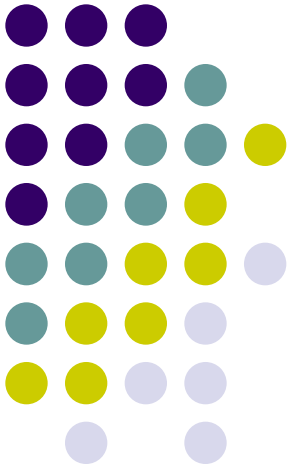
Многопоточное программирование в OpenMP

Киреев Сергей
ИВМиМГ



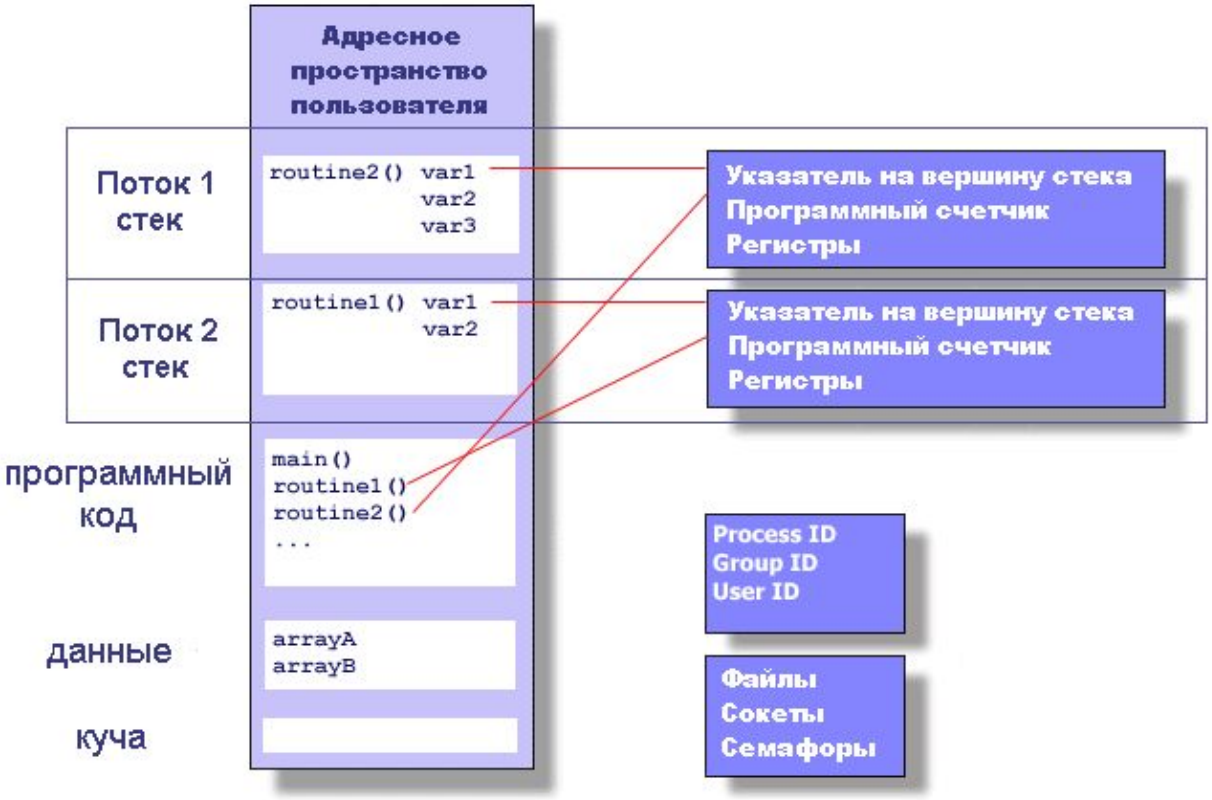
Процессы и потоки

Процесс – это среда выполнения задачи (программы).

Процесс создаётся ОС и содержит информацию о программных ресурсах и текущем состоянии выполнения программы.

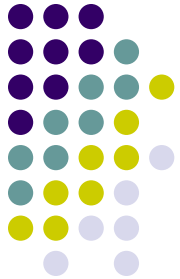
Процессы и потоки

Поток – это «облегченный процесс».

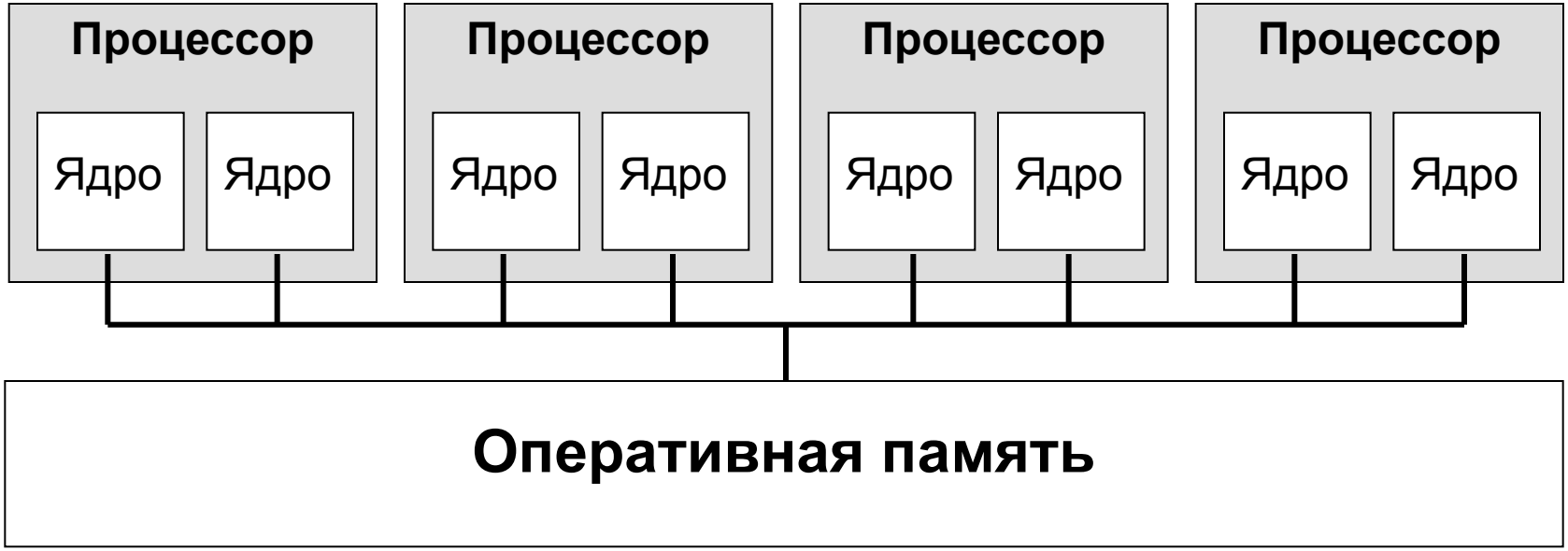


- Создается в рамках процесса,
- Имеет свой поток управления,
- Разделяет ресурсы процесса-родителя с другими потоками,
- Погибает, если погибает родительский процесс.

Многопоточное программирование

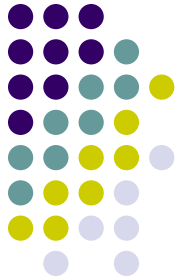


- Используется для создания параллельных программ для систем с общей памятью



- И для других целей…

OpenMP – это…



- Стандарт интерфейса для многопоточного программирования над общей памятью

- Набор средств для языков C/C++ и Fortran:
  - Директивы компилятора

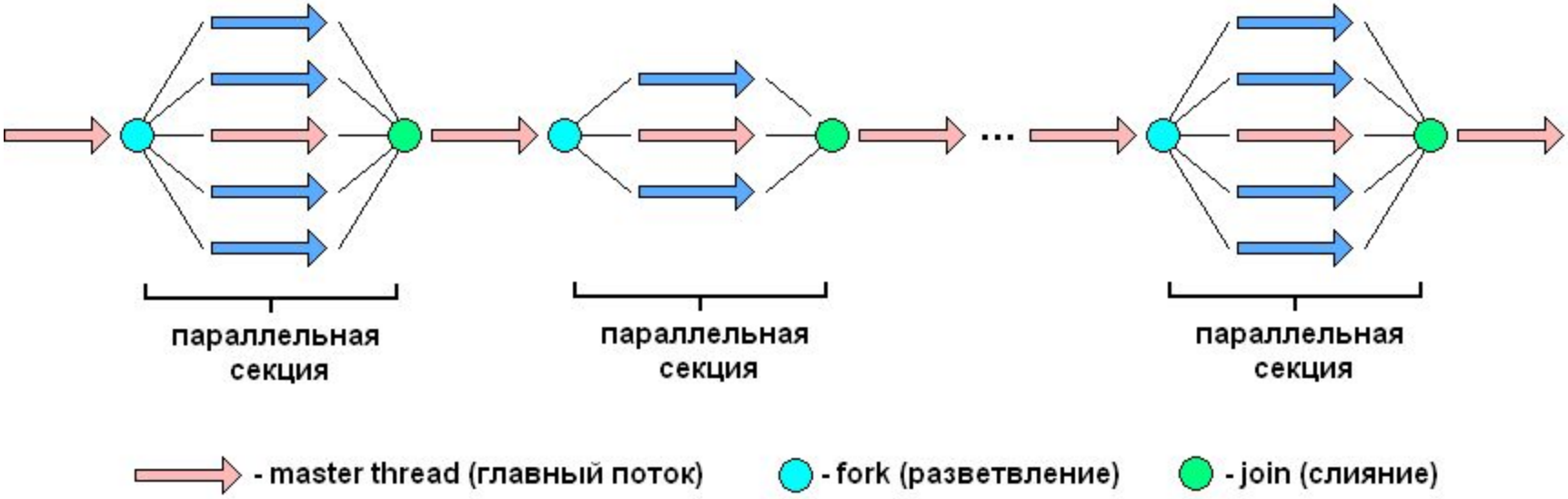
    #pragma omp …
  - Библиотечные подпрограммы

    get_num_threads()
  - Переменные окружения

    OMP_NUM_THREADS

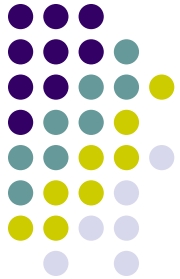
Модель программирования

- Fork-join параллелизм



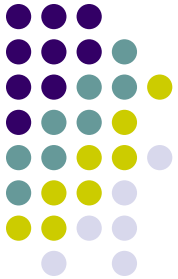
- Явное указание параллельных секций
- Поддержка вложенного параллелизма
- Поддержка динамических потоков

Пример:
Объявление параллельной секции



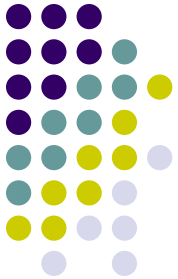
```
#include <omp.h>
int main()
{
  // последовательный код
  #pragma omp parallel
  {
    // параллельный код
  }
  // последовательный код

  return 0;
}
```

Пример:
Hello, World!



```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{
  printf("Hello, World!\n");
  #pragma omp parallel
  { int i,n;
    i = omp_get_thread_num();
    n = omp_get_num_threads();
    printf("I'm thread %d of %d\n",i,n);
  }
  return 0;
}
```

Задание числа потоков



- Переменная окружения OMP_NUM_THREADS

```
>env OMP_NUM_THREADS=4 ./a.out
```

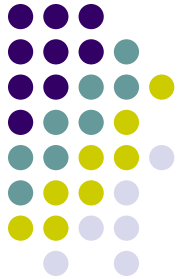
- Функция omp_set_num_threads(int)

```
omp_set_num_threads(4);
#pragma omp parallel
{ . . .
}
```

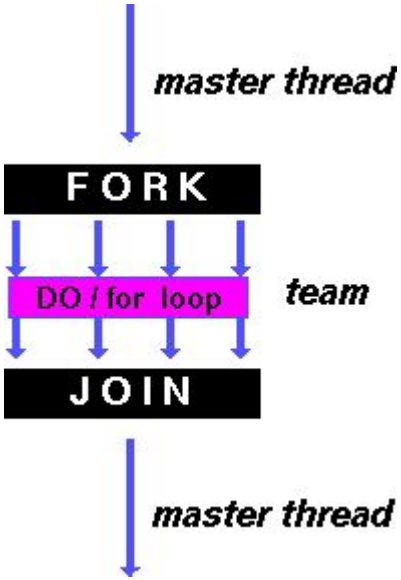
- Параметр num_threads

```
#pragma omp parallel num_threads(4)
{ . . .
}
```

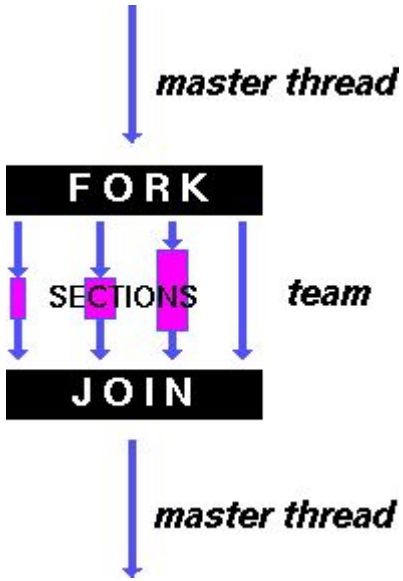
Способы разделения работы между потоками



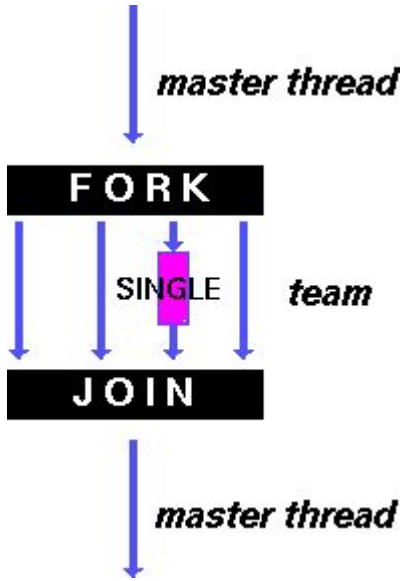
```
#pragma omp for
  for (i=0;i<N;i++)
  {
    // code
  }
```



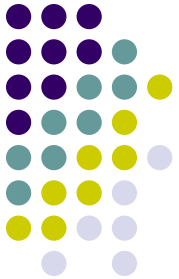

```
#pragma omp sections
{
 #pragma omp section
 // code 1
 #pragma omp section
 // code 2
}
```




```
#pragma omp single
{
   // code
}
```

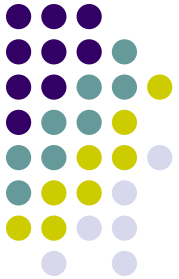


Пример:
Директива omp for



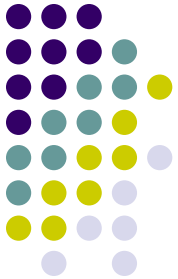
```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{ int i;
  #pragma omp parallel
  {
    #pragma omp for
    for (i=0;i<1000;i++)
      printf("%d ",i);
  }
  return 0;
}
```

Пример:
Директива omp for



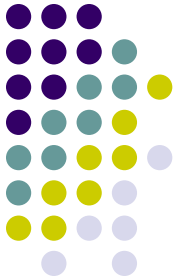
```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{ int i;

  #pragma omp parallel for
    for (i=0;i<1000;i++)
      printf("%d ",i);

  return 0;
}
```

Пример:
Директива omp sections



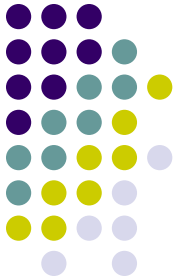
```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{ int i;
  #pragma omp parallel sections private(i)
  {
    #pragma omp section
      printf("1st half\n");
      for (i=0;i<500;i++) printf("%d ");
    #pragma omp section
      printf("2nd half\n");
      for (i=501;i<1000;i++) printf("%d ");
  }
  return 0;
}
```

Пример:
Директива omp single



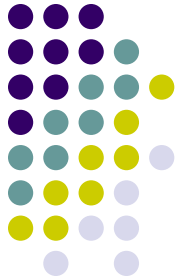
```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{ int i;
  #pragma omp parallel private(i)
  {
    #pragma omp for
      for (i=0;i<1000;i++) printf("%d ");
    #pragma omp single
      printf("I'm thread %d!\n",get_thread_num());
    #pragma omp for
      for (i=0;i<1000;i++) printf("%d ");
  }
  return 0;
}
```

Пример:
Директива omp master



```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{ int i;
  #pragma omp parallel private(i)
  {
    #pragma omp for
      for (i=0;i<1000;i++) printf("%d ");
    #pragma omp master
      printf("I'm Master!\n")
    #pragma omp for
      for (i=0;i<1000;i++) printf("%d ");
  }
  return 0;
}
```

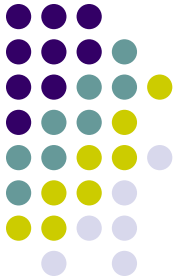
Способы разделения работы между потоками



- Параллельное исполнение цикла for

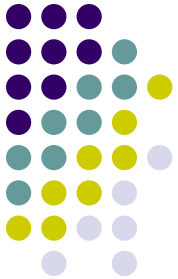
  #pragma omp for *параметры:*
  - schedule - распределения итераций цикла между потоками
    - schedule(static,n) – статическое распределение
    - schedule(dynamic,n) – динамическое распределение
    - schedule(guided,n) – управляемое распределение
    - schedule(runtime) – определяется OMP_SCHEDULE
  - nowait – отключение синхронизации в конце цикла
  - ordered – выполнение итераций в последовательном порядке
  - Параметры области видимости переменных…

Пример:
Директива omp for



```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{ int i;

  #pragma omp parallel private(i)
  {
    #pragma omp for schedule(static,10) nowait
      for (i=0;i<1000;i++) printf("%d ",i);
    #pragma omp for schedule(dynamic,1)
      for (i='a';i<='z';i++) printf("%c ",i);
  }
  return 0;
}
```

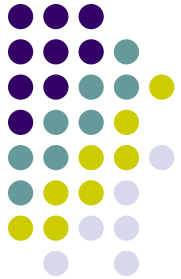
Области видимости переменных



- Переменные, объявленные внутри параллельного блока, являются локальными для потока:

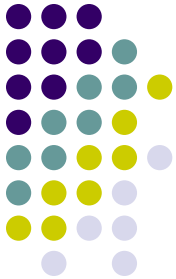
```
#pragma omp parallel
{
  int num;
  num = omp_get_thread_num()
  printf("Поток %d\n",num);
}
```

Области видимости переменных



- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - shared
  - default
  - reduction
  - threadprivate
  - copying

Области видимости переменных

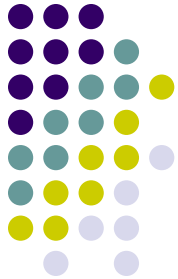


- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - **private**
  - firstprivate
  - lastprivate
  - shared
  - default
  - reduction
  - threadprivate
  - copying

Своя локальная переменная в каждом потоке

```
int num;
#pragma omp parallel private(num)
{
  num=omp_get_thread_num()
  printf("%d\n",num);
}
```

Области видимости переменных



- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - **firstprivate**
  - lastprivate
  - shared
  - default
  - reduction
  - threadprivate
  - copying

Локальная переменная с инициализацией

```
int num=5;
#pragma omp parallel \
                firstprivate(num)
{
  printf("%d\n",num);
}
```

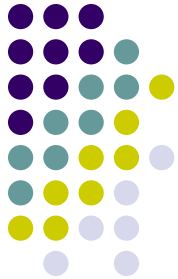
Области видимости переменных

- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - firstprivate
  - **lastprivate**
  - shared
  - default
  - reduction
  - threadprivate
  - copying

Локальная переменная с сохранением последнего значения (в последовательном исполнении)

```
int i,j;
#pragma omp parallel for \
                lastprivate(j)
  for (i=0;i<100;i++) j=i;

printf("Последний j = %d\n",j);
```

Области видимости переменных

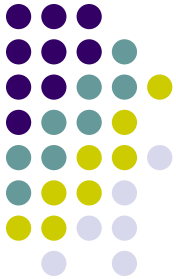


- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - **shared**
  - default
  - reduction
  - threadprivate
  - copying

Разделяемая (общая) переменная

```
int i,j;

#pragma omp parallel for \
                shared(j)
for (i=0;i<100;i++) j=i;

printf("j = %d\n",j);
```

Области видимости переменных

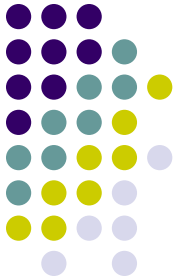


- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - shared
  - **default**
  - reduction
  - threadprivate
  - copying

Задание области видимости не указанных явно переменных

```
int i,k,n=2;
#pragma omp parallel shared(n) \
                default(private)
{
  i = omp_get_thread_num() / n;
  k = omp_get_thread_num() % n;
  printf("%d %d %d\n",i,k,n);
}
```

Области видимости переменных

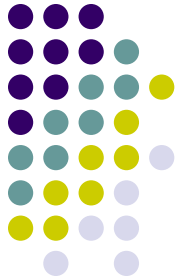


- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - shared
  - default
  - **reduction**
  - threadprivate
  - copying

Переменная для выполнения редукционной операции

```
int i,s=0;
#pragma omp parallel for \
                reduction(+:s)
  for (i=0;i<100;i++)
    s += i;

printf("Sum: %d\n",s);
```

Области видимости переменных

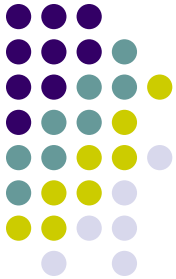


- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - shared
  - default
  - reduction
  - **threadprivate**
  - copying

Объявление глобальных переменных локальными для потоков

```
int x;
#pragma omp threadprivate(x)

int main()
{
   . . .
}
```

Области видимости переменных

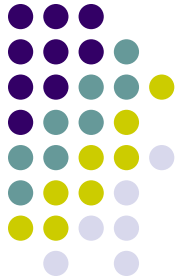


- Переменные, объявленные вне параллельного блока, определяются параметрами директив OpenMP:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - shared
  - default
  - reduction
  - threadprivate
  - **copying**

Объявление глобальных переменных локальными для потоков с инициализацией

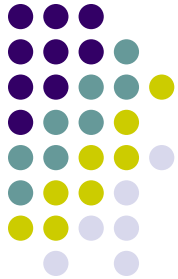
```
int x;
#pragma omp threadprivate(x)
#pragma omp copyin(x)
int main()
{
   . . .
}
```

Синхронизация потоков



- Директивы синхронизации потоков:
  - master
  - critical
  - barrier
  - atomic
  - flush
  - ordered
- Блокировки
  - omp_lock_t

Синхронизация потоков

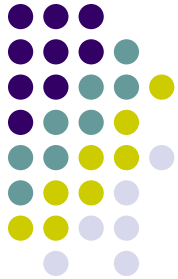


- Директивы синхронизации потоков:
  - **master**
  - critical
  - barrier
  - atomic
  - flush
  - ordered

Выполнение кода только главным потоком

```
#pragma omp parallel
{
   //code
   #pragma omp master
   {
      // critical code
   }
   // code
}
```

Синхронизация потоков

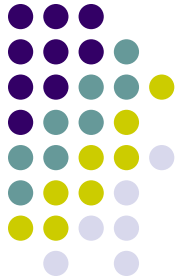


- Директивы синхронизации потоков:
  - master
  - **critical**
  - barrier
  - atomic
  - flush
  - ordered

Критическая секция

```
int x;
x = 0;

#pragma omp parallel
{
  #pragma omp critical
    x = x + 1;
}
```

Синхронизация потоков

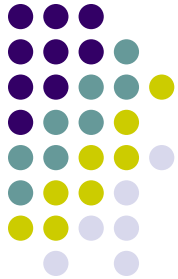


- Директивы синхронизации потоков:
  - master
  - critical
  - **barrier**
  - atomic
  - flush
  - ordered

Барьер

```
int i;

#pragma omp parallel for
  for (i=0;i<1000;i++)
  {
    printf("%d ",i);
    #pragma omp barrier
  }
```

Синхронизация потоков

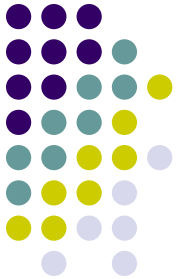


- Директивы синхронизации потоков:
  - master
  - critical
  - barrier
  - **atomic**
  - flush
  - ordered

Атомарная операция

```
int i,index[N],x[M];

#pragma omp parallel for \
                shared(index,x)
  for (i=0;i<N;i++)
  {
    #pragma omp atomic
      x[index[i]] += count(i);
  }
```

Синхронизация потоков

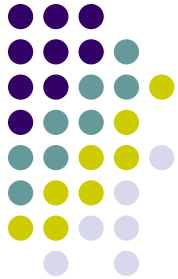


- Директивы синхронизации потоков:
  - master
  - critical
  - barrier
  - atomic
  - **flush**
  - ordered

Согласование значения переменных между потоками

```
int x = 0;
#pragma omp parallel sections \
                        shared(x)
{
  #pragma omp section
  { x=1;
    #pragma omp flush
  }
  #pragma omp section
    while (!x);
}
```

Синхронизация потоков

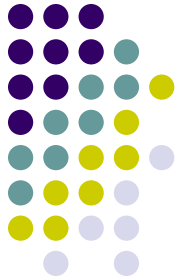


- Директивы синхронизации потоков:
  - master
  - critical
  - barrier
  - atomic
  - flush
  - **ordered**

Выделение упорядоченного блока в цикле

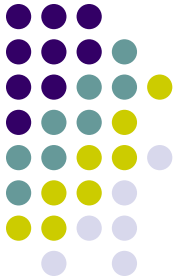
```
int i,j,k;
double x;
#pragma omp parallel for ordered
  for (i=0;i<N;i++)
  {   k = rand(); x = 1.0;
      for (j=0;j<k;j++) x=sin(x);
      printf("No order: %d\n",i);
    #pragma omp ordered
      printf("Order: %d\n",i);
  }
```

Синхронизация потоков



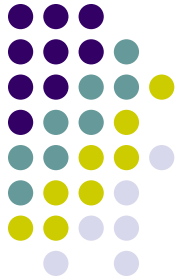
- Блокировки
  - omp_lock_t
    - void omp_init_lock(omp_lock_t *lock)
    - void omp_destroy_lock(omp_lock_t *lock)
    - void omp_set_lock(omp_lock_t *lock)
    - void omp_unset_lock(omp_lock_t *lock)
    - int omp_test_lock(omp_lock_t *lock)
  - omp_nest_lock_t
    - void omp_init_nest_lock(omp_nest_lock_t *lock)
    - void omp_destroy_nest__lock(omp_nest_lock_t *lock)
    - void omp_set_nest__lock(omp_nest_lock_t *lock)
    - void omp_unset_nest__lock(omp_nest_lock_t *lock)
    - int omp_test_nest__lock(omp_nest_lock_t *lock)

Пример: Использование блокировок



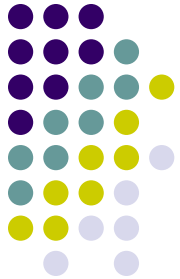
```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <omp.h>
int x[1000];
int main()
{ int i,max;
  omp_lock_t lock;
  omp_init_lock(&lock);
  for (i=0;i<1000;i++) x[i]=rand();
  max = x[0];
  #pragma omp parallel for shared(x,lock)
    for(i=0;i<1000;i++)
    { omp_set_lock(&lock);
      if (x[i]>max) max=x[i];
      omp_set_unlock(&lock);
    }
  omp_destroy_lock(&lock);
  return 0;
}
```

Функции OpenMP



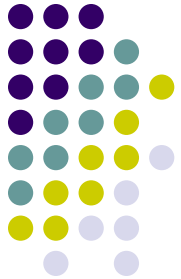
- void omp_set_num_threads(int num_threads)
- int omp_get_num_threads(void)
- int omp_get_max_threads(void)
- int omp_get_thread_num(void)
- int omp_get_num_procs(void)
- int omp_in_parallel(void)
- void omp_set_dynamic(int dynamic_threads)
- int omp_get_dynamic(void)
- void omp_set_nested(int nested)
- int omp_get_nested (void)
- double omp_get_wtick(void)
- Функции работы с блокировками

Порядок создания параллельных программ



1. Написать и отладить последовательную программу
2. Дополнить программу директивами OpenMP
3. Скомпилировать программу компилятором с поддержкой OpenMP
4. Задать переменные окружения
5. Запустить программу

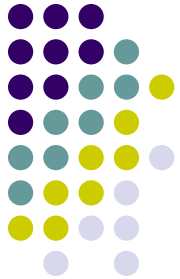
Пример программы: сложение двух векторов



Последовательная программа

```
#define N 1000
double x[N],y[N],z[N];
int main()
{ int i;

  for (i=0;i<N;i++) x[i]=y[i]=i;


  for (i=0;i<N;i++)
    z[i]=x[i]+y[i];
  return 0;
}
```

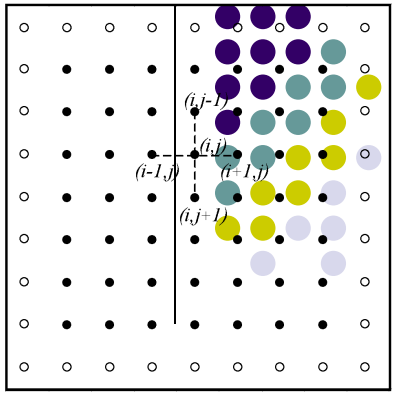
Пример программы: сложение двух векторов



Параллельная программа

```
#include<omp.h>
#define N 1000
double x[N],y[N],z[N];
int main()
{ int i;
  int num;
  for (i=0;i<N;i++) x[i]=y[i]=i;
  num = omp_get_num_threads();
  #pragma omp parallel for schedule(static,N/num)
  for (i=0;i<N;i++)
    z[i]=x[i]+y[i];
  return 0;
}
```

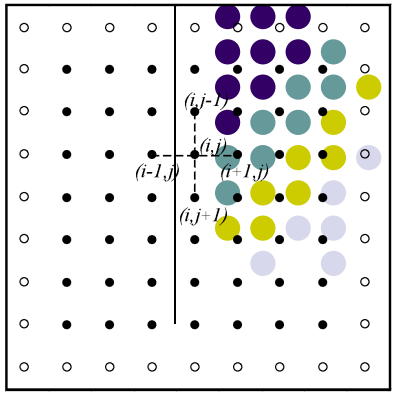
Пример программы: решение краевой задачи



Метод Зейделя

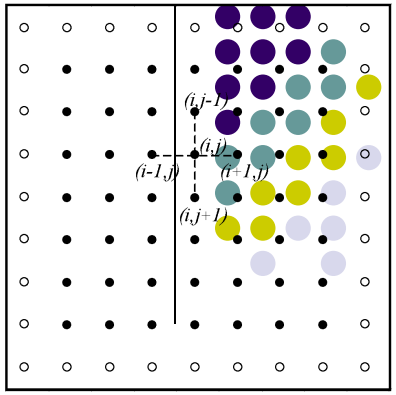
```
do {
  dmax = 0; // максимальное изменение значений u
  for ( i=1; i<N+1; i++ )
    for ( j=1; j<N+1; j++ ) {
      temp = u[i][j];
      u[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+u[i+1][j]+
                u[i][j-1]+u[i][j+1]-h*h*f[i][j]);
      dm = fabs(temp-u[i][j]);
      if ( dmax < dm ) dmax = dm;
    }
} while ( dmax > eps );
```

Пример программы: решение краевой задачи




```
omp_lock_t dmax_lock;
omp_init_lock (&dmax_lock);
do {
  dmax = 0; // максимальное изменение значений u
  #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(i,temp,d)
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) {
    #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(j,temp,d)
    for ( j=1; j<N+1; j++ ) {
      temp = u[i][j];
      u[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+u[i+1][j]+
                u[i][j-1]+u[i][j+1]-h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-u[i][j]);
      omp_set_lock(&dmax_lock);
        if ( dmax < d ) dmax = d;
      omp_unset_lock(&dmax_lock);
    } // конец вложенной параллельной области
  } // конец внешней параллельной области
} while ( dmax > eps );
```

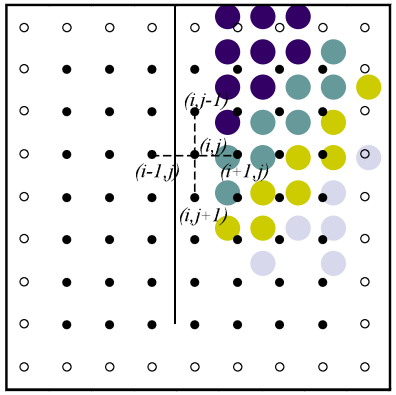
Пример программы: решение краевой задачи




```
omp_lock_t dmax_lock;
omp_init_lock (&dmax_lock);
do {
  dmax = 0; // максимальное изменение значений u
  #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(i,temp,d)
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) {
    #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(j,temp,d)
    for ( j=1; j<N+1; j++ ) {
      temp = u[i][j];
      u[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+u[i+1][j]+
                u[i][j-1]+u[i][j+1]-h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-u[i][j])
      omp_set_lock(&dmax_lock);
        if ( dmax < d ) dmax = d;
      omp_unset_lock(&dmax_lock);
    } // конец вложенной параллельной области
  } // конец внешней параллельной области
} while ( dmax > eps );
```

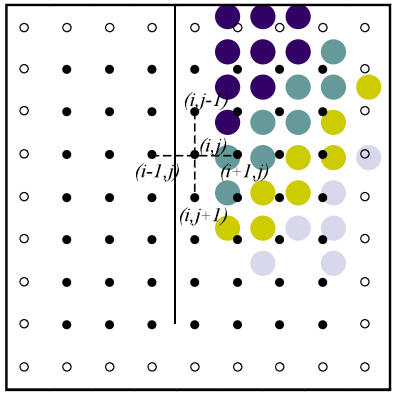
Синхронизация – узкое место

Пример программы: решение краевой задачи



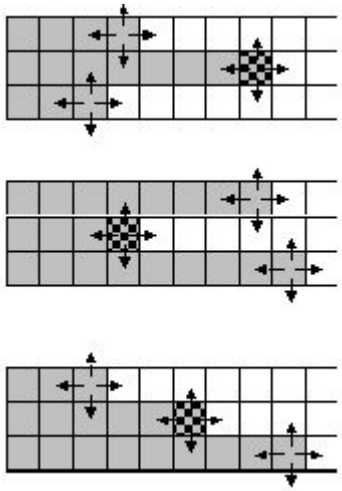

```
omp_lock_t dmax_lock;
omp_init_lock(&dmax_lock);
do {
  dmax = 0; // максимальное изменение значений u
  #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(i,temp,d,dm)
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) {
    dm = 0;
    for ( j=1; j<N+1; j++ ) {
      temp = u[i][j];
      u[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+u[i+1][j]+
                u[i][j-1]+u[i][j+1]-h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-u[i][j])
      if ( dm < d ) dm = d;
    }
    omp_set_lock(&dmax_lock);
      if ( dmax < dm ) dmax = dm;
    omp_unset_lock(&dmax_lock);
    }
  } // конец параллельной области
} while ( dmax > eps );
```

Пример программы: решение краевой задачи

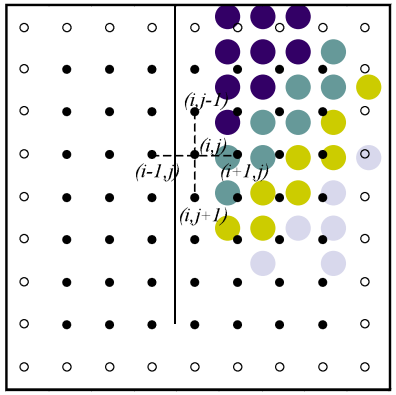



```
omp_lock_t dmax_lock;
omp_init_lock(&dmax_lock);
do {
  dmax = 0; // максимальное изменение значений u
  #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(i,temp,d,dm)
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) {
    dm = 0;
    for ( j=1; j<N+1; j++ ) {
      temp = u[i][j];
      u[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+u[i+1][j]+
                u[i][j-1]+u[i][j+1]-h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-u[i][j])
      if ( dm < d ) dm = d;
    }
    omp_set_lock(&dmax_lock);
      if ( dmax < dm ) dmax = dm;
    omp_unset_lock(&dmax_lock);
    }
  } // конец параллельной области
} while ( dmax > eps );
```

Неоднозначность вычислений

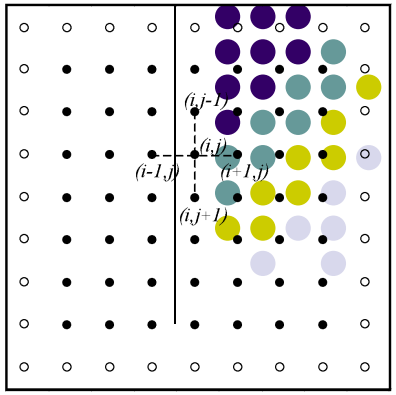


Пример программы: решение краевой задачи




```
omp_lock_t dmax_lock;
omp_init_lock(&dmax_lock);
do {
  dmax = 0; // максимальное изменение значений u
  #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(i,temp,d,dm)
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) {
    dm = 0;
    for ( j=1; j<N+1; j++ ) {
      temp = u[i][j];
      un[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+u[i+1][j]+
                 u[i][j-1]+u[i][j+1]-h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-un[i][j])
      if ( dm < d ) dm = d;
    }
    omp_set_lock(&dmax_lock);
      if ( dmax < dm ) dmax = dm;
    omp_unset_lock(&dmax_lock);
    }
  } // конец параллельной области
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) // обновление данных
    for ( j=1; j<N+1; j++ )
      u[i][j] = un[i][j];
} while ( dmax > eps );
```

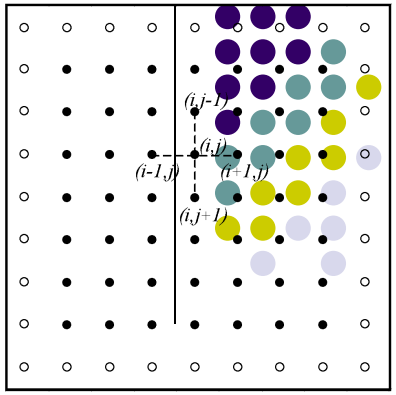
Пример программы: решение краевой задачи



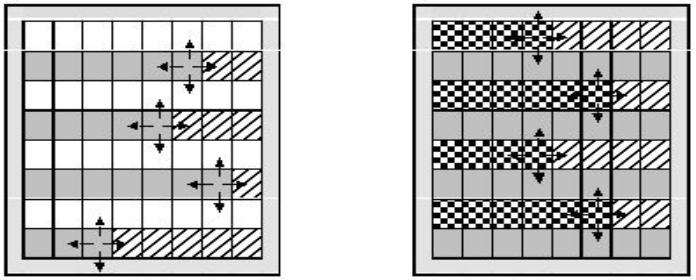

```
omp_lock_t dmax_lock;
omp_init_lock(&dmax_lock);
do {
  dmax = 0; // максимальное изменение значений u
  #pragma omp parallel for shared(u,n,dmax) private(i,temp,d,dm)
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) {
    dm = 0;
    for ( j=1; j<N+1; j++ ) {
      temp = u[i][j];
      un[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+u[i+1][j]+
                 u[i][j-1]+u[i][j+1]-h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-un[i][j]);
      if ( dm < d ) dm = d;
    }
    omp_set_lock(&dmax_lock);
      if ( dmax < dm ) dmax = dm;
    omp_unset_lock(&dmax_lock);
    }
  } // конец параллельной области
  for ( i=1; i<N+1; i++ ) // обновление данных
    for ( j=1; j<N+1; j++ )
      u[i][j] = un[i][j];
} while ( dmax > eps );
```

Получили метод Якоби

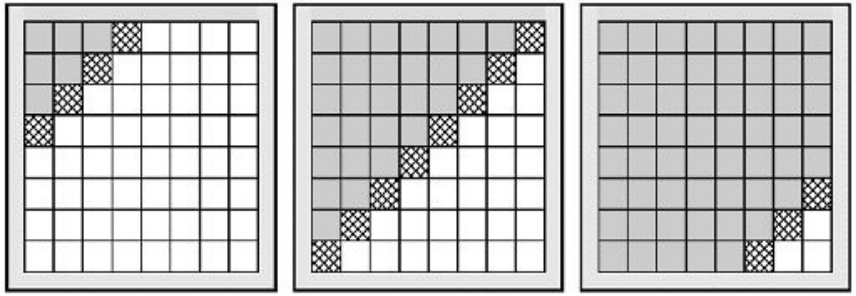
Пример программы: решение краевой задачи



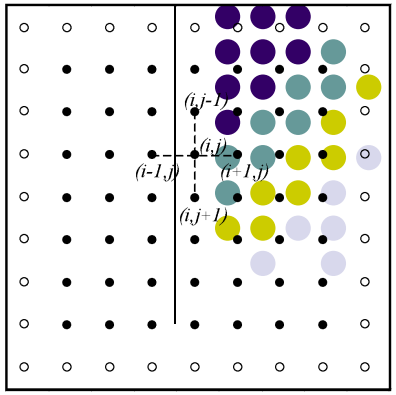
- Другие способы устранения зависимостей
  - Четно-нечетное упорядочивание



  - Волновые схемы



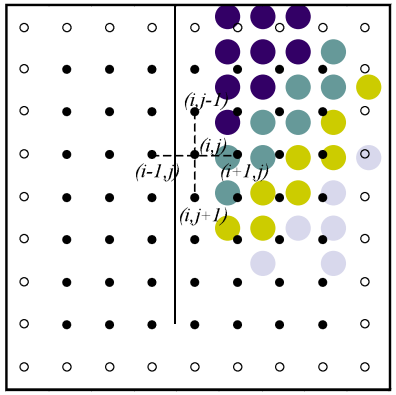
Пример программы: решение краевой задачи



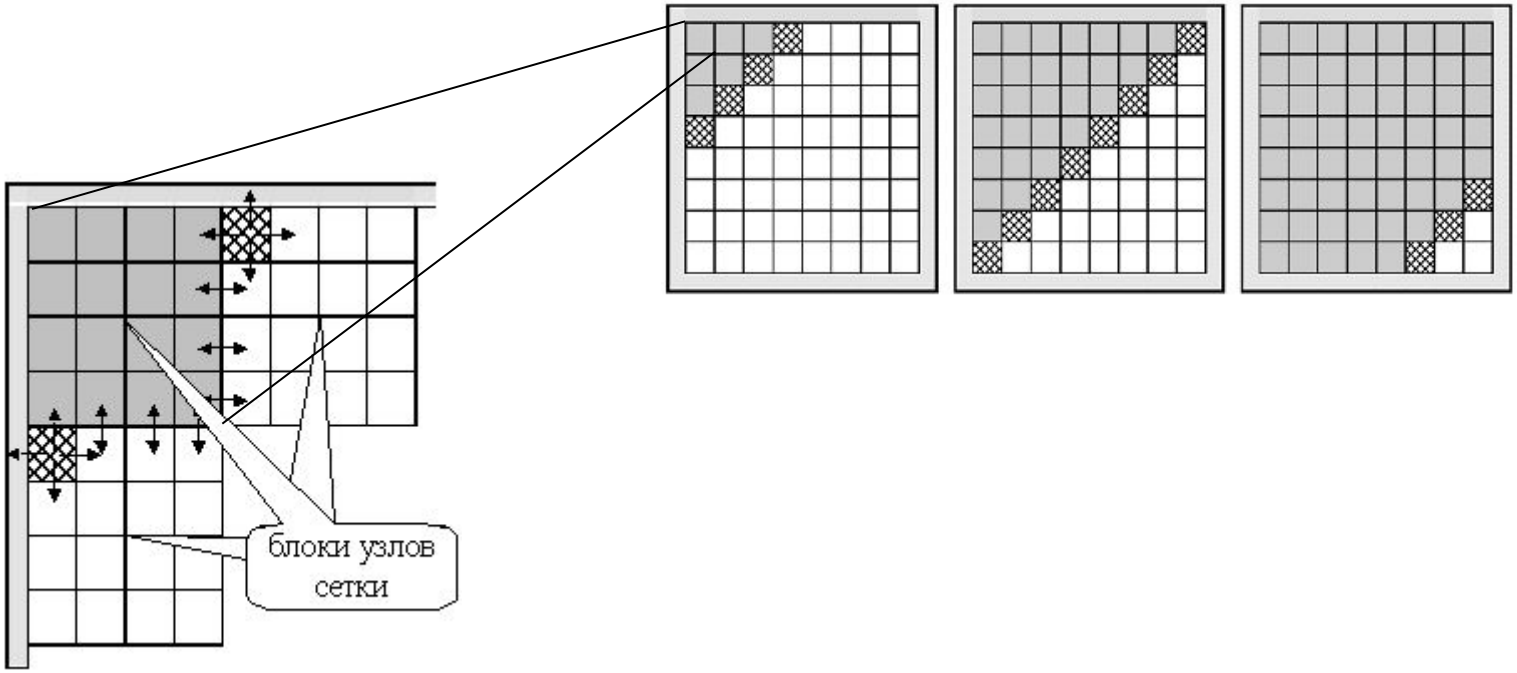
Метод Зейделя: волновая схема

```
omp_lock_t dmax_lock;
omp_init_lock(&dmax_lock);
do {
  // максимальное изменение значений u
  dmax = 0;
  // нарастание волны (nx – размер волны)
  for ( nx=1; nx<N+1; nx++ ) {
    dm[nx] = 0;
    #pragma omp parallel for \
    shared(u,nx,dm)          \
    private(i,j,temp,d)
    for ( i=1; i<nx+1; i++ ) {
      j    = nx + 1 - i;
      temp = u[i][j];
      u[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+
        u[i+1][j]+u[i][j-1]+u[i][j+1]
        -h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-u[i][j]);
      if ( dm[i] < d ) dm[i] = d;
    } // конец параллельной области
  }
  // затухание волны
  for ( nx=N-1; nx>0; nx-- ) {
    #pragma omp parallel for \
    shared(u,nx,dm) private(i,j,temp,d)
    for ( i=N-nx+1; i<N+1; i++ ) {
      j    = 2*N - nx - I + 1;
      temp = u[i][j];
      u[i][j] = 0.25*(u[i-1][j]+
        u[i+1][j]+u[i][j-1]+u[i][j+1]
        -h*h*f[i][j]);
      d = fabs(temp-u[i][j])
      if ( dm[i] < d ) dm[i] = d;
    } // конец параллельной области
  }
  #pragma omp parallel for \
  shared(n,dm,dmax) private(i)
  for ( i=1; i<nx+1; i++ ) {
    omp_set_lock(&dmax_lock);
      if ( dmax < dm[i] ) dmax = dm[i];
    omp_unset_lock(&dmax_lock);
  } // конец параллельной области
} while ( dmax > eps );
```

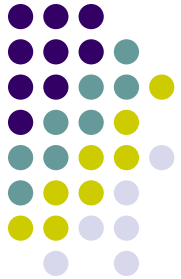
Пример программы: решение краевой задачи



- Волновая схема с разбиением на блоки



Рекомендуемая литература по OpenMP



- http://openmp.org
- http://www.parallel.ru/tech/tech_dev/openmp.html
- https://computing.llnl.gov/tutorials/openMP/