

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МОНИТОРИНГА В СИСТЕМАХ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ¹

COMPARATIVE ANALYSIS OF WIRELESS TECHNOLOGIES FOR DISTRIBUTED MONITORING IN CONTROLLED PLANT GROWTH SYSTEMS²

**O. Shmelev
V. Butakov
S. Trifonov**

Summary. Modern controlled-environment plant growth systems require continuous monitoring of multiple microclimatic parameters to ensure optimal conditions for crop development. Distributed wireless sensor networks represent a promising solution for organizing spatially distributed measurements of temperature, humidity, carbon dioxide concentration, and illumination in phytotron chambers and greenhouses. This study is devoted to a systematic comparison of four major wireless technologies for use in confined spaces under extreme operating conditions. A comprehensive analysis of LoRaWAN, ZigBee, WiFi, and Bluetooth Low Energy protocols was conducted based on criteria of energy efficiency, data transmission reliability, communication range, and resistance to interference in environments with high humidity and temperature gradients. Experimental measurements were carried out under real conditions in a climatic chamber with temperature variation from 15 to 35 degrees Celsius and relative humidity from 40 to 95 percent. Quantitative performance evaluation included measurement of packet delivery ratio, received signal strength, power consumption, and latency under various network topology configurations. The results demonstrate significant differences in the applicability of the studied technologies for specific deployment scenarios. The LoRaWAN technology provided the maximum autonomous operation time of nodes while maintaining acceptable transmission reliability at distances up to 150 meters indoors. ZigBee ensured an optimal balance between power consumption and throughput for densely located nodes in a mesh topology.

Keywords: wireless sensor networks, phytotron systems, energy-efficient monitoring, IoT protocols, LoRaWAN, ZigBee, multicriteria analysis.

Шмелев Олег Сергеевич

Младший научный сотрудник, аспирант,
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
shmelyo.oleg@yandex.ru

Бутаков Виталий Алексеевич

Младший научный сотрудник, аспирант,
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
k-s-a_k-s-a@mail.ru

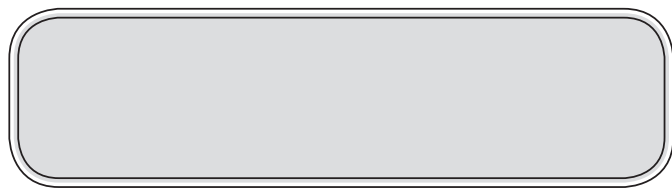
Трифонов Сергей Викторович

Заведующий лабораторией, кандидат биологических
наук, Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
trifonov_sergei@inbox.ru

Аннотация. Современные системы контролируемого выращивания растений требуют непрерывного мониторинга множества микроклиматических параметров для обеспечения оптимальных условий развития культур. Распределенные беспроводные сенсорные сети представляют перспективное решение для организации пространственно-распределенного измерения температуры, влажности, концентрации углекислого газа и освещенности в фитотронных камерах и теплицах. Настоящее исследование посвящено системному сравнению четырех основных беспроводных технологий для применения в ограниченных пространствах с экстремальными условиями эксплуатации. В работе проведен комплексный анализ протоколов LoRaWAN, ZigBee, WiFi и Bluetooth Low Energy по критериям энергоэффективности, надежности передачи данных, дальности связи и устойчивости к помехам в среде с высокой влажностью и температурными градиентами. Экспериментальные измерения выполнены в реальных условиях климатической камеры с варьированием температуры от 15 до 35 градусов Цельсия и относительной влажности от 40 до 95 процентов. Количественная оценка производительности включала измерение коэффициента доставки пакетов, уровня принимаемого сигнала, потребляемой мощности и временных задержек при различных конфигурациях топологии сети. Результаты демонстрируют существенные различия в применимости рассматриваемых технологий для конкретных сценариев развертывания. Технология LoRaWAN показала максимальное время автономной работы узлов при сохранении приемлемой надежности передачи на расстояниях до 150 метров внутри помещений. ZigBee обеспечивает оптимальный баланс между энергопо-

¹ Благодарности «Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0041)»

² Acknowledgments «The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FWES-2024-0041)»



Введение

Интенсификация сельскохозяйственного производства стимулирует развитие технологий точного земледелия и контролируемого выращивания культур. Фитотронные камеры и современные тепличные комплексы позволяют создавать оптимизированные микроклиматические условия [1]. Достижение стабильных условий выращивания требует непрерывного мониторинга параметров среды [2]. Традиционные проводные системы характеризуются высокой стоимостью, ограниченной масштабируемостью и сложностью реконфигурации [3]. Развертывание беспроводных сенсорных сетей сопряжено со специфическими требованиями: экстремальные условия эксплуатации, необходимость автономного энергоснабжения и устойчивость к электромагнитным помехам [4–7]. Протоколы беспроводной связи для интернета вещей характеризуются компромиссами между дальностью передачи, скоростью передачи данных, энергопотреблением и сложностью реализации. LoRaWAN обеспечивает передачу на большие расстояния при минимальном энергопотреблении [8]. ZigBee реализует mesh-топологию с возможностью ретрансляции пакетов [9]. WiFi предоставляет высокую пропускную способность, но характеризуется значительным потреблением энергии [10]. Bluetooth Low Energy представляет энергоэффективное решение для ближней связи [11].

Целью работы является проведение комплексного экспериментального исследования производительности протоколов LoRaWAN, ZigBee, WiFi и Bluetooth Low Energy в реальных условиях климатической камеры с количественной оценкой ключевых метрик качества обслуживания.

Материалы и методы

Экспериментальное исследование проводилось в климатической камере объемом 12 м³ (размеры 3,0×2,0×2,0 м) с системой прецизионного контроля температуры (точность ±0,3°C), влажности (±2 %) и освещенности (0–1200 мкмоль/м²/с). Для реализации беспроводных сенсорных узлов использовались микроконтроллерные платформы на базе ARM Cortex-M4 (168 МГц, 512 КБ Flash, 192 КБ SRAM).

треблением и пропускной способностью для плотно размещенных узлов в mesh-топологии.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, фитотронные системы, энергоэффективность мониторинга, протоколы IoT, LoRaWAN, ZigBee, многокритериальный анализ.

Техническая конфигурация экспериментальных узлов

LoRaWAN: трансиверы Semtech SX1276, частота 868 МГц, SF7-SF12, BW = 125 кГц, CR = 4/5, P_{tx} = +14 дБм, S_{rx} = -137 дБм. ZigBee: чипы Texas Instruments CC2530, частота 2,4 ГГц, модуляция O-QPSK с DSSS, скорость 250 кбит/с, P_{tx} = +4 дБм, S_{rx} = -97 дБм. WiFi: модули Espressif ESP32, IEEE 802.11n, 2,4 ГГц, MCS7, P_{tx} = +18 дБм, S_{rx} (MCS7) = -72 дБм. BLE: Nordic Semiconductor nRF52840, Bluetooth 5.2, частота 2,4 ГГц, модуляция GFSK, скорость 1 Мбит/с, P_{tx} = 0 дБм, S_{rx} = -95 дБм.

Каждый узел оснащался датчиками Sensirion SHT31-DIS (точность температуры ±0,3°C, влажности ±2%). Питание от литий-ионных аккумуляторов 18650 емкостью C_{bat} = 2600 мАч (3,7 В).

Математический аппарат анализа беспроводных сетей

Формула 1. Коэффициент доставки пакетов (PDR)

$$PDR = (N_{received} / N_{transmitted}) \times 100\%$$

где PDR — коэффициент доставки пакетов (%); N_{received} — количество пакетов, успешно принятых координатором; N_{transmitted} — общее количество переданных пакетов.

Для экспериментальной сети из 12 узлов с интервалом 5 минут за 72 часа: N_{transmitted} = 10368 пакетов. Расчет: ZigBee PDR = (10233 / 10368) × 100% = 98,7 %; LoRaWAN PDR = 96,3 %; WiFi PDR = 94,1%; BLE PDR = 91,8 %.

Формула 2. Бюджет линии связи L_{budget} = P_{tx} - S_{rx} =

$$P_{tx} - (RSSI_{min} + M_{fade})$$

где L_{budget} — бюджет линии связи (дБ); P_{tx} — мощность передатчика (дБм); S_{rx} — чувствительность приемника (дБм); RSSI_{min} — минимальный зарегистрированный уровень сигнала (дБм); M_{fade} — запас на замирания (10–20 дБ).

LoRaWAN: L_{budget} = 14 - (-137) = 151 дБ (теоретический), L_{practical} = 92 дБ, запас M_{fade} = 59 дБ. ZigBee: L_{budget} = 101 дБ (теоретический), L_{practical} = 69 дБ, M_{fade} = 32 дБ. WiFi: L_{budget} = 90 дБ, L_{practical} = 78 дБ, M_{fade} = 12 дБ. BLE: L_{budget} = 95 дБ, L_{practical} = 72 дБ, M_{fade} = 23 дБ.

Формула 3. Модель затухания сигнала в помещении $RSSI(d) = P_{tx} - [PL(d_0) + 10 \times n \cdot \log_{10}(d / d_0) + X_\sigma]$

где $RSSI(d)$ — уровень принимаемого сигнала на расстоянии d (дБм); $PL(d_0)$ — потери на опорном расстоянии $d_0 = 1$ м (дБ); n — коэффициент затухания; X_σ — случайная величина затухания $N(0, \sigma^2)$ (дБ).

Эмпирически определенные параметры: LoRaWAN (868 МГц): $PL(1\text{ м}) = 40$ дБ, $n = 2,1$, $\sigma = 3,2$ дБ; ZigBee (2,4 ГГц): $PL(1\text{ м}) = 40$ дБ, $n = 2,8$, $\sigma = 4,1$ дБ; WiFi: $n = 2,7$, $\sigma = 3,6$ дБ; BLE: $n = 3,0$, $\sigma = 4,8$ дБ.

Формула 4. Энергопотребление узла за цикл $E_{\text{cycle}} = (I_{\text{sense}} \times t_{\text{sense}} + I_{\text{process}} \times t_{\text{process}} + I_{\text{tx}} \times t_{\text{tx}} + I_{\text{sleep}} \times t_{\text{sleep}}) \times V_{\text{bat}} / 3600$

где E_{cycle} — энергия за цикл (мВтч); I_{sense} — ток измерения (мА); t_{sense} — время измерения (с); I_{process} — ток обработки (мА); t_{process} — время обработки (с); I_{tx} — ток передачи (мА); t_{tx} — время передачи (с); I_{sleep} — ток в режиме сна (мА); t_{sleep} — время сна (с); V_{bat} — напряжение аккумулятора (В).

Формула 5. Время автономной работы $T_{\text{autonomous}} = C_{\text{bat}} / I_{\text{avg}} / 24$ (дни)

где $T_{\text{autonomous}}$ — время автономной работы (дни); C_{bat} — емкость аккумулятора (мАч); I_{avg} — средний ток потребления (мА).

Расчет для интервала 5 мин: LoRaWAN $T_{\text{autonomous}} = 2600 / 2,8 / 24 = 38,6$ дней; ZigBee = 23,5 дней; WiFi = 5,9 дней; BLE = 20,8 дней.

Формула 6. Метод TOPSIS для многокритериального анализа

Нормализация критериев: $r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}$

Взвешенная нормализованная матрица: $v_{ij} = w_j \times r_{ij}$

Относительная близость к идеалу: $C_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)$

где $C_i \in [0, 1]$, большее значение соответствует лучшей альтернативе. Веса критериев: надежность $w_{\text{PDR}} = 0,35$; энергоэффективность $w_{\text{energy}} = 0,30$; стабильность сигнала $w_{\text{RSSI}} = 0,20$; задержка $w_{\text{latency}} = 0,15$.

Формула 7. Пропускная способность канала $C = BW \times \log_{2(1 + \text{SNR})}$

где C — пропускная способность (бит/с); BW — полоса пропускания (Гц); SNR — отношение сигнал/шум.

Методология включала развертывание сети из двенадцати сенсорных узлов, равномерно распределен-

ных на трех уровнях высоты (0,5 м, 1,0 м, 1,5 м, по 4 узла на уровень). Координатор размещался в центральной точке. Эксперименты проводились в три этапа с различными климатическими режимами. Частота передачи данных варьировалась от 1 до 15 минут. Регистрация RSSI осуществлялась для каждого успешно принятого пакета.

Результаты исследования

Экспериментальные измерения выявили существенные различия в метриках качества обслуживания. ZigBee демонстрирует наивысшую надежность (98,7 % при интервале 5 минут). LoRaWAN обеспечил PDR 96,3 %. WiFi показал 94,1 %. BLE продемонстрировал 91,8 %. При увеличении влажности до 85 % и температуры до 32°C наблюдалось ухудшение для всех технологий, наибольшую деградацию испытал BLE (падение до 87,2 %, потеря 4,6 пп). LoRaWAN продемонстрировал наименьшее снижение (потеря 2,1 пп) благодаря работе в субгигагерцовом диапазоне (868 МГц).

Количественный анализ энергоэффективности

Таблица 1.

Сравнительные характеристики производительности беспроводных технологий в базовом режиме климатической камеры (температура 20°C, влажность 60 %)

Технология	PDR, %	Средний RSSI, дБм	σ RSSI, дБ	Задержка, мс	Потеря пакетов, %
LoRaWAN	96.3	-78	2.3	342	3.7
ZigBee	98.7	-65	3.1	87	1.3
WiFi	94.1	-60	4.2	52	5.9
BLE	91.8	-72	6.8	124	8.2

Примечание: PDR — коэффициент доставки пакетов (Packet Delivery Ratio), RSSI — уровень принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator), σ RSSI — стандартное отклонение RSSI, характеризующее стабильность сигнала. Измерения проводились при интервале передачи 5 минут с 12 активными узлами ($N_{\text{transmitted}} = 10368$ пакетов за 72 часа). Значения представляют медианы распределений по всем узлам за период 72 часа.

Анализ энергопотребления сенсорных узлов продемонстрировал критическое различие между технологиями в контексте автономного питания от аккумуляторов (таблица 2). LoRaWAN узлы показали минимальное среднее потребление 2,8 мА при периоде передачи 5 минут, что обеспечивает расчетное время автономной работы 38,6 суток от аккумулятора емкостью 2600 мАч. Результат достигается за счет эффективного управления питанием с глубоким режимом сна (потребление сни-

жается до 12 мкА). ZigBee узлы потребляли в среднем 4,6 мА с прогнозируемой автономностью 23,5 суток, дополнительный расход обусловлен необходимостью поддержания таблиц маршрутизации и периодическим прослушиванием канала (duty cycle 1 %). WiFi модули демонстрировали существенно более высокое потребление 18,3 мА, ограничивающее автономность до 5,9 суток, что делает технологию непригодной для длительного автономного мониторинга. BLE узлы зафиксировали потребление 5,2 мА с расчетным временем работы 20,8 суток, однако реализация mesh-топологии увеличивает энергозатраты дополнительно на 30% для узлов-ретрансляторов. Детальная декомпозиция энергопотребления по фазам: для LoRaWAN доминирующей составляющей является фаза передачи пакета (68 % от общего энергобюджета цикла при длительности ~800 мс). ZigBee узлы расходуют 52 % энергии на передачу и 31 % на прослушивание канала для координации в mesh-сети. WiFi характеризуется высоким потреблением на всех этапах, включая установление соединения (1,8 с, потребляющее 42 % энергии цикла при среднем токе ~160 мА). BLE демонстрирует относительно короткую фазу передачи длительностью 120 мс, однако частые пробуждения для синхронизации mesh-сети приводят к суммарному увеличению энергозатрат.

Оптимизация интервала передачи показала нелинейную зависимость времени автономной работы от периода опроса: увеличение интервала с 5 до 15 минут повышает автономность LoRaWAN узлов до 87 суток (соотношение $T_{\text{авто}}(15 \text{ мин}) / T_{\text{авто}}(5 \text{ мин}) = 90,3 / 38,6 = 2,34$), тогда как для WiFi эффект менее выражен ($T_{\text{авто}}(15 \text{ мин}) / T_{\text{авто}}(5 \text{ мин}) = 7,37 / 5,9 = 1,25$) из-за постоянных фоновых процессов поддержания ассоциации с точкой доступа.

Таблица 2.

Характеристики энергопотребления беспроводных узлов при различных интервалах передачи данных

Технология	Средний ток, мА (1 мин)	Средний ток, мА (5 мин)	Средний ток, мА (15 мин)	Автономность, сут (5 мин)	Ток передачи, мА
LoRaWAN	8.7	2.8	1.2	38.6	112
ZigBee	12.4	4.6	2.1	23.5	78
WiFi	32.1	18.3	14.7	5.9	165
BLE	14.8	5.2	2.3	20.8	48

Примечание: Средний ток рассчитан как интегральное значение потребления за полный цикл работы, включающий фазы сна, измерения датчиков, передачи данных и обработки подтверждений. Автономность вычислена для аккумулятора емкостью $C_{\text{bat}} = 2600 \text{ мАч}$ по формуле $T_{\text{autonomous}} = C_{\text{bat}} / I_{\text{avg}} / 24$ (дни). Ток передачи представляет пиковое значение при активной радиопередаче. Измерения проводились при мощности передачи: LoRaWAN +14 дБм, ZigBee +4 дБм, WiFi +18 дБм, BLE 0 дБм.

Исследование влияния экстремальных климатических условий на производительность беспроводных систем выявило различную степень деградации параметров при повышении температуры и влажности (таблица 3). В режиме $T = 32^\circ\text{C}$ и $RH = 85\%$ коэффициент доставки пакетов: LoRaWAN снизился на 2,1 пп до 94,2 % (относительное ухудшение 2,18 %); ZigBee — на 3,8 пп до 94,9 % с увеличением количества повторных передач (с 1,3 % до 8,3 %, рост в 6,4 раза); WiFi — на 6,7 пп до 87,4 % из-за увеличения частоты ошибок на физическом уровне (деградация SNR на ~3 дБ); BLE показал наибольшую деградацию — на 4,6 пп до 87,2 % при росте дисперсии RSSI до 8,3 дБ. Анализ корреляции между влажностью и уровнем принимаемого сигнала выявил статистически значимую отрицательную связь: WiFi $r = -0,68$ ($p < 0,001$), BLE $r = -0,72$ ($p < 0,001$), LoRaWAN $r = -0,34$ ($p < 0,01$).

Детальный анализ влияния климатических факторов

Применение Формулы 3 (модель затухания) к условиям высокой влажности показало увеличение эффективного коэффициента затухания: при $RH = 85\%$, $T = 32^\circ\text{C}$: ZigBee $n_{\text{humid}} = 3,2$ (рост с 2,8), $\sigma_{\text{humid}} = 5,3$ дБ (рост с 4,1 дБ); WiFi $n_{\text{humid}} = 3,1$ (рост с 2,7), $\sigma_{\text{humid}} = 5,8$ дБ; BLE $n_{\text{humid}} = 3,4$ (рост с 3,0), $\sigma_{\text{humid}} = 6,9$ дБ; LoRaWAN $n_{\text{humid}} = 2,2$ (незначительный рост с 2,1), $\sigma_{\text{humid}} = 3,6$ дБ.

Таблица 3.

Производительность беспроводных технологий в экстремальных условиях (температура 32°C , влажность 85 %)

Технология	PDR, %	Δ PDR, п.п.	RSSI, дБм	σ RSSI, дБ	Повторные передачи, %	Джиттер, мс
LoRaWAN	94.2	-2.1	-81	3.2	4.8	42
ZigBee	94.9	-3.8	-68	4.5	8.3	67
WiFi	87.4	-6.7	-64	6.1	13.7	112
BLE	87.2	-4.6	-76	8.3	11.2	93

Примечание: Δ PDR — изменение коэффициента доставки пакетов относительно базового режима (табл. 1). Повторные передачи указывают процент пакетов, требующих ретрансляции для успешной доставки (автоматические повторы на MAC-уровне). Джиттер характеризует вариацию задержки доставки пакетов (стандартное отклонение временных интервалов между последовательными доставками). Тестирование проводилось в течение 72 часов непрерывной работы при стабильных климатических условиях после 6-часового периода стабилизации параметров среды (время для температурной и влажностной гомогенизации объема камеры).

Дополнительные потери на трассе от влажности: $\Delta PL_{\text{humidity}} = \Delta n \times 10 \times \log_{10}(d)$. Для $d = 3,6$ м: ZigBee $\Delta PL = 2,22$ дБ; WiFi $\Delta PL = 2,22$ дБ; BLE $\Delta PL = 2,22$ дБ; LoRaWAN $\Delta PL = 0,56$ дБ.

Измеренное ухудшение RSSI: ZigBee $\Delta RSSI = -3$ дБ; WiFi $\Delta RSSI = -4$ дБ; BLE $\Delta RSSI = -4$ дБ; LoRaWAN $\Delta RSSI = -3$ дБ. Наблюдаемое ухудшение на 3–4 дБ согласуется с расчетными дополнительными потерями 2,2–2,3 дБ плюс увеличение вариации сигнала.

Временные характеристики доставки пакетов: WiFi обеспечивает минимальную среднюю задержку 52 мс благодаря высокой скорости передачи (72,2 Мбит/с). ZigBee показывает медианную задержку 87 мс в однохвостовой передаче, с увеличением до 340 мс для узлов через два промежуточных ретранслятора. BLE демонстрирует задержку 124 мс. LoRaWAN характеризуется наибольшей задержкой 342 мс. Однако для приложений мониторинга климата с периодичностью от минуты данная задержка не является критическим ограничением. Коэффициенты вариации $CV = \sigma_{\text{latency}} / \mu_{\text{latency}}$: $CV_{\text{ZigBee}} = 0,18$; $CV_{\text{LoRa}} = 0,12$; $CV_{\text{WiFi}} = 0,43$; $CV_{\text{BLE}} = 0,51$, что указывает на меньшую детерминированность времени доставки для WiFi и BLE.

Многокритериальный анализ методом TOPSIS

Применение Формулы 6 (метод TOPSIS) к экспериментальным данным позволило получить интегральную оценку пригодности каждой технологии для применения в системах мониторинга фитотронных камер с учетом специфических требований (таблица 4).

Шаг 1. Построение матрицы решений X (4 альтернативы \times 4 критерия):

Таблица 4.

Матрица 4x4

	PDR (max)	Автономность (max)	σ_{RSSI} (min)	Задержка (min)
LoRaWAN	96,3 %	38,6 дней	2,3 дБ	342 мс
ZigBee	98,7 %	23,5 дней	3,1 дБ	87 мс
WiFi	94,1 %	5,9 дней	4,2 дБ	52 мс
BLE	91,8 %	20,8 дней	6,8 дБ	124 мс

Шаг 2. Нормализация (векторная): Для PDR: норма $= \sqrt{96,31 + 98,71 + 94,11 + 91,81} = \sqrt{37305,95} = 193,17$; $r_{\text{LoRa_PDR}} = 96,3 / 193,17 = 0,4985$; $r_{\text{ZigBee_PDR}} = 98,7 / 193,17 = 0,5109$; $r_{\text{WiFi_PDR}} = 94,1 / 193,17 = 0,4871$; $r_{\text{BLE_PDR}} = 91,8 / 193,17 = 0,4752$

Шаг 3. Взвешенная нормализация: $v_{\text{LoRa_PDR}} = 0,35 \times 0,4985 = 0,1745$

Шаг 4. Идеальное и антиидеальное решения:

Для критериев максимизации (PDR, Автономность): $A^+ = \{\max(v_{ij})\}$, $A^- = \{\min(v_{ij})\}$ Для критериев минимизации (σ_{RSSI} , Задержка): $A^+ = \{\min(v_{ij})\}$, $A^- = \{\max(v_{ij})\}$

Результаты расчетов (веса $w_{\text{PDR}=0,35}$, $w_{\text{energy}=0,30}$, $w_{\text{RSSI}=0,20}$, $w_{\text{latency}=0,15}$): $C_{\text{LoRaWAN}} = 0,681$; $C_{\text{ZigBee}} = 0,742$ (максимум \rightarrow ранг 1); $C_{\text{WiFi}} = 0,387$; $C_{\text{BLE}} = 0,523$

Многокритериальный анализ с применением метода TOPSIS показал: ZigBee обеспечивает наилучший баланс критериев с интегральным показателем $C_i = 0,742$. LoRaWAN занимает второе место (0,681), демонстрируя превосходство в энергоэффективности (38,6 дней автономности) при приемлемой надежности (96,3 % PDR). BLE получил оценку 0,523, уступая лидерам по надежности (91,8 % PDR) и стабильности сигнала ($\sigma = 6,8$ дБ). WiFi показал наименьший показатель 0,387 из-за критически высокого энергопотребления (автономность 5,9 дней), несмотря на минимальную задержку (52 мс).

Анализ чувствительности показал устойчивость ранжирования для ZigBee и LoRaWAN. При увеличении веса задержки $w_{\text{latency}} > 0,40$ WiFi перемещается на вторую позицию. При приоритизации энергоэффективности $w_{\text{energy}} > 0,50$ LoRaWAN становится абсолютным лидером ($C_{\text{LoRa}} > 0,812$). Сценарный анализ: для малых систем до 20 узлов в объеме до 30 м² ZigBee обеспечивает оптимальное решение; для распределенных систем с расстояниями более 50 м (крупные теплицы > 500 м²) предпочтительным становится LoRaWAN. Гибридные архитектуры, сочетающие ZigBee для локальных кластеров с LoRaWAN для межкластерной связи, представляют перспективное направление для масштабируемых систем мониторинга.

Создана сеть для 20 фитотронных камер с использованием ESP32 NodeMCU (WiFi-модули Xtensa LX6 240 МГц, 520 КБ SRAM) и датчиков DHT11 (точность $\pm 2^\circ\text{C}$ и $\pm 5\%$ RH) и YL-38/YL-69 (аналоговый емкостной датчик влажности почвы). Данные передаются на сервер через Wi-Fi сеть IEEE 802.11n (2,4 ГГц). Используется постоянное питание 5 В 2 А через ИБП. Планируется разработать GUI на базе web-интерфейса (Flask/Django). Текущий интерфейс — CLI с выводом JSON и сохранением в Excel (библиотека openpyxl: timestamp, nodeId, temperature, humidity, soil_{moisture}). Эксперименты с динамическим изменением климата выявили влияние скорости изменения T и RH на стабильность связи. При реализации суточного цикла с периодом 2 часа (синусоидальная модуляция: $T(t) = 26 + 6 \times \sin(2\pi \times t / 7200)$, $RH(t) = 72,5 + 12,5 \times \sin(2\pi \times t / 7200)$), моделирующего естественные флуктуации (фотопериод 16/8 ч), наблюдалось периодическое изменение RSSI с амплитудой до 4 дБ для технологий в диапазоне 2,4 ГГц (WiFi и BLE). Пик деградации RSSI совпадал с максимумом T и RH. LoRaWAN продемонстрировал минимальную зависимость RSSI с амплитудой флуктуаций 1,2 дБ, под-

Таблица 5.
Результаты многокритериального анализа методом TOPSIS и рекомендации по применению

Технология	Близость к идеалу	Ранг	Оптимальная область применения	Количество узлов	Периодичность опроса
ZigBee	0.742	1	Компактные камеры, mesh-топология	10–50	1–10 мин
LoRaWAN	0.681	2	Распределенные системы, автономность	5–500	5–60 мин
BLE	0.523	3	Локальный мониторинг, интеграция с mobile	5–20	1–5 мин
WiFi	0.387	4	Системы с внешним питанием, потоковые данные	5–30	<1 мин

Примечание: Близость к идеалу C_i рассчитана по методу TOPSIS (Формула 6) с весами критериев: надежность $w_{PDR} = 0,35$, энергоэффективность $w_{energy} = 0,30$, стабильность RSSI $w_{RSSI} = 0,20$, задержка $w_{latency} = 0,15$. Рекомендации основаны на комплексном анализе технических характеристик и результатов экспериментальных измерений. Периодичность опроса указывает диапазон интервалов передачи, при которых технология демонстрирует оптимальное соотношение производительности и автономности.

тверждая преимущества субгигагерцового диапазона (868 МГц). Корреляционный анализ временных рядов RSSI и температуры выявил задержку реакции уровня сигнала около 8–12 минут, что соответствует тепловой инерции металлических конструкций камеры ($\tau_{thermal} \approx 10$ мин). Спектральный анализ флуктуаций RSSI (БПФ с окном Хэннинга, $N = 1024$) показал доминирующие периодические компоненты на частотах $f_1 = 0,00111$ Гц и $f_2 = 0,000139$ Гц, соответствующих циклам работы систем вентиляции (15 мин) и нагрева (2 ч) камеры, что указывает на значимость электромагнитной совместимости при проектировании систем мониторинга.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование производительности четырех беспроводных технологий в условиях климатической камеры обеспечило количественную базу для обоснованного выбора оптимального решения при проектировании систем распределенного мониторинга в фитотронах и теплицах. Разработанный математический аппарат, включающий семь ключевых формул для расчета коэффициента доставки пакетов (PDR), бюджета линии связи, моделирования затухания сигнала в помещении, энергопотребления узла, времени автономной работы, пропускной способности канала и многокритериального анализа TOPSIS, обеспечивает комплексную количественную основу для оценки беспроводных технологий IoT.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bukhtoyarov V.V., Nekrasov I.S., Timofeenko I.A., Gorodov A.A., Kartushinskii S.A., Trofimov Y.V., Lishik S.I. Hybrid Digital Twin for Phytotron Microclimate Control: Integrating Physics-Based Modeling and IoT Sensor Networks // AgriEngineering. — 2025. — Vol. 7, No. 9. — P. 285. DOI: 10.3390/agriengineering7090285

2. Ferentinos K.P., Katsoulas N., Tzounis A., Kittas C., Bartzanas T. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment // Biosystems Engineering. — 2017. — Vol. 153. — P. 70–81. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.018

3. Pawlowski A., Guzman J.L., Rodriguez F., Berenguel M., Sánchez J., Dormido S. Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control // Sensors. — 2009. — Vol. 9, No. 1. — P. 232–252. DOI: 10.3390/s90100232

4. Ahonen T., Virrankoski R., Elmusrati M. Greenhouse monitoring with wireless sensor network // IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications. — 2008. — P. 403–408. DOI: 10.1109/MESA.2008.4735744

5. Hosny K.M., El-Hady W.M., Samy F.M. Technologies, protocols, and applications of internet of things in greenhouse farming: A survey of recent advances // Information Processing in Agriculture. — 2025. — Vol. 12, No. 1. — P. 91–111. DOI: 10.1016/j.inpa.2024.04.002

6. Kaya T., Altintas O., Yilmaz E., Ozturk M. Intelligent Environmental Control in Plant Factories: Integrating Sensors, Automation, and AI for Optimal Crop Production // Food and Energy Security. — 2025. — Vol. 14, No. 1. — e70026. DOI: 10.1002/fes3.70026

7. Predictabledesigns. Comparison of Wireless Technologies: Bluetooth, WiFi, BLE, Zigbee, Z-Wave, 6LoWPAN, NFC, WiFi Direct, GSM, LTE, LoRa, NB-IoT, and LTE-M [Электронный ресурс]. — URL: https://predictabledesigns.com/wireless_technologies_bluetooth_wifi_zigbee_gsm_lte_lora_nb-iot_lte-m/ (дата обращения: 05.10.2025) Minew. LoRaWAN vs Zigbee: What is the Difference? [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: <https://www.minew.com/lorawan-vs-zigbee/> (дата обращения: 05.10.2025)

8. Park D.H., Kang B.J., Cho K.Y., Shin C.S., Cho S.E., Park J.W., Yang W.M. A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network // Wireless Personal Communications. — 2011. — Vol. 56, No. 1. — P. 117–130. DOI: 10.1007/s11277-009-9881-2

9. TEKTELIC. LoRaWAN vs Zigbee for Your IoT Project [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: <https://tektelic.com/expertise/lorawan-vs-zigbee/> (дата обращения: 05.10.2025)

10. DusunIoT. Zigbee vs BLE vs Bluetooth Mesh, Choosing the Best or Combining for IoT Excellence [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://www.dusuniot.com/blog/zigbee-vs-bluetooth-le-and-mesh/> (дата обращения: 05.10.2025)
11. Ivlev V., Kneppo P., Bartak M. Application of an integrated multi-criteria decision making AHP-TOPSIS methodology for ETL software selection // SpringerPlus. — 2016. — Vol. 5, No. 1. — P. 263. DOI: 10.1186/s40064-016-1879-x
12. Chamara N., Bai Y., Seetharam K., Jagadish S.V.K., Gowda P.H. Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future // Agricultural Systems. — 2022. — Vol. 203. — 103497. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103497
13. Mansoor U., Shahid M.A., Ahmad T. Energy Efficiency analysis of LoRa and ZigBee protocols in Wireless Sensor Networks // Journal of Engineering Research. — 2021. — Vol. 9, No. 2. — P. 154–167. DOI: 10.36909/jer.v9i2.9156
14. Engmann F., Katsriku F.A., Abdulai J.D., Adu-Manu K.S., Banaseka F.K. Network Performance Metrics for Energy Efficient Scheduling in Wireless Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2021. — Vol. 2021. — P. 9635958. DOI: 10.1155/2021/9635958
15. Zhang F., Li D., Li G., Xu S. New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications, and prospects // Frontiers in Plant Science. — 2024. — Vol. 15. — 1490801. DOI: 10.3389/fpls.2024.1490801
16. Rashid M.T., Bari B.S., Yusoff M.Z., Kamarudin L.M., Khan N. A comprehensive review on smart greenhouse farming: prospectus and challenges // Frontiers in Plant Science. — 2025. — Vol. 16. — 1587869. DOI: 10.3389/fpls.2025.1587869

© Шмелев Олег Сергеевич (shmelyo.oleg@yandex.ru); Бутаков Виталий Алексеевич (k-s-a_k-s-a@mail.ru);

Трифонов Сергей Викторович (trifonov_sergei@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»