

Безбородов Е.С.

*ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва,
Россия (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)*

Канюков А.Р.

*ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва,
Россия (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)*

Советников М.М.

*ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва,
Россия (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)*

МЕТОДИКА ПРОЕКТНОГО РАСЧЁТА БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ОБЪЕКТОВ С РЕТРАНСЛЯЦИЕЙ ДАННЫХ

Рассмотрена задача построения беспроводной сети мониторинга распределённых объектов, у которых расстояние между точкой контроля и узлом сбора данных превышает дальность прямой радиосвязи. Предложена методика сквозного проектного расчёта, включающая анализ дефицита бюджета радиолинии, сопоставление способов его устранения, выбор схемы расширения зоны покрытия и расчёт параметров сети. Методика проиллюстрирована сквозным расчётом для расстояния 7 км, характерного для удаления объектов добычи от узла связи. Показано, что увеличение мощности передатчика и коэффициента усиления антенны формально устраняют дефицит, но лишь при максимальном коэффициенте расширения спектра, что сокращает расчётный срок службы узла до 1,6–3,9 года. Ретрансляция с делением трассы на два участка даёт выигрыш 9,0 дБ и позволяет сохранить срок службы 12,4 года. Сформулированы рекомендации по параметрам сети и определены границы применимости ретрансляции.

Ключевые слова: беспроводные сети мониторинга, распределённые объекты, ретрансляция, бюджет радиолинии, интернет вещей, энергоэффективность, рабочий цикл, автономное питание.

The paper addresses the design of a wireless monitoring network for distributed facilities in which the distance between the measurement point and the data collection node exceeds the direct radio communication range. An end-to-end design calculation methodology is proposed, comprising the analysis of the link budget deficit, the comparison of the ways to eliminate it, the selection of a coverage extension scheme and the calculation of the network parameters. The methodology is illustrated by an end-to-end calculation for a distance of 7 km, typical of the separation between production facilities and a communication node. It is shown that increasing the transmitter power and the antenna gain formally eliminates the deficit, but only at the maximum spreading factor, which reduces the calculated node service life to 1.6–3.9 years. Relaying with the path divided into two hops provides a 9.0 dB gain and preserves a service life of 12.4 years. Recommendations on the network parameters are formulated and the limits of applicability of relaying are established.

Keywords: wireless monitoring networks, distributed facilities, relaying, link budget, internet of things, energy efficiency, duty cycle, battery power supply.

Введение

Распределённые производственные объекты — месторождения, линейная часть трубопроводов, объекты энергетики, водохозяйственные и горнодобывающие комплексы — характеризуются разнесением точек контроля на расстояния от сотен метров до десятков километров. Значительная их часть расположена вне зоны устойчивого сотового покрытия, а подвод кабельных линий связи и электропитания к отдельным точкам экономически неоправдан. Эти условия определяют интерес к беспроводным сетям с автономным питанием узлов, для которых основной статьёй эксплуатационных затрат становится обслуживание источников питания.

Технологии класса LPWAN обеспечивают требуемое сочетание дальности и энергоэффективности [7, 8, 10], что подтверждено результатами натурных испытаний прототипов оборудования [5, 6]. Однако такие сети строятся по топологии «звезда»: каждый оконечный узел должен обеспечивать прямую

радиосвязь со шлюзом. При типовых для распределённых объектов расстояниях это условие нарушается, причём дефицит бюджета радиолинии обнаруживается уже на стадии предпроектной проработки.

Известные работы рассматривают либо параметры радиоканала в отрыве от требований к сроку службы автономных узлов, либо алгоритмические аспекты ретрансляции без учёта энергетических и нормативных ограничений. В результате отсутствует замкнутая процедура, позволяющая от исходных требований перейти к параметрам сети и обоснованно выбрать между увеличением мощности, изменением параметров канала, ретрансляцией и размещением дополнительного шлюза.

Целью работы является разработка методики сквозного проектного расчёта беспроводной сети мониторинга распределённых объектов при дефиците бюджета радиолинии. *Объектом исследования* являются беспроводные сети мониторинга распределённых объектов. *Предметом исследования* являются способы устранения дефицита бюджета радиолинии и ограничения, определяющие их применимость при автономном питании узлов.

1. Обоснование выбора технологии передачи данных

Сопоставление технологий беспроводной передачи данных выполнено по шести критериям: дальность связи, энергоэффективность оконечного узла, автономность инфраструктуры, то есть независимость от оператора связи, помехоустойчивость, пропускная способность и пригодность к ретрансляции силами узлов сети. Оценки по пятибалльной шкале сформированы на основе технических характеристик технологий и обзорных работ [7, 8, 10, 11] и приведены на рисунке 1.

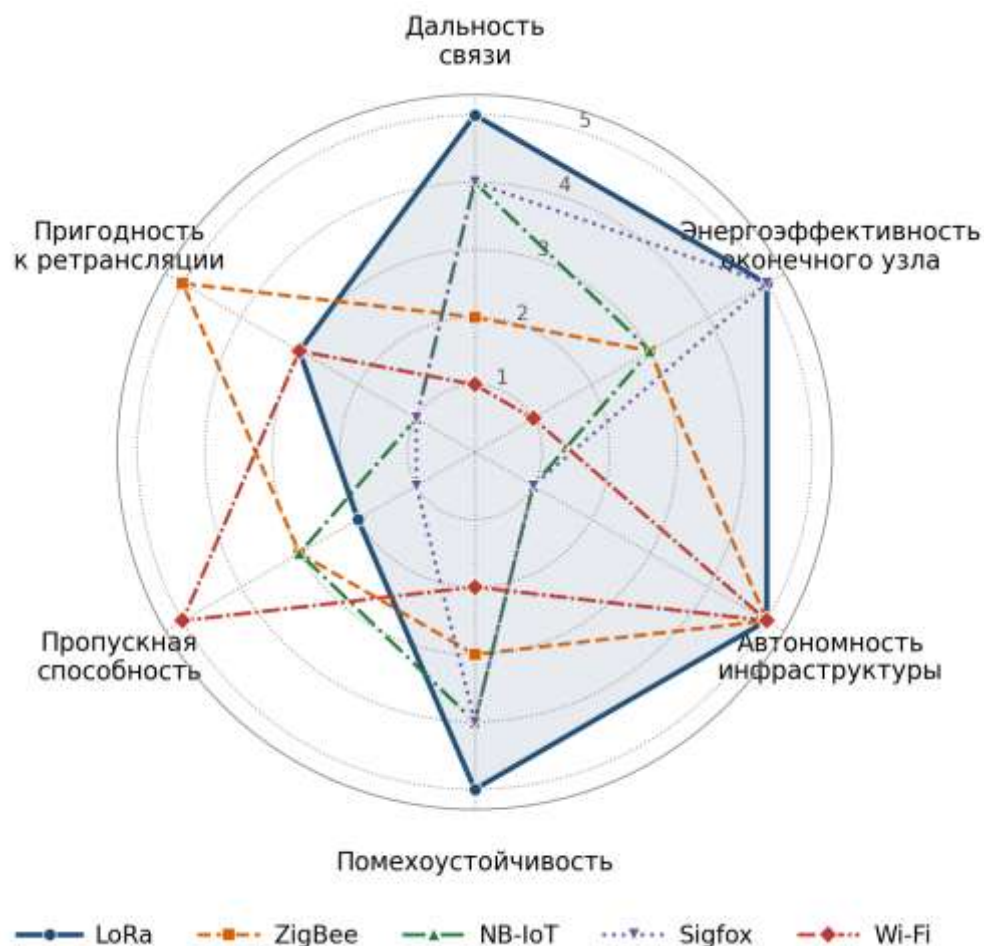


Рисунок 1 – Сравнение технологий беспроводной передачи данных по критериям, существенным для распределённых объектов

Технология LoRa превосходит альтернативы по четырём критериям из шести и уступает Wi-Fi по пропускной способности, что для телеметрического трафика несущественно. Решения на базе сотовых сетей и Sigfox проигрывают по автономности инфраструктуры, предполагая зависимость от покрытия оператора и абонентскую плату. Единственная технология, превосходящая LoRa по пригодности к ретрансляции, — ZigBee, обеспечивающая ячеистую топологию штатными средствами, но проигрывающая по дальности более чем на порядок. Таким образом, слабое место выбираемой технологии находится именно в области расширения зоны покрытия, что и определяет содержание дальнейшего расчёта.

2. Исходные данные и анализ дефицита бюджета радиолинии

В качестве исходных приняты значения, характерные для распределённых объектов: расстояние между точкой контроля и узлом сбора данных 7 км, показатель степени затухания 3,0, соответствующий пересечённой местности с частичным экранированием, размер телеграммы 12 байт, период опроса 15 минут, десять оконечных узлов, требуемый срок службы источника питания не менее 10 лет, допустимая доля потерь пакетов 5 %. Указанное расстояние соответствует типовому удалению кустовой площадки или узла линейной телемеханики от ближайшего пункта сбора данных.

Максимально допустимые потери на трассе и потери, вносимые трассой, определяются соотношениями

$$L_{\max} = P_{\text{ЭИМ}} + G_{\text{пр}} - L_{\phi} - S(SF) - M, \quad L(d) = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \lg(d/d_0) \quad (1)$$

где $P_{\text{ЭИМ}}$ — эффективная излучаемая мощность; $G_{\text{пр}}$ — усиление антенны приёмника; L_{ϕ} — потери в фидерном тракте; $S(SF)$ — чувствительность приёмника при заданном коэффициенте расширения спектра; M — эксплуатационный запас; $L(d_0)$ — потери на опорном расстоянии 1 м, составляющие 31,2 дБ для частоты 868 МГц; n — показатель степени затухания. Дефицит бюджета радиолинии составляет

$$\Delta L_{\text{деф}} = L(d) - L_{\max} \quad (2)$$

Расчёт выполнен для эффективной излучаемой мощности 25 мВт, усиления антенны шлюза 3 дБи, потерь в фидере 1 дБ и эксплуатационного запаса 10 дБ. Потери на трассе длиной 7 км составляют 146,6 дБ. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Дефицит бюджета радиолинии при прямой связи на расстоянии 7 км

SF	Чувствительность, дБм	$L_{\max}$, дБ	Дефицит, дБ	Время в эфире, мс
7	–123	129,0	17,6	41,2
8	–126	132,0	14,6	82,4
9	–129	135,0	11,6	144,4

SF	Чувствительность, дБм	L _{max} , дБ	Дефицит, дБ	Время в эфире, мс
10	–132	138,0	8,6	288,8
11	–133	139,0	7,6	577,5
12	–136	142,0	4,6	1155,1

Прямая связь не обеспечивается ни при одном значении коэффициента расширения спектра: даже при максимальном значении дефицит составляет 4,6 дБ. Существенно, что ресурс повышения чувствительности за счёт расширения спектра исчерпан полностью, а рост времени в эфире при этом составляет 28 раз, что предопределяет энергетические последствия любого решения, опирающегося на большие значения этого параметра.

3. Способы устранения дефицита и выбор схемы

Дефицит бюджета радиолинии может быть устранён пятью способами, сопоставление которых приведено в таблице 2. Принципиально важно, что оценивать их следует не только по способности закрыть дефицит, но и по сохранению требования к сроку службы автономного узла.

Таблица 2 – Способы устранения дефицита бюджета радиолинии

Способ	Эффект, дБ	Ограничение	Результат
Увеличение коэффициента расширения спектра	до 13	ресурс исчерпан, дефицит сохраняется	Дефицит не устранён
Переход в полосу 868,7–869,2 МГц с мощностью 100 мВт	6	допустим только при SF12; ток передачи возрастает до 120 мА	Срок службы 1,6 года
Увеличение усиления антенны шлюза до 8 дБи	5	допустим только при SF12; требуется мачтовое размещение	Срок службы 3,9 года
Ретрансляция с делением трассы на два участка	9,0	требуется ретранслирующий элемент и его питание	Срок службы 12,4 года
Дополнительный шлюз	полное перекрытие	требуется канал связи с сервером и сетевое питание	Срок службы 12,4 года

Результат сопоставления неочевиден и составляет основной методический вывод работы. Увеличение мощности передатчика и усиления антенны шлюза формально устраняют дефицит, однако достаточны лишь при максимальном коэффициенте расширения спектра, время в эфире при котором составляет 1,16 с. Расчётный срок службы оконечного узла в этих вариантах снижается до 1,6 и 3,9 года соответственно при требуемых 10 годах. Таким образом, задача связи решается, а задача проектирования сети — нет.

Ретрансляция принципиально отличается тем, что уменьшает не требуемую чувствительность, а сами потери на трассе. При делении трассы на k равных участков выигрыш составляет

$$\Delta L = 10 \cdot n \cdot \lg k \quad (3)$$

что при $n = 3,0$ и $k = 2$ даёт 9,0 дБ. Потери на участке длиной 3,5 км составляют 137,5 дБ, что требует чувствительности не хуже $-131,5$ дБм и обеспечивается при $SF = 10$ с запасом 0,5 дБ сверх эксплуатационного запаса 10 дБ, уже заложенного в бюджет. Именно снижение коэффициента расширения спектра, а не расширение зоны покрытия как таковое, является основным эффектом ретрансляции.

Выбор между ретрансляцией и дополнительным шлюзом, дающими одинаковый результат по сроку службы узлов, определяется наличием инфраструктуры в точке размещения и стоимостью. Алгоритм выбора схемы приведён на рисунке 2.

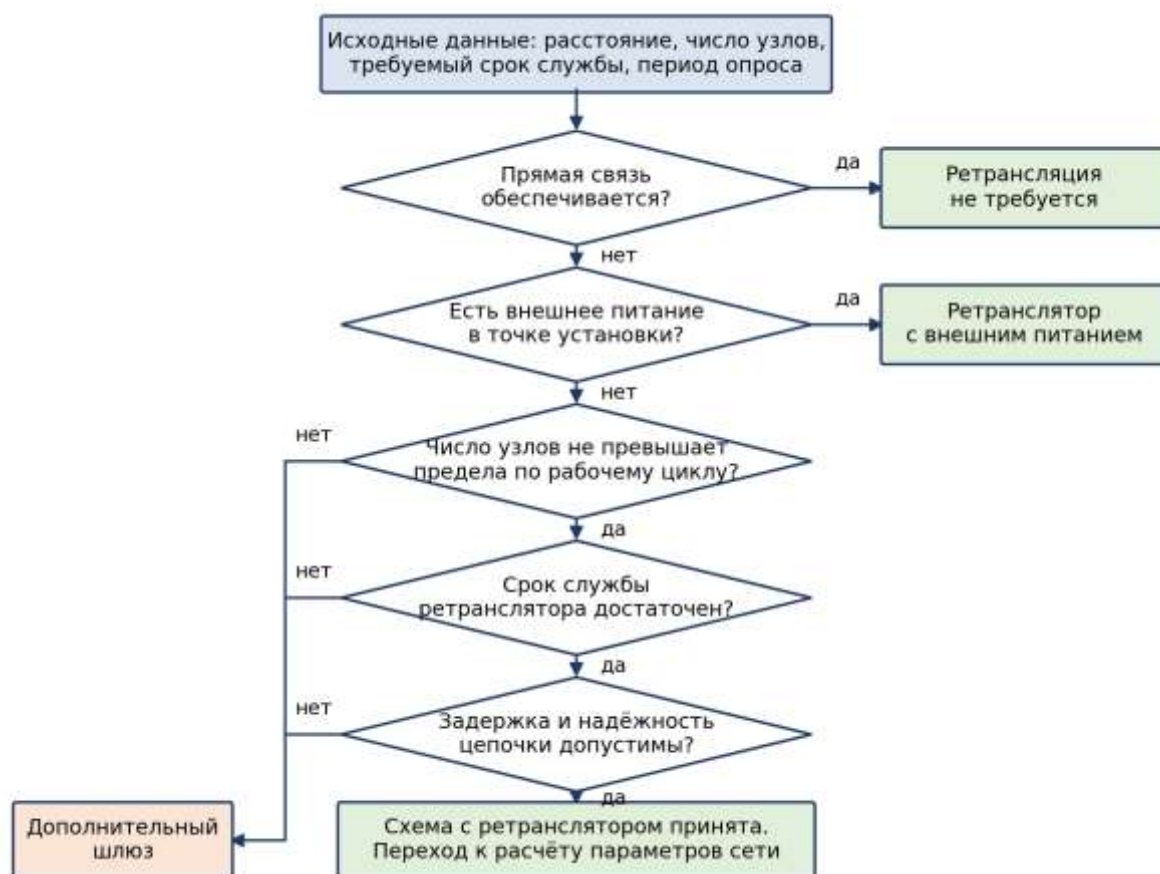


Рисунок 2 – Алгоритм выбора схемы расширения зоны покрытия сети

4. Расчёт параметров сети

Энергетический баланс оконечного узла и ретранслятора описывается общим соотношением, различающимся составом слагаемых. Для ретранслятора, в отличие от оконечного узла, учитывается пребывание в режиме приёма в течение интервалов, когда обслуживаемые узлы могут выйти на связь:

$$Q_u = I_{np} \cdot t_{np} + I_{nd} \cdot N \cdot T_{эф} + I_{cn} \cdot (T - t_{np} - N \cdot T_{эф}) \quad (4)$$

$$I_{cp} = Q_u / T, \quad t_{расч} = C_{бат} \cdot k_{исп} / I_{cp} \quad (5)$$

где $I_{пр}$, $I_{пд}$, $I_{сп}$ — токи потребления в режимах приёма, передачи и глубокого сна; $t_{пр}$ — суммарная длительность окон приёма за период; N — число обслуживаемых узлов; $T_{эф}$ — время передачи телеграммы в эфире; $C_{бат}$ — ёмкость источника питания; $k_{исп}$ — коэффициент её использования. Расчёт выполнен для параметров прототипа, испытанного в работах [5, 6]: ток приёма 17 мА, ток передачи 45 мА, ток сна 5 мкА, ёмкость источника питания 2400 мА·ч

при коэффициенте использования 0,9 и двукратном запасе длительности окон приёма. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчётные энергетические характеристики элементов сети при SF = 10 и периоде опроса 15 минут

Элемент сети	Режим работы	Средний ток, мА	Расчётный срок службы
Оконечный узел	передача раз в 15 мин	0,0199	12,4 года
Ретранслятор, 5 узлов	приём по расписанию	0,132	1,9 года
Ретранслятор, 10 узлов	приём по расписанию	0,258	0,95 года
Ретранслятор, 20 узлов	приём по расписанию	0,512	0,48 года
Ретранслятор	непрерывный приём	17,0	5,3 суток

Полученные значения показывают асимметрию требований к элементам сети. Оконечный узел при выбранных параметрах обеспечивает срок службы 12,4 года, превышающий требуемый, тогда как автономный ретранслятор не достигает даже двухлетнего срока при пяти обслуживаемых узлах, а в режиме непрерывного приёма исчерпывает источник питания за 5,3 суток. Определяющим является ток приёмного тракта, а не логика обработки, поэтому вывод не зависит от совершенствования элементной базы: ретранслирующий элемент должен иметь внешний источник питания.

Дополнительным ограничением является нормативно установленный рабочий цикл. Ретранслятор передаёт в эфир все обслуживаемые телеграммы, поэтому

$$DC = N \cdot T_{эф} / T \leq DC_{дон}, \quad N_{max} = DC_{дон} \cdot T / T_{эф} \quad (6)$$

При допустимом рабочем цикле 1 % предельное число обслуживаемых узлов составляет 31, тогда как принятые десять узлов дают рабочий цикл 0,32 %. В рассматриваемом примере ограничение по рабочему циклу не является критическим, однако при переходе к $SF = 12$ оно снизилось бы до семи узлов, что дополнительно подтверждает нецелесообразность решений, опирающихся на большие значения коэффициента расширения спектра.

Надёжность доставки по цепочке из k транзитных участков определяется соотношением $P_{\text{дост}} = p^k$, где p — вероятность успешной доставки на одном участке. При $p = 0,95$ двухзвенная цепочка обеспечивает 0,90, трёхзвенная — 0,86, что вместе с накоплением задержки ограничивает практически применимую длину цепочки двумя участками.

5. Рекомендации по параметрам сети и границы применимости

Результаты сквозного расчёта сведены в таблицу 4 в форме проектных рекомендаций с указанием обоснования каждого принятого значения.

Таблица 4 – Рекомендуемые параметры сети мониторинга для рассмотренного примера

Параметр сети	Принятое значение	Обоснование
Топология	двухзвенная, один ретранслятор	дефицит 4,6 дБ при прямой связи не устраняется иными способами без потери срока службы
Длина транзитного участка	3,5 км	деление трассы даёт выигрыш 9,0 дБ при требуемых 4,6 дБ
Коэффициент расширения спектра	10	потери на участке 137,5 дБ при допустимых 138,0 дБ
Период опроса	15 мин	обеспечивает срок службы узла 12,4 года и рабочий цикл 0,32 %
Число узлов за ретранслятором	не более 10	предел по рабочему циклу 31 узел, определяющим является энергетика ретранслятора
Питание ретранслятора	внешнее или от солнечной панели	автономный ретранслятор обеспечивает 1,9 года при пяти узлах
Число транзитных участков	не более 2	надёжность доставки 0,90 при вероятности 0,95 на участке

Границы применимости полученных решений определяются тремя обстоятельствами. Ретрансляция не увеличивает пропускную способность сети, а снижает её, поскольку каждая телеграмма занимает эфир дважды; при высокой периодичности опроса предпочтителен дополнительный шлюз. Накопление задержки при работе ретранслятора по расписанию исключает применение схемы для задач, требующих доставки в течение секунд, — такие узлы должны иметь прямую связь со шлюзом. Наконец, при размещении оборудования во взрывоопасных зонах требование ограничения запасённой энергии по ТР ТС 012/2011 [1] и ГОСТ 31610.11-2014 [2] снижает допустимую ёмкость источника питания, вследствие чего приведённые сроки службы для искробезопасного исполнения должны быть уменьшены, а ретранслирующий элемент предпочтительно выносить за пределы взрывоопасной зоны.

Заключение

Предложена методика сквозного проектного расчёта беспроводной сети мониторинга распределённых объектов, включающая анализ дефицита бюджета радиолинии, сопоставление способов его устранения, выбор схемы расширения зоны покрытия и расчёт параметров сети с формированием проектных рекомендаций.

На примере расстояния 7 км показано, что дефицит бюджета радиолинии составляет 4,6 дБ и не устраняется увеличением коэффициента расширения спектра. Установлено, что увеличение мощности передатчика и усиления антенны шлюза формально решают задачу связи, но лишь при максимальном коэффициенте расширения спектра, снижая расчётный срок службы узла до 1,6 и 3,9 года при требуемых 10 годах. Ретрансляция с делением трассы на два участка даёт выигрыш 9,0 дБ, позволяет использовать коэффициент расширения спектра 10 и сохранить срок службы 12,4 года.

Количественно установлено, что ретранслятор в режиме непрерывного приёма исчерпывает типовой автономный источник питания за 5,3 суток, а при работе по расписанию обеспечивает от 1,9 года при пяти обслуживаемых узлах

до полугода при двадцати, вследствие чего ретранслирующий элемент должен иметь внешнее питание. Сформированы рекомендации по параметрам сети и определены границы применимости ретрансляции.

Дальнейшие исследования предполагают разработку протокола согласования расписаний ретранслятора и обслуживаемых узлов, а также экспериментальную проверку полученных оценок.

Список литературы

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 012/2011 «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах».

2. ГОСТ 31610.11-2014 (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь "i"».

3. ГОСТ Р 71168-2023. Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU. Введ. 01.07.2024. – М.: Российский институт стандартизации, 2024.

4. Решение Государственной комиссии по радиочастотам от 11.09.2018 № 18-46-03-1 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия» (с изменениями).

5. Vlasov A.I., Bezborodov E.S., Naumov I.K. Energy-efficient internet of things technology networks based on the LoRa communication module // Proc. 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2025. P. 6–11. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028346.

6. Vlasov A.I., Bezborodov E.S., Naumov I.K. Methods and models of data transmission for ionizing radiation registration systems // Proc. 2026 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). Sochi, 2026. P. 1114–1118.

7. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W.M. A study of LoRa: long range & low power networks for the internet of things // Sensors. 2016. Vol. 16, № 9. Art. 1466. DOI: 10.3390/s16091466.

8. Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J., Watteyne T. Understanding the limits of LoRaWAN // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 9. P. 34–40. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
9. Bor M., Roedig U., Voigt T., Alonso J. Do LoRa low-power wide-area networks scale? // Proc. 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM). Malta, 2016. P. 59–67. DOI: 10.1145/2988287.2989163.
10. Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J. A survey of LoRaWAN for IoT: from technology to application // Sensors. 2018. Vol. 18, № 11. Art. 3995. DOI: 10.3390/s18113995.
11. Gill K., Yang S.-H., Yao F., Lu X. A zigbee-based home automation system // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2009. Vol. 55, № 2. P. 422–430.
12. Semtech Corporation. SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz low power long range transceiver. Datasheet, Rev. 7. 2020.

References

1. Tekhnicheskiiy reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 012/2011 «O bezopasnosti oborudovaniya dlya raboty vo vzryvoopasnykh sredakh» [Technical Regulation of the Customs Union TR CU 012/2011 on the safety of equipment for use in explosive atmospheres].
2. GOST 31610.11-2014 (IEC 60079-11:2011). Vzryvoopasnye sredy. Chast 11. Oborudovanie s vidom vzryvozashchity «iskrobezopasnaya elektricheskaya tsep i» [Explosive atmospheres. Part 11. Equipment protection by intrinsic safety "i"].
3. GOST R 71168-2023. Informatsionnye tekhnologii. Internet veshchey. Spetsifikatsiya LoRaWAN RU [Information technology. Internet of things. LoRaWAN RU specification]. Moscow, Russian Institute of Standardization, 2024.
4. Reshenie Gosudarstvennoy komissii po radiochastotam ot 11.09.2018 № 18-46-03-1 «O vydelenii polos radiochastot ustroystvam malogo radiusa deystviya»

[Decision of the State Commission for Radio Frequencies No. 18-46-03-1 of 11.09.2018 on radio frequency band allocation for short-range devices].

5. Vlasov A.I., Bezborodov E.S., Naumov I.K. Energy-efficient internet of things technology networks based on the LoRa communication module // Proc. 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2025. P. 6–11. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028346.

6. Vlasov A.I., Bezborodov E.S., Naumov I.K. Methods and models of data transmission for ionizing radiation registration systems // Proc. 2026 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). Sochi, 2026. P. 1114–1118.

7. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W.M. A study of LoRa: long range & low power networks for the internet of things // Sensors. 2016. Vol. 16, № 9. Art. 1466. DOI: 10.3390/s16091466.

8. Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J., Watteyne T. Understanding the limits of LoRaWAN // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 9. P. 34–40. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600613.

9. Bor M., Roedig U., Voigt T., Alonso J. Do LoRa low-power wide-area networks scale? // Proc. 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM). Malta, 2016. P. 59–67. DOI: 10.1145/2988287.2989163.

10. Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J. A survey of LoRaWAN for IoT: from technology to application // Sensors. 2018. Vol. 18, № 11. Art. 3995. DOI: 10.3390/s18113995.

11. Gill K., Yang S.-H., Yao F., Lu X. A zigbee-based home automation system // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2009. Vol. 55, № 2. P. 422–430.

12. Semtech Corporation. SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz low power long range transceiver. Datasheet, Rev. 7. 2020.