Введение, многопоточное программирование

Юрий Литвинов
yurii.litvinov@gmail.com

07.09.2018г

О чём этот курс

- Кратко про почти всё, что обязательно знать любому прикладному программисту
  - Многопоточное программирование
  - Сетевое программирование
  - Веб-программирование
  - Продвинутое GUI-программирование
  - Работа с базами данных
  - Рефлексия
- Язык программирования — C#
  - Немного подробностей про внутреннее устройство .NET тоже будет в курсе

Отчётность

- Домашка
- Две контрольные
- Доклады (-1 домашка)
- Семестровая работа

Семестровая работа

- Мини-курсовая
  - Программная реализация достаточно большой и полезной задачи
  - Пишется весь семестр
  - В конце — защита с презентацией
  - Может быть групповой
- Где брать темы
  - Продолжать начатое в летней школе
  - Студпроекты
  - Придумать самим
  - Взять что-нибудь у кого-нибудь поблизости
    - Робототехника
    - Формальные методы
    - Machine Learning

Многопоточное программирование

Зачем это нужно:

- Оптимально использовать ресурсы процессора
  - Одноядерных процессоров практически не бывает
- Использовать асинхронные операции ввода-вывода
- Не “вешать” GUI
- Показывать прогресс

Потенциальные проблемы:

- Тысяча способов прострелить себе ногу
  - Ошибки могут воспроизводиться раз в тысячу лет и их невозможно обнаружить статически
- Не всегда многопоточная программа работает быстрее однопоточной

Процессы и потоки

- Процесс — исполняющаяся программа
  - Загруженный в память .exe-шник со всеми его .dll-ками или аналогичные понятия
  - Имеет выделенные для него системные ресурсы:
    - Память
    - Открытые файлы
    - Открытые сетевые соединения
    - ...
- Поток — единица параллельной работы
  - Существует внутри процесса
  - Имеет свой стек и состояние регистров процессора
  - Все потоки внутри процесса разделяют общие ресурсы (например, память)

Параллельное программирование

- Параллельная программа может быть:
  - Многопроцессной
    - Несколько процессов, возможно, несколько потоков в каждом
  - Многопоточной
- Многопроцессные программы:
  - Могут исполняться на разных компьютерах
  - Пример — веб-приложения
  - Сложное и медленное взаимодействие между процессами
- Многопоточные программы:
  - Могут исполняться только на одном компьютере (нужна общая память)
  - Быстрое общение между потоками через общую память
  - Потоки могут портить состояние друг другу

Внезапно, операционные системы

Функции операционной системы:

- Предоставлять упрощённый доступ к оборудованию
  - Файловая система
  - Драйвера
- Управлять ресурсами компьютера
  - Виртуальная память
  - Планировщик

Планировщик

- Управляет распределением процессорного времени между процессами и потоками
- Каждому потоку выделяется квант времени, прерывание по таймеру
- Поток может отдать ядро процессора до истечения кванта
  - Сам
  - Блокирующая операция ввода-вывода
  - Подгрузка страницы памяти из свопа
  - Аппаратное прерывание
- Хитрые алгоритмы планирования
  - Обеспечение максимального быстродействия при справедливом планировании
  - Учитываются приоритеты потоков

Планировщик в Windows

- Раз в квант времени (или чаще) выбирает поток для исполнения
  - Рассматриваются только потоки, не ждущие чего-либо
- НЕ реальное время
  - Нельзя делать предположения, когда потоку дадут поработать
- Из рассматриваемых потоков выбираются только те, у кого наибольший приоритет
  - Приоритеты потоков от 0 до 31, обычно 8
- Есть ещё приоритеты процессов: Idle, Below, Normal, Normal, Above Normal, High и Realtime
- Относительные приоритеты потоков: Idle, Lowest, Below Normal, Normal, Above Normal, Highest и Time-Critical
  - Истинный приоритет получается из относительного приоритета и приоритета процесса

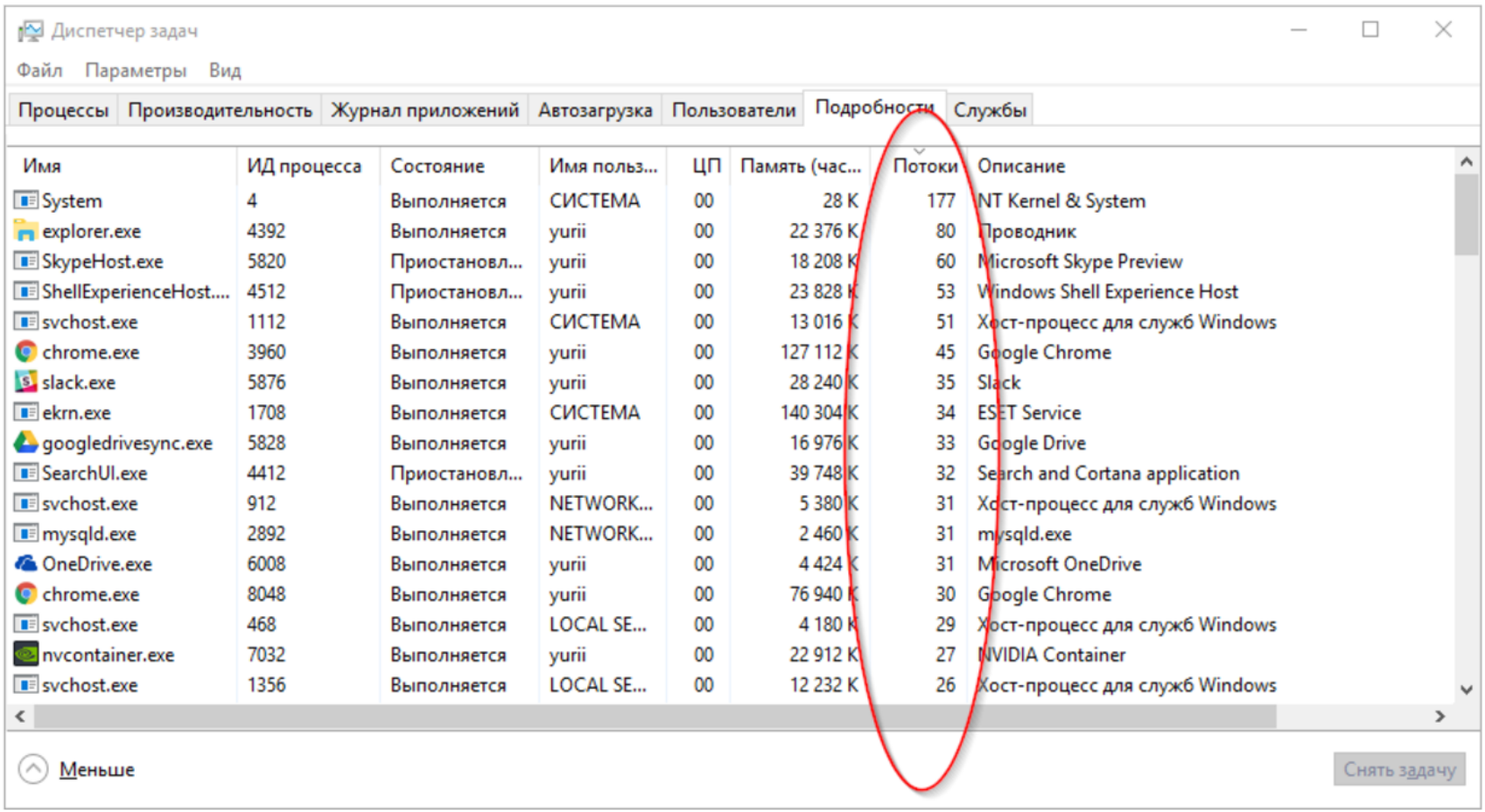
Поток в Windows

- Thread Kernel Object (1240 байт)
- Thread environment block (TEB) (4 Кб)
- User-mode stack (1 Мб)
- Kernel-mode stack (24 Кб)

Ещё для каждой dll-ки, загруженной для процесса при старте или остановке потока, вызывается DllMain с параметрами DLL_THREAD_ATTACH и DLL_THREAD_DETACH

Квант времени — 20-30 мс, после чего происходит *переключение контекстов*

Как делать не надо



System.Threading.Thread

```
using System;
using System.Threading;

namespace MultiThreadingDemo {
   class Program {
      static void Main(string[] args) {
         var otherThread = new Thread(() => {
            while (true)
               Console.WriteLine("Hello from other thread!");
         });
         otherThread.Start();

         while (true)
            Console.WriteLine("Hello from this thread!");
      }
   }
}
```

Параллельная обработка данных

```
static void Main(string[] args) {
    var array = new int[] { 1, 5, 2, 4, 7, 2, 4, 9, 3, 6, 5 };
    var threads = new Thread[3];
    var chunkSize = array.Length / threads.Length + 1;
    var results = new int[threads.Length];

    for (var i = 0; i < threads.Length; ++i) {
        var localI = i;
        threads[i] = new Thread(() => {
            for (var j = localI * chunkSize; j < (localI + 1) * chunkSize && j < array.Length; ++j)
                results[localI] += array[j];
        });
    }

    foreach (var thread in threads)
        thread.Start();
    foreach (var thread in threads)
        thread.Join();

    var result = 0;
    foreach (var subResult in results)
        result += subResult;

    Console.WriteLine($"Result = {result}");
}
```

“Упрощённая” версия

```
static void Main(string[] args) {
   var array = new int[] { 1, 5, 2, 4, 7, 2, 4, 9, 3, 6, 5 };
   var threads = new Thread[3];
   var chunkSize = array.Length / threads.Length + 1;
   var result = 0;

   for (var i = 0; i < threads.Length; ++i) {
      var localI = i;
      threads[i] = new Thread(() => {
         for (var j = localI * chunkSize; j < (localI + 1) * chunkSize && j < array.Length; ++j)
            result += array[j];
      });
   }

   foreach (var thread in threads)
      thread.Start();
   foreach (var thread in threads)
      thread.Join();

   Console.WriteLine($"Result = {result}");
}
```

Немного увеличим размер задачи...

```
static void Main(string[] args) {
   var array = new int[1000];
   for (var i = 0; i < array.Length; ++i)
      array[i] = 1;

   var threads = new Thread[8];
   var chunkSize = array.Length / threads.Length + 1;
   var result = 0;

   for (var i = 0; i < threads.Length; ++i) {
      var localI = i;
      threads[i] = new Thread(() => {
         for (var j = localI * chunkSize; j < (localI + 1) * chunkSize && j < array.Length; ++j)
            result += array[j];
      });
   }

   foreach (var thread in threads)
      thread.Start();
   foreach (var thread in threads)
      thread.Join();

   Console.WriteLine($"Result = {result}");
}
```

Почему так

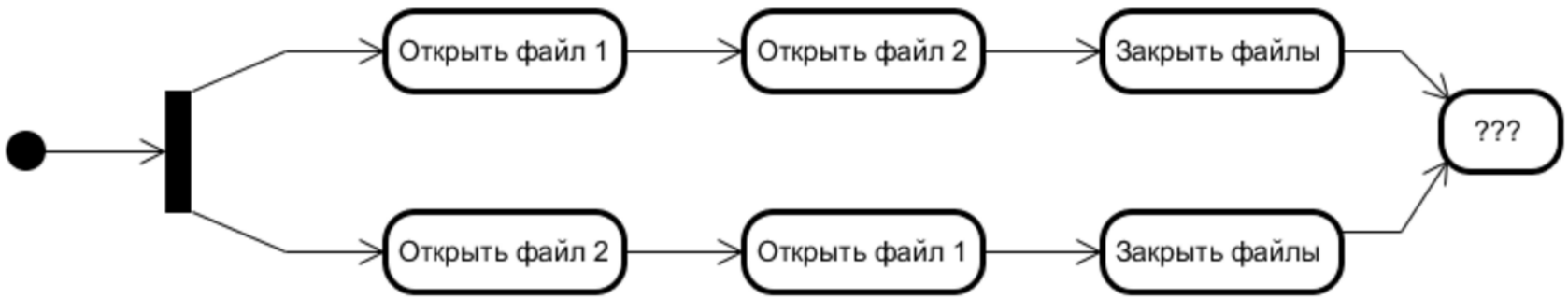
result += array[j];

```
IL_0016: ldarg.0     // this
IL_0017: ldfld       class Program/'<>c__DisplayClass0_0' Program/'<>c__DisplayClass0_1'::'CS$<>8__locals1'
IL_001c: ldarg.0     // this
IL_001d: ldfld       class Program/'<>c__DisplayClass0_0' Program/'<>c__DisplayClass0_1'::'CS$<>8__locals1'
IL_0022: ldfld       int32 Program/'<>c__DisplayClass0_0'::result
IL_0027: ldarg.0     // this
IL_0028: ldfld       class Program/'<>c__DisplayClass0_0' Program/'<>c__DisplayClass0_1'::'CS$<>8__locals1'
IL_002d: ldfld       int32[] Program/'<>c__DisplayClass0_0'::'array'
IL_0032: ldloc.0     // j
IL_0033: ldelem.i4
IL_0034: add
IL_0035: stfld       int32 Program/'<>c__DisplayClass0_0'::result
```

Между **любыми** инструкциями поток может быть прерван

Race condition

Deadlock


Открыть файл 1
Открыть файл 2
Закрыть файлы
???
Открыть файл 2
Открыть файл 1
Закрыть файлы

Какие ещё ловушки бывают

- Процессор может переставлять местами инструкции
  - Результат исполнения гарантируется таким же, как оригинальный, но промежуточные результаты другим ядрам могут быть видны странные
- У ядер процессора есть кеш (у каждого свой)
  - На самом деле, обычно три уровня кеша: L1 и L2 для каждого ядра свой, L3 общий для всех ядер
  - Кеши синхронизируются, но есть буферы чтения и записи, они нет

Примитивы синхронизации

- Лучше необходимости синхронизации вообще избегать
- Бывают:
  - User-mode — атомарные операции, реализующиеся на процессоре и не требующие участия планировщика
  - Kernel-mode — примитивы, управляющие тем, как поток обрабатывается планировщиком
    - Более тяжеловесные и медленные (до 1000 раз по сравнению с “без синхронизации вообще”)
    - Позволяют синхронизировать даже разные процессы

Атомарные операции

- Чтения и записи следующих типов всегда атомарны: Boolean, Char, (S)Byte, (U)Int16, (U)Int32, (U)IntPtr, Single, ссылочные типы
- Для других типов (например, Int64) операции чтения и записи могут быть прерваны посередине!
- Volatile
  - Volatile.Write
  - Volatile.Read
  - Связано с понятием Memory Fence, требует синхронизации ядер
  - Есть ключевое слово volatile: **private** volatile **int** flag = 0;
  - Volatile.Write должен быть последней операцией записи, Volatile.Read — первой операцией чтения
- Про это подробнее ближе к концу семестра, но volatile потребуется в домашке

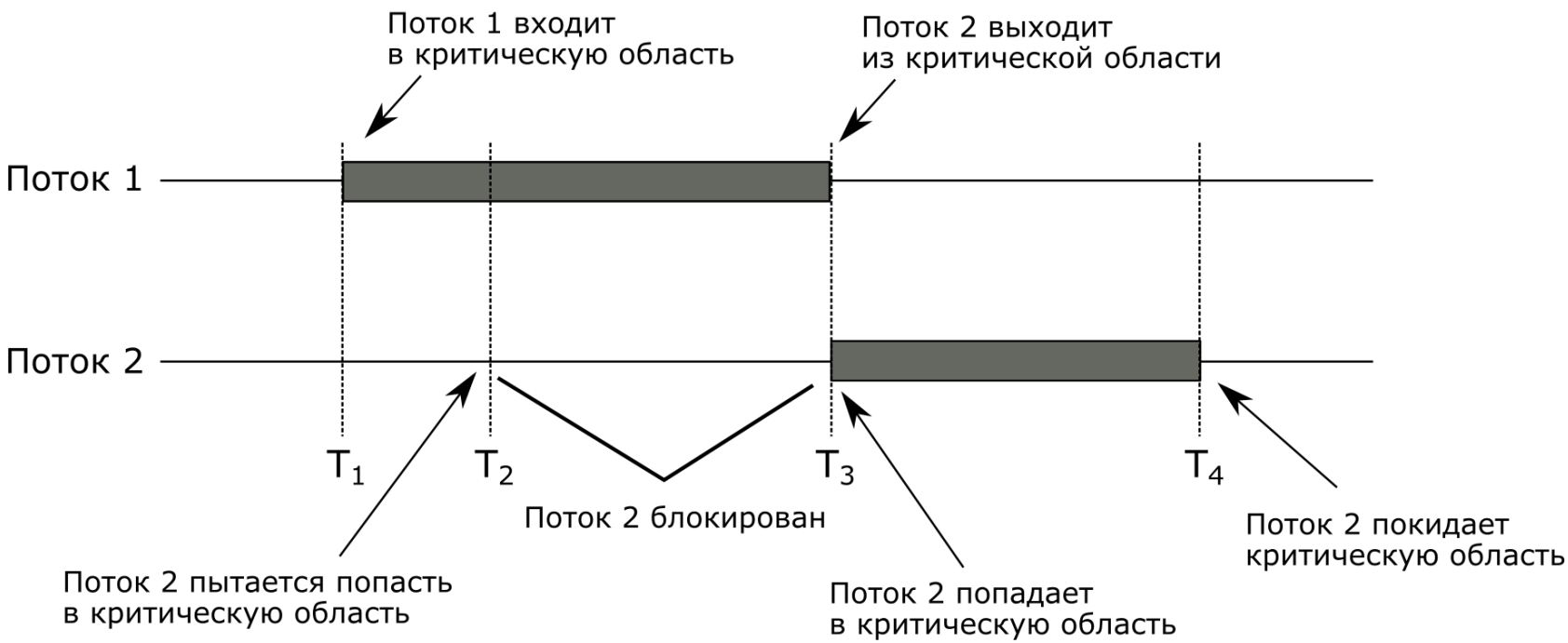
Пример

```
private int flag = 0;
private int value = 0;

public void Thread1() {
    value = 5;
    Volatile.Write(ref flag, 1);
}

public void Thread2() {
    if (Volatile.Read(ref flag) == 1)
        Console.WriteLine(value);
}
```

Критические области



Активное ожидание

```
private int turn = 0;

void Task1()
{
   while (true)
   {
      while (turn != 0) ;
      CriticalSection();
      turn = 1;
      NonCriticalSection();
   }
}

void Task2()
{
   while (true)
   {
      while (turn != 1) ;
      CriticalSection();
      turn = 0;
      NonCriticalSection();
   }
}
```

Активное ожидание, обсуждение

- Не требует поддержки ОС
  - Поэтому переключение может быть очень быстрым
- Ждущий поток полностью занимает ядро
  - Греет процессор и очень быстро сажает аккумулятор
- Потоки работают строго по очереди
  - Это можно побороть, есть алгоритм Петерсона

Проблема производителя и потребителя

Producer-consumer problem

```
private Queue<int> buffer = new Queue<int>();
```

```
private void Producer() {
   while (true) {
      var item = ProduceItem();
      if (buffer.Count == 100)
         Sleep();
      buffer.Enqueue(item);
      if (buffer.Count == 1)
         WakeUp(Consumer);
   }
}
```

```
private void Consumer() {
   while (true) {
      if (buffer.Count == 0)
         Sleep();
      var item = buffer.Dequeue();
      if (buffer.Count == 100 - 1)
         WakeUp(Producer);
      ConsumeItem(item);
   }
}
```

Семафоры

Дейкстры (того самого), 1965 год

- Целочисленный счётчик, который можно поднять и опустить (**up()** и **down()**)
- **down()** уменьшает счётчик на 1, если он больше нуля или блокирует вызывающего, если он 0
- **up()** увеличивает счётчик на один и, если он был нулём, будит одного из ожидающих потоков (случайного!)
- **down()** обычно делается при входе в критическую секцию, **up()** — при выходе
- Позволяет быть в критической секции не более чем заданному количеству потоков
  - Например, Google Drive не позволяет качать более чем с 10 подключениями одновременно, семафор решает проблему

Производитель-потребитель на семафорах

```
private Queue<int> buffer = new Queue<int>();
private Semaphore mutex = new Semaphore(0, 1);
private Semaphore empty = new Semaphore(100, 100);
private Semaphore full = new Semaphore(0, 100);
```

```
private void Producer()
{
   while (true)
   {
      var item = ProduceItem();
      empty.WaitOne();
      mutex.WaitOne();
      buffer.Enqueue(item);
      mutex.Release();
      full.Release();
   }
}
```

```
private void Consumer()
{
   while (true)
   {
      full.WaitOne();
      mutex.WaitOne();
      var item = buffer.Dequeue();
      mutex.Release();
      empty.Release();
      ConsumeItem(item);
   }
}
```

Мьютекс

- Мьютекс — бинарный семафор
  - Пускает ровно один поток в критическую секцию
- Существенно проще в реализации и использовании, чем семафор
- Тоже требует поддержки операционной системы
  - Может использоваться для синхронизации даже процессов

Производитель-потребитель на семафорах и мьютексе

```
private Queue<int> buffer = new Queue<int>();
private Mutex mutex = new Mutex();
private Semaphore empty = new Semaphore(100, 100);
private Semaphore full = new Semaphore(0, 100);
```

```
private void Producer()
{
  while (true)
  {
    var item = ProduceItem();
    empty.WaitOne();
    mutex.WaitOne();
    buffer.Enqueue(item);
    mutex.ReleaseMutex();
    full.Release();
  }
}
```

```
private void Consumer()
{
  while (true)
  {
    full.WaitOne();
    mutex.WaitOne();
    var item = buffer.Dequeue();
    mutex.ReleaseMutex();
    empty.Release();
    ConsumeItem(item);
  }
}
```

Монитор

Хоара, 1974 год

- Пользоваться семафорами очень сложно — например, поменять empty.WaitOne(); и mutex.WaitOne(); в Producer() — хороший способ устроить дедлок
  - Представим, что буфер полон. Producer() захватывает мьютекс и встаёт на семафоре empty, потому что он 0, управление передаётся Consumer(). Он тут же встаёт на mutex.WaitOne(), потому что он захвачен Producer()-ом. Теперь оба потока ждут друг друга.
- Поэтому придумали мониторы
- Монитор — набор методов (или функций), внутри которых может находиться ровно один поток
- Реализуется через мьютексы, требует поддержки в языке программирования

Производитель-потребитель на мониторе

```
private class SynchronizedQueue {
  private Queue<int> buffer =
    new Queue<int>();

  public void Enqueue(int item) {
    lock (buffer) {
      while (buffer.Count == 100)
        Monitor.Wait(buffer);
      buffer.Enqueue(item);
      Monitor.Pulse(buffer);
    }
  }

  public int Dequeue() {
    lock (buffer) {
      while (buffer.Count == 0)
        Monitor.Wait(buffer);
      var result = buffer.Dequeue();
      Monitor.Pulse(buffer);
      return result;
    }
  }
}
```

```
private SynchronizedQueue buffer =
  new SynchronizedQueue();

private void Producer() {
  while (true) {
    var item = ProduceItem();
    buffer.Enqueue(item);
  }
}

private void Consumer() {
  while (true) {
    var item = buffer.Dequeue();
    ConsumeItem(item);
  }
}
```

lock в .NET

- У каждого объекта (сылочного типа) есть скрытое поле, указывающее на структуру синхронизации
- lock использует именно её
  - То есть lock в одной критической секции, но на разные объекты — это разные мониторы
  - Но lock в разных секциях на один объект — один монитор
  - lock умеет обрабатывать исключения и отпускать замок
    - Предыдущие примеры с семафорами и мьютексами были неправильными — не учитывались исключенияы
- Хорошая практика — создавать объект специально для синхронизации, **lock**(**this**) писать нельзя!

```
private Object lockObject = new Object();

private void SomeMethod() {
   lock (lockObject) {
      ...
   }
}
```

WaitHandle

- WaitHandle — всё, что можно ожидать
  - EventWaitHandle
    - AutoResetEvent — по сути, булевый флаг, поддерживаемый ОС
    - ManualResetEvent — тоже булевый флаг, но сбрасывается вручную
- Остальные примитивы синхронизации — наследники WaitHandle

Пример (самодельный замок на Event-ах)

```
internal class SimpleWaitLock : IDisposable {
   private readonly AutoResetEvent available;
   public SimpleWaitLock() {
      available = new AutoResetEvent(true);
   }

   public void Enter() {
      available.WaitOne();
   }

   public void Leave() {
      available.Set();
   }

   public void Dispose() { available.Dispose(); }
}
```

Литература

Эндрю Таненбаум, Х. Бос, Современные операционные системы, Питер, 2017. 1120 С.

Jeffrey Richter, CLR via C# (4th Edition), Microsoft Press, 2012. 894pp.