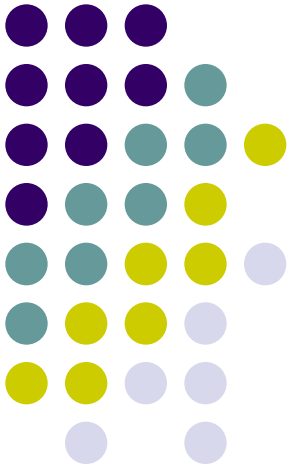
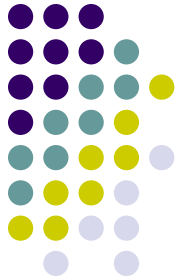
Лекция № 6

Примеры разработки параллельных алгоритмов (реальная оптимизация)

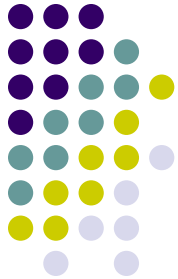


Распараллеливание циклов



- Как правило в любом программном коде основным объектом распараллеливания являются циклы.
- Поэтому крайне важно тщательно изучать структуру этих циклов, определяя, какие из них можно распараллелить, а какие нет.
- Рассмотрим конкретные примеры циклов, используя как пример процедуры оптимизации языка Фортран

Распараллеливание циклов



Оптимизируются, как правило, следующие операции параллельного и векторного режимов:

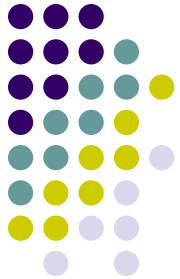
- операции с массивами, выполняемые в векторно-параллельном (ВП) режиме
- интерактивные циклы *DO* вида *DO i = 1,N*.

Такие циклы не должны содержать ни операторов, ни зависимостей данных, ограничивающих оптимизацию выполнения цикла векторно-параллельном режиме.

Циклы DO в зависимости от определенных ограничений могут выполняться в векторном, скалярном параллельном или скалярном режимах.

Циклы DO могут быть представлены в виде нескольких циклов, некоторые из которых реализуются в скалярном режиме, а другие в зависимости от ограничений подвергаются оптимизации определенного вида

Распараллеливание циклов

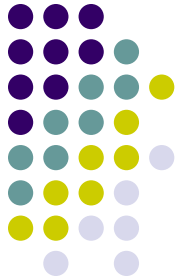


- циклы DO WHILE, не содержащие недопустимых операторов и зависимостей данных выполняются в скалярном параллельном режиме.
- все другие программы выполняются в скалярном режиме. Отметим, что последовательность скалярных операций с элементами некоторого массива не оптимизируется.

Пример программы, которая не будет выполняться ни в параллельном, ни в векторном режимах:

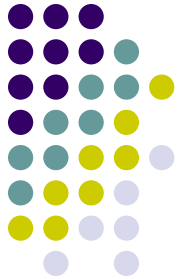
```
A(1) = A(1)+S
A(2) = A(2)+S
A(3) = A(3)+S
A(4) = A(4)+S
```

Режимы выполнения программ



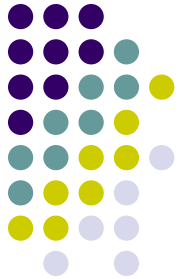
- Скалярный режим. В этом режиме операции выполняются последовательно.Возможно для ускорения использовать преимущества конвейризации вычислений
- Векторный режим. В этом режиме операции выполняются аппаратно по специальным векторным командам на группами, состоящими из элементов, максимальное число которых определяется длиной вектора.
- Параллельный (скалярный параллельный режим. В этом режиме операция различных итераций одного и того же цикла выполняются параллельно рядом вычислительных элементов (ВЭ).
- Векторный параллельный режим. Операции в этом режиме выполняются параллельно несколькими ВЭ над группой из элементов, максимальное число которых определяется длиной вектора.

Возможные режимы расчета массива A(I):



- Пусть в цикле, работающим с этим массивом, производится 8192 арифметические операции с двойной точностью.
- Пусть наш компьютер очень медленный, и длительность такта составляет 170 нс (производительность 0,39 миллионовопераций с плавающей точкой в секунду).
- Тогда время выполнения цикла в скалярной режиме составит 0,02 с, и цикл осуществиться за 122472 такта.

Возможные режимы расчета массива A(I):



Скалярный:

A(1)	A(2)	A(3)	…	A(8192)

122472 такта

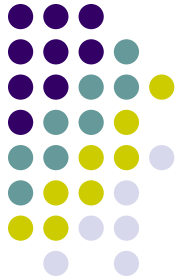
Векторный:

A(1:32)	A(33:64)	…	A(8161:8192)

24184 такта

В векторном режиме, если длина вектора будет равна 32, длительность цикла составит 0,0041с (24184 такта)

Скалярно-параллельный режим



A(1)	A(9)	…	A(8185)
A(2)	A(10)	…	A(8186)
A(3)	A(11)	…	A(8187)
A(4)	A(12)	…	A(8188)
A(5)	A(13)	…	A(8189)
A(6)	A(14)	…	A(8190)
A(7)	A(15)	…	A(8191)
A(8)	A(16)	…	A(8192)

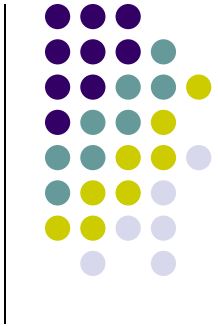
В скалярно параллельном режиме при 8 ВЭ (3,02 миллионов операций с плавающей точной в секунду) длительность выполнения цикла будет 0, 0027с (15970 тактов).

15970 тактов

Пояснение:

На 1-ом ВЭ элементы массива не располагаются подряд, с первого по восьмой. Реально на первом процессоре будут элементы: A(1), A(9), A(17),…, A(8185). Всего 1024 элемента на первом ВЭ (8192/8 = 1024). На втором ВЭ – элементы A(2), A(10), A(18),…, A(8186) и т.д.

Векторно – параллельный режим

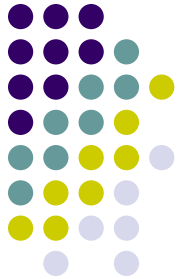


A(1:249:8)	…	
A(2:250:8)	…	
A(3:251:8)	…	
A(4:252:8)	…	
A(5:253:8)	…	
A(6:254:8)	…	
A(7:255:8)	…	
A(8:256:8)	…	

3848 тактов

На 1-ом ВЭ элементы массива располагаются так: A(1), A(9), A(17), A(25), A(33), A(41), A(49), A(57), A(65), A(73), A(81)…..A(249) – всего 32 элемента по длине вектора.
На втором ВЭ – элементы A(2), A(10), A(18), A(26), A(34), A(42), A(50), A(58), A(66), A(74), A(82)…..A(250) – то же составляют вектор, и т.д.

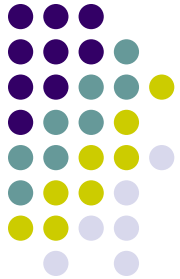
Вложенные циклы



- В случае вложенных циклов внутренний цикл выполняется в векторном режиме, а внешний – в параллельном.
- Если один цикл вложен в другой, то говорят, что такая конструкция выполняется в режиме «внешний – параллельно, внутренний - векторно» (ВПВВ).
- В следующем примере итерации цикла по J выполняются параллельно, а итерации по I внутри каждого цикла по J – в векторном режиме:

```
DO 11 J = 1, L
   DO 12 I = 1,N
A(I,J) = A(I,J) +S
END DO
END DO
```

Операция с массивом в цикле. Операции с многомерными массивами



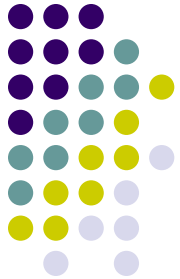
- Операция с массивом в цикле также выполняется в режиме ВПВВ.
- При этом операция с массивом векторизуется, а итерации цикла выполняются параллельно.
- Следующая программа эквивалентна программе, представленной выше:

```
DO  J = 1, L
A(1:N,J) = A(1:N,J) +S
END DO
```

- Операции с многомерными массивами также выполняются в режиме ВПВВ.
- Цикл по самому левому индексу векторизуется, циклы по следующим индексам реализуются в параллельном режиме.
- Следующая программа эквивалентна программе, представленной выше:

```
A(1:N, 1:J) = A(1:N, 1:J) +S
```

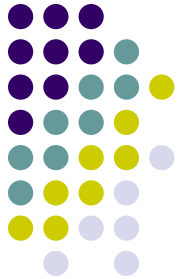
Ограничения параллелизации циклов



Оптимизация цикла путем выполнения его в параллельном режиме или посредством векторизации ограничена в следующих случаях:

- Не оптимизируется пустой цикл.
- Цикл, реализующийся в векторном, векторно-параллельном режиме или ВПВВ режиме, может содержать только операторы следующих типов:
  - оператор присваивания
  - комментарии
  - CONTINUE
  - GOTO с передачей управления вперед на метку, содержащуюся в цикле
  - блок IF, ELSE, END IF
  - логический оператор IF
- Следует отметить, что представленный перечень не содержит операторов ввода-вывода

Ограничения параллелизации циклов



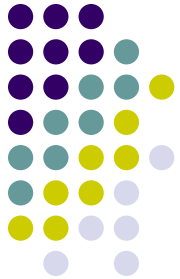
Включение в цикл DO следующих операторов:

- ELSE IF
- блок IF с вложенностью, превышающей 3
- оператор GO TO с передачей управления вперед на метку, находящуюся за пределами цикла
- RETURN
- STOP

запрещает векторизацию, но допускает параллельное выполнение.

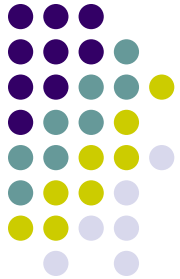
Включение символьных переменных в цикл запрещает параллельную реализацию и векторизацию.

Ограничения параллелизации циклов



- Использование в цикле ссылок на функции-операторы и встроенные функции не препятствует оптимизации.
- Ссылки в цикле на внешние процедуры препятствуют оптимизации, если только пользователь явно не разрешает это сделать.
- Использование в цикле ссылок на функции-операторы и встроенные функции не препятствует оптимизации.
- Ссылки в цикле на внешние процедуры препятствуют оптимизации, если только пользователь явно не разрешает это сделать.

Векторные конструкции



В оптимизируемой программе рассматриваются следующие данные:

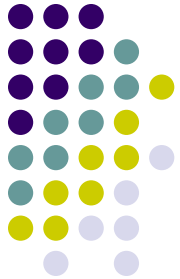
- Вектор – последовательность элементов. Вектор может быть образован посредством операций над массивами или с помощью операций цикла, в которых используются элементы массива.
- Например, в следующей программе используется вектор, состоящий из N последовательных элементов массива A:

```
A(1:N) = A(1:N) +S
```

или

```
DO I = 1, N
A(I) = A(I) +S
END DO
```

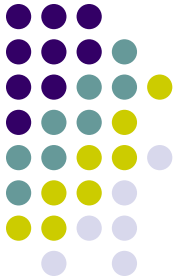
Скаляры цикла



- Скаляры цикла – это отдельные элементы, используемые в векторной операции.
- Скаляр цикла - ссылка на скалярную переменную или на отдельный элемент массива. Примеры:

```
DO  I = 1, N
A(I) = A(I) + B(J)+S
END DO
```

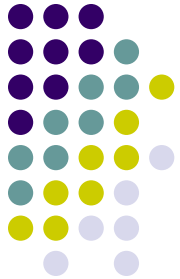
B(J), S – скаляры цикла



- Индекс – отдельный целочисленный элемент, значение которого изменяется на постоянное приращение для каждого элемента вектора.
- Целочисленная величина постоянного приращения (ЦПП) в пределах некоторого цикла определяется следующим образом:
  - рекуррентная ЦПП – переменная плюс или минус некоторое выражение, инвариантное в пределах цикла
  - ЦПП, определяемая по предшествующей ЦПП, ранее встречавшаяся в цикле ЦПП, связанная знаком сложения, вычитания или умножения с выражением, инвариантным в пределах этого цикла.
- Пример:

```
DO 16 I = 1, N
J = J+1
K = I*2+3
A(J) = B(K)
CONTINUE
```

K – ЦПП, поскольку I определено ранее, J – не ЦПП, поскольку ранее не определено



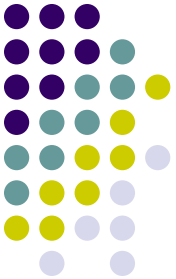
Косвенная адресация

- Косвенная адресация реализуется тогда, когда индекс сам является элементом индексируемого массива. Из-за косвенной адресации снижается эффективность программ. Затраты времени могут значительно возрасти, если будет делаться попытка выполнения двух операций записи в один и тот же элемент массива.

Замена скалярной переменной

- Скалярная переменная, используемая в некотором оптимизируемом цикле вместе с элементами массивов, может быть временно (на время выполнения цикла) заменена на вектор, что позволяет реализовать векторный параллельный режим вычислений

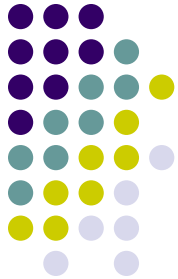
Отказ от оптимизации



- В некоторых случаях использование векторизации или распараллеливание циклов может привести к резкому снижению производительности.

- В таких случаях специальные директивы позволяют отказаться от оптимизации

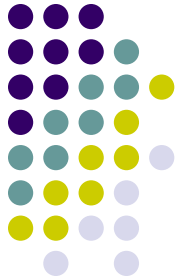
Отказ от векторизации



Отказ от векторизации может повысить производительность в следующих ситуациях:

- Циклы с небольшим числом итераций. Если число итераций цикла не превосходит 3-х (длина векторов равна числу итераций), то отказ от векторизации обычно приводит к уменьшению времени выполнения программы
- Наличие в цикле условных операторов, используемых для обработки массивов. В таких циклах во время выполнения команд может оказаться мало вычислений.

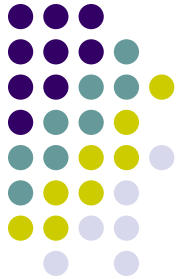
Отказ от векторизации



- Разветвление типа «выбор». Если в каждом цикле выбирается одна из нескольких возможных ветвей, невозможно эффективно сгруппировать скалярные операции в целях векторизации
- Неравномерно нагруженные итерации. Если в теле цикла число ветвей не велико (как, например, в простом блоке IF … ELSE), а ветвь, в которой используются элементы массива, выбирается очень редко, то от векторизации целесообразно отказаться .

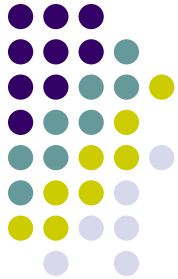
Чтобы быть уверенным в повышении эффективности программы с помощью векторизации, следует измерить время ее выполнения как с векторизацией, так и без нее.

Отказ от режима параллельной обработки



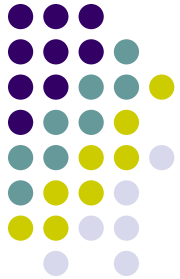
- Можно отказаться от распараллеливания циклов, в которых большая часть кода не может быть оптимизирована вследствие зависимостей данных.
- Следует отказаться от распараллеливания коротких циклов с небольшим числом итераций (однако не менее 5).
- При определенных обстоятельствах можно изменить стандартный метод обработки (внешний – параллельно, внутренний – векторно) вложенных циклов.

Зависимость данных



- Зависимость данных между итерациями цикла (она также называется рекурсией данных, или обратной связью по данным) означает, что вычисления в некоторой итерации цикла зависят от результатов вычислений, полученных на предыдущей итерации, так что должен поддерживаться нужный порядок выполнения операций.
- Зависимость данных может оказаться причиной запрета векторизации и распараллеливания цикла.

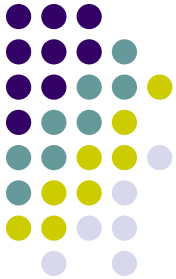
Рекурсивное использование скалярных переменных



- Скалярная переменная, на которую в теле цикла есть ссылка и значение которой после этого изменяется, называется рекурсивно используемой скалярной переменной, поскольку ее значение устанавливается в одной итерации цикла и используется в следующей итерации. Например:

```
S = 0
DO 17 I = 1, N
S = S*A(I) + B(I)
CONTINUE
```

Исключение рекурсивное используемых скалярных переменных

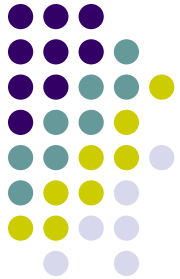


- В определенных ситуациях рекурсивно используемые скалярные переменные могут быть исключены. Например (не связан с предыдущим!):

```
T = 0
DO  I = 1, N
S = A(I) + B(I)
C(I) = S +T
T = S
END DO
```

- В этом случае рекурсивно используемая переменная не накапливается и не вычисляет рекурсивно данные, она просто сохраняет результат, вычисленный в предыдущей итерации.

Исключение рекурсивное используемых скалярных переменных

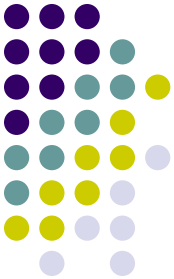


Или (альтернативная запись предыдущего примера):

```
C(1)  = A(1) * B(1)
DO  I = 1, N
C(I)  = A(I) * B(I) + A(I-1) * B(I-1)
END DO
```

- В этом примере в каждой итерации дополнительно выполняется умножение, зато цикл удается полностью оптимизировать.
- Несмотря на дополнительную операцию умножения, этот цикл выполняется при полной оптимизации в несколько раз быстрее предыдущего.

Исключение рекурсивное используемых скалярных переменных



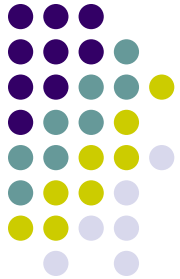
- Рекурсивные вычисления могут быть заменены явными не рекурсивными вычислениями, которые не эффективны в скалярном режиме, но допускают полную оптимизацию.
- Пусть матрица:

1.	1.1	1.2	1.3	4
1.	2.2	2.2	2.3	4
1.	2.3	3.3	3.3	4
1	2.4	3.4	4.4	4

Храниться в памяти в виде вектора (где отсутствуют повторяющиеся значения, поэтому длина вектора не 16, а 10):

1.1	1.2	**2.2**	1.3	2.3	**3.3**	1.4	2.4	3.4	**4.4**

Исключение рекурсивное используемых скалярных переменных



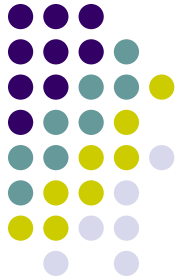
- В следующей программе при обращении к диагональным элементам матрицы A(J) используется рекурсивное определение индекса.
- Эта программа из-за такой рекурсии не может быть векторизована или распараллелена.

```
 J = 0
DO I = 1, N
J = J+I
A(J) = A(J) + B(I) + T
END DO
```

- Однако рекурсивное вычисление может быть заменено явной формулой (формулой для вычисления суммы ряда).

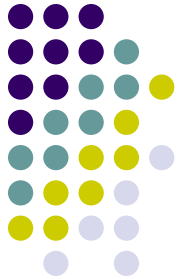
```
DO  I = 1, N
J = (I*I+I)*0.5
A(J) = A(J) + B(I) + T
END DO
```

Обратные ссылки на элементы массива:



- Обратная ссылка на элемент массива происходит тогда, когда элемент массива определяется во время одной итерации, а значение его используется в следующей итерации.
- Если определение значения и ссылка на тот же элемент массива происходят параллельно, то будет получен результат, отличающийся от того, который был бы получен при последовательных действиях.
- (Если распараллеливать итерации цикла, то они могут происходить не синхронно, и, если один ВЭ хочет высчитать новое значение с использованием того, которое должен был вычислить другой ВЭ, а тот еще этого сделать не успел, то будет не понятно что)

Обратные ссылки на элементы массива:

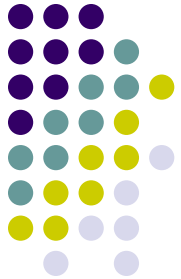


- Например:

A(1) = 1
DO I = 1,N
  A(I+1) = A(I)
CONTINUE
	A(1) = 1
	DO I = 1,N
	  A(I) = A(I-1)
	CONTINUE

Часто для достижения того же результата могут быть использованы не рекурсивные методы, допускающие оптимизацию.
Если в приведенном выше примере целью является присвоение значения 1.0 каждому элементу сегмента массива A(1:N), то рекурсивная программа может быть заменена простым присваиванием массиву нужного значения:
A(1:N) = 1.0

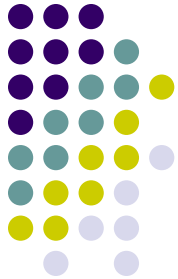
Обратные ссылки на элементы массива:



- Для присваивания нужного значения можно использовать следующий цикл:

```
DO  I = 1, N
A(J) = 1.0
END DO
```

Обратные ссылки на элементы массива:



- Присваивание одному элементу массива значения другого элемента массива не обязательно приводят к обратным ссылкам из одной итерации к другой итерации.
- Например, при записи в предыдущий элемент оптимизация допустима:

  DO I = 1,N

  A(I) = A(I+1)

  CONTINUE

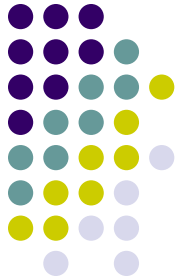
  где A = (1, 2, 3, 4) (т.е. заранее известны)

  A(1) = A(2) = 2

  A(2) = A(3) = 3

  A(3) = A(4) = 4
- При определенном шаге перекрытия нет.

Обратные ссылки на элементы массива:



```
 DO I = 1,N,2
A(I+1) = A(I)
CONTINUE
```

где A = (1, 2, 3, 4, 5,6)

```
A(2) = A(1) = 1
A(4) = A(3) = 3
A(6) = A(5) = 5
```

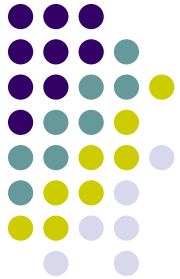
или:

```
DO I = 1,N,3
A(I+3) = A(I)
CONTINUE
```

где A = (1, 2, 3, 4, 5,6)

```
A(4) = A(1) = 1
A(5) = A(2) = 2
A(6) = A(3) = 3
```

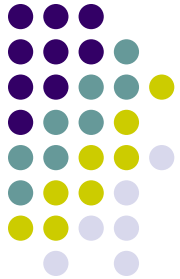
Обратные ссылки на элементы массива:



- В некоторых ситуациях обратные ссылки могут возникать или не возникать во время выполнения программы в зависимости от значений переменных. Если существует уверенность в том, что обратные ссылки не возникают, то оптимизацию следует разрешить.
- Те циклы, которые не оптимизируются или оптимизируются частично, должны быть проанализированы с целью определения возможности преобразования их к виду, допускающему оптимизацию.
- Например, следующий цикл не оптимизируется, так как элементы массива A, определенные в одной итерации, используются в следующей итерации.

```
DO  I = 2, N
S(I)  = A(I -1) + B(I)
A(I) = A(I) + C(I)
END DO
```

Обратные ссылки на элементы массива:

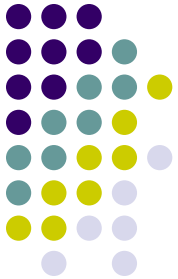


- Однако те же самые действия можно выполнить с использованием двух циклов, в которых уже не возникают обратные ссылки.

```
DO  I = 2, N
A(I) = A(I) + C(I)
END DO
DO 25 I = 1, N
S(I)  = A(I -1) + B(I)
CONTINUE
```

- Некоторые циклы, частично оптимизированные для векторно-параллельного режима, выполняются значительно быстрее в скалярно-параллельном режиме.

Повторная запись в элемент массива

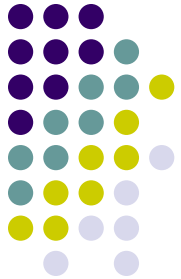


- Распараллеливание (но не векторизация) запрещается, если существует возможность записи нескольких значений в один и тот же элемент массива, поскольку в таком случае должен быть сохранен порядок записи значений.
- Такая адресация возможна, если при работе с массивом возможна косвенная адресация.
- В нижеследующем примере индекс элемента массива A не может быть определен во время компиляции программы.

```
DO  I = 1, N
A(J(I)) = B(I)
END DO
```

- Однако, если известно, что во время выполнения программы не может произойти повторная запись в какой-либо элемент массива, например известно, что все элементы массива имеют различные значения, то оптимизация возможна.

Синхронизация параллельных операций

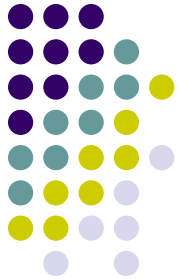


- Потенциально работа в векторно-параллельном и скалярно-параллельном режимах при последовательной записи значений в массивы может приводить к искажению результатов записи.
- Предположим, например, что выполняется следующий цикл:

```
DO I = 1,N
        A(I) = A(I+1)
END DO
```

- Если нулевой вычислительный элемент ВЭ0 выполняет пересылку A(32) = A(33) в то время, как ВЭ1 выполняет пересылку A(33) = A(34), то прежде чем ВЭ1 изменит значение A(34), ВЭ0 должен произвести запись значения A(32) в A(33). Необходимо произвести соответствующую синхронизацию.

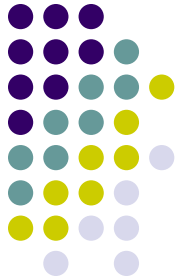
Условное присваивание значений скалярным и индексным переменным



- Если в цикле есть скалярная переменная, значение которой изменяется в условном операторе и используется затем в том же цикле, то она является рекурсивно используемой скалярной переменной.
- Такие циклы оптимизировать запрещено.
- В следующем цикле значение скалярной переменной S изменяется в условном операторе и затем используется в следующем операторе присваивания, что препятствует оптимизации.

```
DO I = 1,N
   IF (A(I).GT.X) S = B(I) +2
   A(I) = S
CONTINUE
```

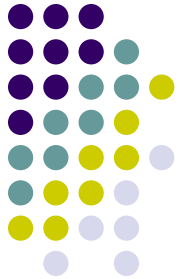
Условное присваивание значений скалярным и индексным переменным



- Если изменение скалярной переменной и ее последующее использование производится в одном условном операторе, то цикл, содержащий такой оператор, оптимизируется.
- Например:

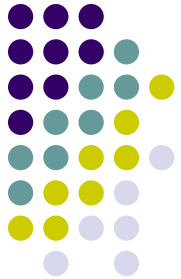
```
DO I = 1,N
   IF (A(I).GT.X) THEN
         S = B(I) +2
         A(I) = S
    END IF
CONTINUE
```

Параллельные независимые подпрограммы



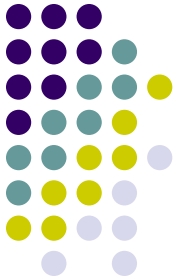
- Цикл DO может использоваться для выполнения отдельных подпрограмм или независимых вызовов подпрограмм параллельно, если каждый отдельный вызов подпрограммы осуществлять по условию в определенной итерации цикла.
- Если одна подпрограмма вызывается повторно, гарантировано, что она рекурсивна.

Внешние процедуры



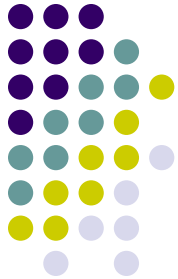
- По умолчанию векторизуемые или распараллеливаемые циклы не могут содержать вызовы внешних процедур, поскольку в таких случаях нельзя произвести проверку зависимости данных.

Предостережения



- Необходимо уделять большое внимание обработке нелокальных данных в подпрограммах, вызываемых в параллельном цикле, поскольку такая параллельная программа будет выполняться асинхронно на нескольких процессорах.
- В частности, нельзя обращаться к одному и тому же элементу данных в памяти класса COMMON или EQUIVALENCE при «наложении» аргументов, т.е. при передаче одного и того же элементы данных двум различным формальным параметрам, если только этот элемент данных не определяется в подпрограмме.

Предостережения



- Т.е. если, например, в цикле вызывается подпрограмма, внутри которой определяется глобальная переменная, а цикл распараллеливается, то на разных ВЭ при работе с подпрограммой будут вычисляться различные значения глобальной переменной, и этот процесс необходимо будет синхронизировать.
- Программист должен быть уверен в том, что подпрограмма не вводит в программу не обнаруживаемой зависимости данных.
- Во избежание этой опасности рекомендуется использовать чистые функции. (В чистой функции никакие аргументы не определяются: определяется лишь возвращаемое значение).