program,
"matrixRows");
            GLuint matrixColumnsLocation = glGetUniformLocation(program,
"matrixColumns");


            glUseProgram(program);
            glUniform1ui(matrixRowsLocation, N);
            glUniform1ui(matrixColumnsLocation, N);


            glDispatchCompute(N, N, 1);


            glMemoryBarrier(GL_SHADER_STORAGE_BARRIER_BIT);


            GetResult();


            glDeleteBuffers(1, &matrixBuffer);
```

```
            glDeleteBuffers(1, &vectorBuffer);
            glDeleteBuffers(1, &resultBuffer);

            chrono::high_resolution_clock::time_point end = wtime();
            chrono::milliseconds timer =
std::chrono::duration_cast<chrono::milliseconds>(end - start);
            time = timer.count();

            glDeleteProgram(program);
            glDeleteShader(shader);
      }
};
class Controller
{
private:
      GLFWwindow* window;
      GLuint size = 30;
      GLuint w = 600;
      GLuint h = 600;
public:
      Controller()
      {
            InitGLFW();
            glewInit();
            glViewport(0, 0, w, h);
      }
      void InitGLFW()
      {
            glfwSetErrorCallback(errorCallback);
            glfwInit();
            glfwWindowHint(GLFW_CONTEXT_VERSION_MAJOR, 4);
            glfwWindowHint(GLFW_CONTEXT_VERSION_MINOR, 3);
            glfwWindowHint(GLFW_OPENGL_PROFILE, GLFW_OPENGL_CORE_PROFILE);
            glfwWindowHint(GLFW_RESIZABLE, GL_FALSE);
            window = glfwCreateWindow(w, h, "OpenGL", nullptr, nullptr);
```

```
            glfwMakeContextCurrent(window);
            glewExperimental = GL_TRUE;
      }
      void Compute()
      {
            Multiplication multiplicationObject;
            multiplicationObject.SetSize(size);
            multiplicationObject.Multiply();
            cout << "\nMultiply Time (30 x 30) = " <<
multiplicationObject.GetTime() << " milliseconds" << endl;

            Transposing transposingObject;
            transposingObject.SetSize(size);
            transposingObject.Transpose();
            cout << "\Transpose Matrix Time (30 x 30) = " <<
transposingObject.GetTime() << " milliseconds" << endl;

            glfwTerminate();
      }
};

int main()
{
      Controller contoller;
      contoller.Compute();
      return 0;
}
```