

Terminology for Constrained-Node Networks

Терминология для сетей с ограниченными узлами

Аннотация

Расширяется применение стека протоколов Internet в мелких устройствах с некоторыми ограничениями по питанию, памяти и ресурсам обработки, образующих сети устройств с ограничениями (constrained-node network). Этот документ определяет множество базовых терминов, полезных для работ по стандартизации сетей из узлов с ограничениями.

Статус документа

Документ не относится к категории Internet Standards Track и публикуется лишь для информации.

Документ является результатом работы IETF¹ и представляет согласованный взгляд сообщества IETF. Документ прошёл открытое обсуждение и был одобрен для публикации IESG². Не все одобренные IESG документы являются кандидатами в Internet Standard, см раздел 2 RFC 5741.

Информацию о текущем статусе документа, ошибках и способах обратной связи можно найти по ссылке <http://www.rfc-editor.org/info/rfc7228>.

Авторские права

Авторские права (Copyright (c) 2014) принадлежат IETF Trust и лицам, указанным в качестве авторов документа. Все права защищены.

К документу применимы права и ограничения, указанные в BCP 78 и IETF Trust Legal Provisions и относящиеся к документам IETF (<http://trustee.ietf.org/license-info>), на момент публикации данного документа. Прочтите упомянутые документы внимательно. Фрагменты программного кода, включённые в этот документ, распространяются в соответствии с упрощённой лицензией BSD, как указано в параграфе 4.e документа IETF Trust Legal Provisions, без каких-либо гарантий (как указано в Simplified BSD License).

Оглавление

1. Введение.....	1
2. Базовые термины.....	2
2.1. Узлы с ограничениями.....	2
2.2. Сети с ограничениями.....	2
2.2.1. Сети с проблемами.....	3
2.3. Сети узлов с ограничениями.....	3
2.3.1. LLN.....	3
2.3.2. LoWPAN, 6LoWPAN.....	3
3. Классы узлов с ограничениями.....	4
4. Термины в части питания.....	4
4.1. Свойства расширяемости.....	4
4.2. Классы ограничения энергии.....	4
4.3. Стратегия использования питания для коммуникаций.....	5
5. Вопросы безопасности.....	5
6. Благодарности.....	5
7. Нормативные документы.....	5

1. Введение

Мелкие устройства с ограниченными ресурсами CPU, памяти и питания, называемые устройствами с ограничениями (constrained devices), часто применяемые в качестве датчиков и приводов, «умных» (smart) объектов или устройств, могут образовывать сети, становясь в них узлами с ограничениями. Такие сети сами по себе могут иметь ограничения, например, ненадёжные каналы с потерями, ограниченной и непредсказуемой пропускной способностью, быстро меняющейся топологией.

Устройства с ограничениями могут отвечать за сбор данных в различных системах, включая природные экосистемы, здания и фабрики, и передачу сведений одному или нескольким серверам. Такие устройства могут работать в условиях жёсткого ограничения ресурсов, таких как батареи или источники питания, памяти, пропускная способность беспроводной сети и возможности связи. Эти ограничения часто усугубляют друг друга. Другие объекты сети, например, базовые станции или серверы управления, могут иметь достаточно вычислительных и коммуникационных ресурсов для поддержки взаимодействия устройств с ограничениями и приложений в традиционных сетях.

¹Internet Engineering Task Force - комиссия по решению инженерных задач Internet.

²Internet Engineering Steering Group - комиссия по инженерным разработкам Internet.

Сегодня к сетям подключаются устройства с разными ограничениями ресурсов и возможностей. Персональные мобильные гаджеты, устройства автоматизации зданий, сотовые телефоны, устройства межмашинного обмена (machine-to-machine или M2M) и другие устройства выигрывают от взаимодействия с другими «вещами» поблизости или в Internet. При этом Internet вещей (Internet of Things или IoT) становится реальностью, включающей однозначно идентифицируемые и адресуемые объекты (вещи). В следующем десятилетии число подключённых к Internet объектов с ограниченными возможностями может существенно вырасти [FIFTY-BILLION], увеличивая размер и охват Internet.

В этом документе приведены определения базовых терминов, полезных при работе по стандартизации сред с ограничениями. Намерение заключается не в полном охвате области, а обеспечении согласованного применения базовых терминов разными группами, работающими в этом пространстве.

В этом документе термин «байт» (byte) используется в обычном смысле как синоним октета (битов). При указании размеров полупроводниковой памяти применяется префикс kibi (1024), например, kibibyte, обычно с сокращением до KiB (1024 байта) [ISQ-13].

В вычислительной технике термин power часто обозначает вычислительную мощность (computing power) или мощность обработки (processing power) как производительность CPU. В этом документе термин относится к электрической мощности (питание), если явно не указано иное. Термин «сетевое питание» (Mains-powered) служит для сокращённого обозначения подключения к стабильной сети электропитания.

2. Базовые термины

Имеется два важных аспекта расширяемости для IoT:

- расширяемость технологий Internet для большого числа [FIFTY-BILLION] недорогих устройств
- при одновременном сокращении возможностей (характеристик) каждого такого узла и построении сетей из них, чтобы сделать это расширение недорогим и физически осмысленным.

Необходимость упрощения узлов (scaling down) ведёт к узлам с ограничениями.

2.1. Узлы с ограничениями

Термин «узел с ограничениями» (constrained node) лучше всего определять путём сопоставления характеристик узла с некоторыми широко распространёнными ожиданиями для более знакомых узлов Internet.

Constrained Node - узел с ограничениями

Узел, в котором на момент написания недостижимы некоторые характеристики, которые считаются само собой разумеющимися для узлов Internet, например из-за ценовых или физических ограничений, таких как размер, масса, доступное электропитание. Жёсткие ограничения по питанию, памяти и ресурсам обработки ведут к жёстким верхним ограничениям состояний, пространства кода и циклов обработки, делая оптимизацию потребляемой мощности и пропускной способности через сеть доминирующими требованиями при разработке. Кроме того, могут отсутствовать некоторые службы уровня 2, такие как полная связность, поддержка групповой и широковещательной адресации.

Хотя это определение не является строгим, оно основано на современном уровне и чётко отделяет узлы с ограничениями от серверных систем, настольных и переносных компьютеров, мощных мобильных устройств, таких как смартфоны и т. п. Может быть много конструктивных соображений, ведущих к таким ограничениям, включая стоимость, размер, массу и другие факторы расширяемости.

Другим термином, когда свойства сетевого узла не находятся в центре внимания, является constrained device - устройство с ограничениями.

Имеется несколько аспектов ограничений для узлов, которые часто возникают в комбинации, например,:

- ограничение максимальной сложности кода (ROM/Flash);
- ограничения размера состояний и буферов (RAM);
- ограничение объёма вычислений за единицу времени (вычислительная мощность - processing power);
- ограничения по питанию;
- ограничения для пользовательского интерфейса и доступности при развёртывании (возможность устанавливать ключи, обновлять программы и т. п.).

В разделе 3 определено несколько классов (класс-N для $N = 0, 1, 2$) узлов с ограничениями, ориентированных на комбинации первых двух ограничений. В части доступного питания [RFC6606] различает энергоёмкие (power-affluent - питание от сети или регулярная зарядка) узлы от узлов с ограничением по питанию (power-constrained node), которые работают от батареи или устройства сбора энергии. Более подробно связанные с питанием термины рассмотрены в разделе 4.

Применение узлов с ограничениями в сетях часто задаёт ограничения для самих сетей. Однако в сетях могут быть свои ограничения, не зависящие от ограничений узлов. Поэтому здесь различаются сети с ограничениями (constrained network) и сети узлов с ограничениями (constrained-node network).

2.2. Сети с ограничениями

Аналогичным способом определяется сеть с ограничениями (constrained network).

Constrained Network - сеть с ограничениями

Сеть, в которой на момент написания недостижимы некоторые характеристики, которые считаются само собой разумеющимися в Internet.

Ограничения могут включать:

- низкую скорость, пропускную способность (включая ограничения на рабочие циклы);

- значительные потери пакетов и большая вариативность числа потерь (скорость доставки);
- сильная асимметрия характеристик каналов;
- серьёзные издержки при использовании больших пакетов (например, большие потери в результате фрагментации на канальном уровне);
- ограничение доступности по времени (значительное число устройств может отключаться в любой момент, время от времени «просыпаться» для кратковременного обмена данными);
- отсутствие (или серьёзные ограничения) расширенных услуг, таких как групповая передача IP (multicast).

В более общем смысле о сетях с ограничениями, когда хотя бы часть узлов сети имеет ограничения. Причины ограничений может быть несколько:

- ценовые ограничения;
- ограничения, вносимые узлами (сеть с ограничениями узлов);
- физические ограничения (например, потребляемая мощность, ограничения окружающей среды, ограничения среды, такие как работа под водой, ограниченный спектр для очень высокой плотности, электромагнитная совместимость);
- нормативные ограничения, такие как доступность частот (включая ограничения на эффективную мощность излучения и рабочие циклы) и взрывобезопасность;
- технологические ограничения, такие как устаревшие и низкоскоростные технологии, которые все ещё работают, и могут сохраняться ещё в течение некоторого времени.

2.2.1. Сети с проблемами

Сети с ограничениями не обязательно являются сетями с проблемами (challenged network) [FALL].

Challenged Network - сеть с проблемами

Сеть, в которой есть серьёзные проблемы с поддержкой ожиданий приложений в части сквозной модели IP:

- невозможно организовать сквозные соединения IP;
- серьёзные прерывания сквозной связности IP;
- задержки, превышающие максимальный срок существования сегментов (Maximum Segment Lifetime или MSL), заданный для TCP [RFC0793].

Все сети с проблемами являются в некотором смысле сетями с ограничениями, но все сети с ограничениями имеют проблемы. Чёткой границы здесь нет. Были разработаны устойчивые к задержкам сети (Delay-Tolerant Networking или DTN) для работы с проблемными сетями [RFC4838].

2.3. Сети узлов с ограничениями

Constrained-Node Network - сеть узлов с ограничениями

Сеть, на характеристики которой указывают существенное влияние узлы с ограничениями.

Сеть узлов с ограничениями всегда является сетью с ограничениями, из-за ограничений, вносимых узлами с ограничениями, но у неё могут быть и свои ограничения.

В оставшейся части параграфа вводятся два дополнительных термина, которые активно используются в сфере сетей узлов с ограничениями, без намерения определить эти термины - LLN и (6)LoWPAN.

2.3.1. LLN

Термин, использовавшийся для описания сферы деятельности рабочей группы IETF ROLL (Low-Power and Lossy Network или LLN). Документ по терминологии ROLL (Routing Over Low-Power and Lossy) [RFC7102] определяет LLN.

LLN (Low-Power and Lossy Network) - сеть с недостаточным питанием и потерями

Обычно состоит из множества встраиваемых устройств с ограниченным питанием, памятью и ресурсами обработки, соединённых различными каналами, такими как IEEE 802.15.4 или Wi-Fi со слабым питанием. Существует широкая сфера применения LLN, включая промышленный мониторинг, автоматизацию зданий (обогрев, вентиляция и кондиционирование - HVAC, освещение, контроль доступа, противопожарная безопасность), подключение домов, здравоохранение, мониторинг окружающей среды, сети городских датчиков, управления энергией, отслеживание активов, охлаждение.

Кроме того, для LLN часто характерны значительные потери на физическом уровне с большой вариативностью скорости доставки и краткосрочной ненадёжностью в сочетании со среднесрочной стабильностью, что делает целесообразным построение направленных ациклических графов со среднесрочной стабильностью для маршрутизации и измерений на границах, таких как ожидаемое число передач (Expected Transmission Count или ETX) [RFC6551]. Не все LLN содержат узлы со слабым питанием [RPL-DEPLOYMENT].

LLN обычно состоят из узлов с ограничениями, это ведёт к разработке режимов работы, таких как non-storing (без сохранения), определённый в RPL [RFC6550]. Поэтому в данном документе LLN означает сеть узлов с ограничениями с определёнными характеристиками, которые включают и ограничения самой сети.

2.3.2. LoWPAN, 6LoWPAN

Интересным случаем сетей с ограничениями, часто применяемым для узлов с ограничениями, являются сети LoWPAN [RFC4919], названные по имени рабочей группы IEEE 802.15.4 LR-WPAN. Расшифровка акронима LoWPAN (Low-Power Wireless Personal Area Network) - низкоскоростные персональные беспроводные сети - содержит малопонятное слово Personal, связанное скорее с историей именования групп IEEE 802, нежели со сферой применения LoWPAN. Фактически эти сети были предложены для городского мониторинга и промышленного контроля и слово Personal можно считать просто пережитком. Иногда термин сокращают до Low-Power Wireless Area Network [WEI] (беспроводная сеть со слабым питанием). Первоначально связанный с IEEE 802.15.4, термином LoWPAN (6LoWPAN для случая IPv6) обозначают также сети с похожими технологиями канального уровня [V6-BTLE] [V6-DECT-ULE] [V6-G9959].

3. Классы узлов с ограничениями

Несмотря на огромное разнообразие подключённых к Internet устройств, может указываться полезной краткая классификация устройств с ограничениями. Этот документ предлагает 3 класса (Таблица 1), примерно оценивающих возможности устройств.

Таблица 1. Классы устройств с ограничениями (KiB = 1024 байта).

Имя	Размер данных (например, RAM)	Размер кода (например, Flash)
Класс 0, C0	<< 10 KiB	<< 100 KiB
Класс 1, C1	~ 10 KiB	~ 100 KiB
Класс 2, C2	~ 50 KiB	~ 250 KiB

На момент создания документа эти характеристики соответствовали разным кластерам коммерчески доступных микросхем и разработок ядра устройств с ограничениями. Хотя ожидается, что границы этих классов будут меняться со временем, закон Мура, обычно менее эффективен для встраиваемых устройств, чем для ПК. Преимущества за счёт роста числа и плотности транзисторов с большей вероятностью будут инвестироваться в сокращение цены и энергопотребления, нежели в постоянный рост вычислительной мощности.

К классу 0 относятся очень ограниченные устройства, такие как датчики. У них обычно нет ресурсов, требуемых для безопасного прямого взаимодействия с Internet (несмотря на редкие героические попытки сделать это). Устройства класса 0 участвуют в коммуникациях Internet через более крупные устройства-посредники, такие как роутеры, шлюзы и серверы. Обычно для таких устройств недоступны традиционные средства защиты и управления. Скорей всего они будут настраиваться заранее (и настройка меняется редко или не меняется) с очень небольшим набором данных. Для управления они могут отвечать на сигналы keepalive и передавать базовые сведения о состоянии.

Устройства класса 1 очень ограничены в части пространства кода и возможностей обработки и им сложно взаимодействовать с другими устройствами Internet, реализующими полный стек протоколов, такими как HTTP, TLS (Transport Layer Security), протоколы защиты и представление данных на основе XML. Однако они могут использовать специализированные для устройств с ограничениями стеки протоколов, такие как CoAP (Constrained Application Protocol) на основе UDP [COAP], и участвовать в осмысленном обмене без помощи шлюзов. В частности, они могут поддерживать функции защиты, требуемые в больших сетях. Такие устройства могут интегрироваться в сети IP как партнёры, но должны экономно расходовать память, пространство кода и экономить энергию при работе приложений.

Устройства класса 2 не так ограничены и обычно способны поддерживать большинство протокольных стеков, применяемых в ноутбуках и серверах. Однако для таких устройств важны облегчённые и энергоэффективные протоколы, а также малый расход пропускной способности. Кроме того, снижение объёма ресурсов для работы в сети оставляет больше ресурсов для приложений. Таким образом, применение специализированных стеков на устройствах класса 2 может снизить стоимость развёртывания и повысить уровень совместимости.

Имеются устройства с ограничениями, возможности которых выходят за пределы класса 2. Они не так требовательны к разработке стандартов, поскольку обычно могут применять имеющиеся протоколы. Поэтому документ не рассматривает такие устройства отдельно. Однако они могут быть ограничены по части доступного электропитания.

В части изучения возможностей устройств с ограничениями, особенно класса 1, важно понять, какого типа приложения могут работать на них и какие протокольные механизмы подойдут. Из-за малой памяти и других ограничений конкретное устройство класса 1 может поддерживать лишь несколько функций, отобранных для работы. Иными словами, набор поддерживаемых функций не является статическим для типа устройства и может меняться между устройствами. Хотя устройства класса 2 имеют дополнительные функциональные возможности, для них также нужна оценка с точки зрения поддерживаемых приложений и протокольных функций. Для определения требований нужно оценить варианты применения и вовлечённость устройств в приложение, а также режим работы. Варианты применения могут сочетать устройства с ограничениями разных классов, а также традиционные узлы Internet.

4. Термины в части питания

Устройства различаются не только по вычислительным возможностям, но и по питанию. Здесь сложнее разбить устройства на классы, но базовая терминология все равно будет полезна.

4.1. Свойства расширяемости

Питание (энергия), доступное устройству, может сильно различаться (от микроватт до киловатт, от микроджоулей, до практически неограниченной энергии). Вместо задания классов или кластеров предлагается просто использовать единицы международной системы СИ (International System of Units - SI units) в качестве приближения (Таблица 2)

Таблица 2. Параметры, связанные с мощностью и энергией.

Имя	Определение	SI Unit
Ps	Средняя мощность в установившемся состоянии, доступная для работы устройства	Вт (W, Watt)
Et	Общая электрическая энергия, которую способен обеспечить источник питания	Дж (J, Joule)

Значение Et может интерпретироваться в сочетании с периодом времени (см. параграф 4.2).

Некоторые устройства переходят в режим экономии (low-power) до исчерпания доступной энергии и даже применять несколько таких режимов. Для таких устройств значение Ps нужно указывать в каждом из поддерживаемых режимов.

4.2. Классы ограничения энергии

Как отмечено выше, некоторые устройства ограничены по доступной энергии, в отличие (или в дополнение) от ограничения по мощности. При отсутствии соответствующих ограничений по энергии устройство классифицируется как E9. Ограничиваться может общая энергия, доступная в течение срока действия устройства (например, для устройств с незаменяемыми батареями), эти устройства относят к классу E2. Если ограничение устанавливается для некоторого интервала времени, устройство относится к классу E1, например с солнечной батареей ограничено энергией, доступной ночью, устройство с подзарядкой ограничено интервалами между зарядкой, батарейное устройство ограничено сроком работы батареи. Может быть также ограничена энергия, доступная для заданного события, например, нажатия кнопки в энергосберегающем выключателе света, это устройства класса E0. Отметим, что в этом смысле многие устройства E1 относятся также к классу E2, поскольку перезаряжаемая батарея имеет ограниченное число циклов заряда.

В таблице 3 дана сводка перечисленных выше устройств.

<i>Имя</i>	<i>Тип ограничения</i>	<i>Таблица 3. Классы ограничений по энергии. Пример источника питания</i>
E0	Ограничение энергии для события	Сбор энергии по событию
E1	Ограничение энергии для интервала времени	Периодическая зарядка или замена батарей
E2	Ограничение энергии для срока действия	Незаменяемая батарея питания
E9	Нет прямых количественных ограничений доступной энергии	Питание от электросети

4.3. Стратегия использования питания для коммуникаций

При беспроводной передаче радио-модуль часто является основным потребителем энергии в устройстве. Параметры устройства, такие как доступные частоты, желаемая дальность и скорость передачи, влияют на потребляемую мощность, а длительность приёма и передачи (включая возможность приёма) влияет на общее потребление энергии.

Возможна разная стратегия использования питания и подключения к сети в зависимости от источника энергии (например, батарея или сеть) и частоты, с которой устройство должно обмениваться данными. Базовые варианты стратегии показаны ниже.

Always-on - всегда включено

Этот вариант подходит при отсутствии причин для крайних мер по энергосбережению. Устройство может быть включено в нормальных условиях постоянно. Может быть полезно применять энергосберегающее оборудование или ограничивать число беспроводных передач, скорость процессора и другие параметры для общей экономии энергии и снижения потребности в охлаждении, но устройство может быть постоянно подключено к сети.

Normally-off - обычно выключено

В этом варианте устройство «спит» так долго, чтобы при его пробуждении не было смысла считать, что во время сна оно было подключено к сети. Устройство заново подключается при пробуждении. Основная цель оптимизации заключается в минимизации усилий в процессе повторного подключения и соответствующих коммуникаций приложения. Если устройство «спит» достаточно долго и пробуждается нечасто, дополнительный расход энергии при повторном подключении может быть приемлемым.

Low-power - режим экономии

Эта стратегия больше всего подходит для устройств, которые должны работать при очень малом потреблении энергии, сохраняя способность достаточно частых взаимодействий по сети. Это предполагает применение энергосберегающих аппаратных решений, выбора механизмов канального уровня и т. п. Обычно с учётом коротких интервалов между передачами, несмотря на «сон» устройство сохраняет подключение к сети. Методы снижения энергопотребления для сетевых коммуникаций включают минимизацию действий при восстановлении подключения после пробуждения и настройку частоты коммуникаций (включая «рабочий цикл», в котором компоненты включаются и выключаются на регулярной основе) и других параметров.

В таблице 4 приведена сводка описанных выше стратегий.

Таблица 4. Стратегии использования питания для коммуникаций.

<i>Имя</i>	<i>Стратегия</i>	<i>Способность к взаимодействию</i>
P0	Обычно выключено	Повторное подключение при необходимости
P1	Энергосбережение	Представляется подключённым, возможно с задержкой
P9	Всегда включено	Всегда подключено

Приведённое выше обсуждение относится к уровню устройства и похожие соображения применимы на уровне коммуникационного интерфейса (для него данный документ терминологию не задаёт).

При описании подходов к энергосбережению часто применяется термин «рабочий цикл» (duty-cycling), он описывает все формы периодического отключения некоторых функций, оставляя их включёнными лишь на некоторое время (duty cycle).

В [RFC7102] различаются лишь 2 уровня, определяющие неспящий узел (Non-Sleepy Node) как узел, всегда сохраняющий полное питание (всегда активен), когда имеется возможность коммуникаций (P9), а засыпающий узел (Sleepy Node) как узел, иногда переходящий в режим сна (снижение потребления энергии в целях экономии) и отключающий протокольные коммуникации (P0). Явного упоминания P1 в документе нет.

5. Вопросы безопасности

Документ вводит базовую терминологию, не создавая новых проблем безопасности. Вопросы безопасности, связанные с рассматриваемыми в документе ограничениями, должны обсуждаться в контексте конкретных протоколов. Например, в параграфе 11.6 [COAP] рассматривается влияние конкретного ограничения на развёртывание механизмов защиты. В [ROLL-SEC-THREATS] приведён анализ угроз безопасности для протокола маршрутизации RPL. Вопросы реализации протоколов защиты на узлах с ограничениями рассмотрены в [IKEV2-MINIMAL] и [TLS-MINIMAL]. Общие соображения безопасности сетей из узлов с ограничениями представлены в [IOT-SECURITY].

6. Благодарности

Dominique Barthel и Peter van der Stok предоставили полезные замечания, Charles Palmer - редакторскую рецензию. Peter van der Stok настоял на включение терминов, связанных с питанием (раздел 4). Текст параграфа 4.3 в основном взят из предыдущей версии [COAP-CELLULAR] и адаптирован для этого документа.

7. Нормативные документы

[COAP] Shelby, Z., Hartke, K., and C. Bormann, "Constrained Application Protocol (CoAP)", Work in Progress¹, June 2013.

[COAP-CELLULAR] Arkko, J., Eriksson, A., and A. Keranen, "Building Power-Efficient CoAP Devices for Cellular Networks", Work in Progress², February 2014.

¹Опубликовано в RFC 7252. Прим. перев.

²Опубликовано в RFC 9178. Прим. перев.

[FALL]	Fall, K., "A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets", SIGCOMM 2003, 2003.
[FIFTY-BILLION]	Ericsson, "More Than 50 Billion Connected Devices", Ericsson White Paper 284 23-3149 Uen, February 2011, < http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-50-billions.pdf >.
[IKEV2-MINIMAL]	Kivinen, T., "Minimal IKEv2", Work in Progress, October 2013.
[IOT-SECURITY]	Garcia-Morchon, O., Kumar, S., Keoh, S., Hummen, R., and R. Struik, "Security Considerations in the IP-based Internet of Things", Work in Progress, September 2013.
[ISQ-13]	International Electrotechnical Commission, "International Standard -- Quantities and units -- Part 13: Information science and technology", IEC 80000-13, March 2008.
[RFC0793]	Postel, J., "Transmission Control Protocol", STD 7, RFC 793 , September 1981.
[RFC4838]	Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, R., Scott, K., Fall, K., and H. Weiss, "Delay-Tolerant Networking Architecture", RFC 4838, April 2007.
[RFC4919]	Kushalnagar, N., Montenegro, G., and C. Schumacher, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals", RFC 4919, August 2007.
[RFC6550]	Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, JP., and R. Alexander, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks", RFC 6550 , March 2012.
[RFC6551]	Vasseur, JP., Kim, M., Pister, K., Dejean, N., and D. Barthel, "Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks", RFC 6551 , March 2012.
[RFC6606]	Kim, E., Kaspar, D., Gomez, C., and C. Bormann, "Problem Statement and Requirements for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Routing", RFC 6606, May 2012.
[RFC7102]	Vasseur, JP., "Terms Used in Routing for Low-Power and Lossy Networks", RFC 7102, January 2014.
[ROLL-SEC-THREATS]	Tsao, T., Alexander, R., Dohler, M., Daza, V., Lozano, A., and M. Richardson, "A Security Threat Analysis for Routing Protocol for Low-power and lossy networks (RPL)", Work in Progress ¹ , December 2013.
[RPL-DEPLOYMENT]	Vasseur, J., Ed., Hui, J., Ed., Dasgupta, S., and G. Yoon, "RPL deployment experience in large scale networks", Work in Progress, July 2012.
[TLS-MINIMAL]	Kumar, S., Keoh, S., and H. Tschofenig, "A Hitchhiker's Guide to the (Datagram) Transport Layer Security Protocol for Smart Objects and Constrained Node Networks", Work in Progress, March 2014.
[V6-BTLE]	Nieminen, J., Ed., Savolainen, T., Ed., Isomaki, M., Patil, B., Shelby, Z., and C. Gomez, "Transmission of IPv6 Packets over BLUETOOTH Low Energy", Work in Progress ² , May 2014.
[V6-DECT-ULE]	Mariager, P., Ed., Petersen, J., and Z. Shelby, "Transmission of IPv6 Packets over DECT Ultra Low Energy", Work in Progress ³ , July 2013.
[V6-G9959]	Brandt, A. and J. Buron, "Transmission of IPv6 packets over ITU-T G.9959 Networks", Work in Progress ⁴ , May 2014.
[WEI]	Shelby, Z. and C. Bormann, "6LoWPAN: the Wireless Embedded Internet", ISBN 9780470747995, 2009.

Адреса авторов

Carsten Bormann
Universitaet Bremen TZI
Postfach 330440
D-28359 Bremen
Germany
Phone: +49-421-218-63921
E-Mail: cabo@tzi.org

Mehmet Ersue
Nokia Solutions and Networks
St.-Martinstrasse 76

81541 Munich
Germany
Phone: +49 172 8432301
E-Mail: mehmet.ersue@nsn.com

Ari Keranen
Ericsson
Hirsalantie 11
02420 Jorvas
Finland
E-Mail: ari.keranen@ericsson.com

Перевод на русский язык

Николай Малых

nmalykh@protokols.ru

¹Опубликовано в RFC 7416. Прим. перев.

²Опубликовано в RFC 7668. Прим. перев.

³Опубликовано в RFC 8105. Прим. перев.

⁴Опубликовано в RFC 7428. Прим. перев.