



# Технологические основы Интернета Вещей

## Лекция 7. Технологии передачи данных интернета вещей

Жматов Дмитрий Владимирович  
кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры Математического обеспечения и  
стандартизации информационных технологий

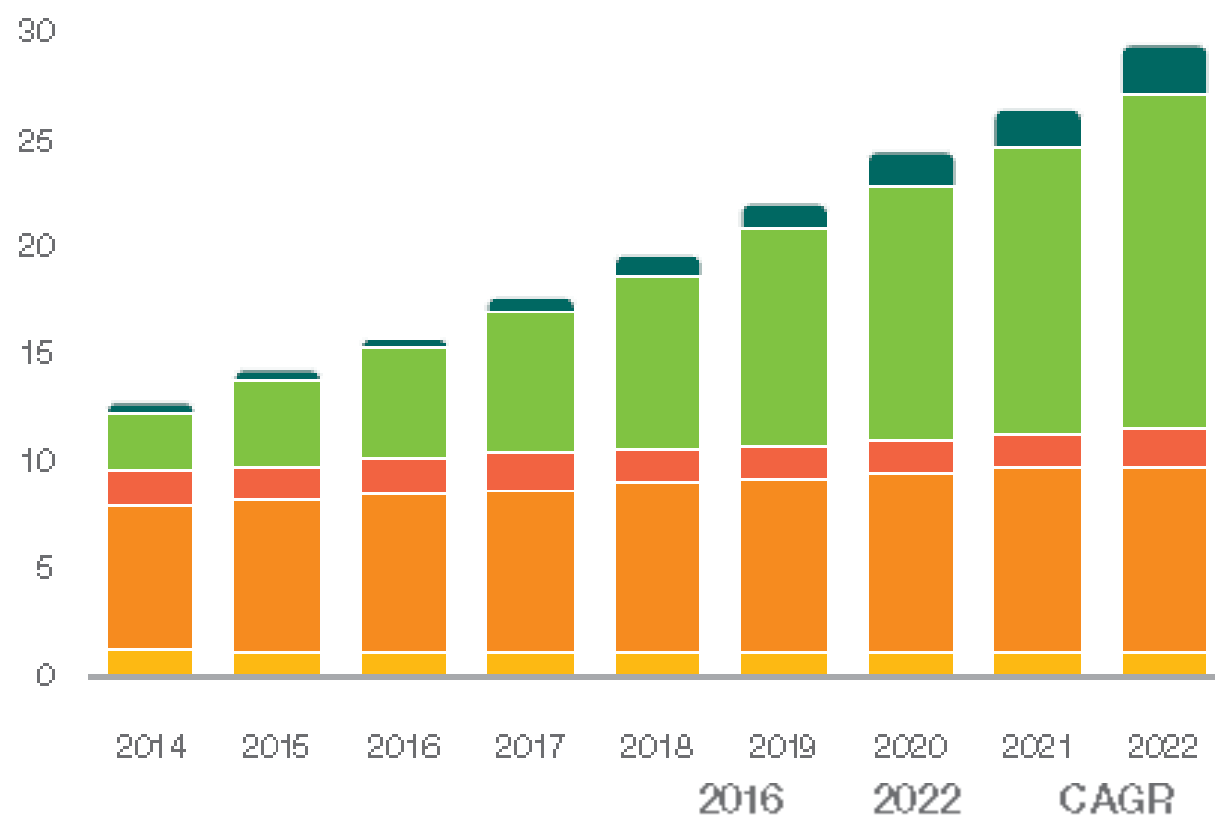
# Всеобщий интернет

Концепция всеобщего интернета предполагает объединение следующих компонентов:

- Вещи – интернет вещей
- Люди – центральное звено, пользователь
- Данные – основа для подготовки информации, пригодной для принятия решений
- Процесс – описание взаимодействия

# Динамика роста рынка телекоммуникаций

Connected devices (billions)

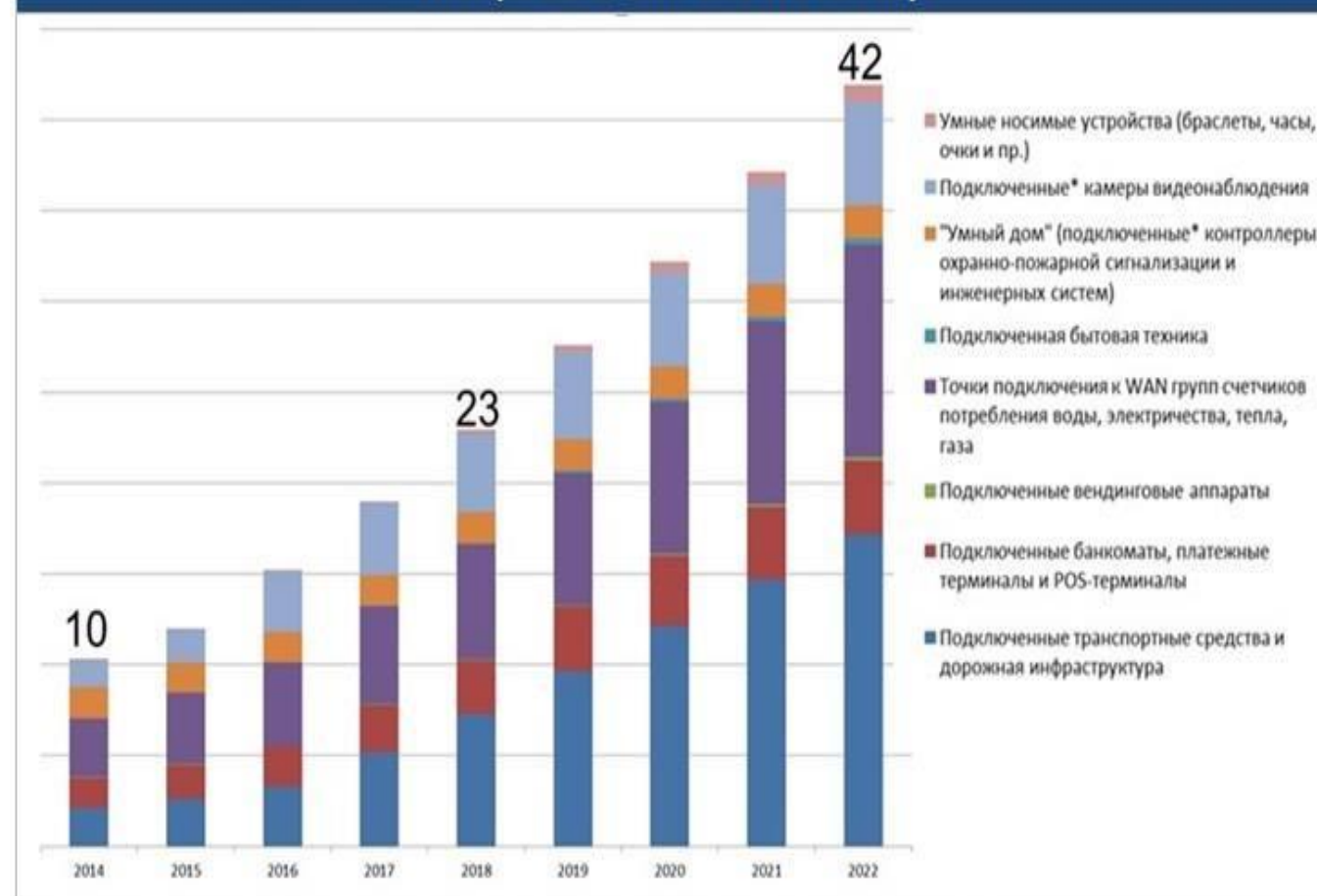


	2016	2022	CAGR
Wide-area IoT	0.4	2.1	30%
Short-range IoT	5.2	15.5	20%
PC/laptop/tablet	1.6	1.7	0%
Mobile phones	7.3	8.6	3%
Fixed phones	1.4	1.3	0%

5 декабря 2022 г.

16 billion 29 billion

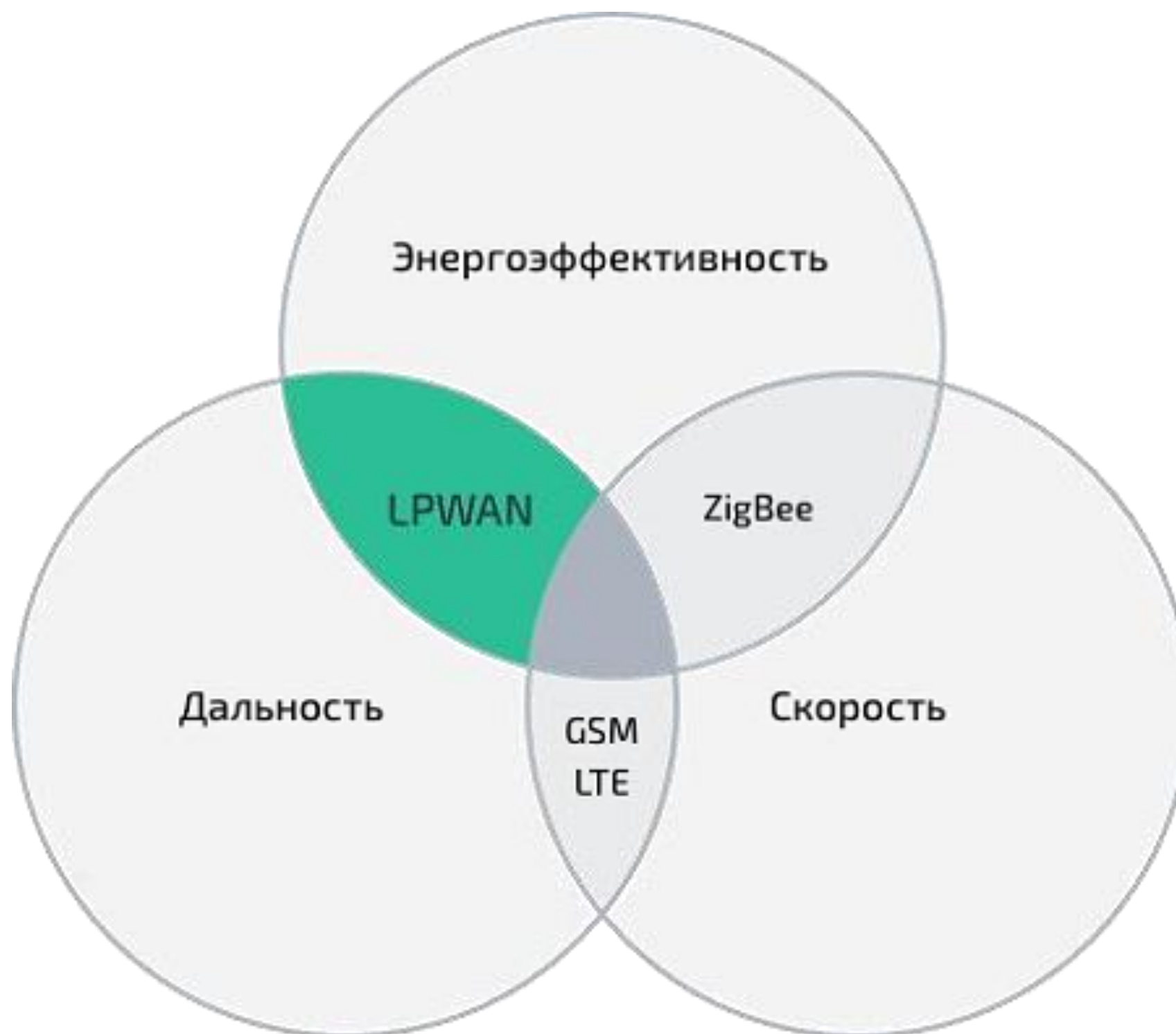
Рис. 1. Оценка количества подключенных к WAN\* устройств IoT/M2M в России, факт за 2010-2018 гг. и прогноз на 2019-2022 гг., тыс. штук



\* к глобальным сетям (WAN, Wide Area Network) локально подключенные устройства не учитываются

Источник: J'son & Partners Consulting, 2019

# Требования к технологии передачи данных



# Немного терминологии:

**Оператор связи** — юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, оказывающие услуги связи на основании соответствующей лицензии.

**Лицензирующая служба - Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)**



**Главный  
радиочастотный  
центр**



**Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ)** — межведомственный координационный орган, действующий при Министерстве связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, обладающий всей полнотой полномочий в области регулирования радиочастотного спектра и отвечающий за формирование государственной политики в области его распределения и использования.

# Немного терминологии:

**Международный союз электросвязи** (МСЭ, англ. International Telecommunication Union, ITU) – международная организация, определяющая рекомендации в области телекоммуникаций и радио, а также регулирующая вопросы международного использования радиочастот (распределение радиочастот по назначениям и по странам).



Сектор радиосвязи МСЭ, МСЭ-Р, ITU-R – одно из трёх подразделений Международного союза электросвязи (МСЭ) – **Сектор радиосвязи** – занимающееся разработкой международных стандартов радиосвязи, телевизионного и радиовещания. Кроме того, в компетенцию МСЭ-Р входит международное распределение радиочастотного спектра и орбит спутников связи. Штаб-квартира МСЭ находится в Женеве. В ней расположен постоянно действующий секретариат и Бюро радиосвязи.

# Нелицензируемые диапазоны частот в России:

В России есть только три диапазона частот, на которых можно проводить радиосвязь без разрешений, лицензий.

Это так называемая гражданская радиосвязь и частоты:

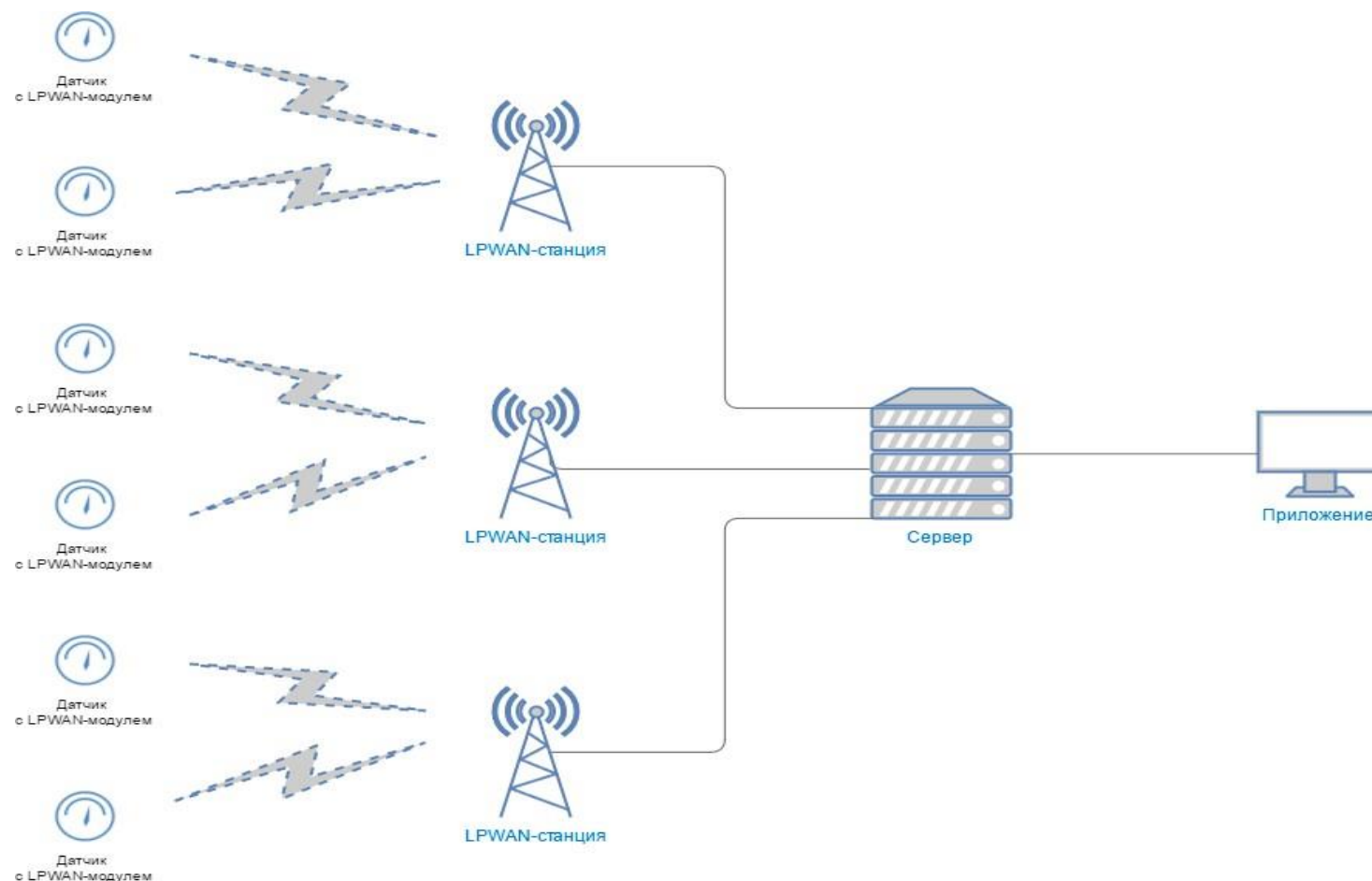
- 27МГц, (SB диапазон)
- 433.075-434.775МГц (LPD диапазон)
- 446-446.200МГц (PMR диапазон).
- 864,0 — 865,0 МГц — мощность до 25 мВт, рабочий цикл до 0,1 % или LBT\*, запрещено использование на территории аэропортов
- 866,0 — 868,0 МГц — мощность до 25 мВт, рабочий цикл до 1 % или LBT\*, запрещено использование на территории аэропортов, спектральная плотность мощности до 1000 мВт/МГц
- 868,7 — 869,2 МГц — мощность до 100 мВт, рабочий цикл до 10 % или LBT\*, использование без ограничений
- 2400 - 2483,5 МГц, с прямым расширением спектра и другими видами модуляции с максимальной эквивалентной изотропно-излучаемой мощностью **не более 100 мВт**
- 5150 - 5350 МГц, 5650 - 5850 МГц с максимальной эквивалентной изотропно-излучаемой мощностью **не более 200 мВт**.

**ISM band** - "industrial, scientific and medical" - спектр радиочастот специально зарезервированный для интернационального использования в областях отличных от телекома, таких как: промышленное производство, исследования и медицина).



# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

**LPWAN** (англ. Low-power Wide-area Network – «энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия») – беспроводная технология передачи небольших по объёму данных на дальние расстояния, разработанная для распределённых сетей телеметрии, межмашинного взаимодействия и интернета вещей. LPWAN является одной из беспроводных технологий, обеспечивающих среду сбора данных с различного оборудования: датчиков, счётчиков и сенсоров





# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

## Преимущества LPWAN

- Большая дальность передачи радиосигнала, достигает 10–15 км[2].
- Низкое энергопотребление у конечных устройств, благодаря минимальным затратам энергии на передачу небольшого пакета данных
- Высокая проникающая способность радиосигнала в городской застройке при использовании частот суб-гигагерцового диапазона.
- Высокая масштабируемость сети на больших территориях.
- Отсутствие необходимости получения частотного разрешения и платы за радиочастотный спектр, вследствие использования нелицензируемых частот (ISM band)

## Недостатки LPWAN

- Относительно низкая пропускная способность, вследствие использования низкой частоты радиоканала.
- Задержка передачи данных от датчика до конечного приложения, связанная с временем передачи радиосигнала, может достигать от нескольких секунд до нескольких десятков секунд.
- Отсутствие единого стандарта, который определяет физический слой и управление доступом к среде для беспроводных LPWAN-сетей.
- **Загруженность нелицензируемых каналов в условиях плотной городской среды**

# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

## Приложения

- Энергетика: системы беспроводного автоматизированного контроля и учёта электроэнергии
- Жилищно-коммунальное хозяйство: удалённый сбор показаний приборов учёта: воды, тепла, газа, электричества
- Сельское хозяйство: контроль влажности и температуры почв, наблюдение за освещённостью и уровнем солнечной радиации, наблюдение за состоянием складов и овощехранилищ.
- Безопасность и охранные системы: резервирование каналов связи, контроль проникновения, контроль затопления помещений, контроль пожарной безопасности.
- Системы городского управления и «умный город»: управление освещением, наблюдение за автомобильными потоками, контроль занятости парковочных мест, контроль температуры, шума, влажности, освещённости, загрязнения воздуха и тому подобного.

# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

## Приложения

- Экологический мониторинг: контроль качества воздуха и воды, контроль уровня воды в реках и озёрах, наблюдение за пожарной опасностью в лесах.
- Строительство: контроль оборудования, наблюдение за параметрами конструкций и зданий.
- Медицина: носимые устройства.
- Автотранспорт: контроль скоростного режима и стиля вождения.
- Производство и системы снабжения: контроль параметров оборудования, наблюдение за состоянием грузов.
- Приложения интернета вещей

# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

Примеры LPWAN технологий:

**LoRa (Long Range)** – это запатентованная, проприетарная технология модуляции маломощной глобальной сети. Основана на методах модуляции с расширенным спектром, полученных на основе технологии chirp spread spectrum . Разработана Cycleo из Гренобля, и приобретена компанией Semtech членом-основателем LoRa Alliance.

# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

Примеры LPWAN технологий:

**NB-Fi** - открытый протокол беспроводной передачи данных малого объёма на больших расстояниях при низких затратах энергии LPWAN. Предназначен для построения распределённых сетей телеметрии, межмашинного взаимодействия и интернета вещей.

Протокол NB-Fi утвержден Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) как предварительный национальный стандарт РФ ПНСТ-2019 «Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала NB-Fi». Стандарт вступит в силу с 01 апреля 2019 г. и действует до 1 апреля 2022 г.

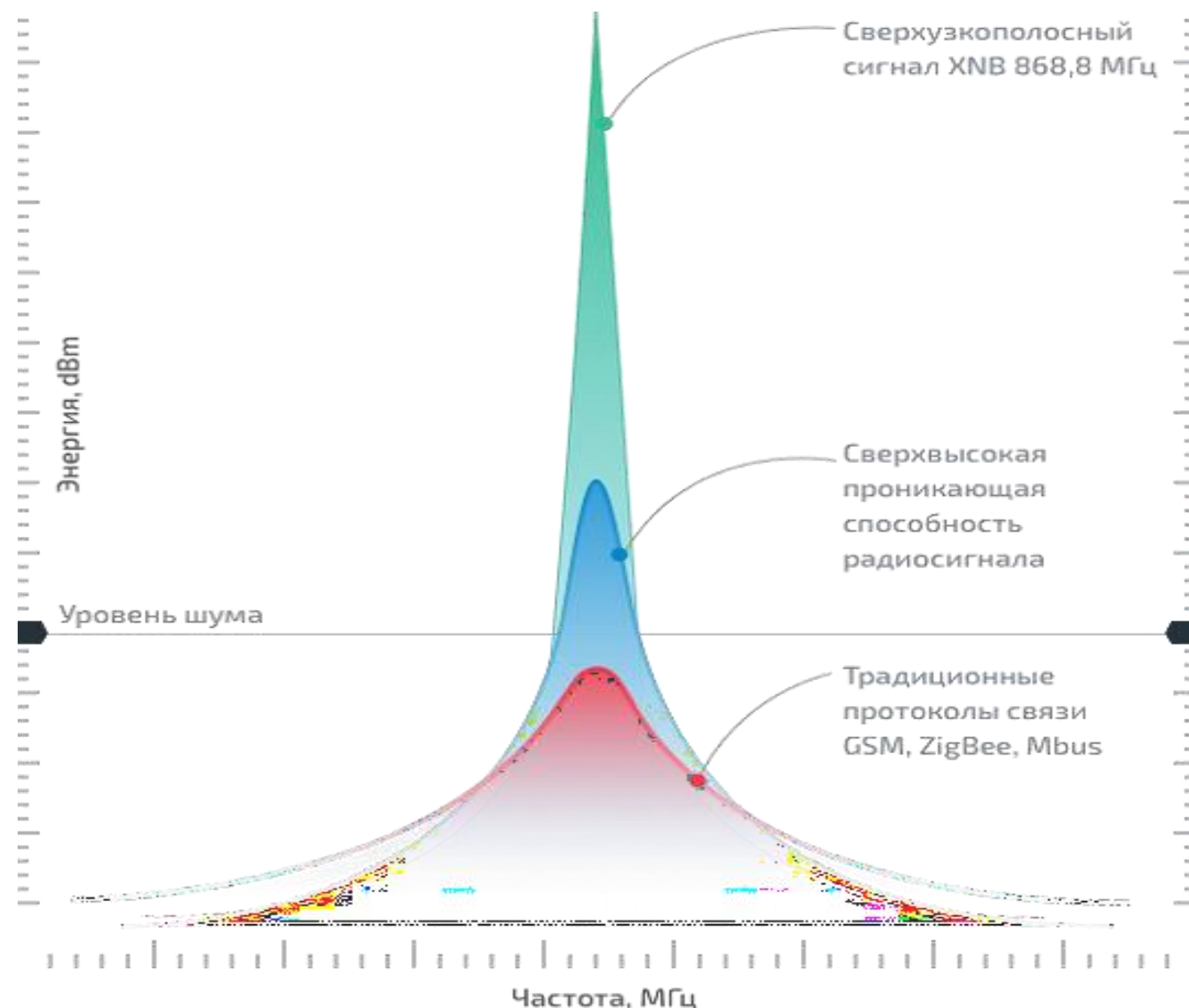
Протокол NB-Fi был разработан российской компанией WAVIoT (ООО "Телематические Решения") для функционирования в широком спектре радиочастот, в том числе в свободном от лицензирования спектре радиочастот

# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

Примеры LPWAN технологий:

**XNB** – энергоэффективный LPWAN-протокол дальнего радиуса действия

На физическом уровне для передачи сигнала в сети «СТРИЖ» используется модуляция DBPSK.





# Технологии дальней энергоэффективной передачи данных:

**GoodWAN** – технология беспроводной передачи данных по радиоканалу для задач интернета вещей (Россия)

**SigFOX** -Французский оператор глобальной сети, основанный в 2010 году, который строит беспроводные сети для подключения объектов с низким энергопотреблением, таких как счетчики электроэнергии и умные часы, которые должны постоянно включаться и передавать небольшие объемы данных.

# Особенности применения LPWAN технологий:

Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) 25 декабря 2018 года приняла решение:

- о введении **регистрации** базовых станций энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (LPWAN).
- С конца 2020 года строить такие сети можно будет только с использованием базовых станций российского производства.

Вводятся и существуют требования по применению отечественных криптографических протоколов («Кузнечик», «Магма») в отдельных областях интернета вещей:

- ЖКХ и «умный гоорд» (Минстрой)
- Энергетика (Минэнерго)
- Транспорт (Минтранс)

# Рассмотрим в качестве примера LoRaWAN

## Основные характеристики LoRa:

*радиус действия:* до 5 км в городе,

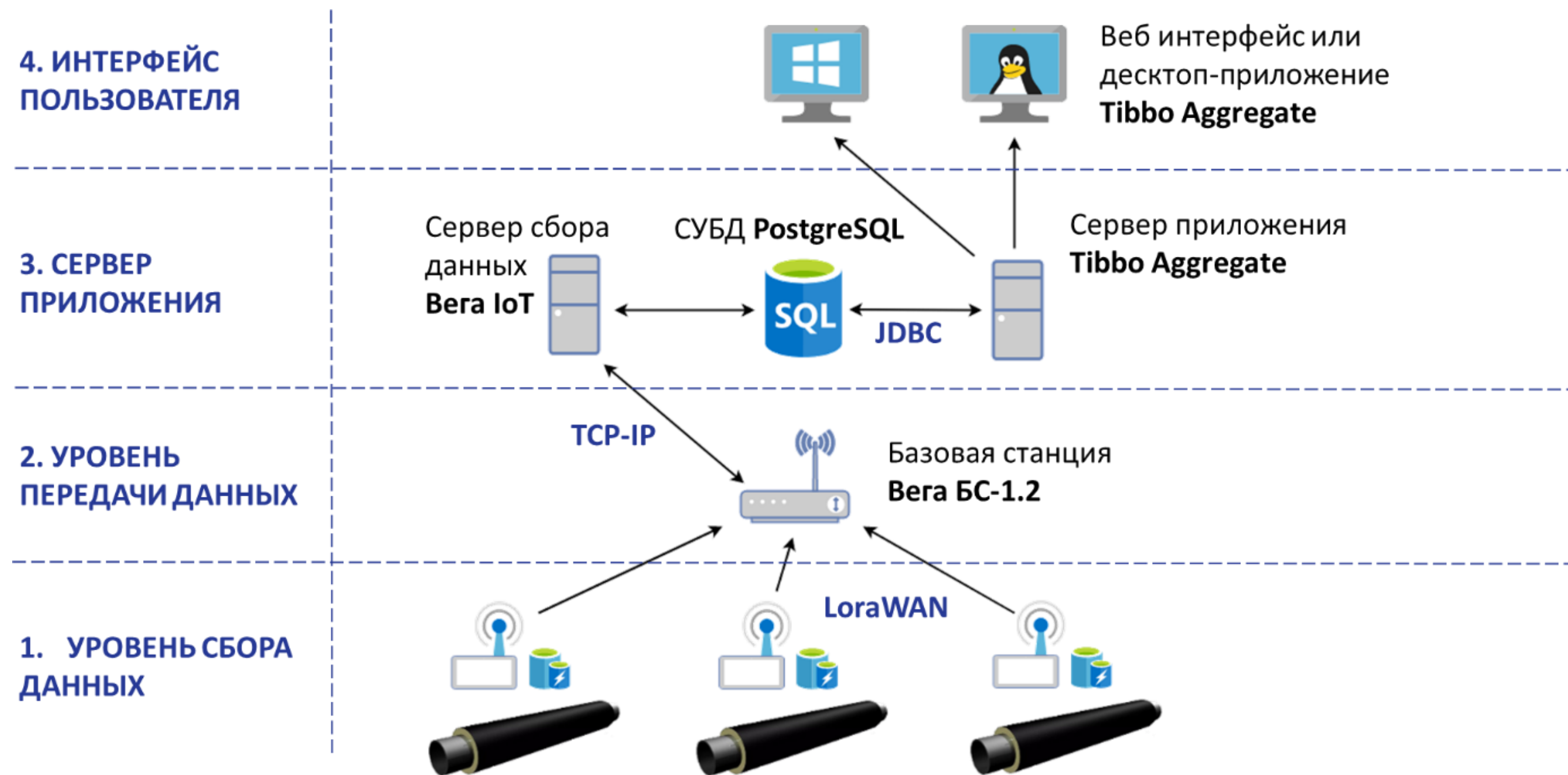
до 15 км вне населенного пункта;

*скорость:* до 50 кбит/с;

*срок службы без замены батареи:* до 10 лет;

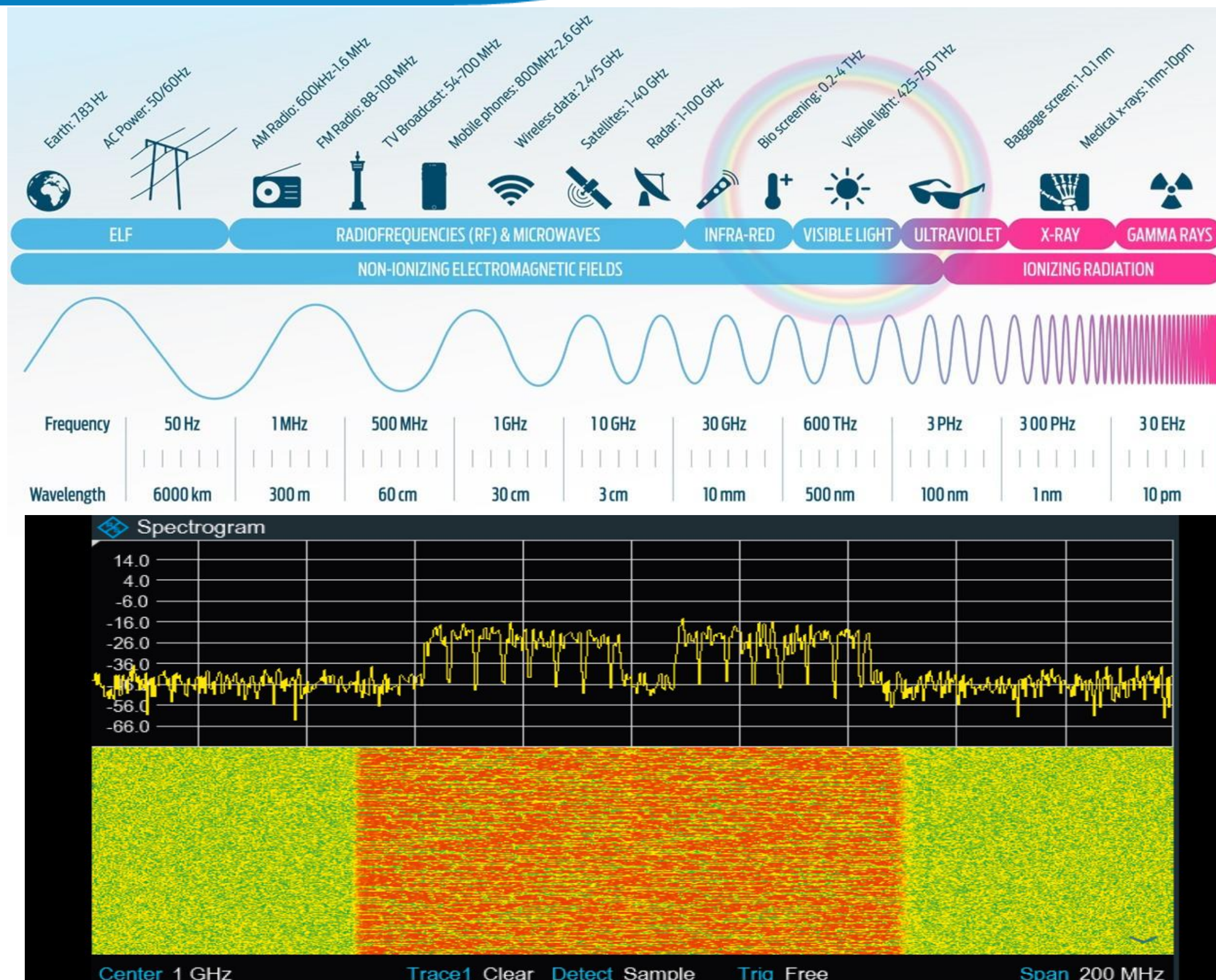


# Архитектура сети Lora Wan





# Эффективность распределения частоты



# Преимущества LoRa:



- открытый стандарт
- большая дальность
- высокая проникающая способность в городской застройке
- низкое энергопотребление, по оценкам до 10 лет работы сенсора от батареи AA
- нелицензируемый диапазон
- симметричный канал
- адаптивная скорость передачи данных
- поддерживает личные и общественные сети
- комплексная безопасность и встроенные идентификация и аутентификация

**Основное – возможность построить свою LPWAN сеть, там где нет покрытия связи!**

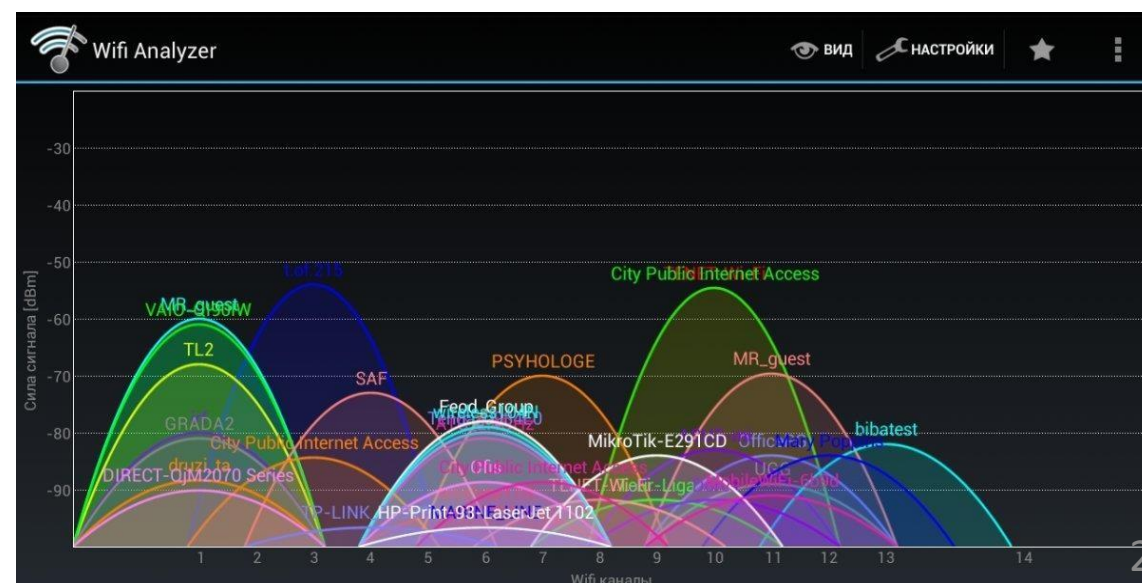


# Недостатки LoRa:

- низкая скорость передачи данных
- отсутствует роуминг
- невысокая помехозащищённость
- малая ширина диапазона
- перегруженный диапазон



**Роуминг** (англ. roaming от англ. roam — бродить, странствовать) — процедура предоставления услуг абоненту вне зоны обслуживания «домашней» сети абонента с использованием ресурсов другой (гостевой) сети.



# Покрытие LoRa:



Главная / Карта покрытия LoRaWAN сети

## КАРТА ПОКРЫТИЯ LORAWAN СЕТИ



# Зона покриття сети



# Сотовая связь

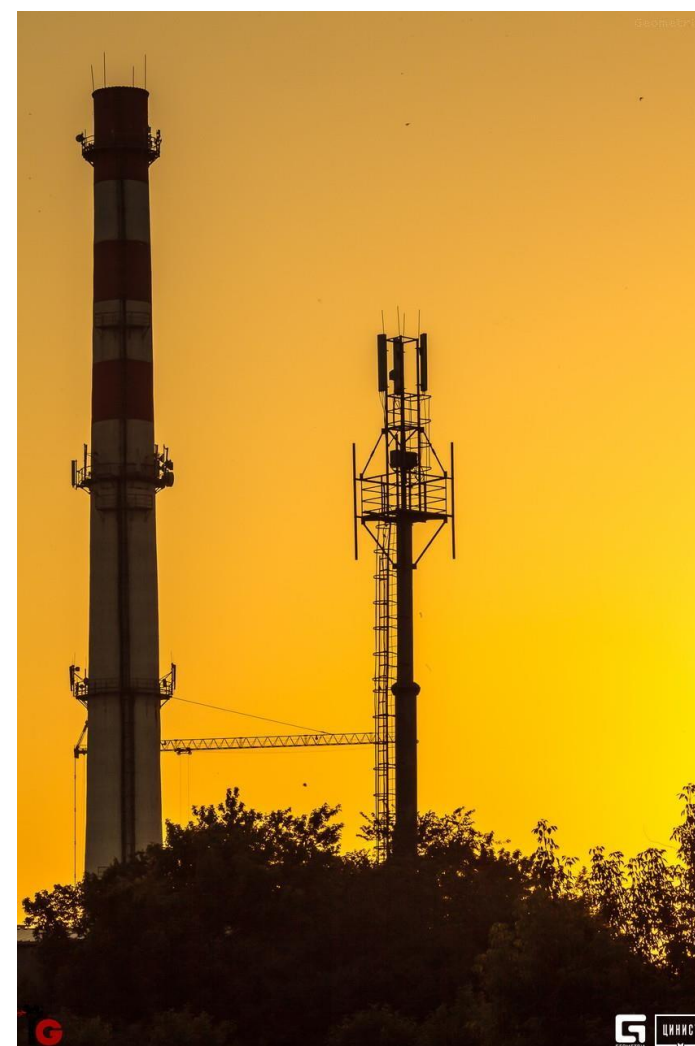
Оператор	Частотный диапазон (выгрузка/загрузка), МГц	Дуплекс*	Полоса
МТС	839.5-847 / 798.5-806	FDD	Band 20
МТС	1710-1785 / 1805-1880	FDD	Band 3
МТС	2595-2615	TDD	Band 38
МТС	2540-2550 / 2660-2670	FDD	Band 7
МегаФон	847-854.5 / 806-813.5	FDD	Band 20
МегаФон	2575-2595	TDD	Band 38
МегаФон	2530-2540 / 2650-2660	FDD	Band 7
Yota	2500-2530 / 2620-2650	FDD	Band 7
Билайн	854.5-862 / 813.5-821	FDD	Band 20
Билайн	2550-2560 / 2670-2680	FDD	Band 7
Теле2	832-839.5 / 791-798.5	FDD	Band 20
Теле2	2560-2570 / 2680-2690	FDD	Band 7

Возможные обозначения каналов работы в телефонах и программах	Диапазон значений ARFCN, UARFCN или EARFCN*
EGSM900, EGSM900, Band 8	0.. 124
GSM-1800 (2G)	512.. 885
UMTS-900 (3G)	2937.. 2712
UMTS-2100 (3G)	10562.. 10838
LTE-800 (4G)	6150.. 6449
LTE-1800 (4G)	1200.. 1949
LTE2600 FDD (4G)	2750.. 3449
LTE2600 TDD (4G) **	37750.. 38249

**GSM** (Global System for Mobile Communications) – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи с разделением каналов по времени (TDMA) и частоте (FDMA). Разработан под эгидой Европейского института стандартизации электросвязи (ETSI) в конце 1980-х годов

**NB-IoT (Narrow Band Internet of Things)** – стандарт сотовой связи для устройств телеметрии с низкими объёмами обмена данными. Разработан консорциумом 3GPP в рамках работ над стандартами сотовых сетей нового поколения. Первая рабочая версия спецификации представлена в июне 2016 года.

# Сотовые сети для IoT





# Особенности сотовых сетей:

## Преимущества

- Высокая скорость передачи данных
- Высокая помехозащищённость и безопасность
- Симметричный канал
- Комплексное решение: от устройства до платформы

## Недостатки:

- Лицензируемый диапазон - если нет присутствия оператора в регионе, быстро построить не выйдет
- Высокое [мгновенное] энергопотребление
- Высокие эксплуатационные расходы (как для оператора, так и для абонента)

# Сети 5G:

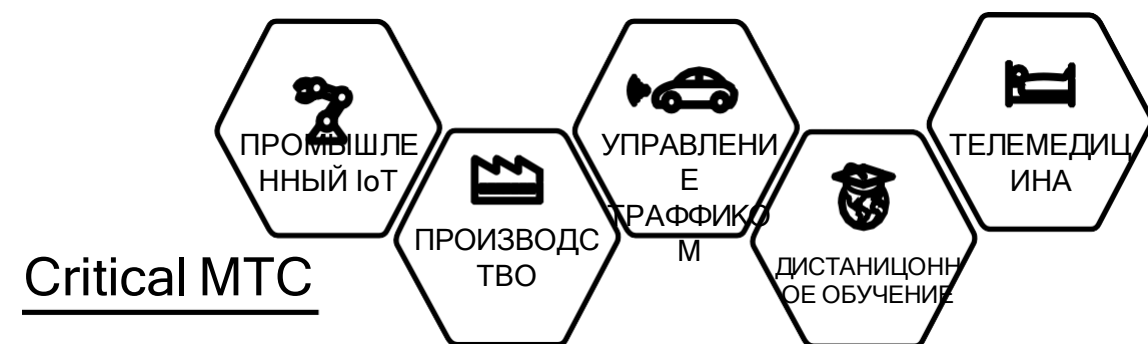
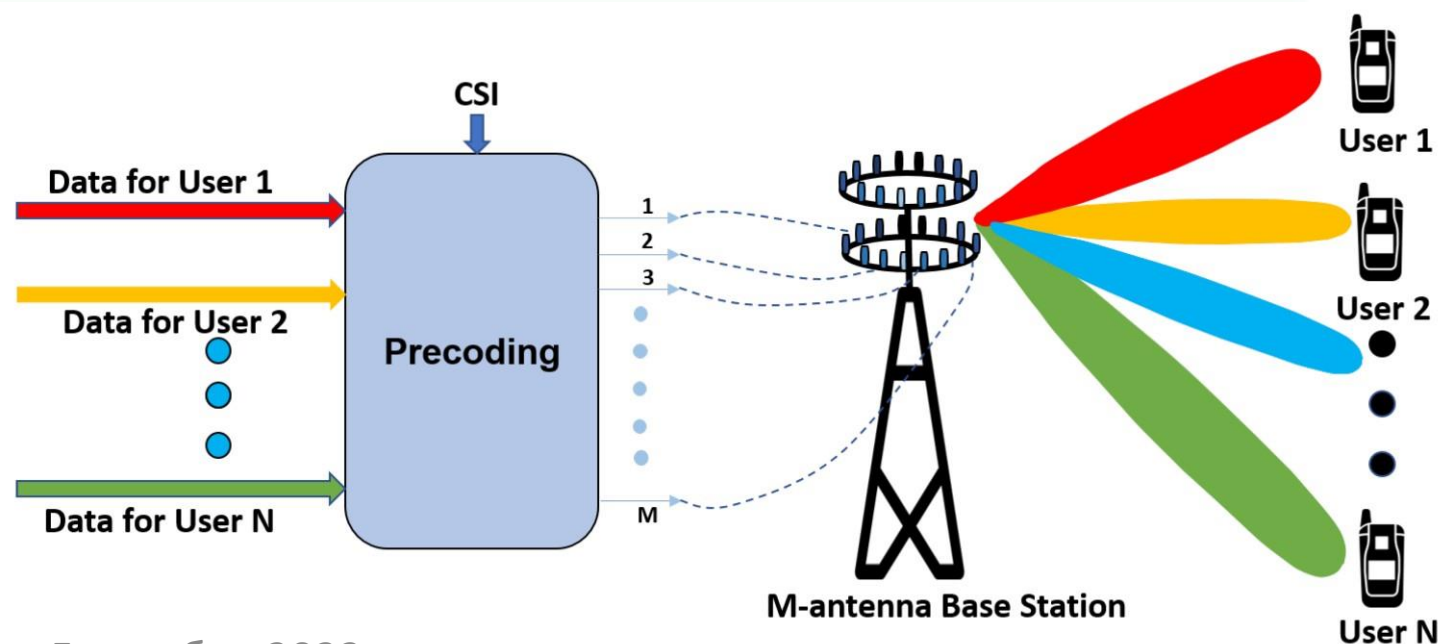
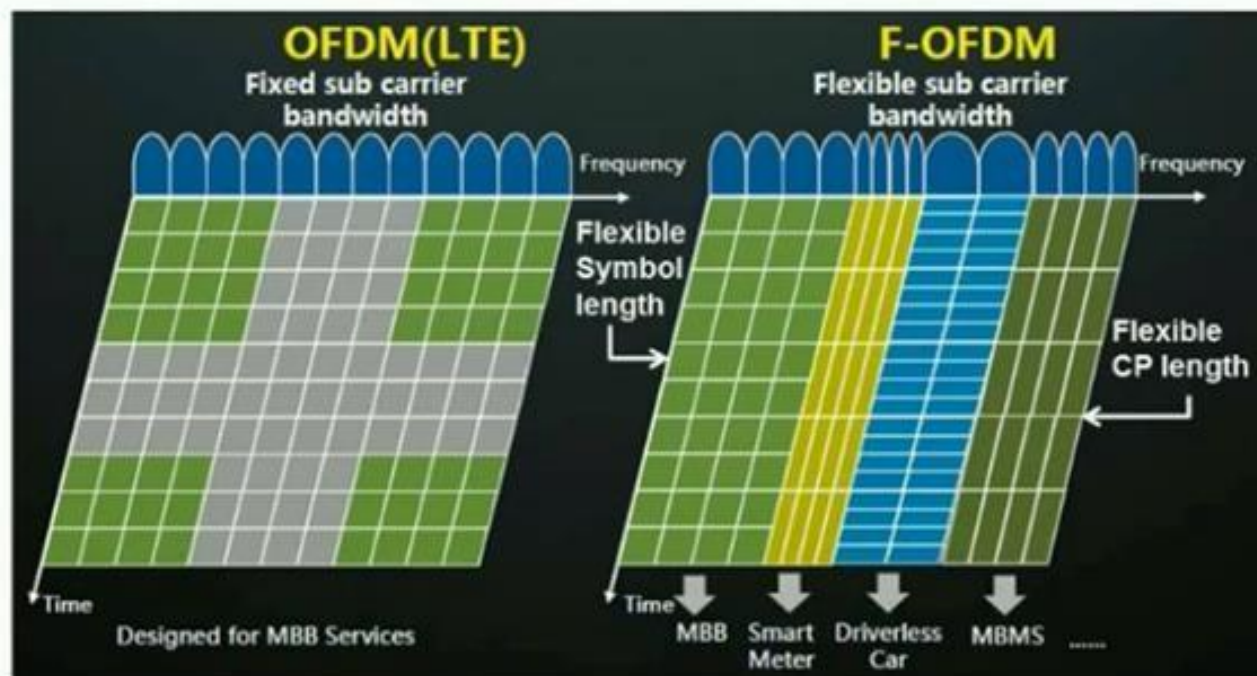
5G – пятое поколение мобильной связи, действующее на основе стандартов телекоммуникаций (5G/IMT-2020), следующих за существующими стандартами 4G/IMT-Advanced

Телекоммуникационный стандарт связи нового поколения.

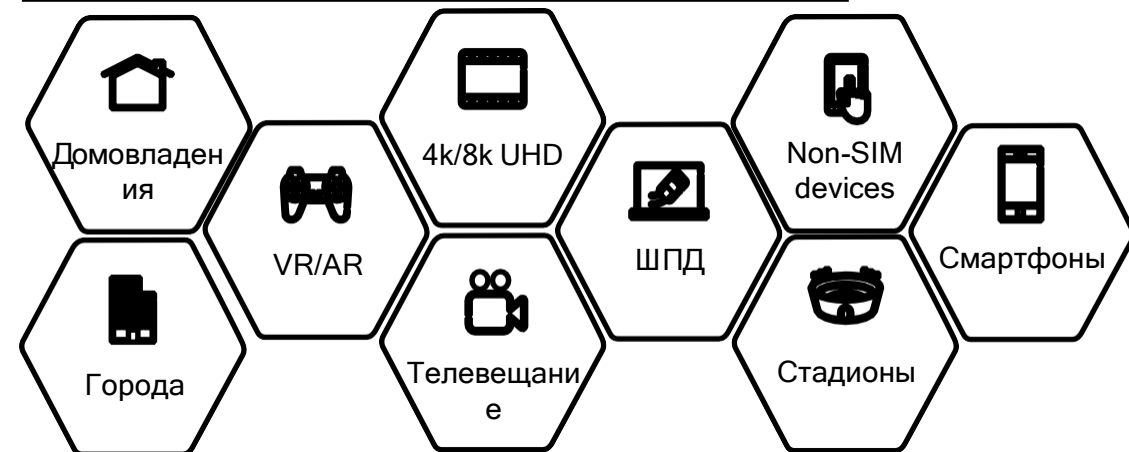
Технологии 5G должны обеспечивать более высокую пропускную способность по сравнению с технологиями 4G, что позволит обеспечить большую доступность широкополосной мобильной связи, а также использование режимов device-to-device (букв. «устройство к устройству», прямое соединение между абонентами), сверхнадёжные масштабные системы коммуникации между устройствами, а также меньшее время задержки, скорость интернета 1–2 Гбит/с, меньший расход энергии батарей, чем у 4G-оборудования, что благоприятно скажется на развитии Интернета вещей (англ. IoT).

# Сети 5G:

## OFDM(4G) vs F-OFDM(5G)



## Enhanced mobile broadband

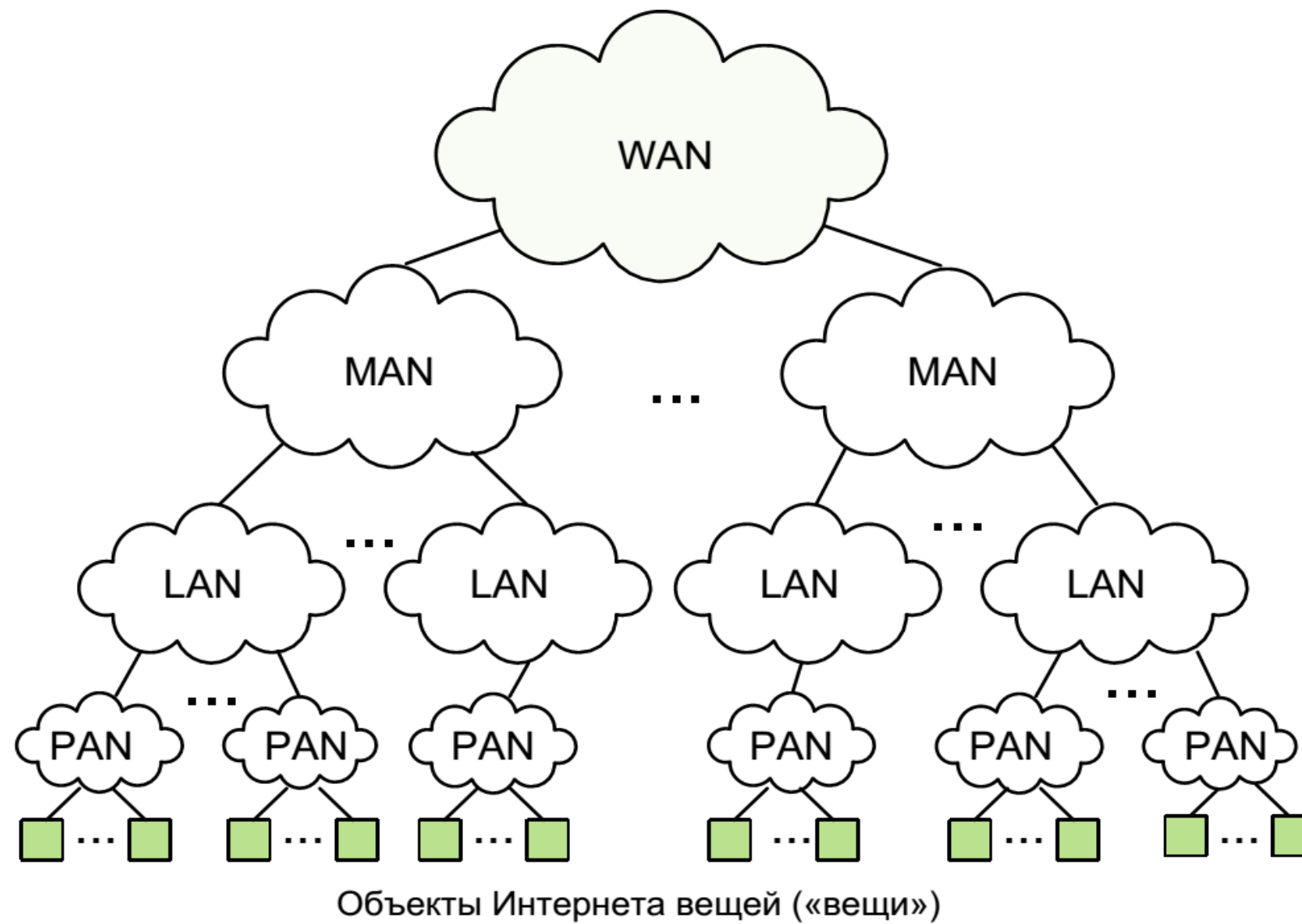


# Сравнительная характеристика

	SIGFOX	LoRa	clean slate  cloT	NB LTE-M Rel. 13 	LTE-M Rel. 12/13 	EC-GSM Rel. 13 	5G (targets) 
Range (outdoor) MCL	<13km 160 dB	<11km 157 dB	<15km 164 dB	<15km 164 dB	<11km 156 dB	<15km 164 dB	<15km 164 dB
Spectrum Bandwidth	Unlicensed 900MHz 100Hz	Unlicensed 900MHz <500kHz	Licensed 7-900MHz 200kHz or dedicated	Licensed 7-900MHz 200kHz or shared	Licensed 7-900MHz 1.4 MHz or shared	Licensed 8-900MHz 2.4 MHz or shared	Licensed 7-900MHz shared
Data rate	<100bps	<10 kbps	<50kbps	<150kbps	<1 Mbps	10kbps	<1 Mbps
Battery life	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years	>10 years
Availability	Today	Today	2016	2016	2016	2016	beyond 2020



# Классификация технологий передачи данных в IoT



# Классификация технологий передачи данных в IoT

1. **Персональная сеть PAN** (Personal Area Network) – это сеть, построенная «вокруг» человека. Данные сети призваны объединять все персональные устройства пользователя (телефоны, смартфоны, карманные персональные компьютеры, ноутбуки, гарнитуры и др.). Применительно к IoT такая сеть строится «вокруг» устройства («вещи»).

2. **Локальная сеть LAN** (Local Area Network) – сеть, покрывающая обычно относительно небольшую территорию или небольшую группу зданий (дом, офис, фирму). К локальным сетям можно отнести и сеть контроллеров CAN (Controller Area Network) – промышленную сеть, ориентированную, прежде всего, на объединение в единую сеть различных исполнительных устройств и датчиков в рамках отдельного предприятия.

3. **Городская сеть MAN** (Metropolitan Area Network) – объединяет отдельных пользователей и локальные сети в пределах города, представляет собой сеть по размерам большую, чем LAN, но меньшую, чем WAN.

4. **Глобальная сеть WAN** (Wide Area Network) – связывает пользователей и сети, рассредоточенные на расстоянии сотен и тысяч километров.



# Беспроводные сети малого радиуса действия

1. Беспроводные персональные сети WPAN (Wireless Personal Area Network). Применяются для связи различных устройств, включая компьютерную, бытовую и оргтехнику, средства связи и т.д. Физический и канальный уровни регламентируются стандартом IEEE 802.15.4. Радиус действия WPAN составляет от нескольких метров до нескольких десятков сантиметров. Такие сети используются как для объединения отдельных устройств между собой, так и для связи их с сетями более высокого уровня, например, глобальной сетью интернет. WPAN может быть развернута с использованием различных сетевых технологий, например, Bluetooth, ZigBee, 6LoWPAN и других.

2. Беспроводные сенсорные сети WSN (Wireless Sensor Network).                      Распределённые, самоорганизующиеся сети множества датчиков (сенсоров) исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиоканала. Область покрытия подобных сетей может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счёт способности ретрансляции сообщений от одного элемента к другому.

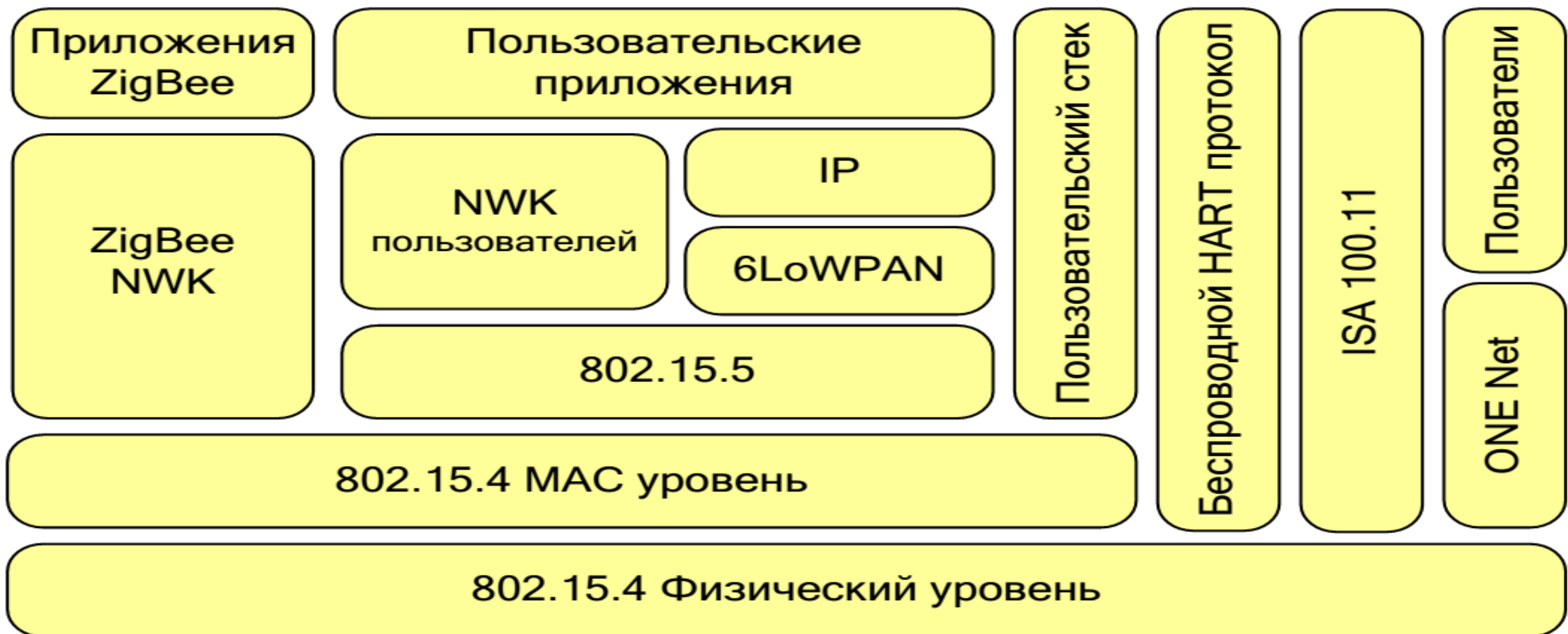
3. Малые локальные сети TAN (Tiny Area Network).    Вычислительные сети, развертываемые в пределах небольшого офиса или отдельного жилища. Их часто называют домашними сетями, так как они объединяют компьютеры, бытовую электронику и приборы сигнализации, принадлежащие одной семье. Наиболее часто такие сети строятся на базе технологии Wi-Fi.

Стандарт	Частота, МГц	Скорость, кбит/с	Уровни протокола						Шифрование
			P H Y	M A C	N W K	T R P	A P S	A C L	
IEEE 802.15.4	868/915/2400	20/40/250	+	+	-	-	-	+	+
ZigBee	2400	250	-	-	+	+	+	+	+
6LoWPAN	-	50-200	-	-	+	-	-	+	+
WirelessHART	2400	250	+	+	+	+	+	+	+
ISA100.11a	2400	250	+	+	+	+	+	+	+
Z-Wave	865/915/869	9,6/40	+	+	+	-	+	-	-
Bluetooth LE	2400	1000	+	+	+	+	+	+	+
DECT ULE	1880-1900	1000	+	+	+	-	-	+	+

# Стандарт IEEE Std 802.15.4

Стандарт IEEE Std 802.15.4 предназначен для реализации беспроводных персональных сетей WPAN большой емкости с низким энергопотреблением и низкой скоростью передачи данных. Он реализует только два нижних уровня стека протоколов – физический уровень (PHY) и уровень доступа к среде (MAC). Стандарт 802.15.4 является базовой основой для более высокоуровневых протоколов, таких как ZigBee, WirelessHART и MiWi. Он может быть также использован совместно со стандартом 6LoWPAN и стандартными протоколами Интернета для построения беспроводных сенсорных сетей

# Стек протоколов для стандарта IEEE Std 802.15.4



# IEEE Std 802.15.4

В стандарте 802.15.4 на физическом уровне под обмен данными зарезервированы 27 каналов в трёх частотных диапазонах: 868 МГц, 910 МГц и 2.4 ГГц, что позволяет использовать стандарт в нелицензируемом в большинстве стран мира диапазоне для промышленных, научных и медицинских целей ISM (Industrial Scientific Medical). На территории Российской Федерации доступен к использованию только диапазон 2.4 ГГц. В данном диапазоне определены 16 каналов шириной 5 МГц с несущими частотами, вычисляемыми в соответствии с выражением:

$$F_c = 2405 + 5(k - 1), \text{ МГц, где } k = 1, \dots, 16.$$



# IEEE Std 802.15.4

Первая версия стандарта 802.15.4 определяла два физических уровня с широкополосной модуляцией с прямым расширением спектра DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): первый – в полосе 868/915 МГц со скоростью передачи соответственно 20 и 40 кбит/с, а второй – в полосе 2450 МГц со скоростью 250 кбит/с. В 2006 году допустимые скорости передачи данных на частотах 868/915 МГц были увеличены до 100 и 250 кбит/с.

Кроме того были определены четыре спецификации физического уровня в зависимости от метода модуляции: при сохранении широкополосной модуляции DSSS возможно использование в диапазоне 868/915 МГц как двоичной, так и квадратурной фазовой манипуляции QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). С 2007 года в версию стандарта IEEE 802.15.4a число физических уровней было увеличено до шести за счёт включения уровня с сверхширокополосной радиотехнологией UWB (Ultra WideBand) для высокоскоростной передачи данных, а также спецификации уровня с радиотехнологией CSS (Chirp Spread Spectrum), основанной на расширении частотного спектра методом линейной частотной модуляции. Физический уровень UWB определён выделенными частотами в трёх диапазонах: ниже 1 ГГц, 3-5 ГГц и 6-10 ГГц, а для CSS выделен спектр в полосе 2450 МГц нелицензируемого диапазона ISM.

# IEEE Std 802.15.4

На канальном уровне спецификация IEEE 802.15.4 определяет механизмы взаимодействия элементов сети на физическом уровне для обеспечения формирования фрагментов данных (кадров), проверки и исправления ошибок, отправки кадров на сетевой уровень. При этом подуровень MAC канального уровня регулирует множественный доступ к физической среде с разделением по времени, управляет связями трансиверов и обеспечивает безопасность.

Стандарт IEEE Std 802.15.4 обеспечивает двустороннюю полудуплексную передачу данных, поддерживая при этом шифрование AES 128. Доступ к каналу основан на принципе Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance (CSMA/CA) – многостанционный доступ с контролем несущей и предотвращением конфликтов. CSMA/CA – это сетевой протокол, в котором используется принцип прослушивания несущей частоты. Устройство, которое готово к передаче данных посылает jam signal (сигнал затора) и прослушивает эфир. Если обнаруживается "чужой" jam signal, то передатчик "засыпает" на случайный промежуток времени, а затем снова пробует начать передачу фрейма. Таким образом, передача может исходить только от одного устройства, что повышает производительность сети. При этом данные передаются относительно небольшими пакетами, что характерно для трафика сигналов управления и мониторинга в БСС. Важной особенностью стандарта является обязательное подтверждение доставки сообщений.

Особенностью устройств, объединённых в сеть по стандарту IEEE Std 802.15.4, является низкое энергопотребление за счёт перехода трансивера в режим «засыпания» при отсутствии данных для пересылки и сохранении подключения в этом режиме. При разработке стандарта основной акцент делался на быстроту процессов конфигурирования и реконфигурирования. В частности, переход приемника в активное состояние длится порядка 10-15 мс, а подключение к сети новых устройств – от 30 мс. При этом длительность реконфигурации и подключения устройств зависит от постоянства «прослушивания» маршрутизаторами сети.

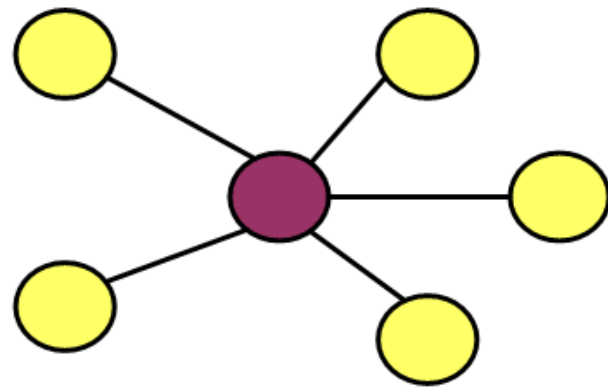
**Стандарт определяет два типа узлов сети:**

- 1) полнофункциональное устройство FFD (Fully Function Device), которое может реализовать как функцию координации работы и установки параметров сети, так и работать в режиме типового узла;
- 2) устройство с ограниченным набором функций RFD (Reduced Function Device), обладающее только возможностью поддержания связи с полнофункциональными устройствами.

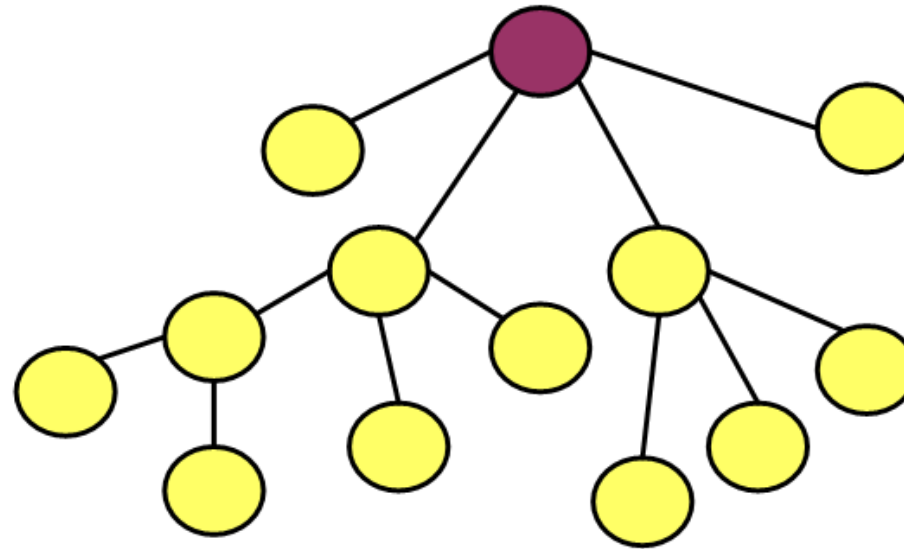
В любой сети должен быть, по крайней мере, один FFD, реализующий функцию координатора. Каждое устройство имеет 64-битный идентификатор, но в некоторых случаях для ограниченной области может использоваться краткий 16-битный для соединений в персональной сети PAN.

# IEEE Std 802.15.4

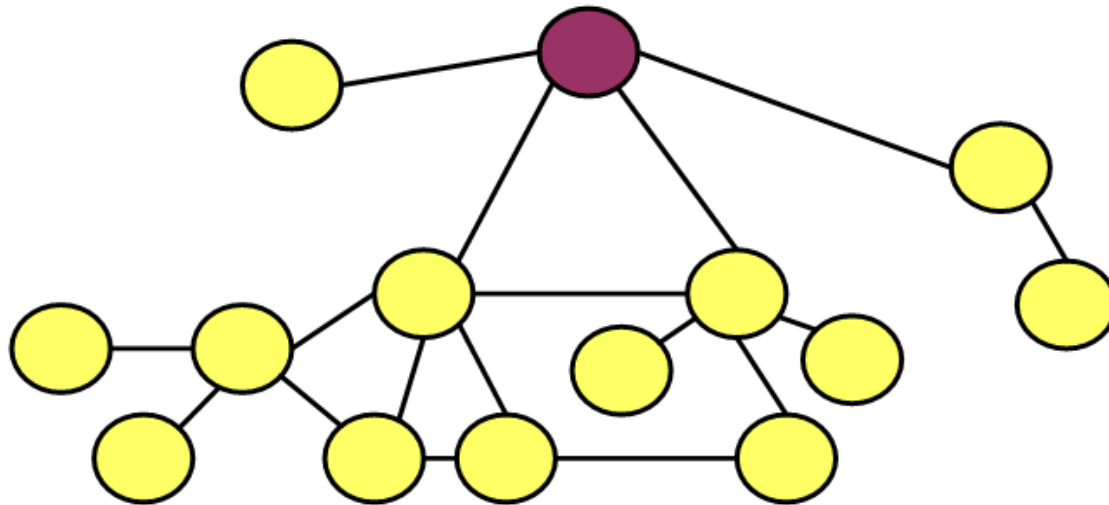
На канальном уровне стандарте IEEE Std 802.15.4 приведены общие рекомендации к построению топологии сети. Сети могут быть одноранговыми P2P (peer-to-peer, point-to-point), либо иметь топологию «звезда». На основе структуры P2P могут формироваться произвольные структуры соединений, ограниченные лишь дальностью связи между парами узлов. С учётом этого возможны различные варианты топологической структуры БСС, в частности «дерево» кластеров – структура, в которой RFD, являясь «листьями дерева», связаны только с одним FFD, а большинство узлов в сети являются FFD. Возможна также ячеистая топология сети, сформированная на основе кластерных «деревьев» с локальным координатором для каждого кластера и содержащая глобальный сетевой координатор



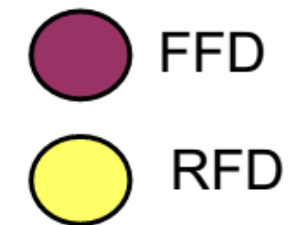
Звезда



Дерево



Ячеистая топология





# Стандарт ZigBee

Как было указано выше, стандарт IEEE Std 802.15.4 описывает два нижних уровня сетевой модели OSI, не определяя требований к верхним уровням и условий их совместимости. Решения этих задач потребовало разработки специальных коммуникационных протоколов. Наиболее известными являются протоколы альянса ZigBee, который был создан крупнейшими мировыми компаниями, специализирующимися в области разработки программно-аппаратных средств для инфокоммуникационных систем. В числе более чем двухсот членов альянса ZigBee, координирующих работы по продвижению технологий и производству технических средств для беспроводных сенсорных сетей - Texas Instruments, Motorola, Philips, IBM, Ember, Samsung, NEC, Freescale Semiconductor, LG, OKI и многие другие. Альянс разработал и ратифицировал в 2004 году стандарт ZigBee, включающий полный стек протоколов для беспроводных сенсорных сетей. Название спецификации ZigBee произошло от Zig-zag – зигзаг и Bee – пчела. Подразумевалось, что топология сети будет напоминать зигзагообразную траекторию полета пчелы от цветка к цветку.

# Стандарт ZigBee

Спецификация ZigBee ориентирована на приложения, требующие гарантированной безопасной передачи данных при относительно небольших скоростях и возможности длительной работы сетевых устройств от автономных источников питания (батарей). Она обеспечивает невысокое потребление энергии и передачу данных со скоростью до 250 Кбит/с на расстояние до 75 метров в условиях прямой видимости. Характеристики ZigBee приведены ниже

# Характеристики технологии ZigBee

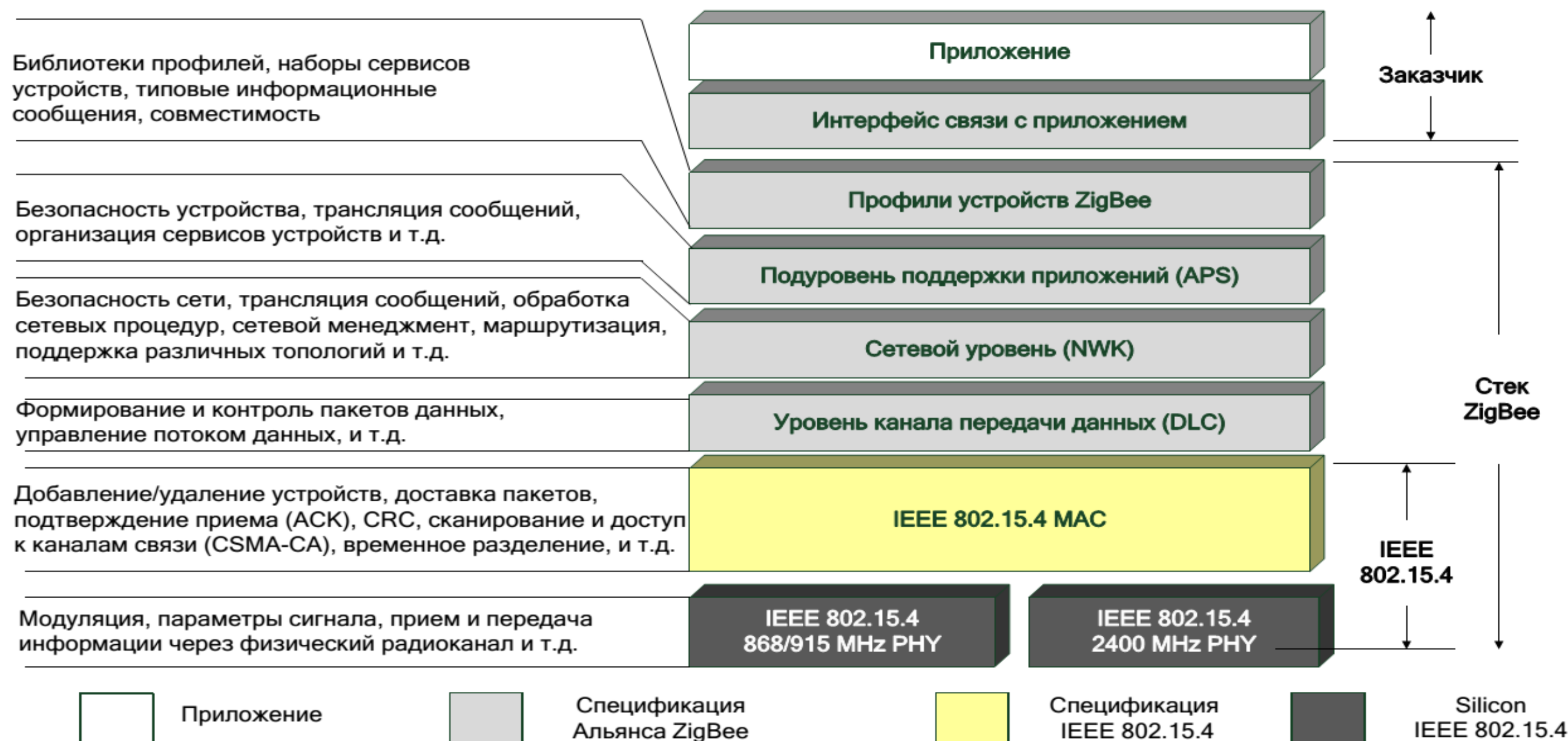
Параметр	Значение
Частотный диапазон, МГц	868/915/2400
Битовая скорость, кбит/с	20/40/250
Тип модуляции сигнала	BPSK/BPSK/O-QPSK
Метод расширения спектра	DSSS
Чувствительность приемника, дБм	-92 или лучше для 868/915 МГц; -85 или лучше для 2400 МГц
Выходная мощность передатчика, дБм	-32...0
Размер данных пакета, байт	До 127
Адресация	16- и 64-бит MAC, 16-бит идентификатор сети
Типовые требования к реализации стека протоколов	45...128 кбайт ПЗУ; 2,7...12 кбайт ОЗУ

# Конфигурация стеков протоколов 802.15.4 и ZigBee

ZigBee базируется на стандарте IEEE Std 802.15.4, который описывает только физический уровень и уровень доступа к среде MAC для беспроводных сетей передачи данных с низким энергопотреблением. Стандарт ZigBee включает описание сетевых процессов управления, совместимости и профилей устройств, а также информационной безопасности.

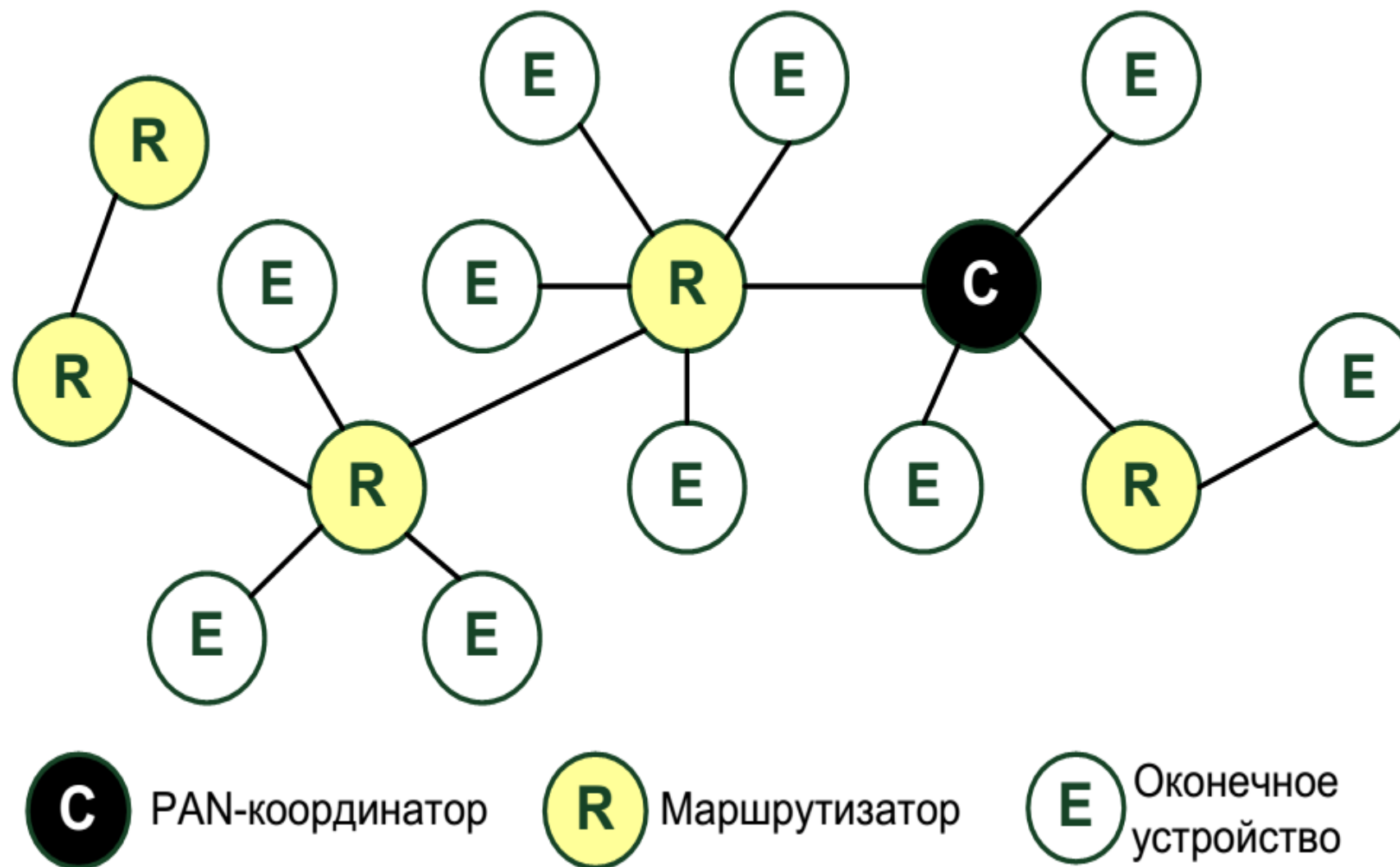
На сетевом уровне в ZigBee определены механизмы маршрутизации и формирования логической топологии сети.

# Конфигурация стеков протоколов 802.15.4 и ZigBee





# Типовая топология сети ZigBee



Таким образом, стандарт ZigBee поддерживает сеть с кластерной архитектурой, сформированной из обычных узлов, объединённых в кластеры посредством маршрутизаторов. Маршрутизаторы кластеров запрашивают сенсорные данные от устройств и, ретранслируя их друг другу, передают координатору, который обычно имеет связь с внешней IP-сетью, куда и отправляет информацию для накопления и окончательной обработки.

Сеть ZigBee является самоорганизующейся, то есть все узлы способны самостоятельно определять и корректировать маршруты доставки данных. Данные передаются с помощью радиопередатчиков от одних узлов к другим по цепочке, и в итоге ближайшие к шлюзу узлы сбрасывают всю аккумулярованную информацию на шлюз. Эта информация включает данные, считываемые с сенсорных датчиков, а также данные о состоянии устройств и результатах процесса передачи информации. В случае выхода части устройств из строя, работа сенсорной сети после реконфигурации должна продолжиться. Беспроводные узлы функционируют под управлением специального приложения. Обычно все узлы сенсорной сети используют одну и ту же управляющую программу, обеспечивающую их функциональность и выполнение сетевых протоколов.

# Стандарт 6LoWPAN

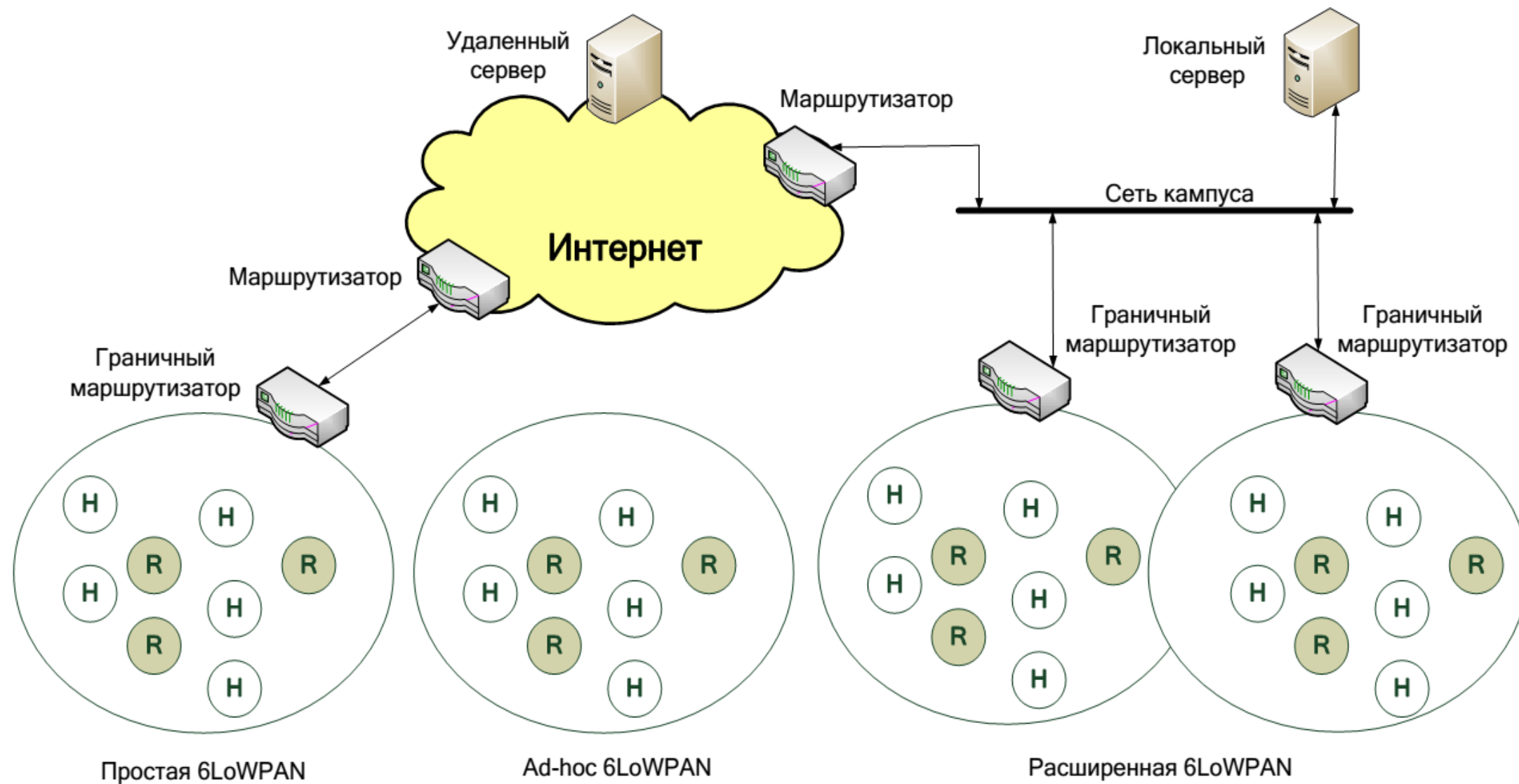
6LoWPAN (IPv6 Low-Power Wireless Personal Area Network) – стандарт, обеспечивающий взаимодействие малых беспроводных сетей с сетями IP по протоколу IPv6 с малым энергопотреблением. Стандарт разработан группой IETF и описан в RFC 4944 и RFC 4919. Технология используется в основном для организации сетей датчиков и автоматизации жилого и офисного помещения с возможностью управления через интернет, однако может использоваться и автономно для реализации простых беспроводных сетей датчиков. Передача данных в стандарте 6LoWPAN подразумевает использование субгигагерцового диапазона и обеспечивает скорость передачи от 50 до 200 Кбит/с на расстояние до 800 метров.

Архитектура сетей 6LoWPAN несколько отличается от традиционных архитектур IP-сетей (наличие специализированного коммутационного оборудования, маршрутизаторов, медиа-конверторов) и от сложившихся архитектур беспроводных сетей сбора данных. Ближе всего к ней находится архитектура WiFi-сетей, хотя и от нее есть ряд отличий.

# Стандарт 6LoWPAN

Прежде всего, сети 6LoWPAN являются подсетями IPv6-сетей, т.е. они могут взаимодействовать с другими сетями и узлами IP-сети, но не являются транзитными для ее сетевого трафика. Сети 6LoWPAN состоят из узлов, которые могут также исполнять роль маршрутизаторов (host и router), кроме этого в сети может присутствовать один или более так называемых граничных маршрутизаторов (edge routers). Участие в маршрутизации не является обязательным требованием для узла сети и он может играть роль, аналогичную роли конечного устройства в сетях ZigBee или устройства с ограниченной функциональностью для сетей 802.15.4, в терминологии 6LoWPAN – «хост-узел» H (host). Узел, способный выполнять маршрутизацию в пределах сети 6LoWPAN, называется роутером или маршрутизатором R (router). Граничный маршрутизатор отвечает за взаимодействие подсети 6LoWPAN с сетью IPv6, участвует в процедуре инициализации и маршрутизации в подсети 6LoWPAN, осуществляет компрессию/декомпрессию заголовков IPv6 при обмене с внешней сетью, в случае подключения к сети IPv4 может играть роль шлюза IPv6↔IPv4. Узлы подсети разделяют 64-битный префикс IPv6, который также является частью сетевого адреса граничного маршрутизатора. Для адресации внутри сети можно пользоваться оставшимися 64 битами (MAC-адрес сетевого интерфейса) или использовать сжатие адреса и укороченную 16-битную схему адресации (младшие два байта MAC-адреса). Предполагается, что сетевой адрес напрямую включает адрес сетевого интерфейса, это исключает необходимость применения протокола определения сетевых адресов ARP (Address Resolution Protocol).

# Стандарт 6LoWPAN





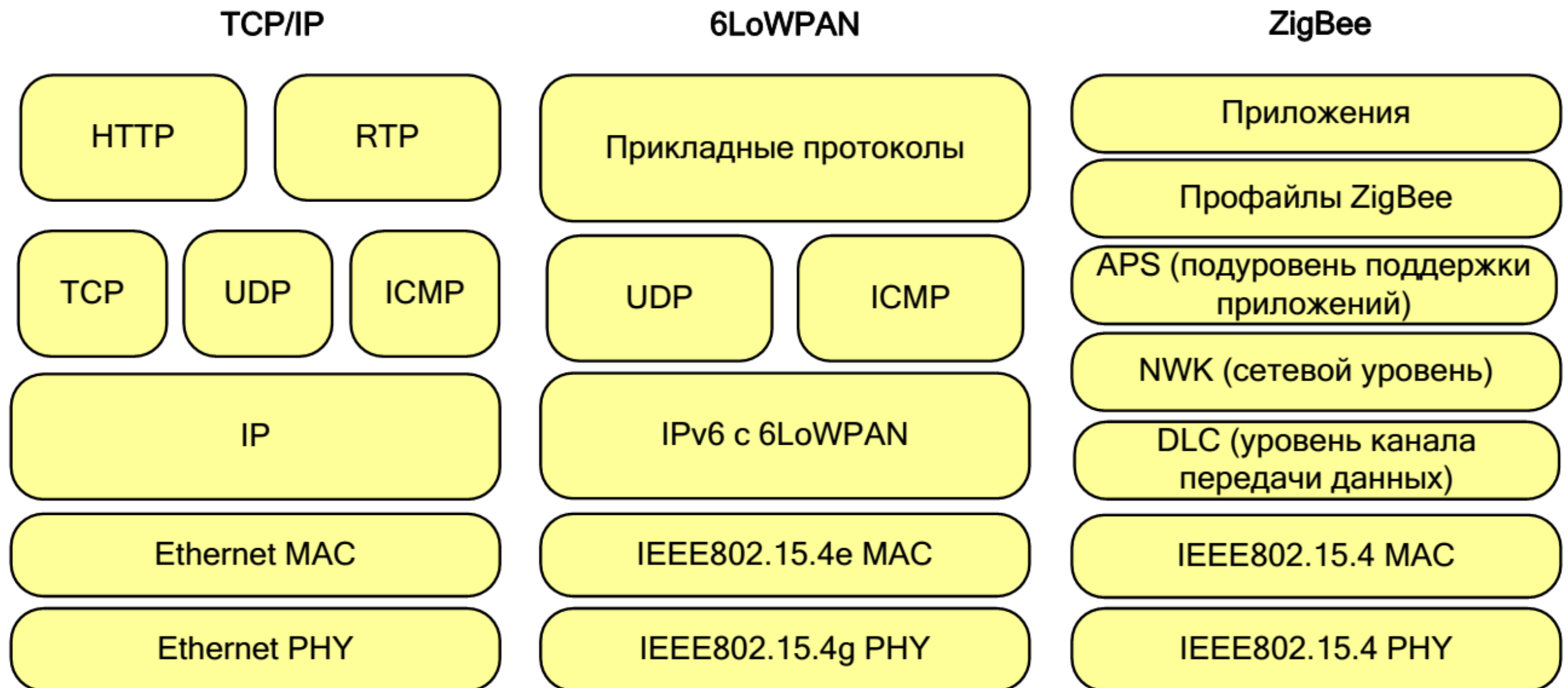
# Стандарт 6LoWPAN

Ad-hoc-сеть не имеет подключения к внешней IP-сети, не имеет граничного маршрутизатора. Является самоорганизующейся сетью, использующей стек протоколов 6LoWPAN для организации работы и передачи данных между узлами.

Простая 6LoWPAN-сеть подключена к другой IP-сети при помощи одного граничного маршрутизатора. Граничный маршрутизатор может быть подключен к внешней IP-сети напрямую (подключение типа «точка-точка», например, GPRS/3G-модем) или может входить в состав кампусной сети (например, сети организации).

Расширенная 6LoWPAN-сеть состоит из одной или нескольких подсетей, подключенных к внешней IP-сети через несколько граничных маршрутизаторов, подключенных к одной сети (например, локальная сеть организации). При этом граничные маршрутизаторы в расширенной сети разделяют один и тот же сетевой префикс. Узлы расширенной сети могут свободно перемещаться в пределах сети и осуществлять обмен с внешней сетью через любой граничный маршрутизатор (обычно выбирается маршрут с наилучшими показателями качества сигнала – уровень ошибок, уровень сигнала)

# Стандарт 6LoWPAN



# Стандарт 6LoWPAN

Основные области применения стандарта 6LoWPAN:

интеллектуальные системы учета;

управление уличным освещением;

промышленная автоматика;

логистические системы, отслеживание товаров или объектов инвентаризации;

коммерческие охранные системы, системы контроля и управления доступом;

некоторые военные приложения.

Некоторые области применений 6LoWPAN перекликаются с рядом стандартов ZigBee, однако в данном случае конкуренция отсутствует, скорее – взаимодействие и дополнение друг друга, особенно в плане интеграции сервисов, расширения зон действия сети.

# Характеристики технологии 6LoWPAN

Параметр	Значение
Адресация	16- и 64-бит MAC, 128-бит адрес IPv6
Требования к реализации стека протоколов	~24 кбайт ПЗУ; ~3,6 кбайт ОЗУ

# Сравнение стеков протоколов OSI, TCP/IP и HART

## OSI

Прикладной уровень
Уровень представления
Сеансовый уровень
Транспортный уровень
Сетевой уровень
Канальный уровень
Физический уровень

## TCP/IP

Прикладной уровень
TCP
IP
Доступ к сети

## HART

Командно-ориентированный. Предопределенные типы данных и действий приложений	
Авто-сегментированная передача больших объемов данных. Надежный транспорт	
Побайтно, маркер, протокол ведущий / ведомый	Пути с резервированием. Ячеистая сеть
Аналоговая и цифровая сигнализация 4-20 мА	TDMA, быстрая смена каналов
	IEEE 802.15.4
	IEEE 802.15.4 (2,4 GHz)
Проводной доступ (FSK/PSK/RS485)	Беспроводной доступ 2.4 Гц

# Стандарты WirelessHART и ISA100.11a

Стандарты промышленных беспроводных сетей WirelessHART (IEC 62591) и ISA100.11a, как и рассмотренные ранее технологии ZigBee и 6LoWPAN, являются надстройками над физическим уровнем стандарта IEEE 802.15.4. Оба стандарта имеют общий принцип работы и конкурируют между собой. Конвергенцию WirelessHART и ISA100.11a планировалось осуществить в едином стандарте ISA100.12, однако после пяти лет работы в конце 2012 года работа над новым стандартом в рамках Международной ассоциации автоматизации (ISA) была прекращена, так как не удалось решить вопрос о совместимости этих стандартов для беспроводных сетей промышленной автоматизации.

WirelessHART – протокол передачи данных по беспроводной линии связи, разработанный фондом HART Communication Foundation для передачи данных в виде HART-сообщений в беспроводной среде. Исходный протокол обмена данными HART в проводных сетях был предназначен для взаимодействия с полевыми датчиками на основе расширяемого набора простых команд «запрос-ответ», передаваемых в цифровом виде по двухпроводной линии с током 4-20 мА (рис. 5.8). Его беспроводный вариант WirelessHART обеспечивает передачу данных со скоростью до 250 кбит/с на расстояние до 200 м (в пределах прямой видимости) при частоте передачи данных в диапазоне 2.4 ГГц. WirelessHART одобрен международной электротехнической комиссией (МЭК) в качестве первого международного стандарта беспроводной связи промышленной автоматизации под номером IEC 62591.



# Архитектура сети WirelessHART

