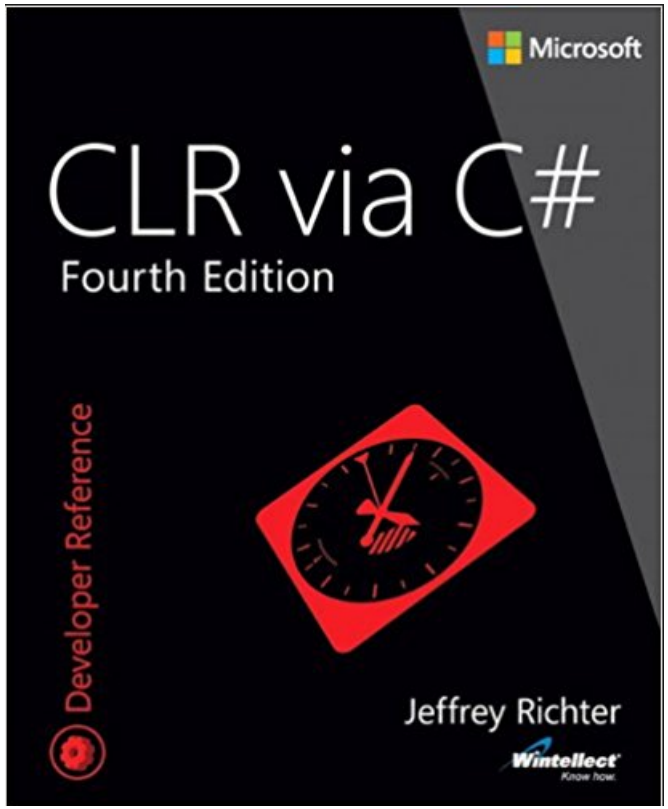
Сборка мусора в .NET

Юрий Литвинов

03.04.2020г

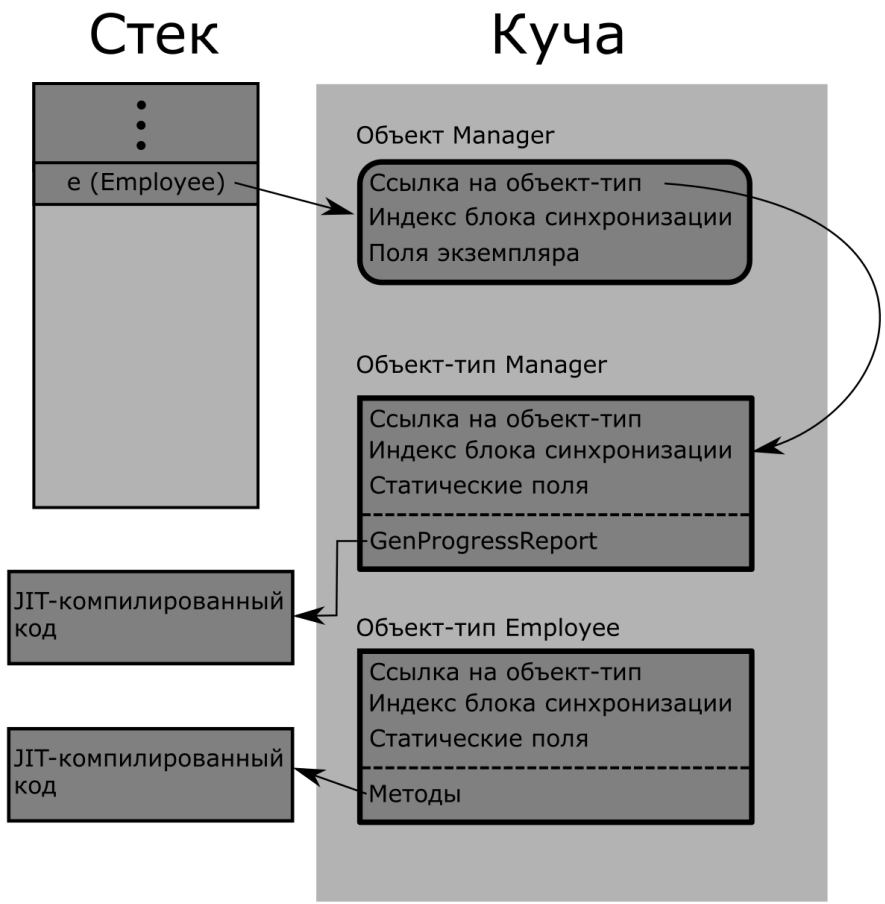
Книжка

Все примеры и картинки взяты из J. Richter, CLR via C# (4th edition), Microsoft Press, 2012, 896pp



Как объекты .NET представляются в памяти

```
let Example () =
    let e: Employee =
        new Manager()
    e.GenProgressReport()
```



Работа с ресурсами

- Выделить память под объект, представляющий ресурс
- Инициализировать ресурс
- Использовать ресурс, вызывая методы объекта
- Деинициализировать ресурс
- Освободить память

В отличие от C++, .NET не даст испортить память (без **unsafe**) и уменьшает вероятность утечек памяти

Выделение ресурсов

Managed Heap

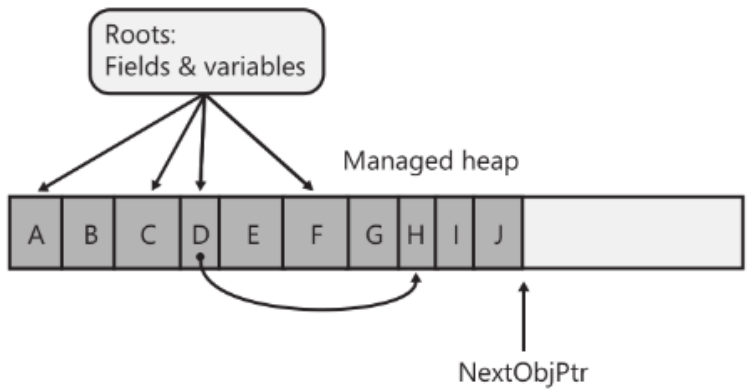
- Вычисление размера объекта
  - Поля объекта + поля, унаследованные от предка
- Добавление служебных данных
  - Указатель на объект-тип
  - Sync block index
- Проверка наличия свободного места на куче
- Сброс памяти в 0, вызов конструктора, возврат указателя на объект из **new**
  - Прямо перед возвратом продвигается указатель начала свободного места в куче

Особенности

- Managed Heap выделяется при запуске процесса, но может расти
  - Доступно порядка 1.5Гб для 32-битных систем и порядка 8Тб для 64-битных
- Выделение памяти — просто прибавить размер объекта к указателю
  - Делается мгновенно, в отличие от C++
- Объекты лежат друг за другом подряд
  - Занимают возможно мало страниц памяти
  - С большей вероятностью помещаются в кеш процессора

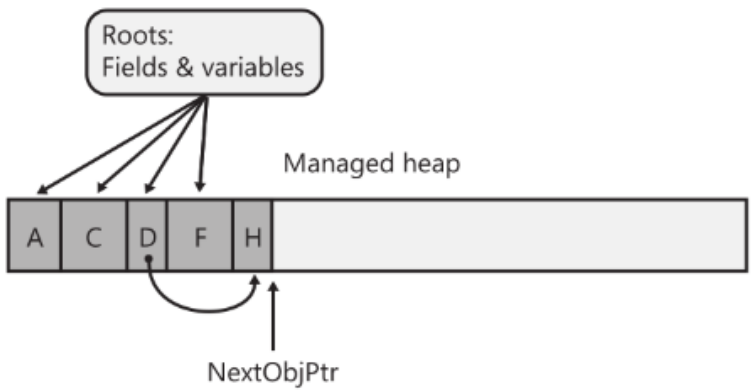
Сборка мусора, mark

- **roots** — переменные ссылочных типов, лежащие на стеке
- **marking** — пометка всех объектов, достижимых из roots, как живых
  - Исполнение всех потоков прерывается
  - Все объекты помечаются как мёртвые
    - Бит в sync block index
  - Гонится обход графа от root-ов



Сборка мусора, sweep

- “Сжатие кучи” — все живые объекты сдвигаются в куче так, чтобы занимать непрерывный участок памяти
  - Восстанавливается locality of reference
  - Исключается фрагментирование памяти
    - Чтобы выделение можно было и дальше осуществлять просто сдвигом указателя
- Ссылки в живых объектах редактируются с учётом сдвигов
- Потоки продолжают выполнение
- Если после сборки мусора памяти всё ещё не хватает, из new бросается OutOfMemoryException
- Статические поля живут вечно



Пример

Работает только на C# и только в .NET Framework

```
public static class Program {
    public static void Main() {
        // Create a Timer object that knows to call our TimerCallback
        // method once every 2000 milliseconds.
        Timer t = new Timer(TimerCallback, null, 0, 2000);
        // Wait for the user to hit <Enter>
        Console.ReadLine();
    }

    private static void TimerCallback(Object o) {
        // Display the date/time when this method got called.
        Console.WriteLine("In TimerCallback: " + DateTime.Now);
        // Force a garbage collection to occur for this demo.
        GC.Collect();
    }
}
```

Так тоже будет плохо

```
public static class Program {
   public static void Main() {
      // Create a Timer object that knows to call our TimerCallback
      // method once every 2000 milliseconds.
      Timer t = new Timer(TimerCallback, null, 0, 2000);
      // Wait for the user to hit <Enter>
      Console.ReadLine();
      // Refer to t after ReadLine (this gets optimized away)
      t = null;
   }

   private static void TimerCallback(Object o) {
      // Display the date/time when this method got called.
      Console.WriteLine("In TimerCallback: " + DateTime.Now);
      // Force a garbage collection to occur for this demo.
      GC.Collect();
   }
}
```

А вот так будет ок

```
public static class Program {
   public static void Main() {
      // Create a Timer object that knows to call our TimerCallback
      // method once every 2000 milliseconds.
      Timer t = new Timer(TimerCallback, null, 0, 2000);
      // Wait for the user to hit <Enter>
      Console.ReadLine();
      // Refer to t after ReadLine (t will survive GCs until Dispose returns)
      t.Dispose();
   }

   private static void TimerCallback(Object o) {
      // Display the date/time when this method got called.
      Console.WriteLine("In TimerCallback: " + DateTime.Now);
      // Force a garbage collection to occur for this demo.
      GC.Collect();
   }
}
```

Не всё так просто

Поколения

Каждый раз чистить память во всей куче было бы дорого, поэтому придумали поколения:

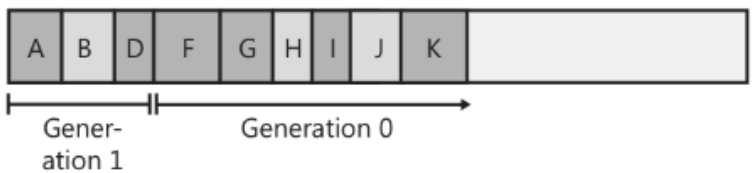
- Чем новее объект, тем меньше, скорее всего, он будет нужен
  - Различного рода локальные переменные и переменные внутри тел циклов
- Чем дольше объект живёт, тем дольше, скорее всего, он ещё проживёт
- Собирать память в части кучи можно быстрее, чем во всей куче

Все новые объекты добавляются в поколение 0:

Первая сборка мусора

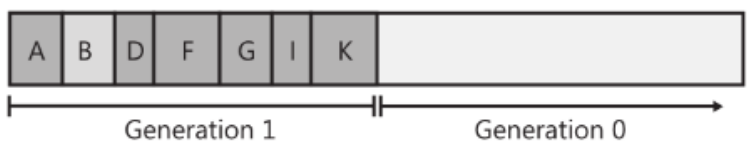
- Под поколение 0 выделяется “бюджет” памяти
- При переполнении поколения 0 происходит сборка мусора и все выжившие объекты перемещаются в поколение 1
  - Поколение 0 после GC всегда пусто

- Следующие выделения идут в поколение 0
- Объекты в поколении 1 могут стать недостижимы



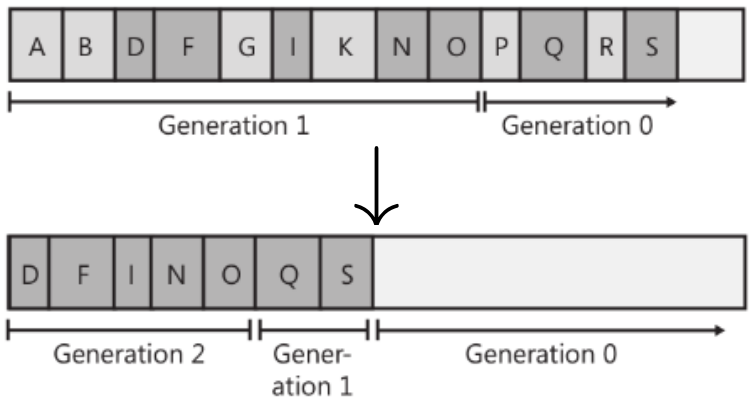
Последующие сборки мусора

- Сборки мусора в Gen0 игнорируют Gen1, пока бюджет первого поколения не превышен
  - При JIT-е для записи в поле ссылочного типа генерируется Write Barrier
  - Write Barrier выставляет флаг в Card Table, если объект в поколении 1 или 2
  - Сборщик мусора смотрит на Card Table, не обходя объекты из Gen1 и Gen2
  - Если есть изменения, то честно гонится обход и объекты помечаются как живые
  - После сборки мусора Card Table сбрасывается
  - Несколько медленнее запись в поля ссылочных типов, но значительно быстрее сборка мусора
- Недостижимые объекты в Gen1 могут пережить сборку мусора
- Сборка мусора в поколении 0 сравнима по времени с page fault (меньше миллисекунды)



Что дальше

Если бюджет поколения 1 превышен, запускается сборка мусора и выжившие объекты перемещаются в поколение 2:



Больше поколений не бывает (GC.MaxGeneration возвращает 2)
Сборщик мусора динамически управляет бюджетами на поколения

- Если выживших в поколении мало, бюджет уменьшается
- Сборки мусора происходят чаще, но быстрее, и надо меньше памяти

Когда происходит сборка мусора

- Закончился бюджет на поколение 0
- Явный вызов System.GC.Collect
  - Настоятельно не рекомендуется
- ОС сообщает о нехватке памяти
  - Да, CLR подписывается на события ОС
- Выгружается AppDomain
  - Выполняется финализация всех объектов
- Нормально завершается процесс с приложением
  - В отличие от убийства процесса через Task Manager
  - Выполняется только финализация, сжатие кучи не делается

Large Object Heap

- Объекты размером больше примерно 85000 байт живут по особым правилам
- Отдельная куча для таких объектов
- Не происходит сжатие кучи
  - Возможна фрагментация
  - Возможен OutOfMemoryException из-за фрагментации
- Они всегда считаются в поколении 2
  - Короткоживущие большие объекты заставляют GC страдать

Режимы сборки мусора

- Workstation — частая быстрая сборка на одном ядре, чтобы не тормозить подолгу и не мешать другим приложениям
  - По умолчанию
- Server — многопоточная сборка, занимающая весь процессор (считается, что приложение на сервере одно)
  - На одноядерной машине бесполезен и не используется

App.config/Web.config, включающий серверный GC:

```
<configuration>
  <runtime>
    <gcServer enabled="true"/>
  </runtime>
</configuration>
```

Многопоточная сборка

- Не Server-режим!
- Mark выполняется в отдельном потоке во время работы приложения
- Если требуется сборка поколений 0 или 1, всё работает как обычно
- Если требуется сборка поколения 2, в поколении 0 выделяется объект вне бюджета и приложение продолжает работать
- В это время гонится mark по поколению 2 в отдельном потоке
- Когда закончили, останавливаем потоки и выполняем sweep
- Mark уже пометил большинство достижимых объектов, так что сборка будет гораздо быстрее
- Сжатие кучи, как правило, при этом не происходит, если памяти ещё много

App.config/Web.config, **выключающий** параллельный GC:

```
<configuration>
  <runtime>
    <gcConcurrent enabled="false"/>
  </runtime>
</configuration>
```

Динамическая настройка GC

- Workstation/Server режимы выставляются при запуске и их нельзя менять
- Можно менять GCSettings.GCLatencyMode:
  - **Batch** — выключает параллельный GC
  - **Interactive** — включает параллельный GC (включён по умолчанию для Workstation)
  - **LowLatency** — избегание сборки поколения 2 (только по явному запросу или исчерпанию системной памяти)
  - **SustainedLowLatency** — избегание сборки поколения 2, минимизация сборок
    - Настолько близко к реальному времени, насколько .NET может

Особенности

- В любой непонятной ситуации кидается OutOfMemoryException
  - LowLatency имеет смысл включать по возможности ненадолго
  - Constrained execution region для переключения
  - Настройки GC действуют на весь процесс
    - Менять настройки GC из нескольких потоков сразу — плохая идея

```
private static void LowLatencyDemo() {
    GCLatencyMode oldMode = GCSettings.LatencyMode;
    System.Runtime.CompilerServices.RuntimeHelpers.PrepareConstrainedRegions();
    try {
        GCSettings.LatencyMode = GCLatencyMode.LowLatency;
        // Run your code here...
    }
    finally {
        GCSettings.LatencyMode = oldMode;
    }
}
```

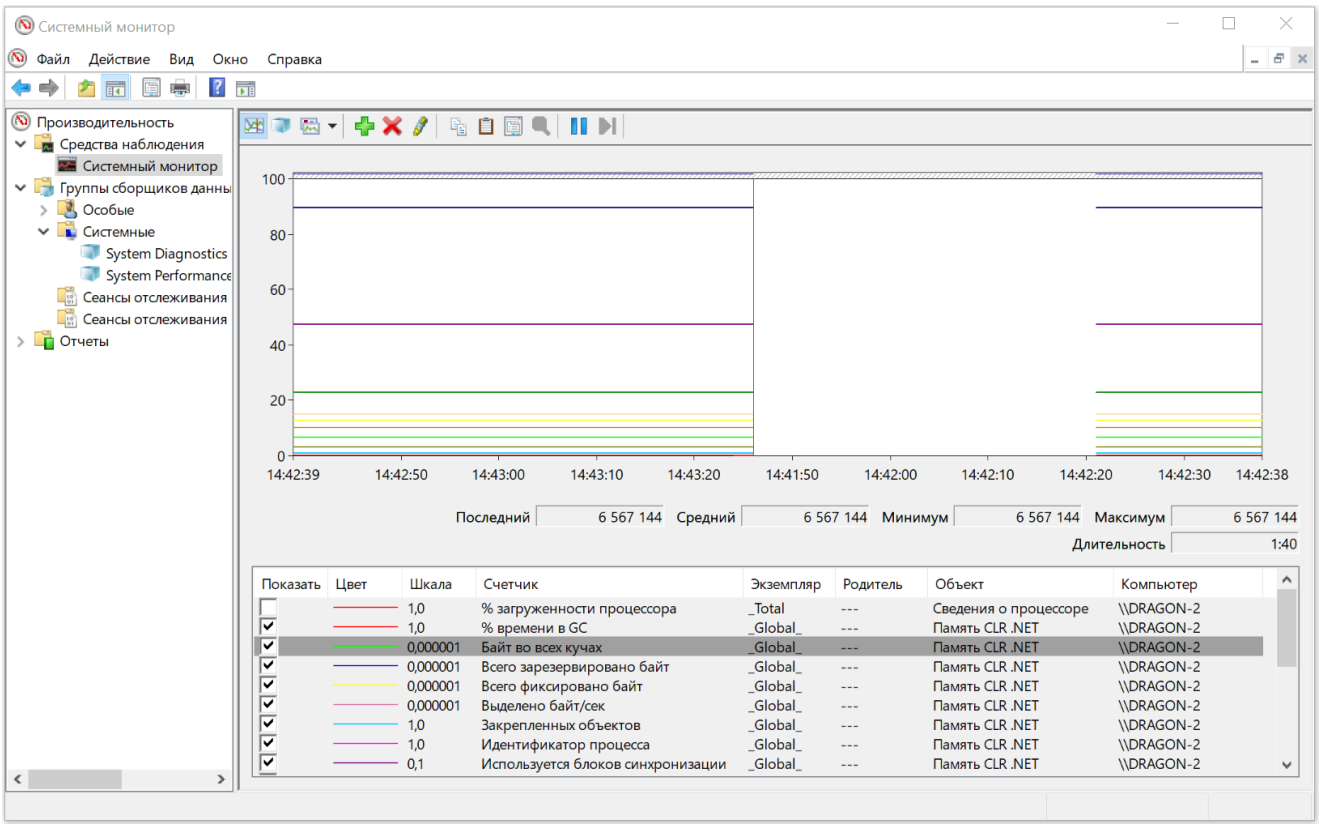
Ручная сборка

- GC.Collect
  - Поколение, до которого собирать
  - Режим
  - Параллельная или блокирующая сборка
- Режим:
  - **Default** — то же, что Forced (может поменяться)
  - **Forced** — принудительная сборка всех поколений до и включая запрошенное
  - **Optimized** — сборка, если GC считает это разумным
- В общем случае лучше не применять, бывает полезно, если в приложении есть *не повторяющееся* событие, освобождающее кучу объектов и нам как можно скорее надо почистить память (зачем бы то ни было)
- Collect обновляет бюджеты поколений

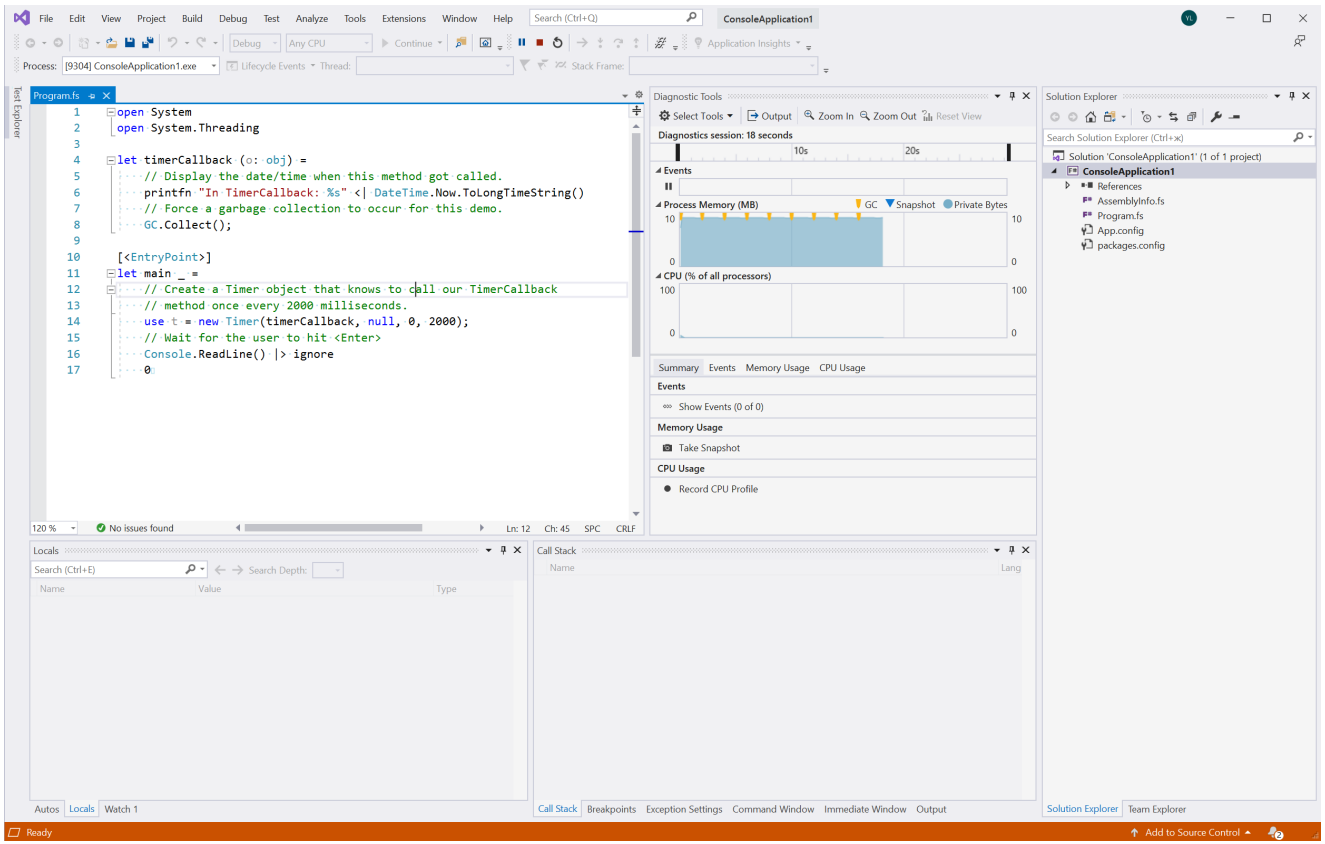
Мониторинг

Int32 CollectionCount(Int32 generation);
Int64 GetTotalMemory(Boolean forceFullCollection);

- Performance Counters (PerfMon.exe -> Add Counters -> .NET CLR Memory)



Мониторинг


File Edit View Project Build Debug Test Analyze Tools Extensions Window Help
ConsoleApplication1
Program.fs
open System
open System.Threading
let timerCallback (o: obj) =
// Display the date/time when this method got called.
printfn "In TimerCallback: %s" <| DateTime.Now.ToLongTimeString()
// Force a garbage collection to occur for this demo.
GC.Collect();
[<EntryPoint>]
let main _ =
// Create a Timer object that knows to call our TimerCallback
// method once every 2000 milliseconds.
use t = new Timer(timerCallback, null, 0, 2000);
// Wait for the user to hit <Enter>
Console.ReadLine() |> ignore
0
Diagnostic Tools
Diagnostics session: 18 seconds
Events
Process Memory (MB)
CPU (% of all processors)
Summary Events Memory Usage CPU Usage
Show Events (0 of 0)
Take Snapshot
Record CPU Profile
Solution Explorer
Solution 'ConsoleApplication1' (1 of 1 project)
ConsoleApplication1
References
AssemblyInfo.fs
Program.fs
App.config
packages.config
Locals
Call Stack
Ready

Финализаторы

- Если объекту требуется только память, то сборщик мусора всё сделает за нас, но бывает так, что требуются ещё системные ресурсы
  - System.IO.FileStream, System.Threading.Mutex
- Метод *Finalize()*
- Финализатор (просто синтаксис для Finalize):

```
internal sealed class SomeType {
   ~SomeType() {
      ...
   }
}
```

Не деструктор! Finalize вызывается, “когда хочет”

Дьявол в деталях

- Объекты с финализаторами всегда переживают сборку в своём поколении
  - Сборщик мусора должен дать финализатору отработать
  - Все поля объекта с финализатором тоже живут дольше, чем надо
- Порядок вызова финализаторов не определён
  - Из финализатора нельзя обращаться к объекту с финализатором
- Финализаторы запускаются в отдельном потоке
  - Нельзя рассчитывать на определённый поток
  - Если Finalize повис, то всё, все финализируемые объекты будут жить вечно
  - Если Finalize бросил исключение, то весь процесс аварийно завершается

System.Runtime.InteropServices.SafeHandle

```
public abstract class SafeHandle : CriticalFinalizerObject, IDisposable {
   protected IntPtr handle;

   protected SafeHandle(IntPtr invalidHandleValue, Boolean ownsHandle);
   protected void SetHandle(IntPtr handle);
   public void Dispose() { Dispose(true); }
   protected virtual void Dispose(Boolean disposing) {
      // The default implementation ignores the disposing argument.
      // If resource already released, return
      // If ownsHandle is false, return
      // Set flag indicating that this resource has been released
      // Call virtual ReleaseHandle method
      // Call GC.SuppressFinalize(this) to prevent Finalize from being called
      // If ReleaseHandle returned true, return
      // If we get here, fire ReleaseHandleFailed Managed Debugging Assistant (MDA)
   }
   ~SafeHandle() { Dispose(false); }
   protected abstract Boolean ReleaseHandle();
...
   public void DangerousAddRef(ref Boolean success) {...}
   public IntPtr DangerousGetHandle() {...}
   public void DangerousRelease() {...}
}
```

Пример, SafeFileHandle

```
public sealed class SafeFileHandle : SafeHandleZeroOrMinusOneIsInvalid {
   public SafeFileHandle(IntPtr preexistingHandle, Boolean ownsHandle)
      : base(ownsHandle) {
      base.SetHandle(preexistingHandle);
   }

   protected override Boolean ReleaseHandle() {
      // Tell Windows that we want the native resource closed.
      return Win32Native.CloseHandle(base.handle);
   }
}
```

IDisposable, так не работает

```
public static class Program {
   public static void Main() {
      // Create the bytes to write to the temporary file.
       Byte[] bytesToWrite = new Byte[] { 1, 2, 3, 4, 5 };

      // Create the temporary file.
      FileStream fs = new FileStream("Temp.dat", FileMode.Create);

      // Write the bytes to the temporary file.
      fs.Write(bytesToWrite, 0, bytesToWrite.Length);

      // Delete the temporary file.
      File.Delete("Temp.dat"); // Throws an IOException
   }
}
```

IDisposable, так работает

```
public static class Program {
   public static void Main() {
      // Create the bytes to write to the temporary file.
       Byte[] bytesToWrite = new Byte[] { 1, 2, 3, 4, 5 };

      // Create the temporary file.
      FileStream fs = new FileStream("Temp.dat", FileMode.Create);

      // Write the bytes to the temporary file.
      fs.Write(bytesToWrite, 0, bytesToWrite.Length);

      // Explicitly close the file when finished writing to it.
      fs.Dispose();

      // Delete the temporary file.
      File.Delete("Temp.dat"); // Throws an IOException
   }
}
```

IDisposable, детали

- Класс, реализующий IDisposable, должен уметь бросать System.ObjectDisposedException из всех своих методов и свойств
- Dispose не должен бросать исключение
  - Если вызван несколько раз, то просто ничего не делать
- Если вы явно вызываете Dispose из своего кода, вы, скорее всего, делаете что-то не так
- Dispose не обязан быть thread-safe

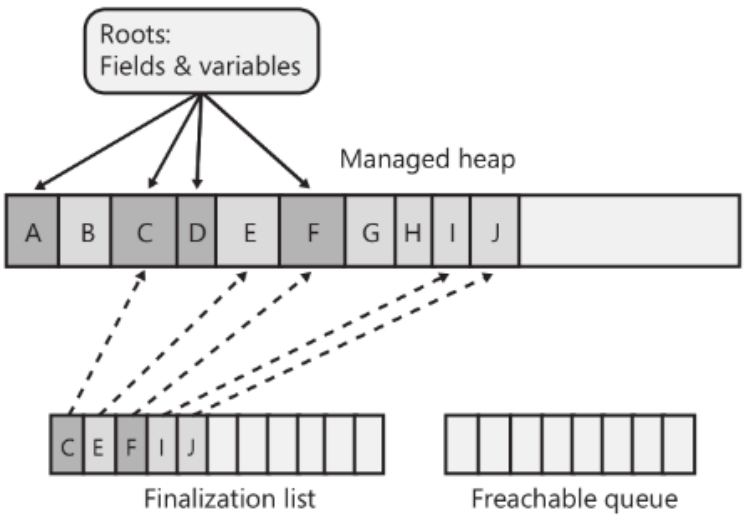
using

```
public static class Program {
   public static void Main() {
      // Create the bytes to write to the temporary file.
      Byte[] bytesToWrite = new Byte[] { 1, 2, 3, 4, 5 };
      // Create the temporary file.
      using (FileStream fs = new FileStream("Temp.dat", FileMode.Create)) {
         // Write the bytes to the temporary file.
         fs.Write(bytesToWrite, 0, bytesToWrite.Length);
      }
      // Delete the temporary file.
      File.Delete("Temp.dat");
   }
}
```

- Или **using var** в C# 8 или **use** в F#

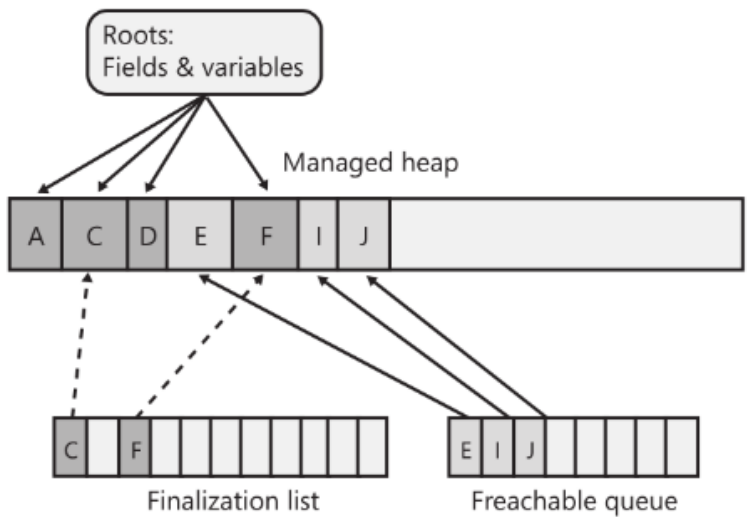
Финализация изнутри

- Finalization list — туда добавляются все объекты, переопределяющие Finalize(), в момент создания
- Freachable queue — туда перекладываются объекты из Finalization list, которые должны умереть, в момент сборки мусора



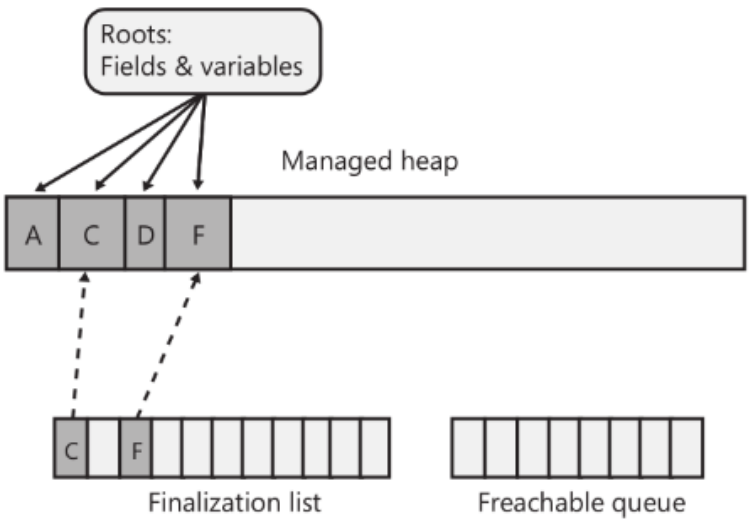
Финализация изнутри (2)

- Объекты из Freachable queue считаются сборщиком мусора root-ами и не умирают
- Финализаторы запускаются в отдельном потоке для каждого объекта из очереди
- Объекты выкидываются из очереди в процессе



Финализация изнутри (3)

- При сборке мусора в следующем поколении финализированные объекты собираются, потому что на них уже точно нет ссылок



Ручное управление жизнью объекта

- System.Runtime.InteropServices.GCHandle
  - Value type, содержит указатель на запись в handle table
  - Записи в handle table содержат объекты, но не все они считаются root-ами
- GCHandleType:
  - **Weak** — позволяет узнать, что объект уже не нужен, но не факт, что финализатор отработал
  - **WeakTrackResurrection** — позволяет узнать, что объект уже не нужен и уже финализирован
  - **Normal** — просьба к GC держать объект в памяти, но можно двигать
  - **Pinned** — просьба к GC держать объект в памяти и не двигать
    - Ключевое слово **fixed**

Пример, fixed

```
unsafe public static void Go() {
   // Allocate a bunch of objects that immediately become garbage
   for (Int32 x = 0; x < 10000; x++) new Object();
   IntPtr originalMemoryAddress;
   Byte[] bytes = new Byte[1000]; // Allocate this array after the garbage objects

   // Get the address in memory of the Byte[]
   fixed (Byte* pbytes = bytes) { originalMemoryAddress = (IntPtr) pbytes; }

   // Force a collection; the garbage objects will go away & the Byte[] might be compacted
   GC.Collect();

   // Get the address in memory of the Byte[] now & compare it to the first address
   fixed (Byte* pbytes = bytes) {
      Console.WriteLine("The Byte[] did{0} move during the GC",
         (originalMemoryAddress == (IntPtr) pbytes) ? " not" : null);
   }
}
```

WeakReference

```
public sealed class WeakReference<T> : ISerializable where T : class {
   public WeakReference(T target);
   public WeakReference(T target, Boolean trackResurrection);
   public void SetTarget(T target);
   public Boolean TryGetTarget(out T target);
}
```