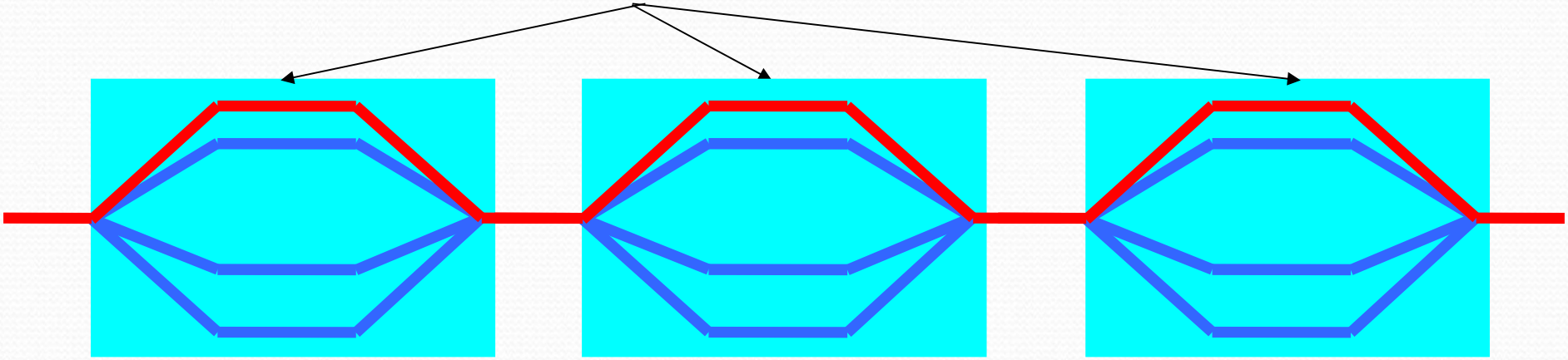
Суперкомпьютеры и параллельная обработка данных

Бахтин Владимир Александрович
к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Института прикладной математики им М.В.Келдыша РАН
кафедра системного программирования
факультет вычислительной математики и кибернетики
Московского университета им. М.В. Ломоносова

Параллельная область (директива parallel)

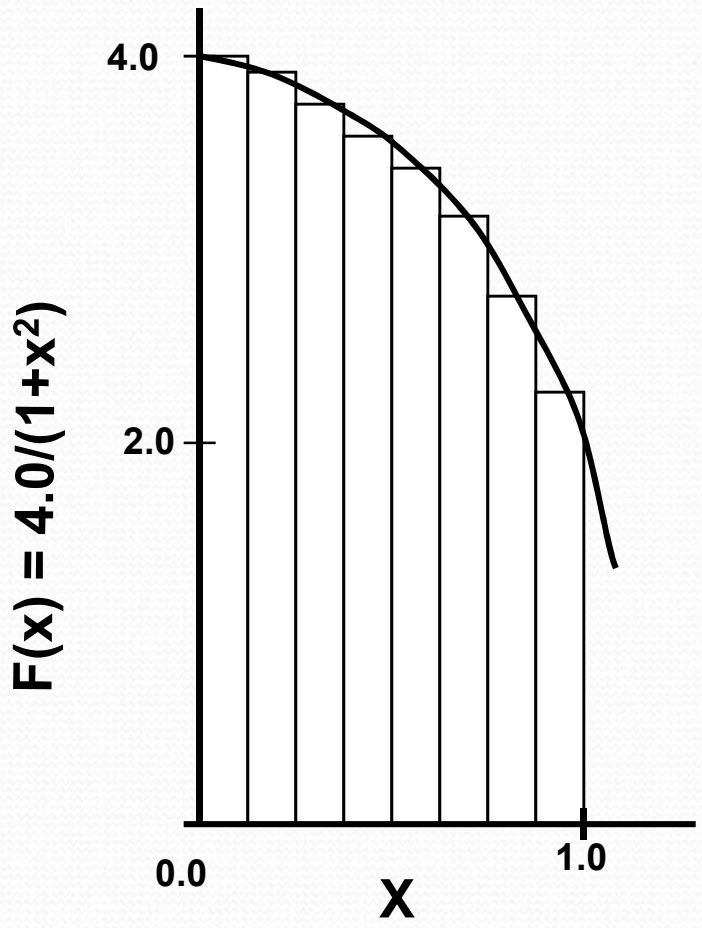


#pragma omp parallel *[клауза[[,] клауза] ...]*
структурный блок

где клауза одна из :

- **default(shared | none)**
- **private(***list***)**
- **firstprivate(***list***)**
- **shared(***list***)**
- **reduction(***operator***: *list***)**
- **if(***scalar-expression***)**
- **num_threads(***integer-expression***)**
- **copyin(***list***)**
- **proc_bind (master | close | spread)** **//OpenMP 4.0**

Вычисление числа π



$$\int_0^1 \frac{4.0}{(1+x^2)} dx = \pi$$

Мы можем аппроксимировать интеграл как сумму прямоугольников:

$$\sum_{i=0}^{N} F(x_i)\Delta x \approx \pi$$

Где каждый прямоугольник имеет ширину Δx и высоту $F(x_i)$ в середине интервала

Вычисление числа π. Последовательная программа

```
#include <stdio.h>
int main ()
{
    int n =100000, i;
    double pi, h, sum, x;
    h   = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
    for (i = 1; i <= n; i ++)
    {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
     }
     pi = h * sum;
     printf("pi is approximately %.16f”, pi);
     return 0;
}
```

Вычисление числа π. Параллельная программа

```
#include <omp.h>
int main ()
{
   int n =100000, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h,sum)
   {
      int id = omp_get_thread_num();
      int numt = omp_get_num_threads();
      for (i = id + 1; i <= n;  i=i+numt) {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
       }
    }
    pi = h * sum;
    printf("pi is approximately %.16f”, pi);
    return 0;
}
```

Конфликт доступа к данным

При взаимодействии через общую память нити должны синхронизовать свое выполнение.

Thread0: sum = sum + val; && Thread1: sum = sum + val;

Время	Thread 0	Thread 1
1	LOAD R1,sum	
2	LOAD R2,val	
3	ADD R1,R2	LOAD R3,sum
4	STORE R1,sum	LOAD R4,val
5		ADD R3,R4
6		STORE R3,sum

Результат зависит от порядка выполнения команд. Требуется взаимное исключение критических интервалов.

Вычисление числа π. Параллельная программа

```
#include <omp.h>
int main ()
{
   int n =100000, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h,sum)
   {
      int id = omp_get_thread_num();
      int numt = omp_get_num_threads();
      for (i = id + 1; i <= n;  i=i+numt) {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            #pragma omp critical
                  sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
       }
    }
    pi = h * sum;
    printf("pi is approximately %.16f", pi);
    return 0;
}
```

Вычисление числа π. Параллельная программа

```
#include <omp.h>
int main ()
{
   int n =100000, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h,sum)
   {
      double local_sum = 0.0;
      int id = omp_get_thread_num();
      int numt = omp_get_num_threads();
      for (i = id + 1; i <= n;  i=i+numt) {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            local_sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
       }
       #pragma omp critical
            sum += local_sum;
    }
    pi = h * sum;
    printf("pi is approximately %.16f", pi);
    return 0;
}
```

Вычисление числа π на OpenMP. Клауза reduction

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main ()
{
   int n =100000, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h) reduction(+:sum)
  {
      int id = omp_get_thread_num();
      int numt = omp_get_num_threads();
      for (i = id + 1; i <= n;  i=i+numt)
      {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
      }
   }
   pi = h * sum;
   printf("pi is approximately %.16f", pi);
   return 0;
}
```

Редукционные операции

reduction(operator:list)

- Внутри паралельной области для каждой переменной из списка list создается копия этой переменной. Эта переменная инициализируется в соответствии с оператором operator (например, 0 для «+»).
- Для каждой нити компилятор заменяет в параллельной области обращения к редукционной переменной на обращения к созданной копии.
- По завершении выполнения параллельной области осуществляется объединение полученных результатов.

Оператор	Начальное значение
+	0
*	1
-	0
&	~0
|	0
^	0
&&	1
||	0
max	Least number in reduction list item type
min	Largest number in reduction list item type

Клауза if

if(*scalar-expression*)

В зависимости от значения *scalar-expression* для выполнения структурного блока будет создана группа нитей или он будет выполняться одной нитью.

```
#include <omp.h>
int main()
{
  int n = 0;
  printf("Enter the number of intervals: (0 quits) ");
  scanf("%d",&n);
#pragma omp parallel if (n>10)
   {
        int id = omp_get_thread_num();
        int numt = omp_get_num_threads();
        for (int i = id + 1; i <= n;  i=i+numt)
            func (i);
   }
   return 0;
}
```

Клауза num_threads

num_threads(*integer-expression)*

integer-expression задает максимально возможное число нитей, которые будут созданы для выполнения структурного блока

```
#include <omp.h>
int main()
{
  int n = 0;
  printf("Enter the number of intervals: (0 quits) ");
  scanf("%d",&n);
#pragma omp parallel num_threads(10)
   {
      int id = omp_get_thread_num ();
      func (n, id);
   }
   return 0;
}
```

Определение числа нитей в параллельной области

Число создаваемых нитей зависит от:

- клаузы if
- клаузы num_threads
- значений переменных, управляющих выполнением OpenMP-программы:
  - dyn-var (включение/отключение режима, в котором количество создаваемых нитей может изменяться динамически: **OMP_DYNAMIC, omp_set_dynamic()**)
  - nthreads-var (максимально возможное число нитей, создаваемых при входе в параллельную область: **OMP_NUM_THREADS, omp_set_num_threads()**)
  - thread-limit-var (максимально возможное число нитей, создаваемых для выполнения всей OpenMP-программы: **OMP_THREAD_LIMIT**)
  - nest-var (включение/отключение режима поддержки вложенного параллелизма:**OMP_NESTED, omp_set_nested()**)
  - max-active-level-var (максимально возможное количество вложенных параллельных областей: **OMP_MAX_ACTIVE_LEVELS, omp_set_max_active_levels()**)

Определение числа нитей в параллельной области

Пусть ***ThreadsBusy*** - *количество* OpenMP нитей, выполняемых в данный момент;

Пусть ***ActiveParRegions*** - *количество активных параллельных областей*;

if в директиве parallel существует клауза **if**

then *присвоить переменной* ***IfClauseValue*** *значение* выражения в клаузе **if**;

else ***IfClauseValue*** **=** ***true*****;**

if в директиве parallel существует клауза **num_threads**

then *присвоить переменной* ***ThreadsRequested*** *значение* выражения в **клаузе num_threads;**

else ***ThreadsRequested*** **=** ***nthreads-var*****;**

ThreadsAvailable **= (*thread-limit-var* - *ThreadsBusy* + 1);**

Определение числа нитей в параллельной области

if (*IfClauseValue* == *false*)
then number of threads = 1;
else if (*ActiveParRegions* >= 1) **and** (*nest-var* == *false*)
then number of threads = 1;
else if (*ActiveParRegions* == *max-active-levels-var*)
then number of threads = 1;
else if (*dyn-var* == *true*) **and** (*ThreadsRequested* <= *ThreadsAvailable*)
then number of threads = [1 : *ThreadsRequested*];
else if (*dyn-var* == *true*) **and** (*ThreadsRequested* > *ThreadsAvailable*)
then number of threads = [1 : *ThreadsAvailable*];
else if (*dyn-var* == *false*) **and** (*ThreadsRequested* <= *ThreadsAvailable*)
then number of threads = *ThreadsRequested*;
else if (*dyn-var* == *false*) **and** (*ThreadsRequested* > *ThreadsAvailable*)
then number of threads зависит от реализации компилятора;

Определение числа нитей в параллельной области

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main (void)
{
    omp_set_nested(1);
    omp_set_max_active_levels(8);
    omp_set_dynamic(0);
    omp_set_num_threads(2);
    #pragma omp parallel
      {
        omp_set_num_threads(3);
        #pragma omp parallel
          {
            …
          }
      }
}
```

Клауза copyin

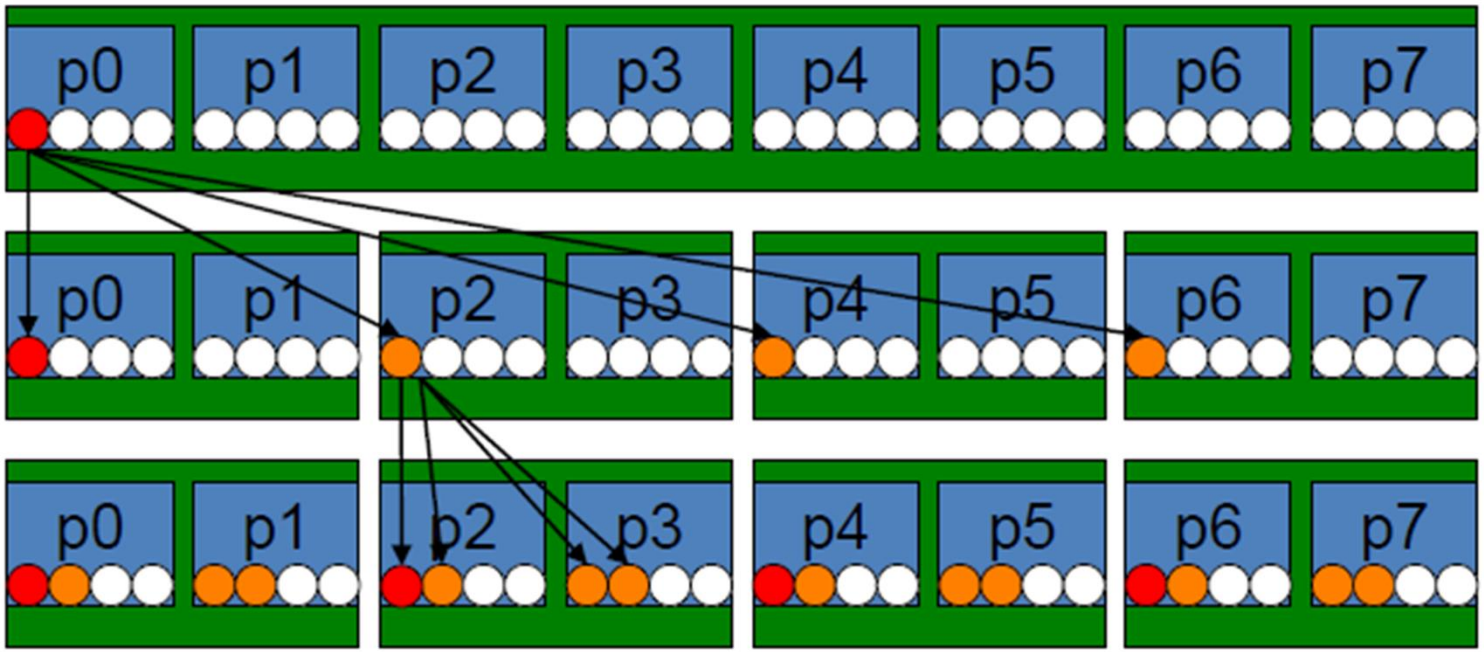
copyin(list)

Значение каждой threadprivate-переменной из списка list, устанавливается равным значению этой переменной в master-нити

```
float* work;
int size;
float val;
#pragma omp threadprivate(work,size,val)
void compute()
{
  work = (float*)malloc( sizeof(float)*size);
  for(int i = 0; i < size; ++i ) work[i] = val;
  … // computation with work array elements
}
int main()
{
   printf("Enter the size of array and value\n");
   scanf("%d",&size);
   scanf("%f",&val);
   #pragma omp parallel copyin(val,size)
       compute();
}
```

Клауза proc_bind (OpenMP 4.0)

```
#pragma omp parallel proc_bind(spread) num_threads(4)
 {
   #pragma omp parallel proc_bind(close) num_threads(4)
         work();
 }
```

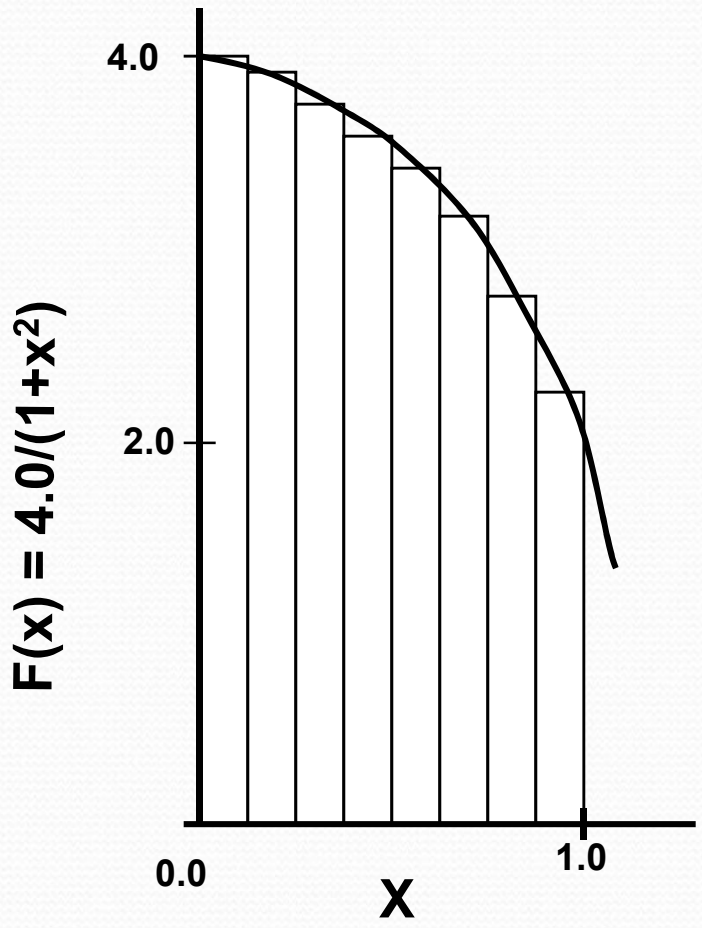


Содержание

Конструкции распределения работы

- Распределение витков циклов (директива for)
- Циклы с зависимостью по данным. Организация конвейерного выполнения для циклов с зависимостью по данным.
- Распределение нескольких структурных блоков между нитями (директива SECTION).
- Выполнение структурного блока одной нитью (директива single)
- Распределение операторов одного структурного блока между нитями (директива WORKSHARE)
- Понятие задачи

Вычисление числа π



$$\int_0^1 \frac{4.0}{(1+x^2)} dx = \pi$$

Мы можем аппроксимировать интеграл как сумму прямоугольников:

$$\sum_{i=0}^{N} F(x_i)\Delta x \approx \pi$$

Где каждый прямоугольник имеет ширину Δx и высоту $F(x_i)$ в середине интервала

Вычисление числа π на OpenMP

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main ()
{
   int n =100000, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h) reduction(+:sum)
  {
      int id = omp_get_thread_num();
      int numt = omp_get_num_threads();
      for (i = id + 1; i <= n;  i=i+numt)
      {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
      }
   }
   pi = h * sum;
   printf("pi is approximately %.16f", pi);
   return 0;
}
```

Вычисление числа π на OpenMP

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main ()
{
   int n =100000, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h) reduction(+:sum)
  {
   #pragma omp for schedule (static,1)
   for (i = 1; i <= n;  i++)
     {
          x = h * ((double)i - 0.5);
          sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
     }
   }
   pi = h * sum;
   printf("pi is approximately %.16f”, pi);
   return 0;
}
```

Вычисление числа π на OpenMP

```
int main ()
{
   int n =100000, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h) reduction(+:sum)
   {
      int iam = omp_get_thread_num();
      int numt = omp_get_num_threads();
      int start = iam * n / numt + 1;
      int end = (iam + 1) * n / numt;
      if (iam == numt-1) end = n;
      for (i = start; i <= end;  i++)
      {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
       }
    }
    pi = h * sum;
    printf("pi is approximately %.16f", pi);
    return 0;
}
```

Вычисление числа π на OpenMP

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main ()
{
   int n =100, i;
   double pi, h, sum, x;
   h   = 1.0 / (double) n;
   sum = 0.0;
#pragma omp parallel default (none) private (i,x) shared (n,h) reduction(+:sum)
   {
      #pragma omp for schedule (static)
      for (i = 1; i <= n;  i++)
       {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
       }
    }
    pi = h * sum;
    printf("pi is approximately %.16f", pi);
    return 0;
}
```

Распределение витков цикла

#pragma omp for *[клауза[[,]клауза] ...]*
for (*init-expr***;** *test-expr***;** *incr-expr***)** *структурный блок*

где клауза одна из :

- **private(***list***)**
- **firstprivate(***list***)**
- **lastprivate(***list***)**
- **reduction(***operator***:** *list***)**
- **schedule(***kind[, chunk_size]***)**
- **collapse(***n***)**
- **ordered(***n***)**
- **nowait**

Распределение витков цикла

init-expr : var = loop-invariant-expr1
| integer-type var = loop-invariant-expr1
| random-access-iterator-type var = loop-invariant-expr1
| pointer-type var = loop-invariant-expr1

test-expr:
var relational-op loop-invariant-expr2
| loop-invariant-expr2 relational-op var

incr-expr: ++var
| var++
| --var
| var --
| var += loop-invariant-integer- expr
| var -= loop-invariant-integer- expr
| var = var + loop-invariant-integer- expr
| var = loop-invariant-integer- expr + var
| var = var - loop-invariant-integer- expr

relational-op: <
| <=
| >
| >=

var: signed or unsigned integer type
| random access iterator type
| pointer type

Parallel Random Access Iterator Loop (OpenMP 3.0)

```
#include <vector>
void iterator_example()
{
  std::vector<int> vec(23);
  std::vector<int>::iterator it;
#pragma omp parallel for default(none) shared(vec)
  for (it = vec.begin(); it < vec.end(); it++)
  {
    // do work with *it //
  }
}
```

Использование указателей в цикле (OpenMP 3.0)

```
void pointer_example ()
{
   char a[N];
   #pragma omp for default (none) shared (a,N)
   for (char *p = a; p < (a+N); p++ )
   {
      use_char (p);
   }
}
```

for (char *p = a; p != (a+N); p++) - ошибка

Распределение витков многомерных циклов. Клауза collapse (OpenMP 3.0)

```
void work(int i, int j) {}
void good_collapsing(int n)
{
   int i, j;
   #pragma omp parallel default(shared)
   {
      #pragma omp for collapse (2)
      for (i=0; i<n; i++) {
            for (j=0; j < n; j++)
               work(i, j);
      }
    }
}
```

Клауза collapse:
collapse (*положительная целая константа*)

Распределение витков многомерных циклов. Клауза collapse (OpenMP 3.0)

```
void work(int i, int j) {}
void error_collapsing(int n)
{
   int i, j;
   #pragma omp parallel default(shared)
   {
      #pragma omp for collapse (2)
      for (i=0; i<n; i++) {
            work_with_i (i);              // Ошибка
            for (j=0; j < n; j++)
               work(i, j);
      }
    }
}
```

Клауза collapse может быть использована только для распределения витков тесно-вложенных циклов.

Распределение витков многомерных циклов. Клауза collapse (OpenMP 3.0)

```
void work(int i, int j) {}
void error_collapsing(int n)
{
   int i, j;
   #pragma omp parallel default(shared)
   {
      #pragma omp for collapse (2)
      for (i=0; i<n; i++) {
            for (j=0; j < i; j++)          // Ошибка
               work(i, j);
      }
    }
}
```

Клауза collapse может быть использована только для распределения витков циклов с прямоугольным индексным пространством.

Использование редукционных операций

```
void reduction (float *x, int *y, int n)
{
  int i, b, c;
  float a, d;
  a = 0.0;
  b = 0;
  c = y[0];
  d = x[0];
  #pragma omp parallel for private(i) shared(x, y, n) \
                       reduction(+:a) reduction(^:b) \
                       reduction(min:c) reduction(max:d)
    for (i=0; i<n; i++) {
      a += x[i];
      b ^= y[i];
      if (c > y[i]) c = y[i];
      d = fmaxf(d,x[i]);
    }
}
```

Реализация редукционных операций

```
#include <limits.h>
void reduction_by_hand (float *x, int *y, int n)
{
  int i, b, b_p, c, c_p;
  float a, a_p, d, d_p;
  a = 0.0f;
  b = 0;
  c = y[0];
  d = x[0];
  #pragma omp parallel shared(a, b, c, d, x, y, n)  private(a_p, b_p, c_p, d_p)
  {
    a_p = 0.0f;   b_p = 0;   c_p = INT_MAX;    d_p = -HUGE_VALF;
    #pragma omp for private(i) nowait
    for (i=0; i<n; i++) {
      a_p += x[i];   b_p ^= y[i];   if (c_p > y[i]) c_p = y[i];   d_p = fmaxf(d_p,x[i]);
    }
    #pragma omp critical
    {
      a += a_p;   b ^= b_p;   if( c > c_p ) c = c_p;   d = fmaxf(d,d_p);
    }
  }
}
```

Редукционные операции, определяемые пользователем (OpenMP 4.0)

#pragma omp declare reduction (reduction-identifier : typename-list : combiner) [initializer(initializer-expr)]

- **reduction-identifier - название редукционной операции**
- **typename-list – тип (типы)**
- **combiner – выражение для объединения частичных результатов**
- **initializer – начальное значение создаваемых приватных переменных**
- **omp_out refers to private copy that holds combined value**
- **omp_in refers to the other private copy**
- **omp_priv represents the private element**
- **omp_orig represents the original variable**

Использование редукционных операций, определяемых пользователем (OpenMP 4.0)

```
struct point
{
   int x;
   int y;
} points[N], minp = { MAX_INT, MAX_INT };

#pragma omp declare reduction (min : struct point : \
    omp_out.x = omp_in.x > omp_out.x ? omp_out.x : omp_in.x, \
    omp_out.y = omp_in.y > omp_out.y ? omp_out.y : omp_in.y ) \
    initializer ( omp_priv = { MAX_INT, MAX_INT })

#pragma omp parallel for reduction (min: minp)
for (int i = 0; i < N; i++)
{
  if (points[i].x < minp.x) minp.x = points[i].x;
  if (points[i].y < minp.y) minp.y = points[i].y;
}
```

Редукционные операции, определяемые пользователем (OpenMP 4.0)

```
#pragma omp declare reduction (merge : std::vector<int> :
omp_out.insert (omp_out.end(), omp_in.begin(), omp_in.end()))

void schedule (std::vector<int> &v, std::vector<int> &filtered)
{
    #pragma omp parallel for reduction (merge: filtered)
    for (std:vector<int>::iterator it = v.begin(); it < v.end(); it++)
        if ( filter(*it) ) filtered.push_back(*it);
}
```

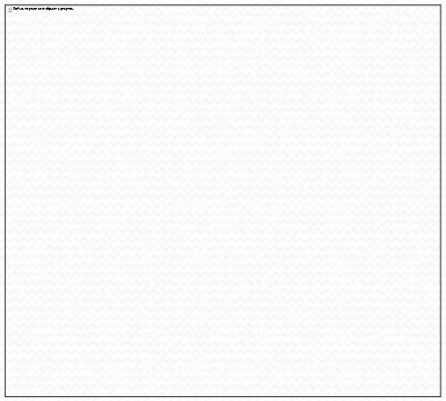
Распределение витков цикла. Клауза schedule

Клауза schedule:
schedule(*алгоритм планирования[, число_итераций]*)

Где алгоритм планирования один из:

- **schedule(static*[, число_итераций]*) - статическое планирование;**
- **schedule(dynamic*[, число_итераций]*) - динамическое планирование;**
- **schedule(guided*[, число_итераций]*) - управляемое планирование;**
- **schedule(runtime) - планирование в период выполнения;**
- **schedule(auto) - автоматическое планирование (OpenMP 3.0).**

```
#pragma omp parallel for private(tmp) shared (a) schedule (runtime)
    for (int i=0; i<N-2; i++)
     for (int j = i+1; j< N-1; j++) {
       tmp = a[i][j];
       a[i][j]=a[j][i];
       a[j][i]=tmp;
     }
```



Распределение витков цикла. Клауза schedule

```
#pragma omp parallel for schedule(static)
    for(int i = 1; i <= 100; i++)
```

Результат выполнения программы на 4-х ядерном процессоре будет следующим:

- **Поток 0 получает право на выполнение итераций 1-25.**
- **Поток 1 получает право на выполнение итераций 26-50.**
- **Поток 2 получает право на выполнение итераций 51-75.**
- **Поток 3 получает право на выполнение итераций 76-100.**

Распределение витков цикла. Клауза schedule

```
#pragma omp parallel for schedule(static, 10)
    for(int i = 1; i <= 100; i++)
```

Результат выполнения программы на 4-х ядерном процессоре будет следующим:

- **Поток 0 получает право на выполнение итераций 1-10, 41-50, 81-90.**
- **Поток 1 получает право на выполнение итераций 11-20, 51-60, 91-100.**
- **Поток 2 получает право на выполнение итераций 21-30, 61-70.**
- **Поток 3 получает право на выполнение итераций 31-40, 71-80**

Распределение витков цикла. Клауза schedule

```
#pragma omp parallel for schedule(dynamic, 15)
  for(int i = 1; i <= 100; i++)
```

Результат выполнения программы на 4-х ядерном процессоре может быть следующим:

- Поток 0 получает право на выполнение итераций 1-15.
- Поток 1 получает право на выполнение итераций 16-30.
- Поток 2 получает право на выполнение итераций 31-45.
- Поток 3 получает право на выполнение итераций 46-60.
- Поток 3 завершает выполнение итераций.
- Поток 3 получает право на выполнение итераций 61-75.
- Поток 2 завершает выполнение итераций.
- Поток 2 получает право на выполнение итераций 76-90.
- Поток 0 завершает выполнение итераций.
- Поток 0 получает право на выполнение итераций 91-100.

Распределение витков цикла. Клауза schedule

число_выполняемых_потоком_итераций =
max(число_нераспределенных_итераций/omp_get_num_threads(),
число_итераций)

```
#pragma omp parallel for schedule(guided, 10)
  for(int i = 1; i <= 100; i++)
```

Пусть программа запущена на 4-х ядерном процессоре.

- Поток 0 получает право на выполнение итераций 1-25.
- Поток 1 получает право на выполнение итераций 26-44.
- Поток 2 получает право на выполнение итераций 45-59.
- Поток 3 получает право на выполнение итераций 60-69.
- Поток 3 завершает выполнение итераций.
- Поток 3 получает право на выполнение итераций 70-79.
- Поток 2 завершает выполнение итераций.
- Поток 2 получает право на выполнение итераций 80-89.
- Поток 3 завершает выполнение итераций.
- Поток 3 получает право на выполнение итераций 90-99.
- Поток 1 завершает выполнение итераций.
- Поток 1 получает право на выполнение 100 итерации.

Распределение витков цикла. Клауза schedule

```
#pragma omp parallel for schedule(runtime)
   for(int i = 1; i <= 100; i++)  /* способ распределения витков цикла между
     нитями будет задан во время выполнения программы*/
```

При помощи переменных среды:

csh:

```
setenv OMP_SCHEDULE "dynamic,4“
```

ksh:

```
export OMP_SCHEDULE="static,10“
```

Windows:

```
set OMP_SCHEDULE=auto
```

или при помощи функции системы поддержки:

```
void omp_set_schedule(omp_sched_t kind, int modifier);
```

Распределение витков цикла. Клауза schedule

```
#pragma omp parallel for schedule(auto)
  for(int i = 1; i <= 100; i++)
```

Способ распределения витков цикла между нитями определяется реализацией компилятора.

На этапе компиляции программы или во время ее выполнения определяется оптимальный способ распределения.

Распределение витков цикла. Клауза nowait

```
void example(int n, float *a, float *b, float *c, float *z)
{
   int i;
   #pragma omp parallel
   {
      #pragma omp for schedule(static) nowait
      for (i=0; i<n; i++) {
         c[i] = (a[i] + b[i]) / 2.0;
         …
      }
      #pragma omp for schedule(static) nowait
        for (i=0; i<n; i++)
          z[i] = sqrt(c[i]);
   }
}
```

Верно в OpenMP 3.0, если количество итераций у циклов совпадает и параметры клаузы schedule совпадают (STATIC + *число_итераций*).

Распределение циклов с зависимостью по данным

```
for(int i = 1; i < 100; i++)
    a[i]= a[i-1] + a[i+1];
```

Между витками цикла с индексами i1 и i2 (i1<i2) существует зависимость по данным (информационная связь) массива *a*, если оба эти витка осуществляют обращение к одному элементу массива по схеме запись-чтение или чтение-запись.

Если виток i1 записывает значение, а виток i2 читает это значение, то между этими витками существует потоковая зависимость или просто зависимость i1 -> i2.

Если виток i1 читает "старое" значение, а виток i2 записывает "новое" значение, то между этими витками существует обратная зависимость i1<- i2.

В обоих случаях виток i2 может выполняться только после витка i1.

Распределение циклов с зависимостью по данным

```
for (int i = 0; i < n; i++) {
   x = (b[i] + c[i]) / 2;
   a[i] = a[i + 1] + x;       // ANTI dependency
}
```

```
#pragma omp parallel shared(a, a_copy) private (x)
{
   #pragma omp for
   for (int i = 0; i < n; i++) {
      a_copy[i] = a[i + 1];
   }
   #pragma omp for
   for (int i = 0; i < n; i++) {
      x = (b[i] + c[i]) / 2;
      a[i] = a_copy[i] + x;
   }
}
```

Распределение циклов с зависимостью по данным

```
for (int i = 1; i < n; i++) {
   b[i] = b[i] + a[i - 1];
   a[i] = a[i] + c[i]; // FLOW dependency
}
```

```
b[1] = b[1] + a[0];
a[1] = a[1] + c[1];
b[2] = b[2] + a[1];
a[2] = a[2] + c[2];
b[3] = b[3] + a[2];
a[3] = a[3] + c[3];
```

```
b[1] = b[1] + a[0];
#pragma omp parallel for shared(a,b,c)
for (int i = 1; i < n - 1; i++) {
    a[i] = a[i] + c[i];
    b[i + 1] = b[i + 1] + a[i];
}
a[n - 1] = a[n - 1] + c[n - 1];
```

Клауза и директива ordered

```
void print_iteration(int iter) {
    #pragma omp ordered
        printf("iteration %d\n", iter);
}

int main( ) {
    int i;
    #pragma omp parallel
    {
        #pragma omp for ordered
          for (i = 0 ; i < 5 ; i++) {
              print_iteration(i);
              another_work (i);
          }
    }
}
```

Результат выполнения программы:

```
iteration 0
iteration 1
iteration 2
iteration 3
iteration 4
```

Распределение циклов с зависимостью по данным. Клауза и директива ordered

```
#pragma omp parallel for ordered
for(int i = 1; i < 100; i++) {
    #pragma omp ordered
      {
        a[i]= a[i-1] + a[i+1];
      }
}
```

Распределение циклов с зависимостью по данным. Метод переменных направлений (ADI)

```
for(int i = 1; i < M; i++)
   for(int j = 1; j < N; j++)
      a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i+1][j]) / 2;
```

```
for(int i=1; i < M; i++)
   {
        #pragma omp parallel for shared(a)
        for(int j = 1; j < N; j++)
             a[i][j] = (a[i-1][j]+a[i+1][j])/2.;
   }
```

Распределение циклов с зависимостью по данным. Метод переменных направлений (ADI)

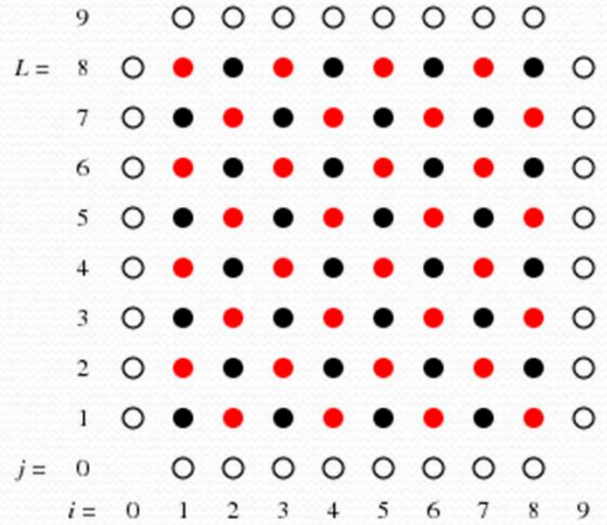
```
for(int i = 1; i < M; i++)
   for(int j = 1; j < N; j++)
      a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i+1][j]) / 2;
```

```
#pragma omp parallel shared(a)
{
   for(int i=1; i < M; i++)
   {
        #pragma omp for
        for(int j = 1; j < N; j++)
            a[i][j] = (a[i-1][j]+a[i+1][j])/2.;
   }
}
```

Распределение циклов с зависимостью по данным. Метод Red-Black

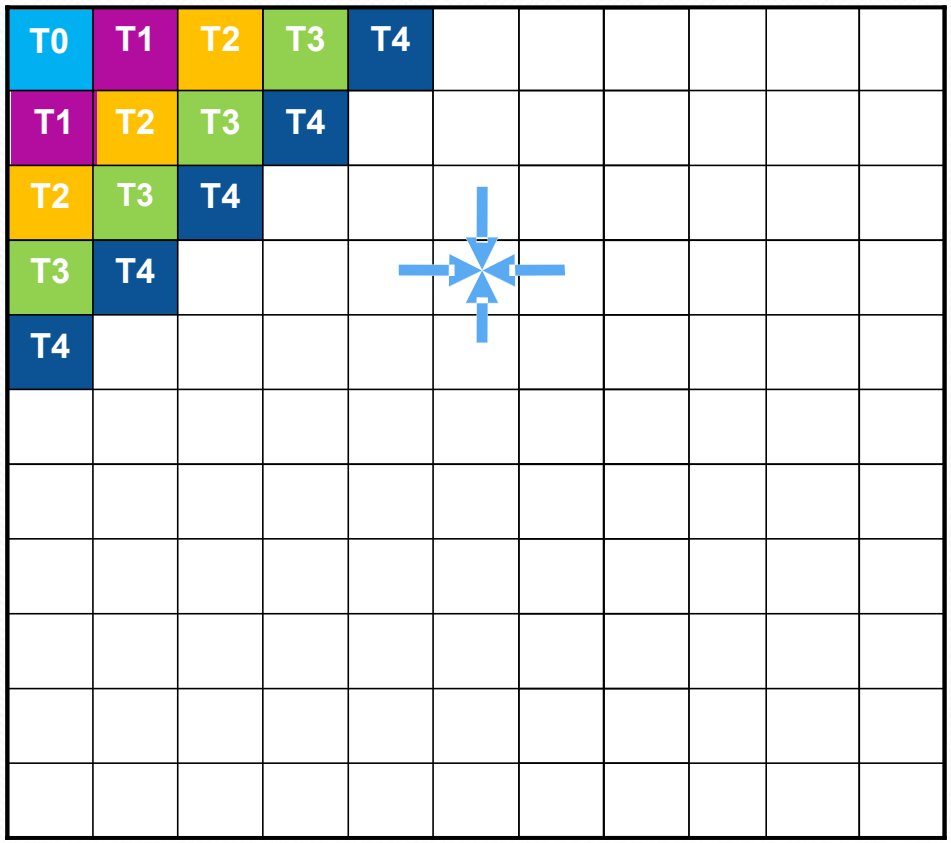
```
for(int i = 1; i < M; i++)
   for(int j = 1; j < N; j++)
       a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] + a[i][j+1]) / 4;
```

```
#pragma omp parallel shared(a)
{
    #pragma omp for
   for(int i = 1; i < M; i++)
     for(int j = 1 + i %2 ; j < N; j += 2)
       a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] + a[i][j+1]) / 4;
    #pragma omp for
   for(int i = 1; i < M; i++)
     for(int j = 1 + (i + 1)%2 ; j < N; j += 2)
       a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] + a[i][j+1]) / 4;
}
```



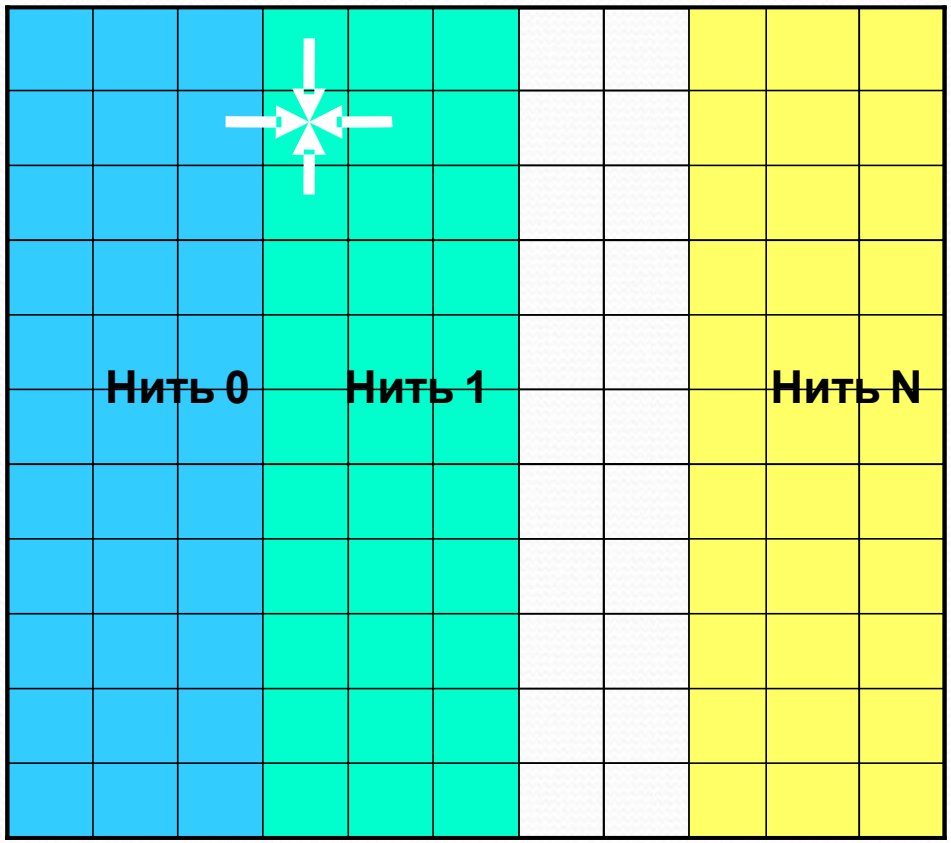
Распределение циклов с зависимостью по данным. Параллелизм по гиперплоскостям

```
for(int i = 1; i < M; i++)
  for(int j = 1; j < N; j++)
    a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] + a[i][j+1]) / 4;
```



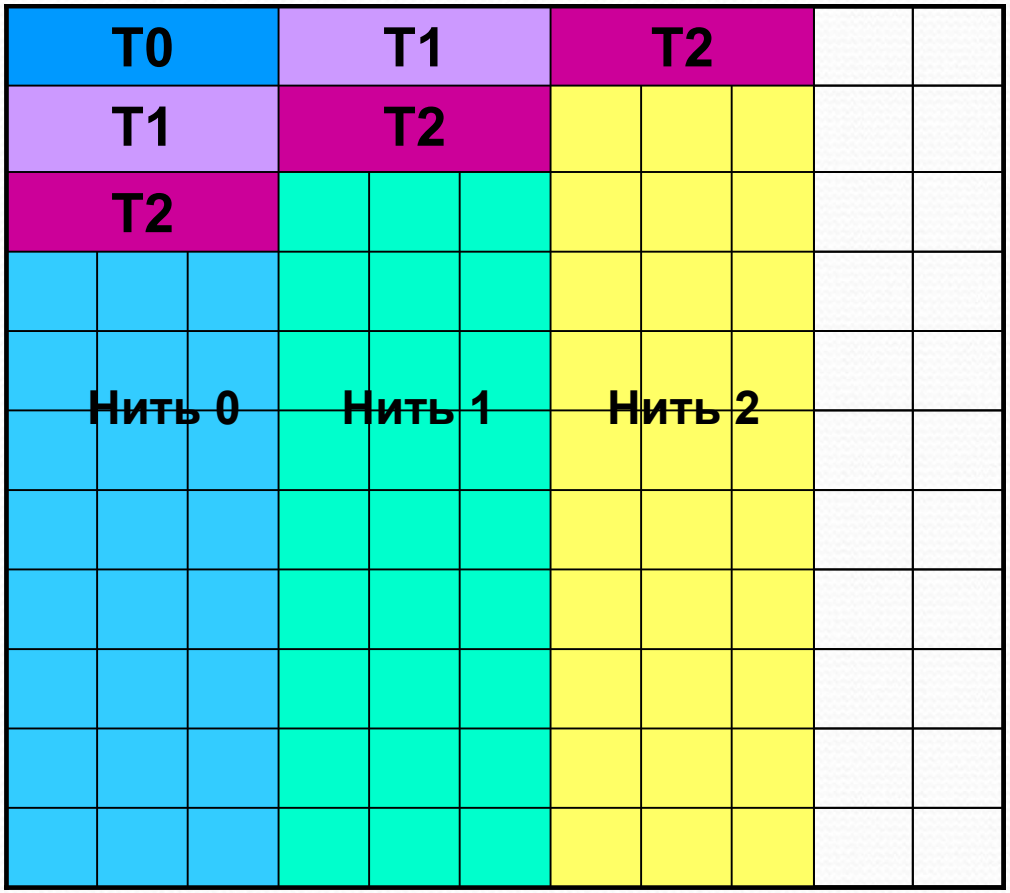
Распределение циклов с зависимостью по данным. Организация конвейерного выполнения цикла

```
for(int i = 1; i < M; i++)
  for(int j = 1; j < N; j++)
    a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] + a[i][j+1]) / 4;
```



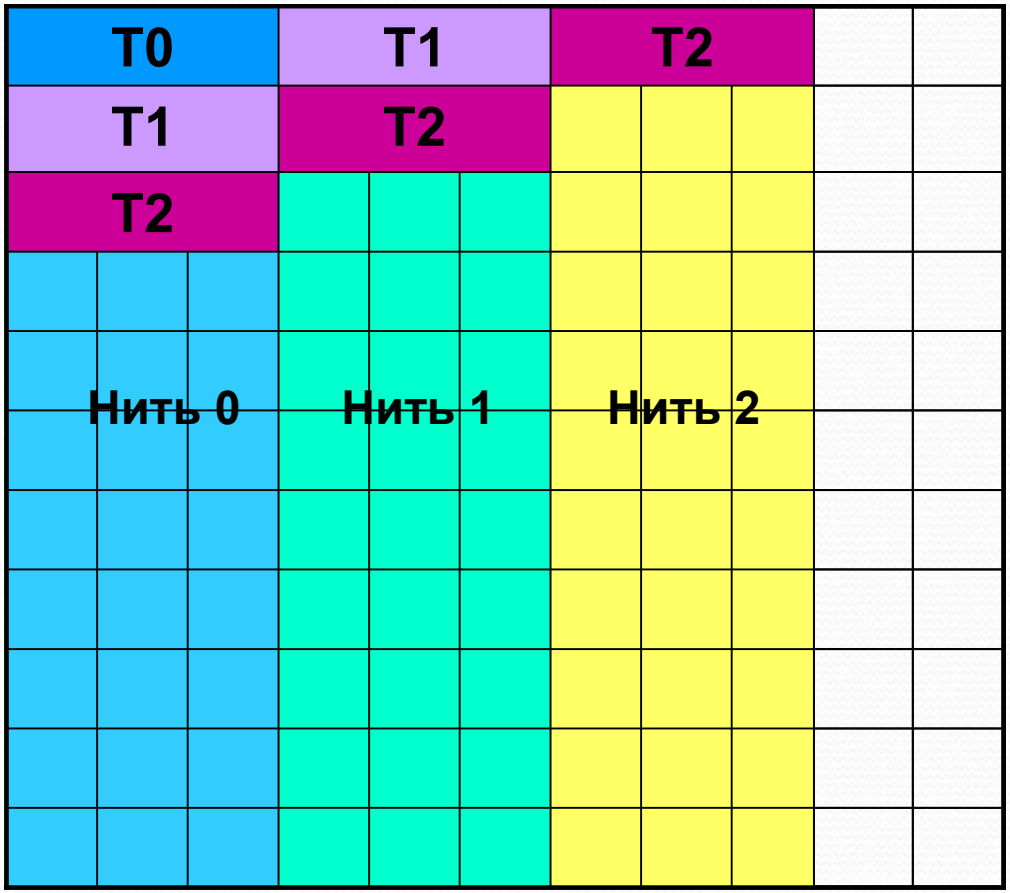
Распределение циклов с зависимостью по данным. Организация конвейерного выполнения цикла

```
for(int i = 1; i < M; i++)
  for(int j = 1; j < N; j++)
    a[i][j] = (a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] + a[i][j+1]) / 4;
```



Распределение циклов с зависимостью по данным. Организация конвейерного выполнения цикла

isync	1	0	0	0



Распределение циклов с зависимостью по данным. Организация конвейерного выполнения цикла

```
int iam, numt, limit;
int *isync = (int *)
malloc(omp_get_max_threads()*sizeof(int));
#pragma omp parallel private(iam,numt,limit)
  {
  iam = omp_get_thread_num ();
  numt = omp_get_num_threads ();
  limit=min(numt-1,N-2);
  isync[iam]=0;
#pragma omp barrier
  for (int i=1; i<M; i++) {
    if ((iam>0) && (iam<=limit)) {
      for (;isync[iam-1]==0;) {
        #pragma omp flush (isync)
      }
      isync[iam-1]=0;
      #pragma omp flush (isync)
    }
#pragma omp for schedule(static) nowait
    for (int j=1; j<N; j++) {
      a[i][j]=(a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] +
                a[i][j+1])/4;
    }
    if (iam<limit) {
      for (;isync[iam]==1;) {
        #pragma omp flush (isync)
      }
      isync[iam]=1;
      #pragma omp flush (isync)
    }
  }
}
```

Распределение циклов с зависимостью по данным. Организация конвейерного выполнения цикла

```
#pragma omp parallel
  {
    int iam = omp_get_thread_num ();
    int numt = omp_get_num_threads ();
    for (int newi=1; newi<M + numt - 1; newi++) {
      int i = newi - iam;
      #pragma omp for
        for (int j=1; j<N; j++) {
          if ((i >= 1) && (i< M)) {
            a[i][j]=(a[i-1][j] + a[i][j-1] + a[i+1][j] + a[i][j+1])/4;
          }
        }
    }
  }
```

Распределение циклов с зависимостью по данным. OpenMP 4.5

```
#pragma omp parallel for ordered(2) shared(a)
 for (int i=1; i<M; i++)
      for (int j=1; j<N; j++) {
          #pragma omp ordered depend (sink: i - 1, j) depend (sink: i, j - 1)
               a[i][j] = (a[i-1][j]+a[i+1][j]+a[i][j-1]+a[i][j+1])/4;
          #pragma omp ordered depend (source)
      }
```

Распределение нескольких структурных блоков между нитями (директива sections)

```
#pragma omp sections [клауза[[,] клауза] ...]
{
  [#pragma omp section]
  структурный блок
  [#pragma omp section
  структурный блок ]
  ...
}
```

где клауза одна из :

private(list)

firstprivate(list)

lastprivate(list)

reduction(operator: list)

nowait

```
void XAXIS();
void YAXIS();
void ZAXIS();
void example()
{
   #pragma omp parallel
   {
      #pragma omp sections
      {
         #pragma omp section
         XAXIS();
         #pragma omp section
         YAXIS();
         #pragma omp section
         ZAXIS();
      }
   }
}
```

Выполнение структурного блока одной нитью (директива single)

#pragma omp single *[клауза[[,] клауза] ...]*
структурный блок

где клауза одна из :

- **private(***list***)**
- **firstprivate(***list***)**
- **copyprivate(***list***)**
- **nowait**

Структурный блок будет выполнен одной из нитей. Все остальные нити будут дожидаться результатов выполнения блока, если не указана клауза NOWAIT.

```
#include <stdio.h>
static float x, y;
#pragma omp threadprivate(x, y)
void init(float *a, float *b ) {
  #pragma omp single copyprivate(a,b,x,y)
      scanf("%f %f %f %f", a, b, &x, &y);
}
int main () {
   #pragma omp parallel
   {
      float x1,y1;
      init (&x1,&y1);
      parallel_work ();
   }
}
```

Распределение операторов одного структурного блока между нитями (директива WORKSHARE)

```
      SUBROUTINE EXAMPLE (AA, BB, CC, DD, EE, FF, GG, HH, N)
       INTEGER N
       REAL AA(N,N), BB(N,N), CC(N,N)
       REAL DD(N,N), EE(N,N), FF(N,N)
       REAL GG(N,N), HH(N,N)
       REAL SHR
!$OMP PARALLEL SHARED(SHR)
!$OMP WORKSHARE
       AA = BB
       CC = DD
       WHERE (EE .ne. 0) FF = 1 / EE
       SHR = 1.0
       GG (1:50,1) = HH(11:60,1)
       HH(1:10,1) = SHR
!$OMP END WORKSHARE
!$OMP END PARALLEL
       END SUBROUTINE EXAMPLE
```

Понятие задачи

Задачи появились в OpenMP 3.0
Каждая задача:

- **Представляет собой последовательность операторов, которые необходимо выполнить.**
- **Включает в себя данные, которые используются при выполнении этих операторов.**
- **Выполняется некоторой нитью.**

В OpenMP 3.0 каждый оператор программы является частью одной из задач.

- **При входе в параллельную область создаются неявные задачи (implicit task), по одной задаче для каждой нити.**
- **Создается группа нитей.**
- **Каждая нить из группы выполняет одну из задач.**
- **По завершении выполнения параллельной области, master-нить ожидает, пока не будут завершены все неявные задачи.**

Понятие задачи. Директива task

Явные задачи (explicit tasks) задаются при помощи директивы:
#pragma omp task [клауза[[,] клауза] ...]
структурный блок
где клауза одна из :

- **if (scalar-expression)**
- **final(scalar-expression)** **//OpenMP 3.1**
- **untied**
- **mergeable** **//OpenMP 3.1**
- **shared (list)**
- **private (list)**
- **firstprivate (list)**
- **default (shared | none)**
- **depend (dependence-type: list)** **//OpenMP 4.0**

В результате выполнения директивы task создается новая задача, которая состоит из операторов структурного блока; все используемые в операторах переменные могут быть локализованы внутри задачи при помощи соответствующих клауз. Созданная задача будет выполнена одной нитью из группы.