

# Network-Layer:

# IPv6

## (Internet Protocol v.6)

*RFC 1883* – The IPv6 base protocol.

*RFC 1884* – The address specification.

*RFC 4291* – **IP Version 6 Addressing Architecture**

*RFC 1885* – Description of the control protocol, known as ICMPv6.

*RFC 1970* – **Neighbor Discovery for IP Version 6**

# IPv6



**Основная мотивация:** 32-битное адресное пространство будет исчерпано к 2008 году.

Рабочая группа IETF: начало 1992; -> RFC 1883 (1996) ->  
Спецификация IPv6: RFC 2460 (1998)

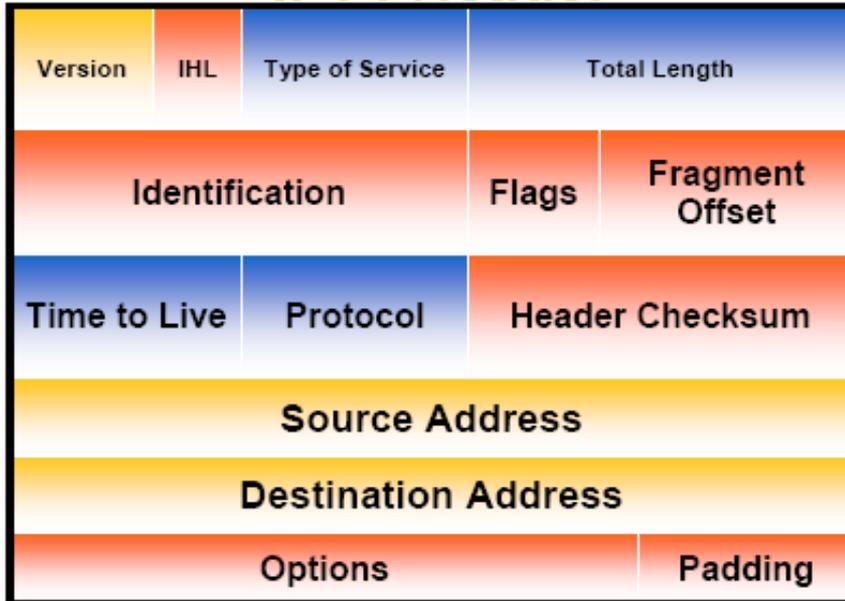
Дополнительная мотивация:

**Эффективность** — формат заголовка IPv6 помогает ускорить обработку/пересылку маршрутизаторами.

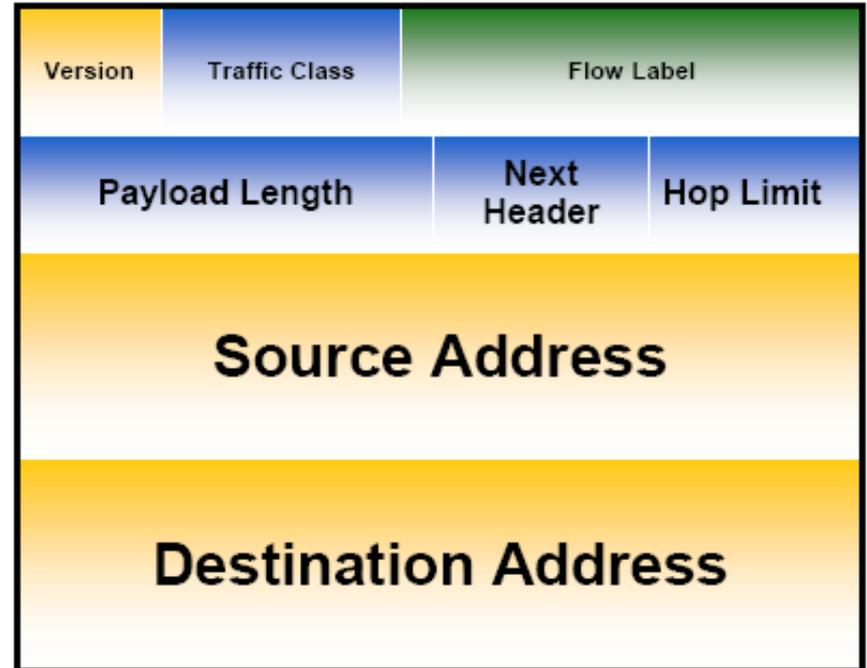
- Фиксированный заголовок длиной 40 байт (+расширения, если необходимо);
- Фрагментация не допускается;
- QoS — изменения заголовка;
- Новый адрес «anycast»: маршрут к «лучшему» из нескольких реплицированных серверов
- Безопасность на сетевом уровне
- Нет широковещания (broadcast)

# Заголовки IPv4 vs IPv6

## IPv4 Header



## IPv6 Header



- Legend**
- Field's name kept from IPv4 to IPv6
  - Fields not kept in IPv6
  - Name & position changed in IPv6
  - New field in IPv6

Ethernet\_Type: IPv4 x0800  
 IPv6 x86DD

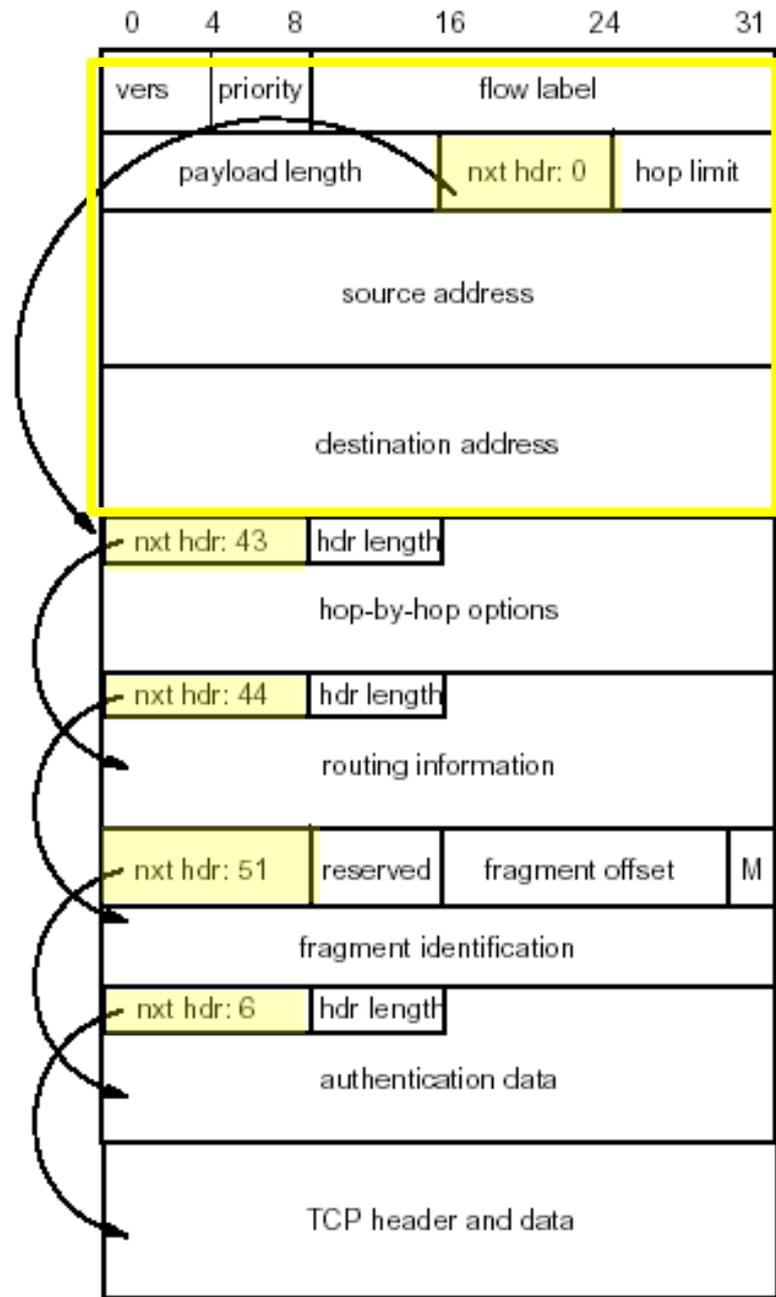
# Заголовки расширений (Extension Headers)

Типы новых протоколов:

- 41 IPv6 Header
- 45 Interdomain Routing Protocol
- 46 Resource Reservation Protocol
- 58 IPv6 ICMP Packet

Все следующие значения являются заголовками расширений:

- 0 Hop-by-Hop Options Header
- 43 IPv6 Routing Header
- 44 IPv6 Fragment Header
- 50 Encapsulating Security Payload
- 51 IPv6 Authentication Header
- 59 No Next Header
- 60 Destination Options Header



# Что реально изменилось?

- Расширенное адресное пространство  
Длина адреса  $8 \times 16 = 128$  байт
- Упрощение формата заголовка  
Фиксированная длина (40 байт), необязательные заголовки объединены в цепочку  
Контрольная сумма на уровне IP отсутствует
- Нет фрагментации hop-by-hop  
Path MTU discovery  
Минимальный размер MTU по умолчанию 1280 байт (IPv4 – 576 байт)
- Безопасность на сетевом уровне  
IPsec является обязательным (расширение) →  
AH & ESP – встроенные средства аутентификации и шифрования
- Многоадресная рассылка  
Нет традиционной широковещательной IP-передачи  
Использование группы многоадресной рассылки по адресу  
ff02::1 (для всех узлов на локальном канале; <-> 255.255.255.255 <-> 224.0.0.1)
- Автоконфигурация адреса без сохранения состояния (*Stateless*)

# IPv6 Адресация / RFC 2373 /

- Address notation: 8 groups, 16 bits in every group  
6ACD:0001:00FC:B10C:0000:0000:001A:011A
- Simplified notation  
6ACD:1:FC:B10C:0:0:1A:11A  
A112::33DF:1122
- Mapping between IPv4 and IPv6:  
0:0:0:0:0:FFFF:xxxx:xxxx *(use: from IPv6-node to IPv4)*
- Loopback: ::1/128
- Unspecified address: ::  
(It is equivalent to the IPv4 unspecified address 0.0.0.0)

Addresses can be of different **types** and have different **scopes**

*\*/ Полезная ссылка:*

[https://secure.wikimedia.org/wikipedia/en/wiki/IPv6\\_address](https://secure.wikimedia.org/wikipedia/en/wiki/IPv6_address)

# Типы адресов

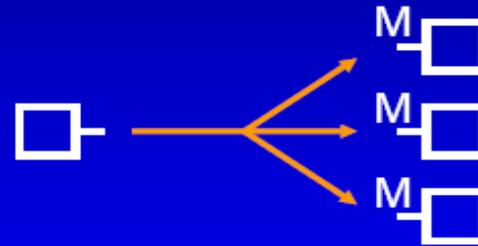
## unicast:

for one-to-one  
communication



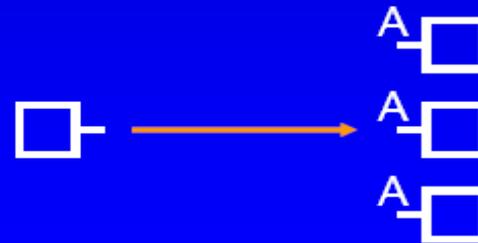
## multicast:

for one-to-many  
communication



## anycast:

for one-to-nearest  
communication

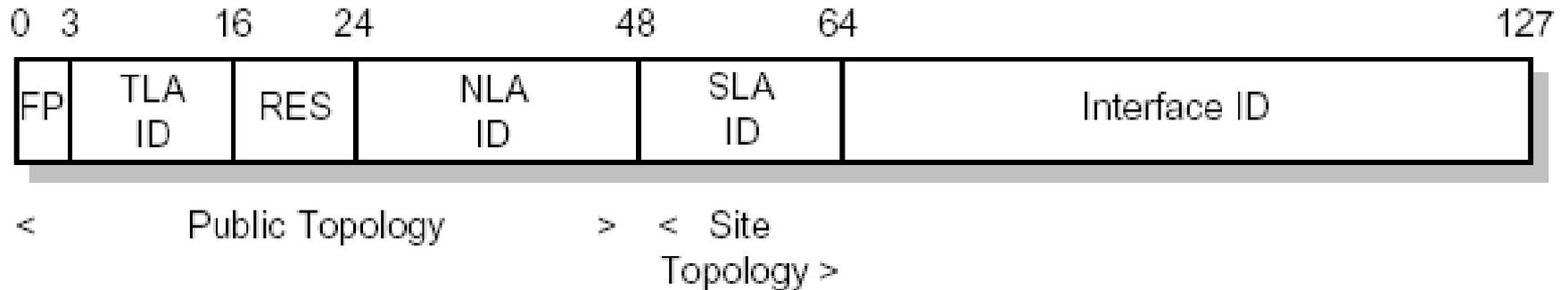


**NEW:** Anycast-адрес назначается группе интерфейсов, обычно принадлежащих разным узлам (маршрутизаторам). Пакет, отправленный на anycast-адрес, доставляется только на один из интерфейсов-участников, обычно на ближайший хост. Anycast-адреса имеют тот же формат, что и unicast-адреса. Anycast-адрес не может быть указан как адрес источника.

## IPv6 - Format Prefix Allocation

Allocation	Prefix (bin)	Start of Address Range (hex)	Mask Length (bits)	Fraction of Address Space
Reserved	0000 0000	0:: /8	8	1/256
Reserved for NSAP	0000 001	200:: /7	7	1/128
Reserved for IPX	0000 010	400:: /7	7	1/128
Aggregatable Global Unicast Addresses	001	2000:: /3	3	1/8
Link-local Unicast	1111 1110 10	FE80:: /10	10	1/1024
Site-local Unicast	1111 1110 11	FEC0:: /10	10	1/1024
Multicast	1111 1111	FF00:: /8	8	1/256
Total Allocation				15%

# IPv6 Global **Unicast** Address Format



**FP** Format Prefix (001).

**TLA ID** Top-Level Aggregation Identifier. Это верхний уровень в иерархии маршрутизации.

**RES** Зарезервировано для будущего использования.

**NLA ID** Next-Level Aggregation Identifier. Используется организациями, которым назначен идентификатор TLA (провайдерам), для создания собственной иерархии адресации и идентификации.

**SLA ID** Site-Level Aggregation Identifier. Это поле используется отдельной организацией/клиентом для создания собственной локальной иерархии.

# IPv6 Multicast Address Format



**FP** Format Prefix - 1111 1111.

**Flags 0000** Постоянный адрес.

**0001** Временный адрес. Адреса такого типа могут быть установлены приложениями по мере необходимости.

**Scope** 4-битное значение, указывающее область действия multicast-рассылки.

**0** Зарезервировано

**1** Ограничено интерфейсами на локальном узле (**local node**)

**2** Ограничено узлами на локальном канале (**local link**)

**5** Ограничено локальным сайтом (**local site**)

**8** Ограничено организацией

**E** Глобальная область (**Global scope**)

**F** Зарезервировано

**Group ID** Идентификатор группы многоадресной рассылки.

# Well-known IPv6 multicast-адреса

**ff02::1** → All nodes on the local-link ( → 255.255.255.255)

**ff02::2** → All routers on the local-link

**ff05::2** → All routers in the site-local

**ff05::1:3** → All-dhcp-servers

**ff0x::fb** → mDNSv6

...

**ff02::1:ff00:0/104** → Solicited-node multicast address.

Адрес многоадресной рассылки запрошенного узла. Младшие 24 бита этого многоадресного адреса заполняются младшими 24 битами одноадресного или произвольного адреса интерфейса. Используется для обнаружения соседей (*Neighbor Discovery Protocol*).

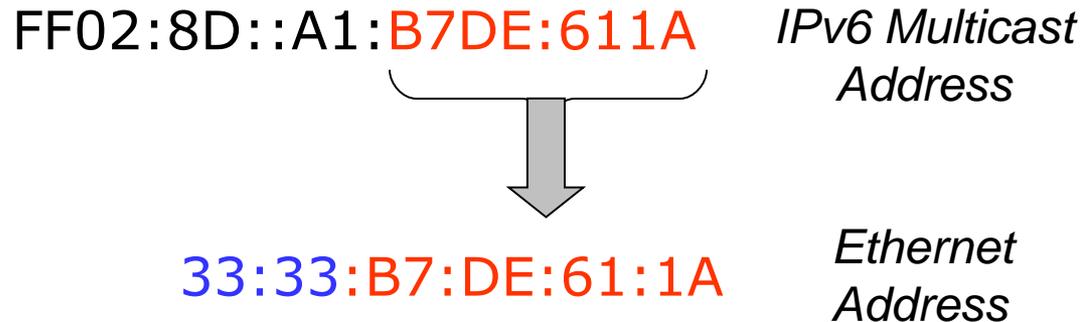
Во время загрузки каждый узел должен присоединиться к 2 специальным многоадресным группам для каждого сетевого интерфейса:

- **All nodes** multicast group: **ff02::1**
- **Solicited-node** multicast group **ff02::1:ffxx:xxxx**

# Mapping: Multicast Address to Ethernet

**33:33:xx:xx:xx:xx** – зарезервировано для IPv6 Multicast (RFC 2464)

*Младшие 32 бита этого multicast-адреса сопоставляются с младшими 32 битами MAC.*



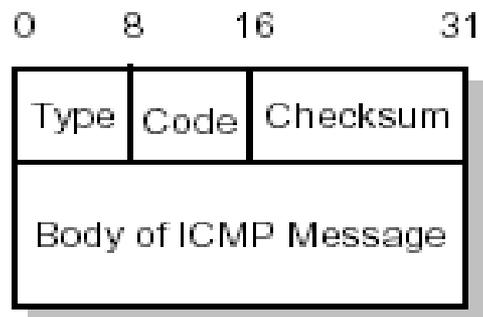
# ICMPv6

/ RFC1885 /

**ICMPv6:** новая версия ICMP - дополнительные типы сообщений, функции управления многоадресными группами и т. д.

## Type

- 1 Destination Unreachable
- 2 Packet Too Big
- 3 Time (Hop Count) Exceeded
- 4 Parameter Problem
  
- 128 Echo Request
- 129 Echo Reply
- 130 Group Membership Query
- 131 Group Membership Report
- 132 Group Membership Reduction
- 133 Router Solicitation (RS)
- 134 Router Advertisement (RA)
- 135 Neighbor Solicitation (NS)
- 136 Neighbor Advertisement (NA)
- 137 Redirect Message
- + other



## Code

Изменяется в зависимости от типа сообщения.

**Checksum** Используется для обнаружения повреждения данных в сообщении.

**Body of Message** Зависит от типа сообщения.

# Neighbor Discovery Protocol (NDP) / RFC 4861 /

Полностью динамическое взаимодействие между хостами и роутерами.

## IPv6 Neighbor Discovery:

комбинация протоколов/функций из IPv4:

- ARP
- + ICMP Router Discovery
- + ICMP Redirect
- + IGMP

NDP defines 5 ICMPv6 packet types:

- 133 Router Solicitation (Запрос маршрутизатора)
- 134 Router Advertisement (Объявление маршрутизатора)
- 135 Neighbor Solicitation (Запрос соседа)
- 136 Neighbor Advertisement (Объявление соседа)
- 137 Redirect

# Neighbor Discovery Protocol (NDP)

NDP отвечает за

- автоконфигурацию адресов узлов,
- обнаружение других узлов на канале,
- определение адресов канального уровня других узлов,
- обнаружение дубликатов адресов,
- поиск доступных маршрутизаторов и DNS-серверов,
- обнаружение префикса адреса,
- обнаружение параметров: хосты могут находить параметры канала, напр., MTU,
- разрешение адресов: сопоставление IP-адресов и MAC-адресов,
- перенаправление: маршрутизатор может информировать узел о лучших маршрутизаторах первого перехода,
- поддержка информации о достижимости путей к другим активным соседним узлам

# Neighbor Discovery: Address Resolution

## Neighbor Solicitation

Src: 2008:a2::ab00:1 (00:b0:d0:f4:c6:c5)

Dst: ff02::1::ff00:2 (33:33:ff:00:00:02)

Who has the address 2008:a2::ab00:2 ?

My MAC 00:b0:d0:f4:c6:c5

Host1

MAC 00:b0:d0:f4:c6:c5

IP 2008:a2::ab00:1

Multicast:

33:33:ff:00:00:01

ff02::1::ff00:1

1



Host2

MAC 00:80:d0:32:ca:b3

IP 2008:a2::ab00:2

Multicast:

33:33:ff:00:00:02

ff02::1::ff00:2

2



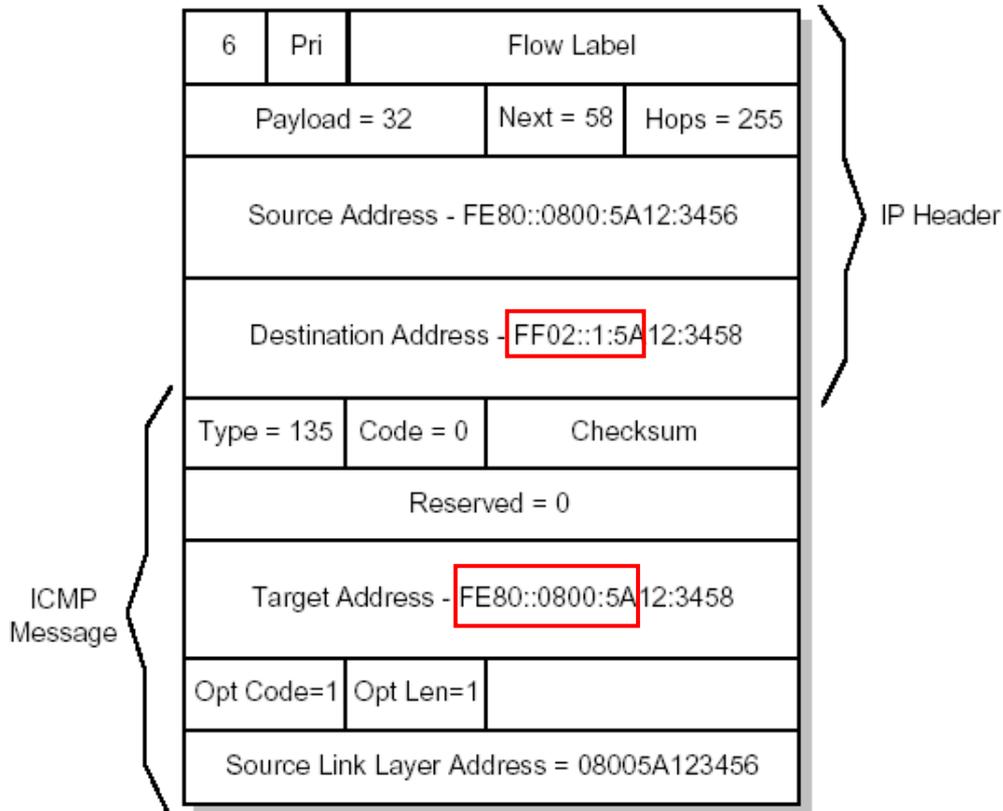
Src: 2008:a2::ab00:2 (00:80:d0:32:ca:b3)

Dst: 2008:a2::ab00:1 (00:b0:d0:f4:c6:c5)

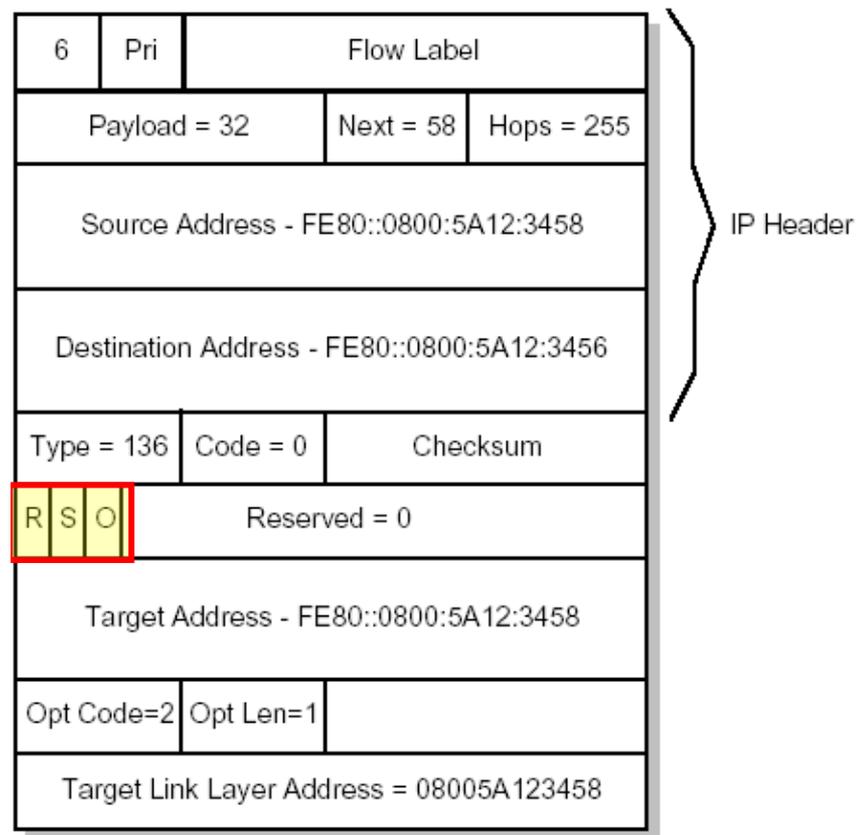
My MAC 00:80:d0:32:ca:b3

## Neighbor Advertisement

## Neighbor Solicitation Message:



## Neighbor Advertisement Message:



**R** Router Flag. Бит =1, если отправителем объявления является роутер.

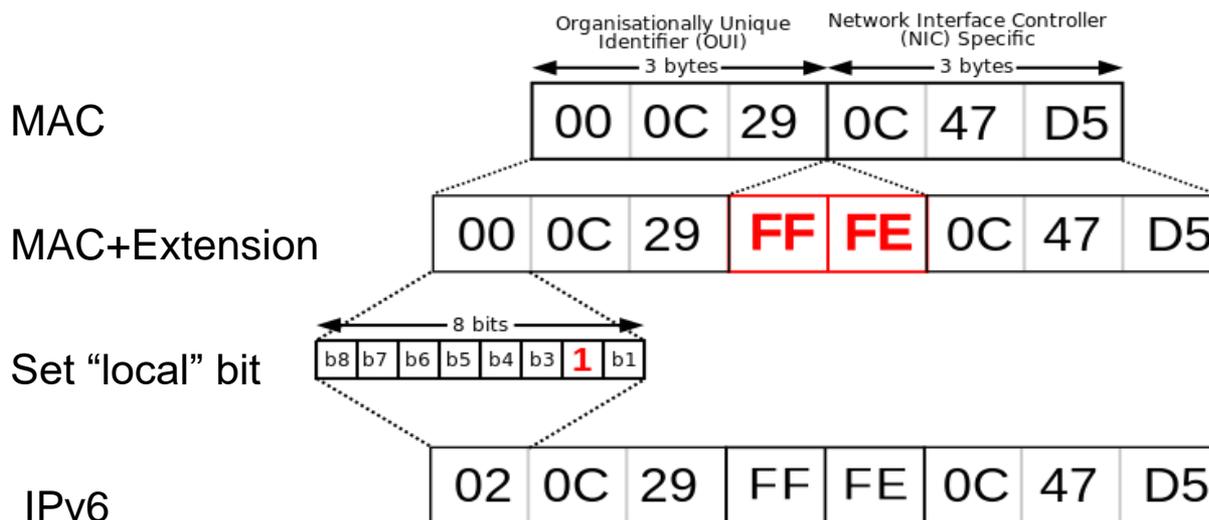
**S** Solicited Flag. Бит=1, если объявление является ответом на запрос.

**O** Override Flag. Когда этот бит установлен, принимающий узел должен обновить существующую кэшированную запись канального уровня в кэше своих соседей (neighbor-кэш).

# Stateless address autoconfiguration (SLAAC)

SLAAC позволяет узлам самостоятельно генерировать свои IPv6-адреса на основе префиксов, объявленных роутерами.

- При запуске системы узел автоматически создает link-local address с префиксом **fe80::/64**
- Globally routable unicast address: Для установки уникального глобально маршрутизируемого адреса хост получает назначение **префикса** с помощью Neighbor Discovery или DHCPv6.
- Нижние 64 бита этих адресов заполняются 64-битным идентификатором интерфейса в **modified EUI-64** формате.



\* /В настоящее время ничего не делается с битом U/L 1 или 0. Однако, согласно RFC4291, преимущество идентификаторов интерфейса с универсальной областью действия будет использоваться в будущем.

# IPv6 and DNS

	IPv4	IPv6
Hostname to IP address	<b>A record:</b> www.abc.test. A 192.168.30.1	<b>AAAA record:</b> www.abc.test AAAA 3FFE:B00:C18:1::2
IP address to hostname	<b>PTR record:</b> 1.30.168.192.in-addr.arpa. PTR www.abc.test.	<b>PTR record:</b> 2.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1.0.0.0.8.1.c.0. 0.0.b.0.e.f.f.3.ip6.arpa PTR www.abc.test.

# Переход от IPv4 к IPv6

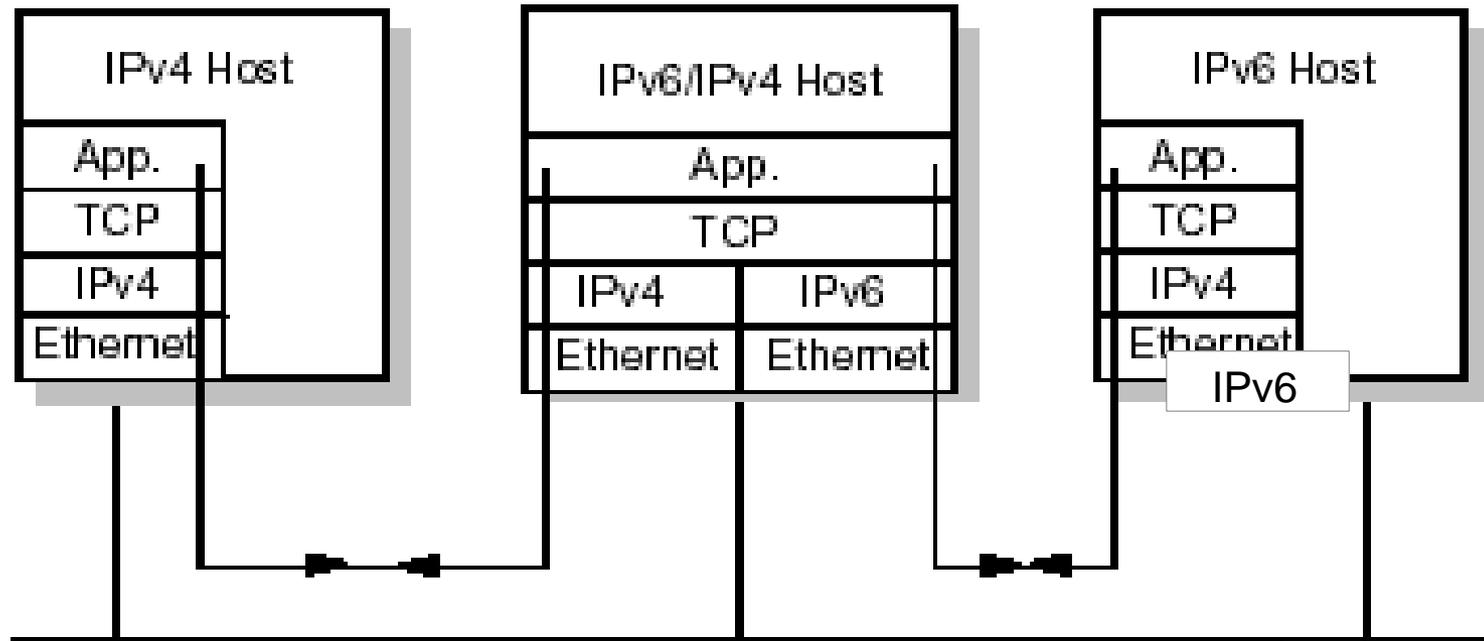
Не все маршрутизаторы могут быть обновлены одновременно.

Как сеть будет работать со смешанными маршрутизаторами IPv4 и IPv6?

Предлагаемые подходы:

- **Dual Stack:** маршрутизаторы с двойным стеком (v6, v4) могут «транслировать» между форматами
- **Tunneling:** IPv6 передается как полезная нагрузка в датаграмме IPv4 между маршрутизаторами IPv4,  
как вариант – **Tunnel Broker:** туннельный брокер, доступный через web-сайт
- **Translation:** NAT-PT  
был Microsoft Teredo, - уже нет)

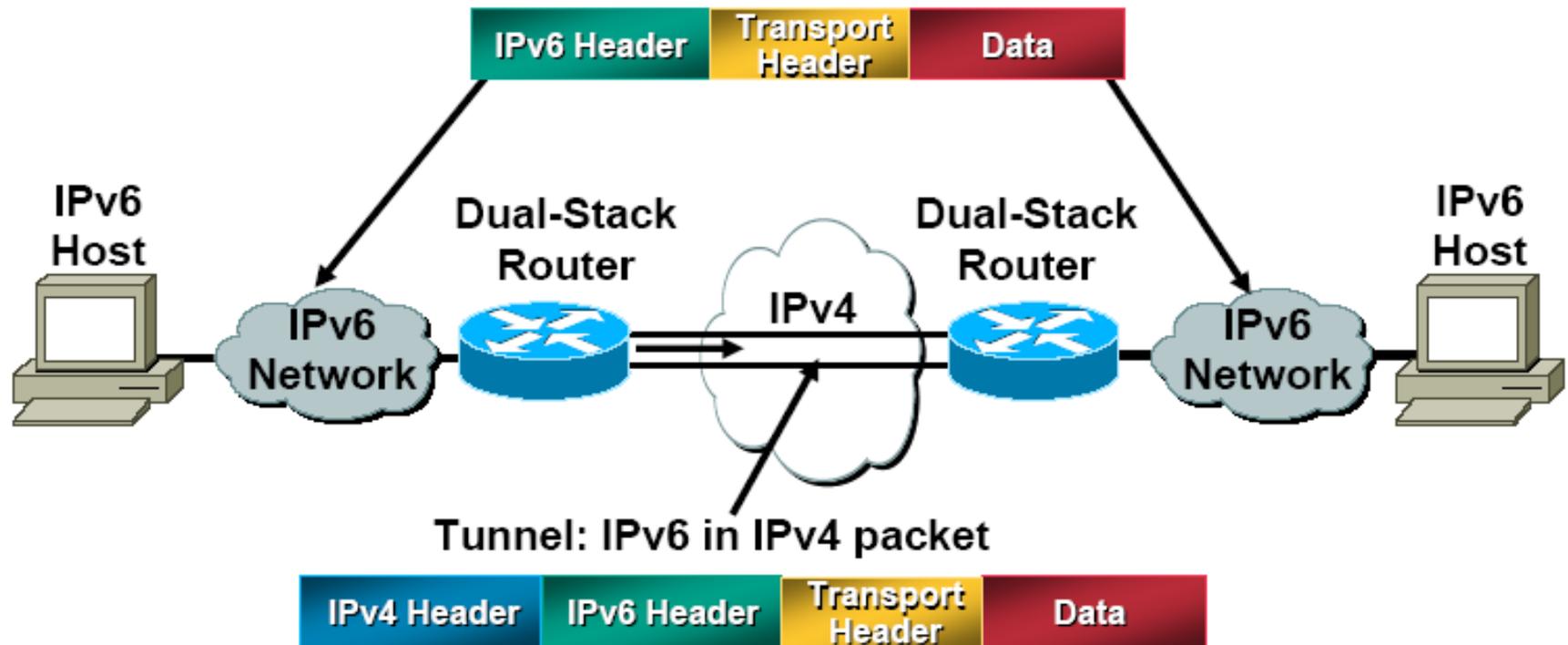
# Dual Stack Transition Mechanism (DSTM)



## Переходной механизм с двумя стеками:

- Двойной стек, настроенный на IPv4 и IPv6, не решает проблему нехватки IPv4-адресов
- Маршрутизаторы должны быть настроены на обе версии IP => => 2 набора таблиц маршрутизации

# IPv6 over IPv4 Tunnels

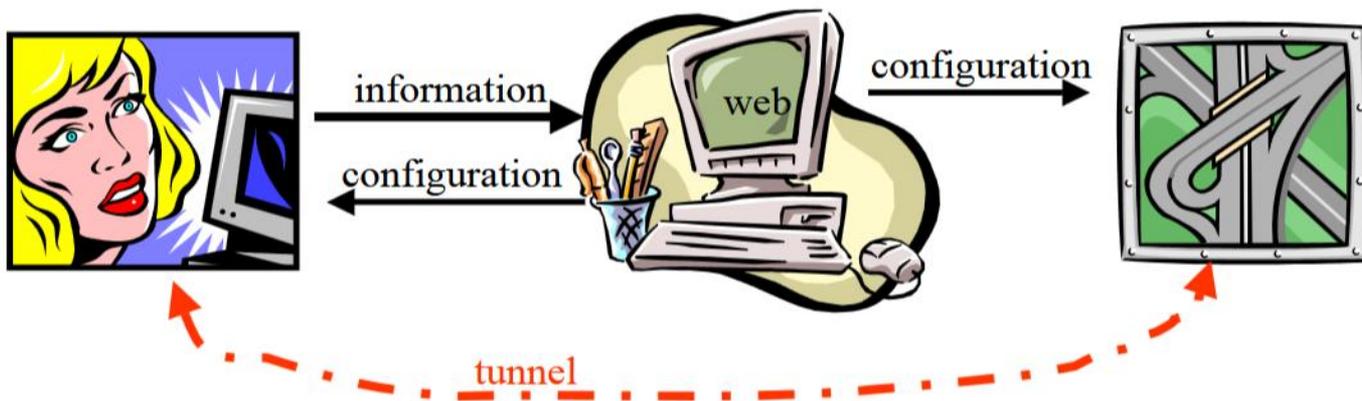


- Туннелирование — это инкапсуляция пакета IPv6 в пакет IPv4
- Протокол туннелирования **6in4** (RFC 4213)
- Заголовок IPv4: **proto=41** (IPv6 Encapsulation)
- Туннелирование может использоваться и маршрутизаторами и хостами



# Tunnel Brokers

- Упрощает создание туннелей IPv4 для конечного пользователя.
- Использование веб-страницы.
- Для предоставления IPv6 поверх IPv4 применяется протокол **6in4**.
- Нужен анонсированный адрес IPv4



[https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_брокеров\\_IPv6](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_брокеров_IPv6)

Рекомендую : <https://tunnelbroker.net>

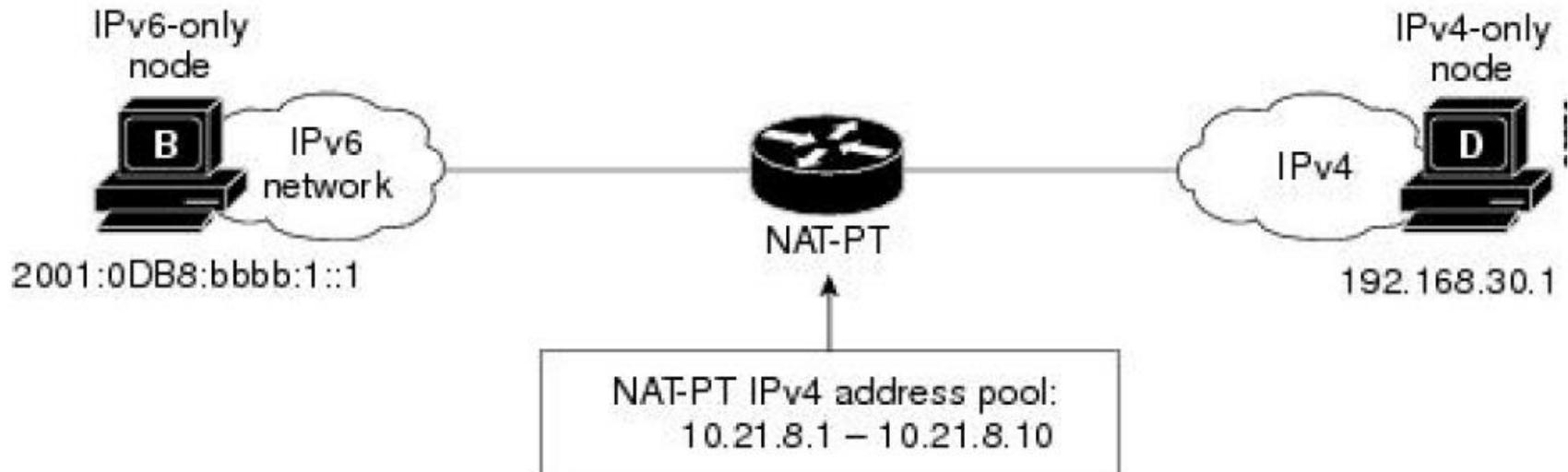
<https://6in4.ru>

<https://ipv6.ip4market.ru/>

# NAT-PT (RFC 2765 и RFC 2766)

NAT-PT — это механизм преобразования IPv6 в IPv4, который позволяет устройствам, поддерживающим только IPv6, взаимодействовать с устройствами, поддерживающими только IPv4, и наоборот.

- Трансляция адресов и заголовков
- Пул маршрутизируемых адресов назначается транслятору
- Трансляция входящих сессий должна перехватывать DNS-запросы
- Префикс направляется в NAT-table.
- Можно изменить номера портов, чтобы разрешить больше переводов



# \*/ Teredo

## **RFC4380: Tunneling IPv6 over UDP through Network Address Translations (NATs)**

Microsoft Technology, <= Win7

Special-Use Ranges **2001::/32** (for Teredo clients)

The Teredo protocol performs several functions:

- Diagnoses UDP over IPv4 (UDPv4) connectivity and discovers the kind of NAT present (using a simplified replacement to the STUN protocol)
- Assigns a globally routable unique IPv6 address to each host using it
- Encapsulates IPv6 packets inside UDPv4 datagrams for transmission over an IPv4 network (this includes NAT traversal)
- Routes traffic between Teredo hosts and native (or otherwise non-Teredo) IPv6 hosts

### Node Types:

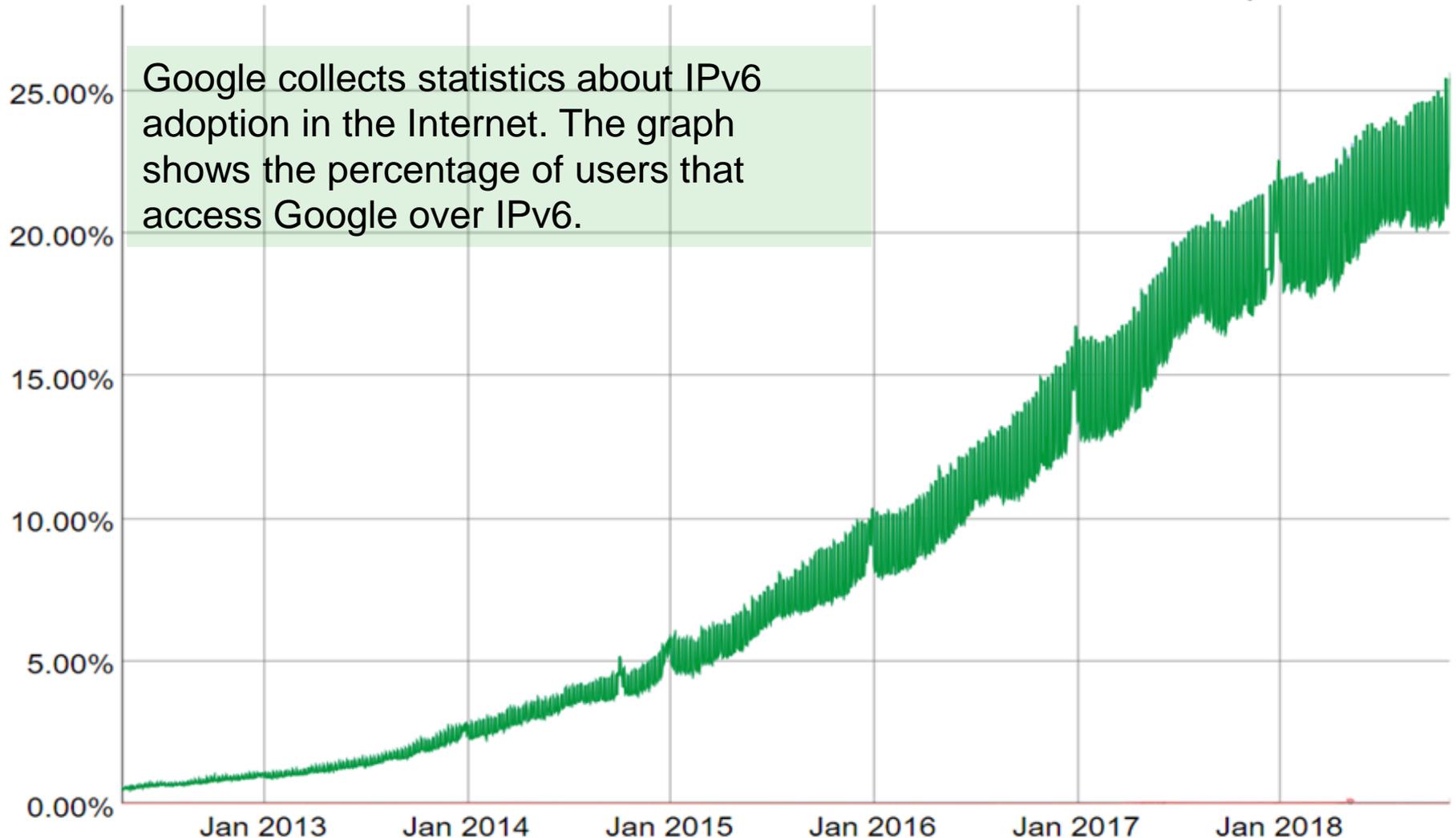
Teredo Client, Teredo Server(UDP/3544), Teredo relay, Teredo host-specific relay

**Miredo** is a client, relay and server for Linux, \*BSD and Mac OS X

# Looking at the IPv6... 03.11.2018

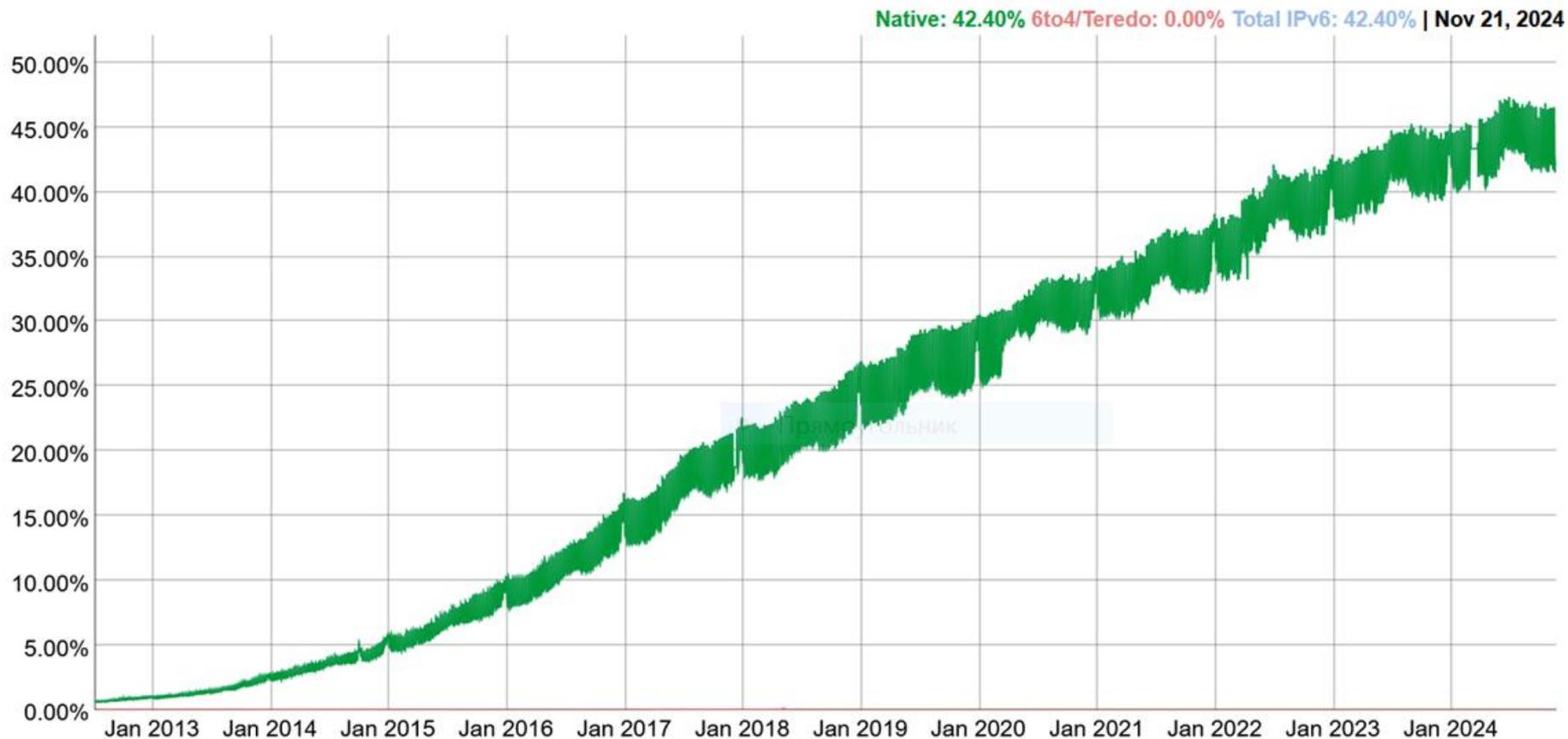
Native: 16.85% 6to4/Teredo: 0.02% Total IPv6: 16.87% | 14 сент. 2017 г.

Native: 25.47% 6to4/Teredo: 0.00% Total IPv6: 25.48% | 3 нояб. 2018 г.



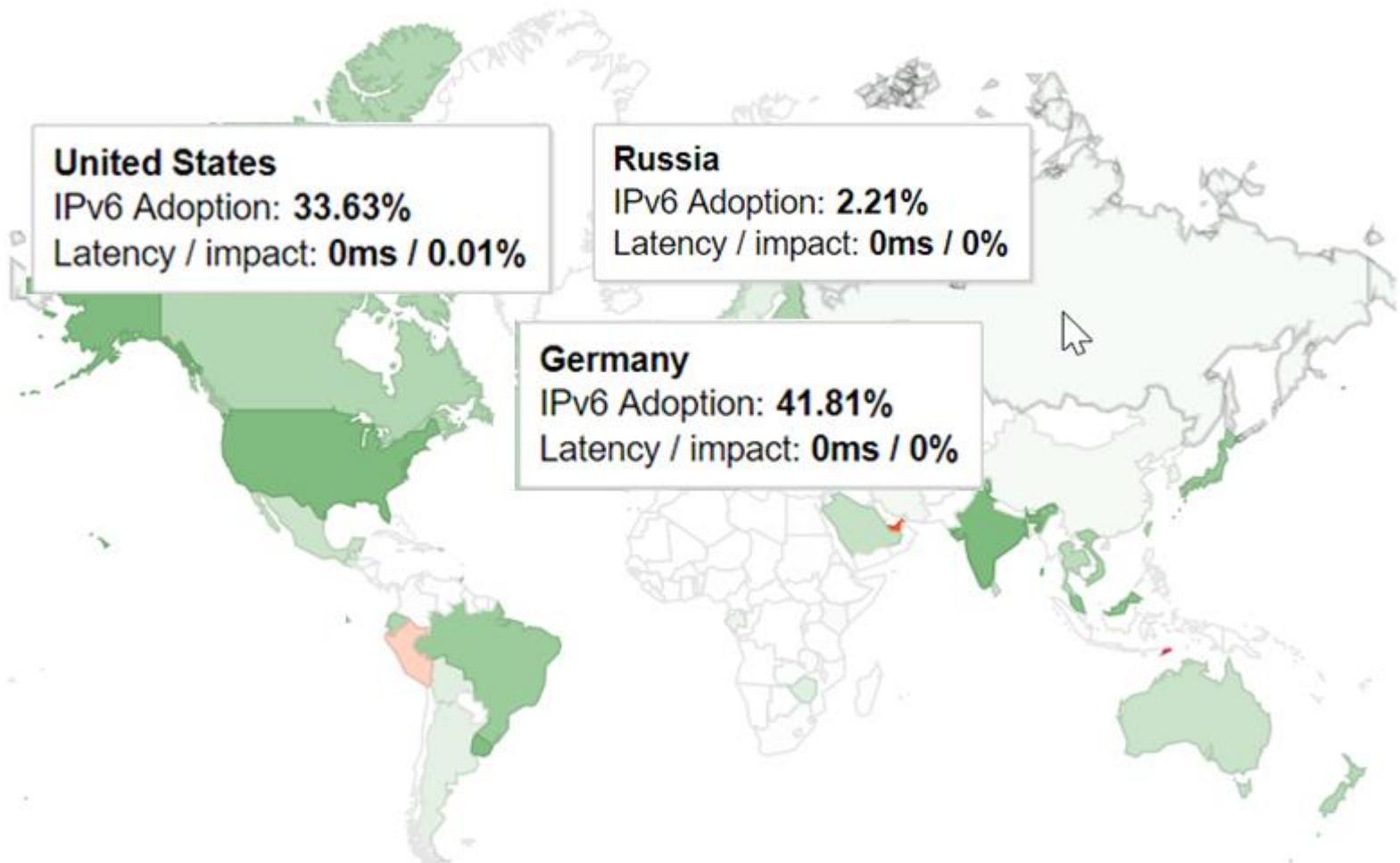
<https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html>

# Looking at the IPv6... 21.11.2024

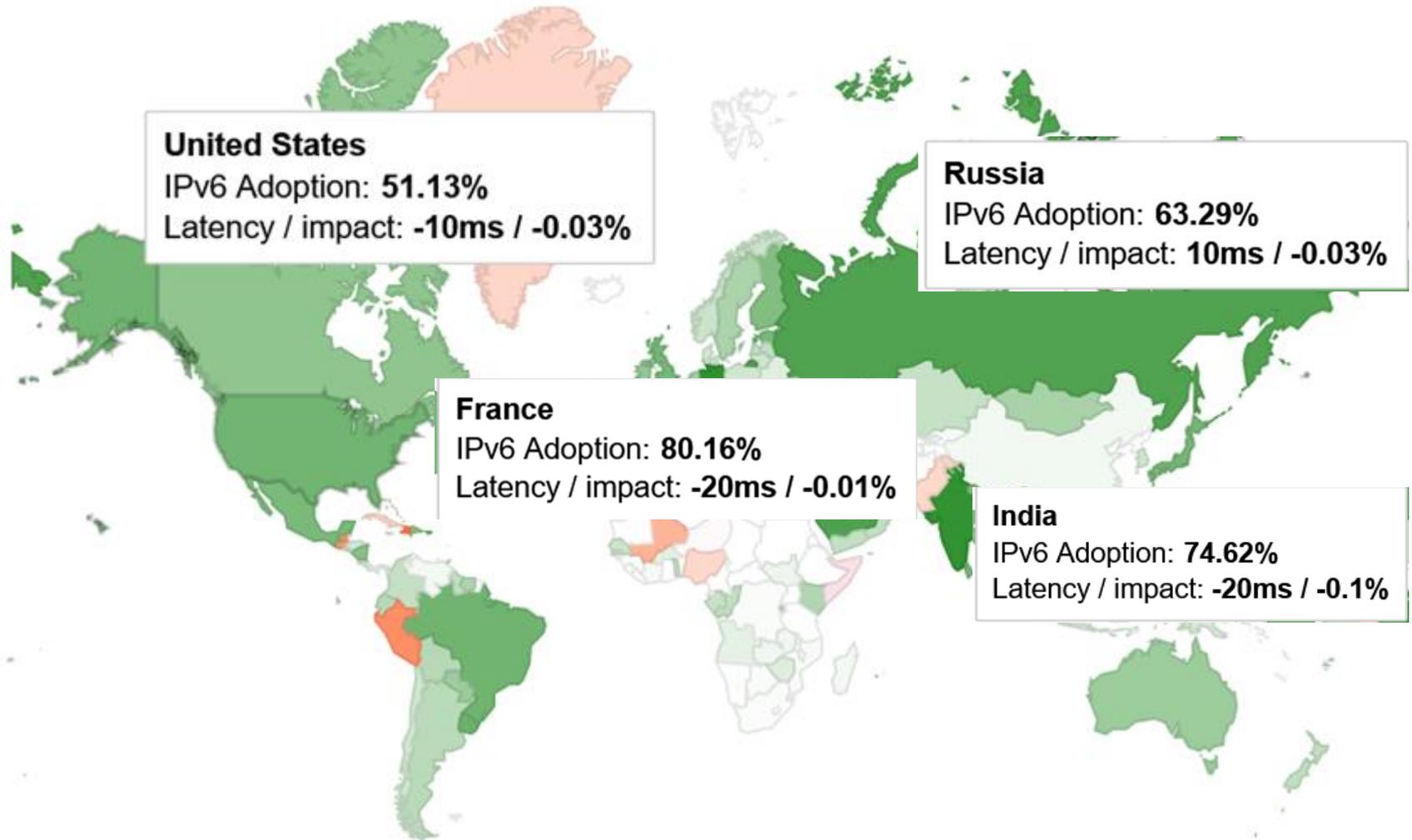


# Looking at the IPv6... 3.11.2018

## Per-Country IPv6 adoption

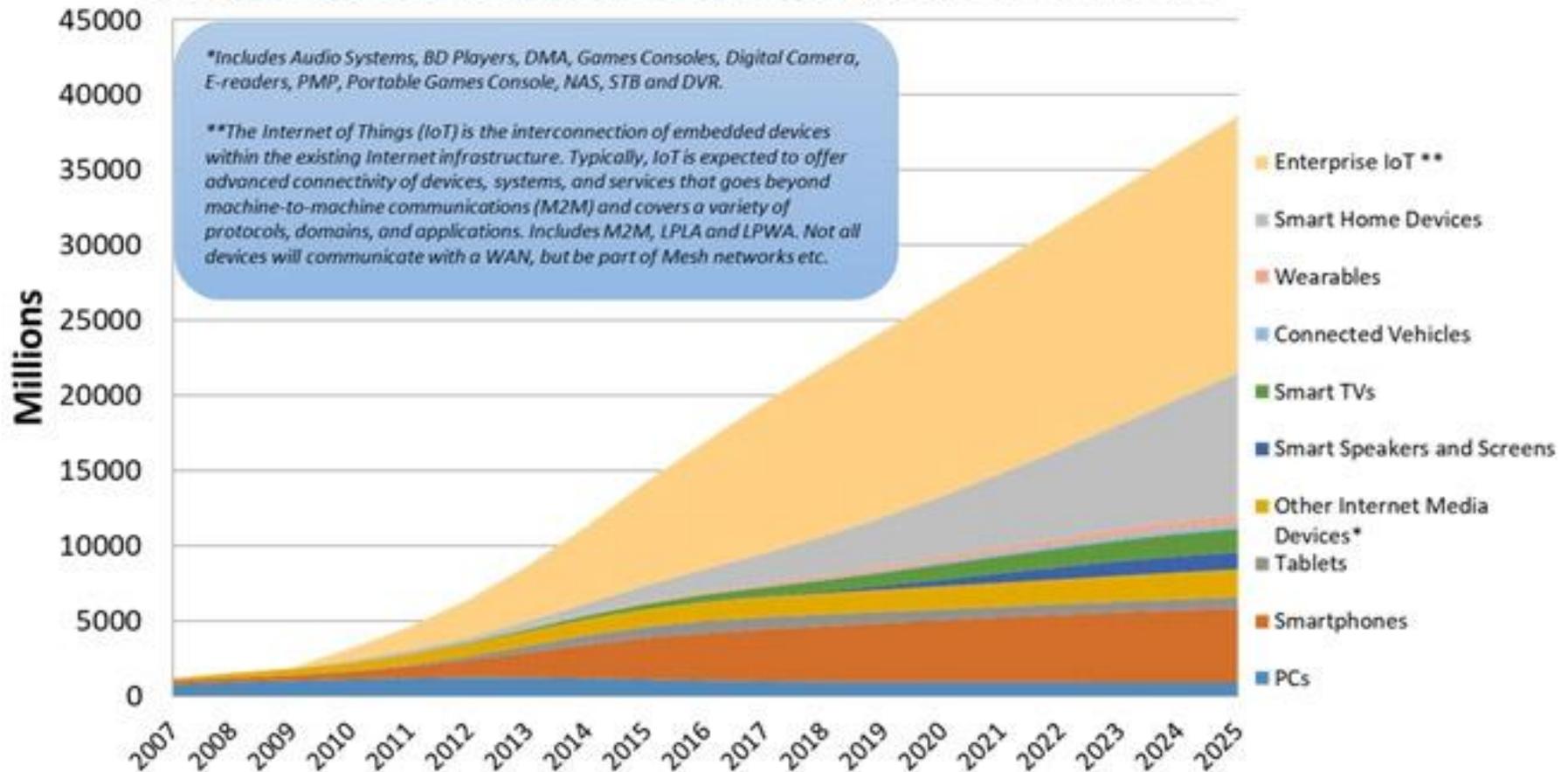


# Looking at the IPv6... 19.02.2025



# За счет каких устройств?

## Global Connected and IoT Device Installed Base Forecast



Source – Strategy Analytics research services, May 2019: IoT Strategies, Connected Home Devices, Connected Computing Devices, Wireless Smartphone Strategies, Wearable Device Ecosystem, Smart Home Strategies

# Example: interface config

```
eth0 Link encap:Ethernet HWaddr 00:50:FC:90:AE:2E
inet addr:195.70.217.195 Bcast:195.70.217.255 Mask:255.255.255.192
inet6 addr: fe80::250:fcff:fe90:ae2e/64 Scope:Link
UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
RX packets:5994791 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:6512900 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:1000
RX bytes:4247649943 (3.9 GiB) TX bytes:1355671025 (1.2 GiB)
Interrupt:11 Base address:0xa000

lo Link encap:Local Loopback
inet addr:127.0.0.1 Mask:255.0.0.0
inet6 addr: ::1/128 Scope:Host
UP LOOPBACK RUNNING MTU:16436 Metric:1
RX packets:52798 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:52798 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:0
RX bytes:9801172 (9.3 MiB) TX bytes:9801172 (9.3 MiB)
```

# Example: min routing table (linux)

```
[root@nordic route]# netstat -rn --inet6
```

```
Kernel IPv6 routing table
```

Destination	Next	Hop	Flags	Met	Ref	If
::1/128	::	U	0	20776	2	lo
fe80::250:fcff:fe90:ae2e/128	::	U	0	0	2	lo
fe80::/64	::	U	256	0	0	eth0
ff00::/128	ff00::	UC	0	1	0	eth0
ff00::/8	::	U	256	0	0	eth0

```
[root@nordic route]# ping6 ::1
```

```
PING ::1 (::1) 56 data bytes
```

```
64 bytes from ::1: icmp_seq=0 ttl=64 time=0.028 ms
```

```
64 bytes from ::1: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.009 ms
```

```
64 bytes from ::1: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.026 ms
```

# Example: services

```
[root@nordic ~]# netstat -an|more
```

Active Internet connections (servers and established)

Proto	Recv-Q	Send-Q	Local Address	Foreign Address	State
tcp	0	0	195.70.217.195:53	0.0.0.0:*	LISTEN
tcp	0	0	127.0.0.1:53	0.0.0.0:*	LISTEN
tcp	0	0	0.0.0.0:21	0.0.0.0:*	LISTEN
tcp	0	0	127.0.0.1:953	0.0.0.0:*	LISTEN
tcp	0	0	127.0.0.1:25	0.0.0.0:*	LISTEN
tcp	0	0	:::22	:::*	LISTEN
tcp	0	0	::ffff:195.70.217.195:22	::ffff:195.70.217.201:3730	ESTABLIS
tcp	0	52	::ffff:195.70.217.195:22	::ffff:82.179.116.18:1924	ESTABLIS
udp	0	0	195.70.217.195:53	0.0.0.0:*	
udp	0	0	127.0.0.1:53	0.0.0.0:*	

*Kernel support:*

```
[root@nordic ~]# /sbin/sysctl -a
```

```
net.ipv6.conf.default.max_addresses = 16
net.ipv6.conf.default.max_desync_factor = 600
net.ipv6.conf.default.regen_max_retry = 5
net.ipv6.conf.default.temp_prefered_lft = 86400
net.ipv6.conf.default.temp_valid_lft = 604800
net.ipv6.conf.default.use_tempaddr = 0
net.ipv6.conf.default.force_mld_version = 0
net.ipv6.conf.default.router_solicitation_delay = 1
net.ipv6.conf.default.router_solicitation_interval = 4
```

...

# Example: Win10 interfaces

```
PS C:\WINDOWS\system32> ipconfig
```

Настройка протокола IP для Windows

Адаптер Ethernet VirtualBox Host-Only Network:

DNS-суффикс подключения . . . . . :

Локальный IPv6-адрес канала . . . : fe80::9896:e7a2:c200:9b2e%21

IPv4-адрес. . . . . : 192.168.56.1

Маска подсети . . . . . : 255.255.255.0

Основной шлюз. . . . . :

...

Адаптер беспроводной локальной сети Беспроводная сеть:

DNS-суффикс подключения . . . . . :

Локальный IPv6-адрес канала . . . : fe80::a1ba:4493:4c9a:6431%23

IPv4-адрес. . . . . : 192.168.1.41

Маска подсети . . . . . : 255.255.255.0

Основной шлюз. . . . . : 192.168.1.1

# Example: Win10 routes

```
PS C:\WINDOWS\system32> route print -6
```

```
=====
```

Список интерфейсов

```
21...0a 00 27 00 00 15 .....VirtualBox Host-Only Ethernet Adapter
12...18 5e 0f 1f 0b 90 .....Microsoft Wi-Fi Direct Virtual Adapter #3
4...00 ff 0f 4a 00 41 .....TAP Adapter V9 for Private Tunnel
5...00 ff 22 8e cc 86 .....TAP-Windows Adapter V9
23...56 b9 a6 3c 32 8e .....Intel(R) Dual Band Wireless-AC 7265
1.....Software Loopback Interface 1
```

```
=====
```

Метрика	Сетевой адрес	Шлюз
1 331	::1/128	On-link
21 281	fe80::/64	On-link
23 306	fe80::/64	On-link
21 281	fe80::9896:e7a2:c200:9b2e/128	On-link
23 306	fe80::a1ba:4493:4c9a:6431/128	On-link
1 331	ff00::/8	On-link
21 281	ff00::/8	On-link
23 306	ff00::/8	On-link

```
=====
```

Постоянные маршруты: Отсутствует

Do you have IPv6?

<http://test-ipv6.com>

<http://ipv6-test.com>

# Reference

1. Мелоун Д., Мэрфи Н. IPv6. Администрирование сетей.- М:КУДИЦ-ПРЕСС, 2007, 320с.

2. [https://secure.wikimedia.org/wikipedia/en/wiki/IPv6\\_address](https://secure.wikimedia.org/wikipedia/en/wiki/IPv6_address)

3. <http://wood.phys.spbu.ru/net2017/BOOKS/BT-IPv6-Tutorial.pdf>

4. <http://www.intuit.ru/studies/courses/11157/1119/info> (продвинутый курс «IPv6 для профессионалов»)

5. *Google statistics:*

<https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html#tab=ipv6-adoption&tab=ipv6-adoption>