

Событийно-ориентированное программирование

Юрий Литвинов

y.litvinov@spbu.ru

1. Введение

В этой лекции речь пойдёт про событийную систему C# и лямбда-функции. Лямбда-функции, на самом деле, очень полезны и безотносительно событийно-ориентированного программирования, но оказываются очень удобны в качестве обработчиков событий (только использовать их в этом качестве надо очень аккуратно, иначе утечки памяти гарантированы).

Нужна событийная система прежде всего для разработки программ с пользовательским интерфейсом. В отличие от большинства консольных программ, программы с пользовательским интерфейсом не управляют сами процессом вычисления, а ждут событий извне (например, что пользователь кликнет на кнопку) и реагируют на них. Делается это с помощью системной очереди сообщений, в которую сама операционная система ставит событие, и цикла обработки событий, в котором оконное приложение проверяет очередь сообщений и, если она не пуста, забирает оттуда событие и обрабатывает его. При этом, как правило, библиотека, на базе которой написано оконное приложение, занимается диспетчеризацией события, то есть находит конкретный элемент управления, которому событие предназначено, и вызывает правильный обработчик события. Дело прикладного программиста — лишь переопределить обработчики.

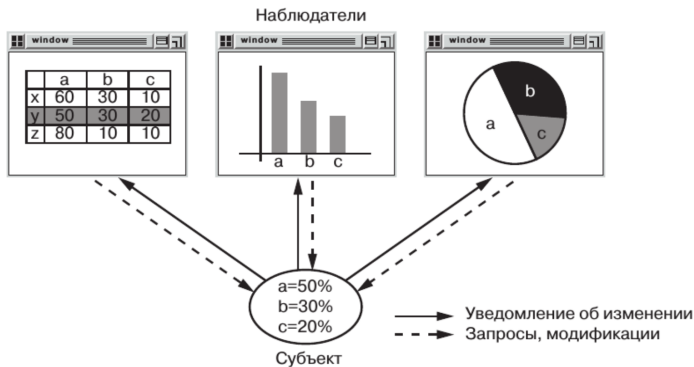
Событийное программирование применяется не только для разработки оконных приложений. Вообще, большая часть приложений, работающих в мире, запускается и ждёт наступления какого-либо события — поступления сетевого запроса, срабатывания датчика, действия пользователя, события от таймера и т.д. Постоянно крутиться в цикле и проверять, не произошло ли событие сейчас, нельзя, потому что непрерывно исполняющийся бесконечный цикл загружает на 100% ядро процессора, что негативно сказывается на энергопотреблении, шуме от вентилятора и работоспособности остальной системы. Поэтому поток, ожидающий события, блокируется операционной системой до того, как ожидаемое событие не наступит, и системных ресурсов почти не потребляет.

Обработка событий когда-то давно реализовывалась с помощью такого понятия, как `callback`. Колбэк — это, по сути, указатель на функцию, которую можно вызвать. Так, например, работал старый WinAPI (программный интерфейс операционной системы Windows) — если мы хотим ловить в нашей программе событие «пользователь нажал на кнопку», мы создаём функцию, которая будет обрабатывать это событие, берём указатель на неё, и передаём оконной системе, чтобы она связала кнопку и этот указатель. Тогда по нажатию на кнопку по указателю вызовется функция. Это плохо вяжется с ООП, потому что есть виртуальные методы (конкретный адрес, по которому надо передать управление,

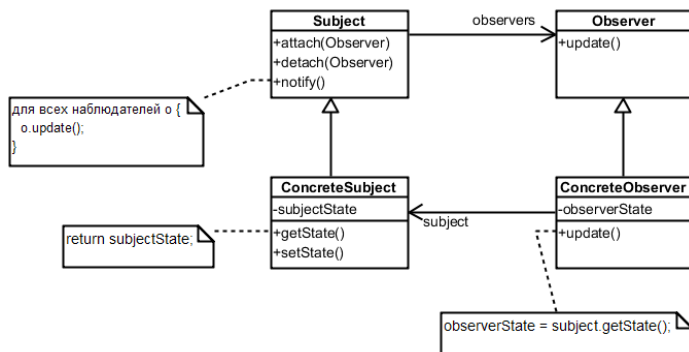
может быть неизвестен во время компиляции).

Более объектно-ориентированный способ — когда библиотека определяет в классе “Кнопка” абстрактный метод “РеагироватьНаКлик”, а в пользовательском коде мы наследуемся от кнопки и переопределяем этот метод так, чтобы он делал что-нибудь полезное. Оконная библиотека, когда получила событие, вызывает у кнопки её метод и происходит вызов переопределённого метода у потомка. Этот приём называется “Inversion of Control” — не мы вызываем библиотечный код, а библиотека наш. Используется этот приём, как обычно, не только в оконных приложениях, но и везде, где существенную часть всяких рутинных действий по организации процесса вычисления можно вынести в библиотеку (те же веб-приложения устроены так же).

Ещё более идеологически правильным решением является паттерн «Наблюдатель». Этот паттерн заключается в том, что есть наблюдаемый объект, который может производить некоторые события, и есть наблюдающие за ним объекты, которые хотят получать оповещения об этих событиях. В таком случае, наблюдающие объекты регистрируются в наблюдаемом (обычно просто заносятся в список), и когда в наблюдаемом объекте происходит какое-то событие, наблюдаемый объект бежит по списку наблюдателей, говоря каждому, что произошло событие:



Вот диаграмма классов, которая обобщает изложенное выше:



Subject — это штука, которая может производить события (например, кнопка). У неё есть методы, позволяющие зарегистрировать наблюдателей (класс Observer), и метод

notify(), который бежит по списку зарегистрированных наблюдателей и вызывает их метод, ответственный за обработку события (тут update()). При этом подробности произошедшего либо прямо передаются как параметры в этот метод, либо наблюдатель может спросить у субъекта подробности сам (как тут ConcreteObserver, наследующийся от Observer, может спросить у ConcreteSubject детали через метод getState()).

Собственно, в Java долгое время обработчики событий реализовывались буквально как в этом паттерне. Создавался класс, реализующий интерфейс ActionListener, состоящий из одного метода actionPerformed, где и делается всё, что надо делать по клику на кнопку. Потом с помощью вызова метода кнопки addActionListener объект этого класса регистрировался в кнопке. Потом пользователь нажимал на кнопку, кнопка обходила список объектов типа ActionListener, вызывая их методы actionPerformed. Чтобы это было удобно (не приходилось долго и мучительно передавать состояние в объект-обработчик), в Java даже сделали весьма странный языковой механизм — нестатические вложенные классы, которые неявно хранили ссылку на объект объемлющего класса, который их создал. Кроме того, в Java есть «анонимные классы», или объектные выражения, которые могут реализовывать интерфейс прямо на месте, при вызове addActionListener. Такой объект, объявленный локально в методе, имел ещё и доступ к локальным переменным метода (то есть реализовывалось честное замыкание), так что до лямбда-функций оставался один шаг, который и был сделан в 2014 году в Java 8. В C# всё появилось гораздо раньше.

2. Делегаты

На самом деле, работа с событиями достаточно важна, чтобы в C# появилась довольно мощная языковая поддержка для паттерна «Наблюдатель» (как ни странно, в отличие от Java, где всё ограничилось анонимными классами и лямбда-функциями). Но появилась эта поддержка не сразу, язык эволюционировал, и довольно уродливый синтаксис первых версий языка постепенно заменился на довольно удобный синтаксис, который используется сейчас. Но поскольку эволюция шла в направлении повышения уровня абстракции, и каждый следующий вид синтаксиса на самом деле базируется на предыдущих, то имеет смысл повторить этот путь, благо в коде и в различной документации часто можно наткнуться на термины типа «Делегат». Собственно, с делегатов и начнём.

Делегат в .NET — это объект, который по сути является ссылкой на некоторый метод. Тут важно, что делегат — это объект, он довольно многое знает о том методе, на который ссылается: его параметры (с типами), тип возвращаемого значения, адрес того метода, который надо вызвать, переменные, попавшие в замыкание делегата (но об этом попозже). В делегате можно сохранить ссылку на метод, передать куда-нибудь делегат, а потом вызвать делегат, при этом вызовется тот метод, который там лежит.

Делается это так. Сначала надо объявить тип делегата:

```
public delegate void Feedback(int value);
```

delegate — ключевое слово, Feedback — имя типа делегата. Такой делегат может хранить в себе ссылку на любой метод, принимающий один int-овый параметр и ничего не возвращающий. На самом деле, Feedback — это автоматически генерируемый компилятором класс, наследуемый от библиотечного класса System.MulticastDelegate, который в

свою очередь наследуется от `System.Delegate`, у него есть всякие методы, самый интересный из которых — генерируемый компилятором метод `Invoke(...)`, вызов метода, на который делегат ссылается. `Invoke` имеет те же параметры, что и сам делегат, в данном случае, `int`, и возвращает то, что возвращает делегат, в данном случае — ничего.

Ещё есть методы `BeginInvoke(...)` и `EndInvoke()`, позволяющие вызвать делегат асинхронно. Это довольно часто использовавшийся раньше в стандартной библиотеке паттерн обеспечения асинхронных вызовов, `Begin...` инициирует асинхронную операцию, принимая необходимые аргументы и колбэк, и тут же возвращая управление вызывающему. Операция выполняется в параллельном потоке, и когда она заканчивает исполнение, вызывается колбэк (в потоке делегата, не в вызывающем), который может получить доступ к результатам вычислений, выполненных делегатом, с помощью метода `EndInvoke`.

Интересно, что для вызова делегата можно обойтись и без `Invoke`, а просто вызвать делегат, как будто это обычная функция:

```
public delegate int HashFunction(string str, int hashSize);

private static class HashFunctions
{
    public static int Hash1(string str, int hashSize)
    {
        return str[0] % hashSize;
    }

    public static int Hash2(string str, int hashSize)
    {
        int result = 0;
        foreach (var ch in str)
        {
            result += ch;
        }

        return result % hashSize;
    }
}

static void Main(string[] args)
{
    var h = new HashFunction(HashFunctions.Hash1);
    var result = h("ololo", 10);
}
```

Тут вызовется статический метод `HashFunctions.Hash1`.

3. Пример: цикл обработки событий

Делегаты даже в таком виде можно использовать для реализации событийной схемы. Собственно, можно построить модель своей собственной «оконной системы» с циклом обработки событий и обработчиками. Она у нас будет очень простая, но вполне подойдёт для примера, который будет постепенно эволюционировать, следуя за появлением языковых особенностей в C#. Положим, мы пишем компьютерную игру, и хотим, чтобы она реагировала на нажатие стрелочек на клавиатуре. Было бы разумно разделить пользовательский ввод и реакцию на действия пользователя по разным классам, так что нам потребуются классы EventLoop и Game. Псевдокод цикла обработки событий выглядел бы так:

```
public class EventLoop
{
    public void Run()
    {
        while (true)
        {
            var key = Console.ReadKey();
            switch (key.Key)
            {
                case ConsoleKey.LeftArrow:
                    // Сделать что-то по нажатию на "влево"
                    break;
                case ConsoleKey.RightArrow:
                    // Сделать что-то по нажатию на "вправо"
                    break;
            }
        }
    }
}

static void Main(string[] args)
{
    var eventLoop = new EventLoop();
    eventLoop.Run();
}
```

Попользуем делегаты для того, чтобы задавать нужную нам функциональность как реакцию на события нажатия клавиш:

```
public delegate void ArrowHandler();

public class EventLoop
{
    public void Run(ArrowHandler left, ArrowHandler right)
    {
        while (true)
```

```

    {
        var key = Console.ReadKey(true);
        switch (key.Key)
        {
            case ConsoleKey.LeftArrow:
                left();
                break;
            case ConsoleKey.RightArrow:
                right();
                break;
        }
    }
}

public class Game
{
    public void OnLeft()
    {
        Console.WriteLine("Going left");
    }

    public void OnRight()
    {
        Console.WriteLine("Going right");
    }
}

static void Main(string[] args)
{
    var eventLoop = new EventLoop();
    var game = new Game();
    eventLoop.Run(new ArrowHandler(game.OnLeft), new ArrowHandler(game.OnRight));
}

```

Обратите внимание, метод `Main` остаётся очень простым, всё, что он делает — это связывает цикл обработки событий и игру. Ни игра ничего не знает о цикле обработки событий, ни цикл обработки событий ничего не знает об игре, что даёт нам возможность переиспользовать эти классы в разных других ситуациях.

4. Комбинирование делегатов

Паттерн «Наблюдатель» прекрасно работает, если за одним объектом хотят наблюдать сразу несколько наблюдателей (они просто добавляются в список, и наблюдаемый объект сообщает о событии им всем). У нас пока что так нельзя, потому что делегаты передаются

в конструктор нашего цикла обработки событий. Допустим, мы хотим помимо собственно игры прицепить к циклу обработки событий объект для записи действий пользователя, который бы, например, запоминал, куда ходил пользователь, и отправлял бы данные на сервера тайного мирового правительства. Это можно сделать прямо в Game, но это архитектурно плохо, потому что эта функциональность к Game не относится, и было бы хорошо, если бы Game вообще ничего про это не знала. Делегаты так умеют — они поддерживают так называемый мультикастинг, то есть рассылку сообщения множеству адресатов. Делегату можно приписать ещё один метод, который он будет вызывать, когда его вызовут, с помощью оператора +=, или статического метода Delegate.Combine. Можно было бы написать вот такой код, который бы позволил зарегистрировать больше одного делегата на одно и то же событие:

```
public void Register(SomeDelegateType someDelegate)
{
    if (currentDelegate == null)
    {
        currentDelegate = someDelegate;
    }
    else
    {
        Delegate.Combine(currentDelegate, someDelegate);
    }
}
```

Более понятно должно быть из большого примера:

```
public delegate void ArrowHandler();

public class EventLoop
{
    private ArrowHandler leftHandler;
    private ArrowHandler rightHandler;

    public void RegisterLeftHandler(ArrowHandler left)
    {
        leftHandler += left;
    }

    public void RegisterRightHandler(ArrowHandler right)
    {
        rightHandler += right;
    }

    public void Run()
    {
        while (true)
        {
```

```

        var key = Console.ReadKey(true);
        switch (key.Key)
        {
            case ConsoleKey.LeftArrow:
                if (leftHandler != null)
                {
                    leftHandler();
                }

                break;
            case ConsoleKey.RightArrow:
                if (rightHandler != null)
                {
                    rightHandler();
                }

                break;
        }
    }
}

```

```

public class Game
{
    public void OnLeft()
    {
        Console.WriteLine("Going left");
    }

    public void OnRight()
    {
        Console.WriteLine("Going right");
    }
}

```

```

public class Logger
{
    private List<string> log = new List<string>();

    public void LeftPressed()
    {
        log.Add("Left");
    }

    public void RightPressed()
    {

```



```

        log.Add("right");
    }
}

static void Main(string[] args)
{
    var eventLoop = new EventLoop();
    var game = new Game();
    var logger = new Logger();

    eventLoop.RegisterLeftHandler(game.OnLeft);
    eventLoop.RegisterRightHandler(game.OnRight);

    eventLoop.RegisterLeftHandler(logger.LeftPressed);
    eventLoop.RegisterRightHandler(logger.RightPressed);

    eventLoop.Run();
}

```

Мы тут ещё пользуемся механизмом, называемым **Method Group Conversion** — явно не создаём объект делегата, передавая в метод, принимающий делегат, прямо метод, на который этот делегат должен указывать. Например, `eventLoop.RegisterLeftHandler(game.OnLeft);`. Это то же самое, что и создание делегата, только короче. Ещё обратите внимание, что мы проверяем делегат на `null` перед вызовом — теперь может так оказаться, что никто не добавит свой обработчик, при этом программа не должна падать.

Можно и отписываться от событий, используя оператор `-=`, например, можно сделать метод

```

public void UnregisterLeftHandler(ArrowHandler left)
{
    leftHandler -= left;
}

```

Делать подобные методы обычно весьма мудро, потому что пока делегат добавлен в какую-нибудь цепочку вызовов, сборщик мусора не может его собрать, а значит, не может собрать и все объекты, на которые делегат ссылается. Случайно не отписанный вовремя делегат может иметь ужасные последствия в плане скорости работы и занимаемой памяти. Представим себе ситуацию, когда, например, при переинициализации рабочей области текстового редактора (например, при открытии документа) мы подписываем делегаты, обрабатывающие события нажатия на клавиши, и случайно забываем отписать те делегаты, что уже были подписаны. Если при этом редактор устроен так, что обработчики только лишь запрашивают состояние рабочей области, обновляют внутреннюю структуру документа и не производят видимых эффектов, то проблему можно будет заметить только через несколько тысяч открытий документов — редактор станет работать заметно медленнее. Вряд ли такой баг будет замечен при тестировании.

5. Внутреннее устройство цепочек делегатов

Чтобы окончательно разобраться, что происходит в делегатах с цепочками, можно посмотреть на то, как примерно выглядит сгенерированный метод `Invoke` для делегата `Feedback`, с которого начинался этот рассказ:

```
public Int32 Invoke(Int32 value) {
    Int32 result;
    Delegate[] delegateSet = _invocationList as Delegate[];
    if (delegateSet != null)
    {
        foreach (Feedback d in delegateSet)
        {
            result = d(value);
        }
    }
    else
    {
        result = _methodPtr.Invoke(_target, value);
    }

    return result;
}
```

Видим, что `_invocationList` — это просто массив делегатов, и если он `null`, то ничего интересного не происходит — вызывается метод и возвращается его значение. А вот если он не `null`, то делегаты последовательно вызываются из массива, при этом «наше» значение `_methodPtr` даже не используется. Ещё, что важно, если делегатов несколько, то и результатов несколько, так что результатом вызова цепочки станет результат последнего вызванного делегата. Обычно порядок делегатов в цепочке сложно предсказать — он соответствует порядку, в котором делегаты подписывались, но объект, посылающий событие, вряд ли может знать, кто и в каком порядке на него подписан. Поэтому использовать цепочки делегатов рекомендуется (очень рекомендуется) только в случае, если они возвращают `void`, либо возвращаемое значение можно проигнорировать. То же самое с исключениями — если кто-то из цепочки бросит исключение, оставшиеся делегаты даже не будут вызваны, что не всегда желательно.

В принципе, цепочка делегатов доступна с помощью метода `GetInvocationList()` у делегата, так что вызов делегатов из цепочки можно сделать и вручную, так:

```
Delegate[] arrayOfDelegates = leftHandler.GetInvocationList();
foreach (ArrowHandler handler in arrayOfDelegates)
{
    try
    {
        handler.Invoke();
    }
    catch (InvalidOperationException e)
```

```

{
    Object component = handler.Target;
    Console.WriteLine(
        "Failed to call handler from {1}{2}{0} Error: {3}{0}{0}",
        Environment.NewLine,
        ((component == null) ? "" : component.GetType() + "."),
        handler.GetMethodInfo().Name,
        e.Message);
}
}

```

Тут, если делегат из цепочки бросил исключение, исключение обрабатывается и делегаты из цепочки спокойно вызываются дальше.

6. Шаблонные типы-делегаты

Кучу кода из приведённого примера с циклом обработки событий на самом деле можно не писать. Первое, что можно заметить, что обработчик события нажатия на кнопку — это просто метод, который ничего не принимает и ничего не возвращает, нам не важно, как называется тип делегата, и никакого преимущества от объявления типа `ArrowHandler` мы не получили. Поэтому в стандартной библиотеке объявлены классы `Action` и `Func`, `Action` представляет собой генерик-делегат, принимающий до 15 каких угодно параметров и ничего не возвращающий. `Func` представляет делегат, который принимает до 15 параметров любого типа и возвращает значение. Например, вместо `ArrowHandler` можно было писать просто `Action`, а вместо делегата из самого начала,

```
public delegate int HashFunction(string str, int hashSize);
```

можно было использовать `Func<string, int, int>`. Два первых параметра-типа — это аргументы, последний — тип возвращаемого значения. `Func` и `Action` появились в стандартной библиотеке не сразу, поэтому в самой библиотеке нередко объявления типов-делегатов. На самом деле, по словам Джеффри Рихтера, ситуация в стандартной библиотеке была примерно такой:

```

public delegate void TryCode(Object userData);
public delegate void WaitCallback(Object state);
public delegate void TimerCallback(Object state);
public delegate void ContextCallback(Object state);
public delegate void SendOrPostCallback(Object state);
public delegate void ParameterizedThreadStart(Object obj);

```

Понятно, что эти типы описывают одно и то же, но при этом не совместимы друг с другом (ну а что, это никак не связанные между собой типы, присваивать один делегат другому нельзя). Собственно, кто-то решил, что так дальше жить нельзя, и появились генерики `Func` и `Action`. Кстати, не всегда `Func` и `Action` подходят как типы делегатов — если ваш метод принимает `out`- и `ref`-параметры, то `Func` и `Action` не могут быть его типами (из-за вариантности, но что это такое — будет рассказано немного потом).

7. События

Делегаты обычно используются именно не как колбэки, а как средства для реагирования на некоторые события (бывают и другие способы их применения, но про это чуть-чуть попозже). Поэтому в С# есть специальная поддержка понятия «событие», чтобы не писать код, который позволял бы зарегистрировать/разрегистрировать делегат. Можно, конечно, поля делегатов из примера выше сделать `public`, и этот код не писать, регистрируя делегат непосредственно в `Main`-е, так:

```
eventLoop.leftHandler += game.OnLeft;
```

но это идеологически очень плохо, потому что так вызывающий может, во-первых, зарегистрировать/разрегистрировать что угодно без ведома класса, а во-вторых (и в главных), сам вызвать все прицепленные делегаты, вызвав `eventLoop.leftHandler.Invoke()`. Событие, идеологически, может быть инициировано только тем классом, в котором оно описано, иначе можно запутаться в причинно-следственных связях в программе. Так что возможность вызвать делегат извне — это страшная дыра в инкапсуляции.

Поэтому есть ключевое слово `event`, которое говорит, что мы хотим дать возможность подписываться на такое-то событие, и вызывать срабатывание этого события только из того класса, где оно объявлено. В нашем примере это могло бы выглядеть так:

```
public event Action LeftHandler;  
public event Action RightHandler;
```

Тогда на такие события можно безопасно подписываться в `Main`-е, как будто они просто публик-делегаты:

```
eventLoop.LeftHandler += game.OnLeft;  
eventLoop.RightHandler += game.OnRight;  
  
eventLoop.LeftHandler += logger.LeftPressed;  
eventLoop.RightHandler += logger.RightPressed;
```

Методы регистрации делегатов больше не нужны, и инициировать событие извне класса не получится (будет ошибка компиляции). Инициирование события изнутри класса можно точно так же, как мы делали с делегатами. На самом деле, `event` при компиляции просто порождает методы подписывания/отписывания и `private`-поле для хранения делегата, которые мы писали руками. Очень похоже на свойство — там тоже генерируется поле и пара методов для чтения и записи значения в поле. Как мы увидим дальше, события действительно можно понимать как свойства для делегатов.

8. Анонимные методы

Большинство методов-обработчиков пишутся для использования только с одним каким-то событием, и нигде больше не вызываются. Можно сэкономить усилия на объявление метода и придумывание ему имени, воспользовавшись анонимными методами. Анонимные методы могут быть объявлены прямо в месте использования. В нашем примере, например, логгер мог бы быть не отдельным классом, а просто кодом в `Main`:

```

static void Main(string[] args)
{
    var eventLoop = new EventLoop();
    var game = new Game();

    eventLoop.LeftHandler += game.OnLeft;
    eventLoop.RightHandler += game.OnRight;

    var log = new List<string>();

    eventLoop.LeftHandler += delegate
    {
        log.Add("left");
    };

    eventLoop.RightHandler += delegate
    {
        log.Add("right");
    };

    eventLoop.Run();
}

```

Обратите внимание на использование ключевого слова **delegate** и использование переменной `log` из контекста внутри тела делегата — замыкание. Делегат — это объект, так что он хранит в себе ссылки на внешние переменные просто как поля, и таскает их с собой. Делегат может жить даже когда мы вернулись из метода, и не дать умереть локальным переменным метода, пока он сам жив. Это позволяет делать довольно интересные штуки, например, вот такую фабрику функций преобразования координат из одного прямоугольника в другой:

```

static Func<Point, Point> CreateRemapFunction(Rectangle rect1, Rectangle rect2)
{
    var xScale = rect2.Width() / rect1.Width();
    var yScale = rect2.Height() / rect1.Height();
    Func<Point, Point> result = delegate(Point point)
    {
        var returnValue = new Point();
        returnValue.x = point.x * xScale;
        returnValue.y = point.y * yScale;
        return returnValue;
    };
    return result;
}

static void Main(string[] args)
{

```

```

var rect1 = new Rectangle()
{
    topLeft = new Point() { x = 0, y = 0 },
    bottomRight = new Point() { x = 2, y = 2 }
};

var rect2 = new Rectangle()
{
    topLeft = new Point() { x = 0, y = 0 },
    bottomRight = new Point() { x = 4, y = 6 }
};

var remap = CreateRemapFunction(rect1, rect2);
var point = new Point() { x = 1, y = 1 };

Console.WriteLine($"Point: x = {point.x}, y = {point.y}");

var transformedPoint = remap(point);

Console.WriteLine($"Transformed point: x = {transformedPoint.x}, y = {transformedPoint.y}")
}

```

Здесь мы описали функцию, которая принимает какие-то параметры и на их основе создаёт и возвращает нам новую функцию, которую мы потом можем использовать дальше. Впрочем, это скорее функциональное, чем событийно-ориентированное программирование, так что не совсем относится к теме, но это тот самый ещё один способ использования делегатов помимо событий — если вам почему-то не нравится F#, но хочется более функционального стиля программирования. Обратите внимание на потенциальные утечки памяти, связанные с забытыми переменными из контекста.

9. Замыкания “под капотом”

Есть некоторая тонкость, связанная с замыканиями и локальными переменными:

```

delegate void F();

class Program
{
    static void Main(string[] args)
    {
        var delegates = new F[10];
        for (var i = 0; i < 10; ++i)
        {
            delegates[i] = delegate { Console.WriteLine(i); };
        }
    }
}

```

```

    foreach (var f in delegates)
    {
        f();
    }
}

```

Выведется 10 раз число 10, поскольку в замыкание попадёт ссылка на локальную переменную цикла `i`, которая в тот момент, когда делегаты начнут вызываться, уже будет иметь значение 10. Может быть слегка не интуитивно. Тем не менее, если взять какой-нибудь декомпилятор (например, `dotPeek`), сказать ему показывать сгенерированный код и декомпилировать эту программу, мы увидим объяснение (тут код приводится с пропуском некоторых ненужных подробностей типа пустого конструктора):

```

private static void Main(string[] args)
{
    F[] fArray = new F[10];
    Program.<c__DisplayClass0_0 cDisplayClass00 = new Program.<c__DisplayClass0_0();
    for (cDisplayClass00.i = 0; cDisplayClass00.i < 10; ++cDisplayClass00.i) {
        fArray[cDisplayClass00.i] = new F(object) cDisplayClass00, __methodptr(<Main>b__0));
    }
    foreach (F f in fArray)
        f();
}

[CompilerGenerated]
private sealed class <c__DisplayClass0_0
{
    public int i;
    internal void <Main>b__0() {
        Console.WriteLine(this.i);
    }
}

```

Для замыкания сгенерировался отдельный класс с полем `i`, объект этого класса создаётся перед циклом, в цикле счётчиком стало это самое поле `i` из нового класса, так что не удивительно, что после цикла оно равно 10. Давайте немного поменяем программу:

```

delegate void F();

class Program
{
    static void Main(string[] args)
    {
        var delegates = new F[10];
        for (var i = 0; i < 10; ++i)
        {

```

```

        var localI = i;
        delegates[i] = delegate { Console.WriteLine(localI); };
    }

    foreach (var f in delegates)
    {
        f();
    }
}

```

И теперь дизассемблер выдаст нам вто такое:

```

private static void Main(string[] args)
{
    F[] fArray = new F[10];
    for (int index = 0; index < 10; ++index)
    {
        Program.<>c__DisplayClass0_0 cDisplayClass00 = new Program.<>c__DisplayClass0_0();
        cDisplayClass00.localI = index;
        fArray[index] = new F((object) cDisplayClass00, __methodptr(<Main>b__0));
    }
    foreach (F f in fArray)
        f();
}

[CompilerGenerated]
private sealed class <>c__DisplayClass0_0
{
    public int localI;
    internal void <Main>b__0()
    {
        Console.WriteLine(this.localI);
    }
}

```

Теперь объект-замыкание создаётся внутри цикла, так что на каждой итерации значение localI, попавшее в замыкание делегата (который сгенерился как метод <Main>b__0) будет своим. Программа распечатает числа от 0 до 9.

В целом, можно понимать замыкания так, что переменные попадают в замыкание по ссылке, а не по значению, и не заморачиваться тонкостями генерации кода.

10. Лямбда-выражения

Анонимные делегаты тоже никому особо не нужны, потому что есть лямбда-выражения. Что это такое на самом деле обычно рассказывают на курсе функционально-

го программирования, обычному C#-программисту их вполне можно понимать как очень удобную форму записи анонимных делегатов.

```
delegate(список параметров)
```

```
{  
    тело  
};
```

— это то же самое, что и

```
(список параметров) => { тело };
```

Вот это самое `=>` — и есть оператор «лямбда» из лямбда-исчисления в синтаксисе C#. Наш пример можно было бы переписать так:

```
eventLoop.LeftHandler += () => log.Add("left");  
eventLoop.RightHandler += () => log.Add("right");
```

Обратите внимание на `()`, означающий, что лямбда-выражение не требует аргументов. Если в теле один оператор, фигурные скобки можно не писать. Более того, если лямбда-выражение должно возвращать значение, и его тело состоит из одного выражения, то можно и `return` не писать, например, вот такое вполне ок:

```
Func<int, int> x2 = x => x * 2;  
var n = x2(1); // n будет 2
```

Посмотрите, как красиво можно выбрать из списка только чётные элементы:

```
var list = new List<int>() { 20, 1, 4, 8, 9, 44 };  
var evenNumbers = list.FindAll(i => (i % 2) == 0);
```

Теперь вернёмся к работе с событиями. Лямбда-выражениями можно делать обработчики, ещё лямбда-выражения бывают полезны, чтобы инициализировать события, дабы их потом не надо было проверять на `null`:

```
public event Action LeftHandler = () => { };  
public event Action RightHandler = () => { };
```

Такая штука говорит, что события в любом случае слушает обработчик, который делает ничего, даже если никто другой на эти события не подпишется. Теперь событие можно безопасно вызывать в нашем объекте, без проверки его на `null`. Нельзя сказать, что это рекомендуемая практика, потому что это негативно сказывается на скорости работы программы, но иногда (особенно в процессе прототипирования) бывает удобно.

11. Каноничное объявление события

Майкрософтовский стайлгайд предписывает, чтобы обработчики событий принимали первым параметром **object** sender — ссылку на объект, пославший событие, а вторым параметром — объект класса, наследуемого от библиотечного класса EventArgs, который, собственно, и хранит параметры события. В принципе, это не важно, но бывает удобно: отправителя бывает полезно знать довольно часто (например, у кого спрашивать дополнительную информацию о событии, или кому слать ответ), да и параметры лучше передавать одним объектом, а не сотней. Для удобства даже есть тип делегата EventHandler<T>, который генерик, и в качестве параметра-типа принимает тип того самого наследника EventArgs, который хранит в себе параметры. Этого шаблона придерживаются все события, объявленные в стандартной библиотеке, и этого же шаблона рекомендуют придерживаться и сторонних авторов.

Итак, чтобы «идеологически правильно» объявить событие, надо выполнить следующие действия:

1. Объявить наследник EventArgs, содержащий в себе параметры события

- Если параметров нет, то обработчики события всё равно должны принимать EventArgs
 - Передавать при вызове имеет смысл EventArgs.Empty

```
internal class NewMailEventArgs : EventArgs {
    private readonly string from;
    private readonly string to;
    private readonly string subject;

    public NewMailEventArgs(string from, string to, string subject) {
        this.from = from;
        this.to = to;
        this.subject = subject;
    }

    public string From => from;
    public string To => to;
    public string Subject => subject;
}
```

2. Объявить само событие в наблюдаемом классе

- Инстанциация шаблона EventHandler
- **public delegate void** EventHandler<EventArgs>(object sender, EventArgs e);

```
internal class MailManager
{
    public event EventHandler<NewMailEventArgs> NewMail;
    ...
}
```

3. Сделать вспомогательный метод, кидающий событие (строго говоря, не требуется стайлгайдом, но очень удобен)

- Сюда идёт проверка списка подписчиков на `null`
- Вызов лучше делать потокобезопасным

```
internal class MailManager
{
    ...
    protected virtual void OnNewMail(NewMailEventArgs e) {
        EventHandler<NewMailEventArgs> temp = Volatile.Read(ref NewMail);
        if (temp != null)
        {
            temp(this, e);
        }
    }
    ...
}
```

4. Собственно, бросить событие

- Создаём наследника EventArgs
- Вызываем метод, отправляющий событие наблюдателям

```
internal class MailManager
{
    public void SimulateNewMail(string from, string to, string subject)
    {
        NewMailEventArgs e = new NewMailEventArgs(from, to, subject);
        OnNewMail(e);
    }
}
```

Теперь всё сделано «по канону» и событием можно воспользоваться вот так:

```
internal sealed class Fax
{
    public Fax(MailManager mm)
    {
        mm.NewMail += FaxMsg;
    }

    private void FaxMsg(object sender, NewMailEventArgs e)
    {
        Console.WriteLine("Faxing mail message:");
        Console.WriteLine($" From={e.From}, To={e.To}, Subject={e.Subject}");
    }
}
```

```

public void Unregister(MailManager mm)
{
    mm.NewMail -= FaxMsg;
}
}

```

В общем, полностью отрефакторенный пример с циклом обработки событий выглядел бы вот так:

```

public class EventLoop
{
    public event EventHandler<EventArgs> LeftHandler = (sender, args) => { };
    public event EventHandler<EventArgs> RightHandler = (sender, args) => { };

    public void Run()
    {
        while (true)
        {
            var key = Console.ReadKey(true);
            switch (key.Key)
            {
                case ConsoleKey.LeftArrow:
                    LeftHandler(this, EventArgs.Empty);
                    break;
                case ConsoleKey.RightArrow:
                    RightHandler(this, EventArgs.Empty);
                    break;
            }
        }
    }
}

public class Game
{
    public void OnLeft(object sender, EventArgs args)
    {
        Console.WriteLine("Going left");
    }

    public void OnRight(object sender, EventArgs args)
    {
        Console.WriteLine("Going right");
    }
}

static void Main(string[] args)

```

```

{
    var eventLoop = new EventLoop();
    var game = new Game();

    eventLoop.LeftHandler += game.OnLeft;
    eventLoop.RightHandler += game.OnRight;

    var log = new List<string>();

    eventLoop.LeftHandler += (sender, eventArgs) => log.Add("left");
    eventLoop.RightHandler += (sender, eventArgs) => log.Add("right");

    eventLoop.Run();
}

```

12. Ручное управление подписчиками

Ещё одна немаловажная особенность работы с событиями (и то, что роднит их со свойствами) — это то, что подписывание на событие и отписывание от события может быть реализовано вручную. Этим, в частности, пользуются оконные библиотеки (например, WPF), где у одного элемента управления может быть несколько десятков разных событий, только на одно-два из которых кто-то реально подписывается и хранить несколько десятков `null`-ов для каждого контрола, который есть на экране (а даже в случае простенькой формочки их, как правило, несколько десятков) — слишком расточительно. Потому там используется «разреженное» хранение подписчиков: есть одна большая хеш-таблица с событиями на весь контрол, когда подписчик регистрирует свой обработчик, он добавляется в хеш-таблицу и вызывается, когда событие происходит. Если на событие никто не подписан, то в хеш-таблице его просто нет и памяти оно не занимает. Это могло бы быть реализовано примерно так:

```

public event EventHandler<FooEventArgs> Foo
{
    add { eventSet.Add(fooEventKey, value); }
    remove { eventSet.Remove(fooEventKey, value); }
}

protected virtual void OnFoo(FooEventArgs e)
{
    eventSet.Raise(fooEventKey, this, e);
}

```

`fooEventKey` — это уникальный идентификатор конкретного события, по которому его можно найти в хеш-таблице, `eventSet` — та самая хеш-таблица, имеющая ещё метод `Raise`, позволяющий кидать событие. Всё это работает благодаря наличию в C# ключевых слов `add` и `remove`.

Подробности такого подхода и более подробный пример кода описаны в Рихтере, и вообще, многие примеры были взяты оттуда, поэтому Рихтер очень рекомендуется как дополнительная литература к этой лекции и к курсу вообще.