

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет Кафедра информационных систем и технологий

Введение в OpenMP

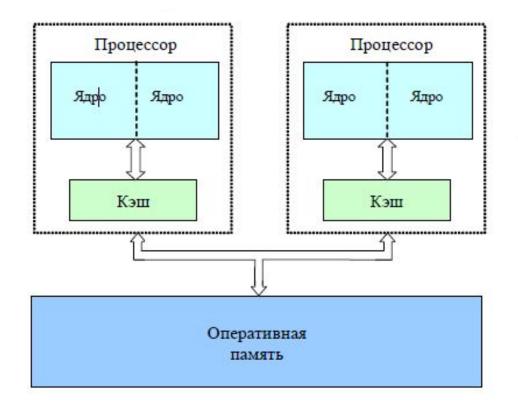
по материалам Гергеля В.П., Сысоева А.В. (Кафедра математического обеспечения ЭВМ, ННГУ)

Кислицын Д.И.

Содержание

- □ Обзор технологии OpenMP
- Директивы OpenMP
 - Формат, области видимости, типы
 - Определение параллельной области
 - Управление областью видимости данных
 - Распределение вычислений между потоками
 - Операция редукции
 - Синхронизация
 - Совместимость директив и их параметров
- Библиотека функций OpenMP
- Переменные окружения
- □ Информационные ресурсы

 Интерфейс OpenMP задуман как стандарт параллельного программирования для многопроцессорных систем с общей памятью (SMP, NUMA, ...)



В общем вид системы с общей памятью описываются в виде модели параллельного компьютера с произвольным доступом к памяти (parallel random-access machine – PRAM)

Динамика развития стандарта

- □ OpenMP Fortran API v1.0 (1997)
- OpenMP C/C++ API v1.0 (1998)
- □ OpenMP Fortran API v2.0 (2000)
- OpenMP C/C++ API v2.0 (2002)
- OpenMP C/C++ API v2.5 (2005)
- Разработкой стандарта занимается организация OpenMP Architecture Review Board, в которую вошли представители крупнейших компаний - разработчиков SMP-архитектур и программного обеспечения.

 Основания для достижения эффекта – разделяемые для параллельных процессов данные располагаются в общей памяти и для организации взаимодействия не требуется операций передачи сообщений.

Н.Новгород,

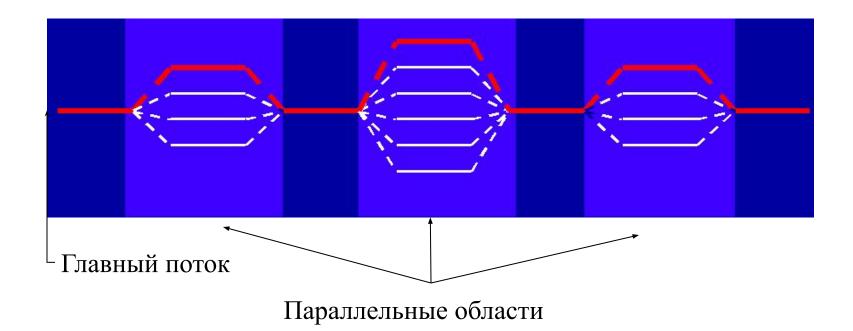
Положительные стороны

- Поэтапное (инкрементальное) распараллеливание
 - Можно распараллеливать последовательные программы поэтапно, не меняя их структуру
- □ Единственность разрабатываемого кода
 - Нет необходимости поддерживать последовательный и параллельный вариант программы, поскольку директивы игнорируются обычными компиляторами (в общем случае)
- □ Эффективность
 - Учет и использование возможностей систем с общей памятью
- □ Стандартизованность (переносимость), поддержка в наиболее распространенных языках (C/C++, Fortran) и платформах (Windows, Unix)

Н.Новгород,

Принцип организации параллелизма

- Использование потоков (общее адресное пространство)
- Пульсирующий ("вилочный", fork-join) параллелизм



Принцип организации параллелизма

- □ При выполнении обычного кода (вне параллельных областей) программа выполняется одним потоком (master thread)
- □ При появлении директивы #parallel происходит создание "команды" (team) потоков для параллельного выполнения вычислений
- □ После выхода из области действия директивы #parallel происходит синхронизация, все потоки, кроме master, уничтожаются
- □ Продолжается последовательное выполнение кода (до очередного появления директивы #parallel)

Термины и понятия

- □ Параллельный фрагмент (parallel construct) блок программы, управляемый директивой parallel; именно параллельные фрагменты, совместно с параллельными областями, представляют параллельно-выполняемую часть программы.
- □ Параллельная область (parallel region) параллельно выполняемые участки программного кода, динамическивозникающие в результате вызова функций из параллельных фрагментов.
- □ Параллельная секция (parallel section) часть параллельного фрагмента, выделяемая для параллельного выполнения при помощи директивы section.

Структура

- Набор директив компилятора
- Библиотека функций
- □ Набор переменных окружения

 Изложение материала будет проводиться на примере C/C++

Формат записи директив

Формат

```
#pragma omp имя_директивы [clause,...]
```

Пример

```
#pragma omp parallel default(shared) \
    private(beta,pi)
```

Пример показывает также, что для задания директивы может быть использовано несколько строк программы – признаком наличия продолжения является знак обратного слеша "\".

Действие директивы распространяется, как правило, на следующий в программе оператор, который может быть, в том числе, и структурированным блоком.

Типы директив

- □ Определение параллельной области
- □ Разделение работы
- □ Синхронизация

Н.Новгород,

Определение параллельной области

- □ Директива parallel (основная директива OpenMP)
- Когда основной поток выполнения достигает директиву parallel, создается набор (team) потоков; входной поток является основным потоком этого набора (master thread) и имеет номер 0
- Код области дублируется или разделяется между потоками для параллельного выполнения
- В конце области обеспечивается синхронизация потоков выполняется ожидание завершения вычислений всех потоков; далее все потоки завершаются дальнейшие вычисления продолжает выполнять только основной поток

Определение параллельной области

□ Пример использования директивы parallel

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
 int main () {
    int nthreads, tid;
    // Создание параллельной области
    #pragma omp parallel private(nthreads, tid)
      // печать номера потока
      tid = omp get thread num();
      printf("Hello World from thread = %d\n", tid);
      // Печать количества потоков - только master
      if (tid == 0) {
        nthreads = omp get num threads();
        printf("Number of threads = %d\n", nthreads);
    } // Завершение параллельной области
```

Определение параллельной области

□ Формат директивы parallel

```
#pragma omp parallel [clause ...] newline
structured_block
```

Возможные параметры (clause)

```
if (scalar_expression)
num_threads(integer-expression)
private (list)
firstprivate (list)
default (shared | none)
shared (list)
copyin (list)
reduction (operator: list)
```

Определение параллельной области

- □ Количество потоков (по убыванию старшинства)
 - num_threads(N)
 - omp_set_num_threads()
 - OMP_NUM_THREADS
 - Число, равное количеству процессоров, которое "видит" операционная система
- □ Параметр (clause) if если условие в if не выполняется, то процессы не создаются

Управление областью видимости данных

 Управление областью видимости обеспечивается при помощи параметров (clause) директив

private, firstprivate, lastprivate, shared, reduction, ...

которые определяют, какие соотношения существуют между переменными последовательных и параллельных фрагментов выполняемой программы

Управление областью видимости данных

- □ Параметр **shared** определяет список переменных, которые будут общими для всех потоков параллельной области; правильность использования таких переменных должна обеспечиваться программистом shared (list)
- □ Параметр **default** может отменить действие правила по умолчанию (default(none)) или восстановить правило, что по умолчанию: *переменные программы являются общими* (default(shared)).
- □ Параметр private определяет список переменных, которые будут локальными для каждого потока; переменные создаются в момент формирования потоков параллельной области; начальное значение переменных является неопределенным private (list)

Управление областью видимости данных

- Начальные значения локальных переменных не определены, а конечные значения теряются при завершении потоков
- □ Параметр firstprivate позволяет создать локальные переменные потоков, которые перед использованием инициализируются значениями исходных переменных firstprivate (list)
- □ Параметр lastprivate позволяет создать локальные переменные потоков, значения которых запоминаются в исходных переменных после завершения параллельной области (используются значения потока, выполнившего последнюю итерацию цикла или последнюю секцию) lastprivate (list)

Определение времени выполнения параллельной программы

 Получение текущего момента времени выполнения фрагментов кода параллельных программ обеспечивается при помощи функции

double omp_get_wtime(void)

Функция возвращает количество секунд, прошедших от некоторого определенного момента времени в прошлом.

```
double t1, t2, dt;
t1 = omp_get_wtime ();
...
t2 = omp_get_wtime ();
dt = t2 - t1;
```

Распределение вычислений между потоками

- Существует 3 директивы для распределения вычислений в параллельной области
 - DO / for распараллеливание циклов
 - sections распараллеливание раздельных фрагментов кода (функциональное распараллеливание)
 - single директива для указания последовательного выполнения кода
- Начало выполнения директив по умолчанию не синхронизируется
- Завершение директив по умолчанию является синхронным

H.Новгород, Введение в ОреnMP 21

Распределение вычислений между потоками

Формат директивы for

```
#pragma omp for [clause ...] newline
for loop
```

□ Возможные параметры (clause)

```
private(list)
firstprivate(list)
lastprivate(list)
reduction(operator: list)
ordered
schedule(kind[, chunk_size])
nowait
```

Распределение вычислений между потоками

- □ Распределение итераций в директиве for регулируется параметром (clause) schedule
 - static итерации делятся на блоки по chunk итераций и статически разделяются между потоками; если параметр chunk не определен, итерации делятся между потоками равномерно и непрерывно
 - dynamic распределение итерационных блоков осуществляется динамически (по умолчанию chunk=1)
 - guided размер итерационного блока уменьшается экспоненциально при каждом распределении; chunk определяет минимальный размер блока (по умолчанию chunk=1)
 - runtime правило распределения определяется переменной ОМР_SCHEDULE (при использовании runtime параметр chunk задаваться не должен) Так, например, для задания динамического способа при размере блока итераций 3, следует определить:

setenv OMP_SCHEDULE "dynamic,3"

Распределение вычислений между потоками

□ Пример использования директивы for

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
#define NMAX 100
int main () {
int i, j;
double a [NMAX] [NMAX], sum;
for (i=0; i < NMAX; i++)
 for (j=0; j < NMAX; j++)
      a[i][j] = (i+j);
#pragma omp parallel for shared(a) private(i,j,sum)
 for (i=0; i < NMAX; i++) {
  sum = 0;
  for (j=0; j < NMAX; j++)
   sum += a[i][i];
 printf ("Summa of row elements %d is %f\n",i,sum);
 } /* Завершение параллельного фрагмента */
```

Распределение вычислений между потоками

Пример динамического распределения итераций между потоками

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
#define NMAX 100
#define CHUNK 10
int main () {
int i, j;
double a [NMAX] [NMAX], sum;
for (i=0; i < NMAX; i++)
for (j=0; j < NMAX; j++)
      a[i][j] = (i+j);
#pragma omp parallel for shared(a) private(i,j,sum) \
                  schedule (dynamic, CHUNK)
 for (i=0; i < NMAX; i++) {
  sum = 0;
  for (j=i; j < NMAX; j++)
   sum += a[i][j];
 printf ("Summa of row elements %d is %f\n",i,sum);
 } /* Завершение параллельного фрагмента */
```

Распределение вычислений между потоками

□ Управление порядком выполнения вычислений

Если же для ряда действий в цикле необходимо сохранить первичный порядок вычислений, который соответствует последовательному выполнению итераций в последовательной программе, то желаемого результата можно добиться при помощи директивы ordered (при этом для директивы for должен быть указан параметр ordered). Параметр ordered управляет порядком выполнения только тех действий, которые выделены директивой ordered.

Н.Новгород,

Распределение вычислений между потоками

- Синхронизация вычислений по окончании выполнения цикла
- По умолчанию, все потоки, прежде чем перейти к выполнению дальнейших вычислений, ожидают окончания выполнения итераций цикла даже если некоторые из них уже завершили свои вычисления конец цикла представляет собой некоторый барьер, который потоки могут преодолеть только все вместе.
- Можно отменить указанную синхронизацию, указав параметр *nowait* в директиве *for* тогда потоки могут продолжить вычисления за переделами цикла, если для них нет итераций цикла для выполнения.

Операция редукции

- Параметр reduction определяет список переменных, для которых выполняется операция редукции
 - перед выполнением параллельной области для каждого потока создаются копии этих переменных,
 - потоки формируют значения в своих локальных переменных
 - при завершении параллельной области над всеми локальными значениями выполняются необходимые операции редукции, результаты которых запоминаются в исходных (глобальных) переменных

reduction (operator: list)

H.Новгород, Введение в ОреnMP 28

Операция редукции

Правила записи параметра reduction

Возможный формат записи выражения

```
x = x op expr
x = expr op x
x binop = expr
x++, ++x, x--, --x
```

- х должна быть скалярной переменной
- ехрг не должно ссылаться на х
- op (operator) должна быть неперегруженной операцией вида+, -, *, /, &, ^, |, &&, ||
- binop должна быть неперегруженной операцией вида
 +, -, *, /, &, ^, |

Операция редукции

□ Пример использования параметра reduction

Использование общей переменной total без создания локальных копий является неправильным, т.к. без обеспечения взаимоисключения возникает ситуация гонки потоков и итоговый результат может быть ошибочным.

Распределение вычислений между потоками

□Параметр if директивы parallel

```
#include <omp.h>
#define NMAX 1000
#define LIMIT 100
main () {
int i, j, sum;
float a[NMAX][NMAX];
<инициализация данных>
#pragma omp parallel for shared(a) private(i,j,sum) \
                           if (NMAX>LIMIT)
for (i=0; i < NMAX; i++) {
sum = 0;
for (j=0; j < NMAX; j++)
sum += a[i][j];
printf ("Сумма элементов строки %d равна %f\n",i,sum);
} /* Завершение параллельного фрагмента */
```

Н.Новгород,

Распределение вычислений между потоками

□ Формат директивы sections

```
#pragma omp sections [clause ...] newline
{
    #pragma omp section newline
        structured_block
    #pragma omp section newline
        structured_block
}
```

□ Возможные параметры (clause)

```
private(list)
firstprivate(list)
lastprivate(list)
reduction(operator: list)
nowait
```

H.Новгород, Введение в ОреnMP 32

Распределение вычислений между потоками

- Директива sections распределение вычислений для раздельных фрагментов кода
 - фрагменты выделяются при помощи директивы section
 - каждый фрагмент выполняется однократно
 - разные фрагменты выполняются разными потоками
 - завершение директивы по умолчанию синхронизируется
 - директивы section должны использоваться только в статическом контексте

H.Новгород, Введение в ОреnMP 33

Распределение вычислений между потоками

□ Пример использования директивы sections

```
total = 0;
#pragma omp parallel shared(a,b) private(i,j)
#pragma omp sections
#pragma omp section
/* Вычисление сумм элементов строк и общей суммы */
for (i=0; i < NMAX; i++) {
 sum = 0;
 for (j=0; j < NMAX; j++)
  sum += a[i][j];
 printf ("Summa of row elements %d is %f\n",i,sum);
 total = total + sum;
#pragma omp section
 /* Копирование матрицы */
 for (i=0; i < NMAX; i++)
  for (j=0; j < NMAX; j++)
   b[i][j] = a[i][j];
} /* Завершение параллельного фрагмента */
printf ("Total summa is %f\n", total);
```

Н.Новгород,

Распределение вычислений между потоками

□ Объединение директив parallel и for/sections

```
total = 0;
#pragma omp parallel sections shared(a,b) private(i,j)
#pragma omp section
/* Вычисление сумм элементов строк и общей суммы */
for (i=0; i < NMAX; i++) {
 sum = 0;
 for (j=0; j < NMAX; j++)
  sum += a[i][i];
 printf ("Summa of row elements %d is %f\n",i,sum);
 total = total + sum;
#pragma omp section
 /* Копирование матрицы */
 for (i=0; i < NMAX; i++)
  for (j=0; j < NMAX; j++)
   b[i][j] = a[i][j];
} /* Завершение параллельного фрагмента */
printf ("Total summa is %f\n", total);
```

H.Новгород, Введение в OpenMP

35

Распределение вычислений между потоками

□ Формат директивы single

```
#pragma omp single [clause ...] newline
   structured_block
```

□ Возможные параметры (clause)

```
private(list)
firstprivate(list)
copyprivate(list)
nowait
```

Директива **single** определяет блок параллельного фрагмента, который должен быть выполнен только одним потоком; все остальные потоки ожидают завершения выполнения данного блока (если не указан параметр **nowait**).

Синхронизация

□ Директива master определяет фрагмент кода, который должен быть выполнен только основным потоком; все остальные потоки пропускают данный фрагмент кода (завершение директивы по умолчанию не синхронизируется)

```
#pragma omp master newline
structured_block
```

 Директива critical определяет фрагмент кода, который должен выполняться только одним потоком в каждый текущий момент времени (критическая секция)

```
#pragma omp critical [name] newline
   structured_block
```

Синхронизация

Пример использования директивы critical

H.Новгород, Введение в ОреnMP 38

Синхронизация

□ Директива barrier – определяет точку синхронизации, которую должны достигнуть все процессы для продолжения вычислений (директива должны быть вложена в блок)

#pragma omp barrier newline

Синхронизация

 □ Директива atomic – определяет переменную, доступ к которой (чтение/запись) должна быть выполнена как неделимая операция

```
#pragma omp atomic newline
expression
```

□ Возможный формат записи выражения expression

```
x \text{ binop} = \exp r, x++, ++x, x--, --x
```

х должна быть скалярной переменной

expr не должно ссылаться на x

binop должна быть неперегруженной операцией вида

Синхронизация

□ Пример использования директивы atomic

```
total = 0;
#pragma omp parallel for shared(a) private(i,j,sum)
 for (i=0; i < NMAX; i++) {
  sum = 0;
  for (j=0; j < NMAX; j++)
   sum += a[i][j];
printf ("Summa of row elements %d is %f\n",i,sum);
 #pragma omp atomic
 total += sum;
} /* Завершение параллельного фрагмента */
printf ("Total summa is %f\n", total);
```

Синхронизация

□ Директива flush – определяет точку синхронизации, в которой системой должно быть обеспечено единое для всех процессов состояние памяти (т.е. если потоком какое-либо значение извлекалось из памяти для модификации, измененное значение обязательно должно быть записано в общую память)

```
#pragma omp flush (list) newline
```

- □ Если указан список list, то восстанавливаются только указанные переменные
- □ Директива flush неявным образом присутствует в директивах barrier, critical, ordered, parallel, for, sections, single

Совместимость директив и их параметров

Clause	Directive						
	PARALLEL	DO/for	SECTIONS	SINGLE	PARALLEL DO/for	PARALLEL SECTIONS	
IF	•				•	•	
PRIVATE	•	•	•	•	•	•	
SHARED	•	•			•	•	
DEFAULT	•				•	•	
FIRSTPRIVATE	•	•	•	•	•	•	
LASTPRIVATE		•	•		•	•	
REDUCTION	•	•	•		•	•	
COPYIN	•				•	•	
SCHEDULE		•			•		
ORDERED		•			•		
NOWAIT		•	•	•			

Сводный перечень директив OpenMP

Директива	Описание		
parallel [<параметр>]	Директива определения параллельного фрагмента в коде программы (подраздел 4.2).		
	Параметры: if, private, shared, default, firstprivate, reduction, copyin, num_threads		
for [<параметр>]	Директива распараллеливания циклов (подраздел 4.2). Параметры: private, firstprivate, lastprivate, reduction, ordered, nowait, schedule		
sections [<параметр>]	Директива для выделения программного кода, который далее будет разделен на параллельно выполняемые параллельные секции (подраздел 4.6). Выделение параллельных секций осуществляется при помощи директивы section.		
	Параметры: private, firstprivate, lastprivate, reduction, nowait		
section	Директива выделения параллельных секций — должна располагаться в блоке директивы sections (подраздел 4.6).		
single [<параметр>]	Директива для выделения программного кода в параллельном фрагменте, исполняемого только одним потоком (п. 4.7.1). Параметры: private, firstprivate, copyprivate, nowait		

Сводный перечень директив OpenMP

Директива	Описание
parallel for [<параметр>	Объединенная форма директив parallel и for (подраздел 4.2). Параметры: private, firstprivate, lastprivate, shared, default, reduction, ordered, schedule, copyin, if, num_threads
parallel sections [<параметр>	Объединенная форма директив parallel и sections (подраздел 4.6). Параметры: private, firstprivate, lastprivate, shared, default, reduction, copyin, if, num_threads
master	Директива для выделения программного кода в параллельном фрагменте, исполняемого только основным (master) потоком (п. 4.7.1).
critical [(name)]	Директива для определения критических секций (п. 4.5.2).
barrier	Директива для барьерной синхронизации потоков (п. 4.7.2).
atomic	Директива для определения атомарной (неделимой) операции (п. 4.5.1).
flush [list]	Директива для синхронизации состояния памяти (п. 4.7.3).
threadprivate (list)	Директива для определения постоянных локальных переменных потоков (п. 4.7.4).
ordered	Директивы управления порядком вычислений в распараллеливаемом цикле (п. 4.3.2). При использовании данной директивы в директиве for должен быть указан одноименный параметр ordered

Сводный перечень параметров директив OpenMP

Параметр	Описание	
private (list)	Параметр для создания локальных копий для перечисленных в списке переменных для каждого имеющегося потока (п. 4.4.1). Исходные значения копий не определены. Директивы: parallel, for, sections, single	
firstprivate (list)	Тоже что и параметр private и дополнительно инициализация создаваемых копий значениями, которые имели перечисленные в списке переменные перед началом параллельного фрагмента (п. 4.4.1). Директивы: parallel, for, sections, single	
lastprivate (list)	Тоже что и параметр private и дополнительно запоминан значений локальных переменных после завершен параллельного фрагмента (п. 4.4.1). Директивы: for, sections	
shared (list)	Параметр для определения общих переменных для во имеющихся потоков (п. 4.4.1). Директивы: parallel	
default (shared none)	Параметр для установки правила по умолчанию на использование переменных в потоках (п. 4.4.1). Директивы: parallel	

Сводный перечень параметров директив **OpenMP**

Параметр	Описание
reduction (operator: list)	Параметр для задания операции редукции (п. 4.4.2). Директивы: parallel, for, sections
nowait	Параметр для отмены синхронизации при завершении директивы. Директивы: for, sections, single
if (expression)	Параметр для задания условия, только при выполнении которого осуществляется создание параллельного фрагмента (п. 4.3.4). Директивы: parallel
ordered	Параметр для задания порядка вычислений в распараллеливаемом цикле (п. 4.3.2). Директивы: for
schedule (type [, chunk])	Параметр для управления распределением итераций распараллеливаемого цикла между потоками (п. 4.3.1). Директивы: for
copyin (list)	Параметр для инициализации постоянных переменных потоков (п. 4.7.4). Директивы: parallel
copyprivate (list)	Копирование локальных переменных потоков после выполнения блока директивы single (п. 4.7.1). Директивы: single
num_treads	Параметр для задания количества создаваемых потоков в параллельной области (п. 4.7.5). Директивы: parallel

Библиотека функций OpenMP

□ Позволяет назначить максимальное число потоков для использования в следующей параллельной области (если это число разрешено менять динамически). Вызывается из последовательной области программы

```
void omp_set_num_threads(int num_threads)
```

□ Возвращает максимальное число потоков

```
int omp get max threads (void)
```

 Возвращает фактическое число потоков в параллельной области программы

```
int omp_get_num_threads(void)
```

Библиотека функций OpenMP

□ Возвращает номер потока

```
int omp_get_thread_num(void)
```

Возвращает число процессоров, доступных приложению

```
int omp get num procs (void)
```

□ Возвращает true, если вызвана из параллельной области программы

```
int omp in parallel (void)
```

- Возвращает количество сек., прошедших от некоторого определенного момента времени в прошлом
- double omp_get_wtime(void)

 озвращает время в сек. между двумя последовательными
 показателями времени аппаратного таймера

```
double omp_get_wtick(void)
```

Библиотека функций OpenMP

□ Разрешение (dynamic=true) динамического режима и его отключение (dynamic=false)

```
void omp_set_dynamic (int dynamic);
```

□ Возвращает true, если динамический режим разрешён

```
int omp_get_dynamic(void);
```

 □ Разрешение (nested=true) вложенного параллелизма и его отключение (nested=false)

```
int omp_set_nested(int nested);
```

□ Возвращает true, если вложенный параллелизм разрешён

```
int omp_get_nested(void);
```

Переменные окружения

- □ OMP_SCHEDULE определяет способ распределения итераций в цикле, если в директиве for использована клауза schedule(runtime)
- OMP_NUM_THREADS определяет число нитей для исполнения параллельных областей приложения
- ОМР_DYNAMIC разрешает или запрещает динамическое изменение числа нитей
- ОМР_NESTED разрешает или запрещает вложенный параллелизм

Н.Новгород,

Информационные ресурсы

- Гергель В.П. Раздел "Параллельное программирование с использованием OpenMP». Учебный курс "Введение в методы параллельного программирования». - Н. Новгород, 2007
- www.openmp.org
- Что такое OpenMP –
 http://parallel.ru/tech/tech_dev/openmp.html
- Introduction to OpenMP www.llnl.gov/computing/tutorials/workshops/workshop/openM P/MAIN.html
- Chandra, R., Menon, R., Dagum, L., Kohr, D., Maydan, D., McDonald, J. Parallel Programming in OpenMP. – Morgan Kaufmann Publishers, 2000