

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ИНТЕНСИВНЫХ САДОВ

В.В. Самойленко

Владимир Валерьевич Самойленко (ORCID 0000-0003-4703-9642)

Ставропольский государственный аграрный университет, пер. Зоотехнический, 12, Ставрополь, 355000, Россия

E-mail: samoilenko.vv@stgau.ru

Технологической платформой Интернета вещей служат беспроводные сенсорные сети (далее - БСС), применяемые для мониторинга состояния почвы, растений и управления параметрами технологического процесса выращивания сельскохозяйственных культур. В системах управления выращивания фруктовых деревьев применение БСС способствует эффективному выращиванию «суперинтенсивных» садов. Внедрение технологий точного земледелия, в том числе систем капельного орошения с автоматическим управлением на основе данных влажности почвы снижают расход воды до 30-40% и удобрений до 15-25% по сравнению с традиционными методами полива. Несмотря на многочисленные исследования в области проектирования сетей, научный пробел остается в отсутствии формализованных методов поиска оптимального числа узлов, которые позволяли бы достигать баланса между показателями надежности и совокупной стоимости сети. В статье предлагается методика определения оптимального количества узлов в БСС, которая учитывает ключевые экономические и технические параметры при мониторинге садов. Для решения задачи оптимизации количества узлов предложен алгоритм, интегрирующий технические характеристики радиопередатчика, режимы его функционирования, технологические параметры выращивания плодовых культур и внешние воздействия. Предложенный методический подход позволяет осуществлять экономически оптимизированный расчет количества узлов БСС на основе интегральной оценки энергопотребления узлов, дальности радиосвязи и совокупных эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, оптимизация топологии, интенсивные сады, точное земледелие, энергопотребление, экономическая эффективность, мониторинг сельскохозяйственных культур, алгоритм оптимизации, эксплуатационные затраты, радиосвязь.

ECONOMIC AND MATHEMATICAL OPTIMIZATION OF WIRELESS SENSOR NETWORK STRUCTURE FOR INTENSIVE ORCHARDS

V.V. Samoylenko

Vladimir V. Samoylenko (ORCID 0000-0003-4703-9642)

Stavropol State Agrarian University, Zootekhnicheskyy lane, 12, Stavropol, 355000, Russia

E-mail: samoilenko.vv@stgau.ru

The technological platform for the Internet of Things are wireless sensor networks (WSNs), used for monitoring the conditions of soil, plants, and managing technological processes in crop cultivation. In the management systems for intensive orchards, the application of WSNs facilitates the effective cultivation of "super-intensive" orchards. The adoption of precision farming technologies, including automated drip irrigation systems controlled by soil moisture data, reduces water consumption by 30-40% and fertilizer use by 15-25% compared to traditional irrigation methods. Despite extensive research in the field of network design, a scientific gap persists in the lack of formalized methods for determining the optimal number of sensor nodes that would achieve a balance between network reliability and total cost. This article proposes a methodology for determining the optimal number of nodes in a WSN for orchard monitoring, which considers key economic and technical parameters. To solve the node optimization task, an algorithm is proposed

that integrates the technical characteristics of the radio transmitter, its operational modes, the technological parameters of fruit crop cultivation, and external factors. The proposed methodological approach enables an economically optimized calculation of the number of WSN nodes based on an integrated assessment of node energy consumption, radio communication range, and total operational costs.

Keywords: Wireless Sensor Network (WSN), topology optimization, intensive orchards, precision agriculture, energy consumption, cost-effectiveness, crop monitoring, optimization algorithm, operational costs, radio communication.

Для цитирования:

Самойленко В.В. Экономико-математическая оптимизация структуры беспроводных сенсорных сетей для интенсивных садов. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2025. № 04(66). С. 136-145. DOI: 10.6060/ivecofin.2025664.753

For citation:

Samoylenko V.V. Economic and mathematical optimization of wireless sensor network structure for intensive orchards. *Ivecofin*. 2025. N 04(66). P. 136-145. DOI: 10.6060/ivecofin.2025664.753 (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Индустрия садоводства является одной из самых динамично развивающихся в области агропромышленного комплекса. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) общая площадь садов в мире составляет 65-70 млн га [1]. В Российской Федерации общая площадь всех видов садов составляет более 800 тыс. га. с ежегодным ростом 20-20 тыс. га [1]. Существенная разница между экстенсивным (урожайность 12-14 т/га) и интенсивным садоводством (урожайность: 40-60 т/га) заставляет агропромышленные предприятия реализовывать комплекс мероприятий по внедрению высокотехнологичных решений с целью получения максимального урожая высококачественной продукции с единицы площади при минимальных затратах труда и ресурсов.

Активное внедрение парадигмы Интернета вещей (IoT) [2, 3] позволяет эффективно использовать все преимущества систем точного земледелия и автоматизированного садоводства. Рынок сельскохозяйственного IoT быстро растет и по прогнозам [4] достигнет 40 миллиардов долларов к 2034 г., в основном за счет внедрения беспроводных сенсорных сетей (БСС). Внедрение цифровизации в сельскохозяйственное производство позволяет в режиме реального времени собирать критически важные данные о состоянии почвы, растений и окружающей среды. Технологический основой реализации систем точного земледелия являются БСС. Внедрение сенсорных сетей позволяет оптимизировать расход ресурсов (воды, удобрений), повысить урожайность и качество продукции, а также снизить количество рабочей силы за счет практически полной автоматизации производства.

БСС находят различные применения для мониторинга и анализа данных, в том числе:

Для автоматизации технологических процессов при выращивании растений в садах. Авторы статьи [5] представили результаты применения интеллектуальной системы мониторинга и управления на базе IoT для комплексного мониторинга и управления фруктовым садом, прогнозирования болезней и вредителей, а также управления орошением и внесением удобрений [6]. Предложенные технические решения позволили снизить расход фунгицидов на 33% и пестицидов до 50%, что улучшило качество яблок с точки зрения остаточных химических веществ. Использование предложенной системы управления позволило снизить производственные затраты и повысить количество и качество урожая за счет своевременного предупреждения и практических рекомендаций по опрыскиванию, орошению и внесению удобрений. Активное применение БСС нашли в системах поддержки принятия решений для мониторинга и автоматизации процессов орошения садов. В исследованиях [7, 8] предложена сенсорная сеть, реализующая стратегию равномерности распределения орошения на основе зонирования с использованием нормализованного вегетационного индекса (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index) и объемной электропроводности почвы. Экспериментальные исследования, проведенные в течение четырех вегетационных сезонов (2019-2022) показали значительное сокращение расхода воды и электроэнергии с одновременным повышением урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. Еще одна работа в этой области посвящена разработке и исследованию интеллектуальной системы орошения для садов и яблонь на основе нечеткой логики и БСС [9]. Авторы предложили оригинальный алгоритм управ-

ления системой орошения, реализующую оптимальный полив и точную дозировку воды, которые позволяют реализовать ресурсосберегающую концепцию получения качественного урожая.

Для комплексной борьбы с вредителями. Предложенная в исследовании [10] система включает в себя физический прототип интеллектуальной ловушки для насекомых, оснащенной встроенными вычислениями для обнаружения и классификации вредителей. Реализация предложенной концепции позволила повысить эффективность выращивания плодовых культур. Для борьбы с муравьями-листорезами авторами разработана оригинальная концепция системы предупреждения на основе ББС [11]. Система реализована на базе энергоэффективных модулей LoRa. Использование системы позволило проводить эффективный мониторинг вредителей при выращивании манговых деревьев. Экономический эффект составил более 6 тыс. долларов США при использовании для 100 деревьев.

Для анализа физиологического состояния растений. Внедрение современных информационных систем [12] позволило разработать эффективную систему зондирования физиологии урожая с использованием периферийных вычислений (CPSS - Computer Peripheral Subsystem) для мониторинга солнечных ожогов яблок. Основной целью данного исследования была разработка и полевая оценка модели сегментации плодов с использованием нейронной сети независимой от сорта и цвета маски (R-CNN) и алгоритма оценки FST совместимого с периферийными вычислениями.

Важным аспектом внедрения ББС является учет экономической эффективности, в среднем рентабельность производства повышается на 15-25% за счет оптимизации ресурсов и увеличения урожайности. Капитальные затраты на оборудование составляют 15-25 тыс. руб./га, срок окупаемости – 1-2 сезона [13]. Экономическая целесообразность и потенциал повышения устойчивости сельского хозяйства посредством интеграции Интернета вещей в г. Джизане (Саудовская Аравия) рассмотрены в работе [14]. Комплексное исследование [15] внедрения БПЛА для задач зондирования показало возможность снижения эксплуатационных расходов на 30–50%. В работе использовались модели экономического анализа, такие как анализ затрат и выгод (СВА), возврат инвестиций (ROI) и анализ стоимости жизненного цикла (LCCA).

Исследователи в работе, посвященной экономическим и экологическим преимуществам цифровых сельскохозяйственных технологий в растениеводстве [16, 17], выявили существенный

вклад цифровых технологий в пяти ключевых категориях: технологии регистрации и картирования (RMT - Recording and Mapping Technologies), технологии управления и контролируемого движения в сельском хозяйстве (CTF - Controlled Traffic Farming), технологии переменного расхода (VRT - Variable Rate Technologies), роботизированные системы или интеллектуальные машины (RSSM - Robotic Systems or Smart Machines) и информационные системы управления фермерским хозяйством (FMIS - Farm Management Information Systems). Можно выделить следующие преимущества применения вышеописанных технологий:

- совместное применение RMT и СТ позволило сократить использование удобрений до 80% при применении RMT и CTF, в то время как VRT продемонстрировала 60% снижение использования удобрений и до 80% снижение использования пестицидов;
- VRT также показала увеличение урожайности на 62%;
- RSSM смогла сократить трудозатраты на 97% и расход дизельного топлива на 50%;
- использование FMIS повысило урожайность на 10–15%, способствуя одновременному сокращению затрат на рабочую силу и производственные ресурсы, что подтверждает важнейшую роль интегрированных цифровых решений в повышении эффективности и устойчивости сельского хозяйства;
- с экологической точки зрения, технология VRT стала важным фактором экологической устойчивости, продемонстрировав экономию воды от 20 до 50% в виноградниках и грушевых садах, а также значительное сокращение выбросов парниковых газов.

К основным преимуществам внедрения ББС в отрасль является значительное сокращение расхода воды и электроэнергии с одновременным повышением урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. Внедрение систем поддержки принятия решений на основе собранных данных позволяет применять прогностические модели для прогнозирования урожайности, контроля роста растений и оптимизации технологических процессов.

Несмотря на существенные преимущества применения вышеописанной технологии, существуют ряд проблем и ограничений:

- *Обеспечение бесперебойным электропитанием.* Несмотря на высокую энергетическую эффективность современных сенсорных узлов и алгоритмов маршрутизации при длительной эксплуатации и повышенных нагрузках элементы питания выходят из строя и требуют производства обслуживания (замены батареи),

что является затруднительным при большом количестве узлов и удаленных расстояниях.

- *Стоимость.* Первоначальные инвестиции в оборудование и развертывание сети могут быть существенными.
- *Надежность связи.* Радиосигнал может ослабевать из-за густой растительности, рельефа местности или помех. Выход из строя одного сенсорного узла может за собой отказ участка сети или полностью отключить участки.
- *Безопасность данных.* Беспроводные сенсорные сети являются публичными сетями, к которым может иметь доступ третье лицо, в связи с чем защита сети от несанкционированного доступа и кибератак также является актуальной задачей.

Каждая из рассмотренных выше работ вносит вклад в решение задачи оптимизации выбора структуры сети и экономически-обоснованного выбора количества и размещения сенсорных узлов на исследуемом объекте. Тем не менее, общим недостатком рассмотренных исследований является отсутствие единого системного подхода к расчету необходимого количества сенсорных узлов, обеспечивающих заданные параметры надежности сети, с учетом анализа экономической эффективности. Целью исследования является разработка нового методического подхода к экономически обоснованному расчету количества узлов БСС, применяемой для мониторинга садов, учитывающего энергопотребление узлов, расстояние радиопередачи и затраты на функционирование сети.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С учетом поставленной цели важным условием при проведении исследований стала конкретизация исходных данных (условий), к основным были отнесены следующие:

Условия, предоставляемые аграрной надсистемой: размеры поля для выращивания плодовых деревьев, как объекта мониторинга; выделяемый участок земли под 1 растение, контролируемый сенсором (расстояния между деревьями); суточная частота сбора данных каждым датчиком; продолжительность срока вегетации растения за сезон.

Технические параметры ретрансляционных узлов в составе БСС: тип модемов связи и источников питания (ИП); характеристики модема связи (мощности передачи и приема сигналов, токи потребления энергии, вид модуляции, несущая частота); режимы формирования, передачи и обработки данных.

Физические характеристики среды распространения сигналов: варианты межузловых расстояний связи; значение коэффициента глубины зами-

раний сигнала (К-фактор), определяемый отражающей способностью растений; показатели влияния погодных условий на качество радиосвязи.

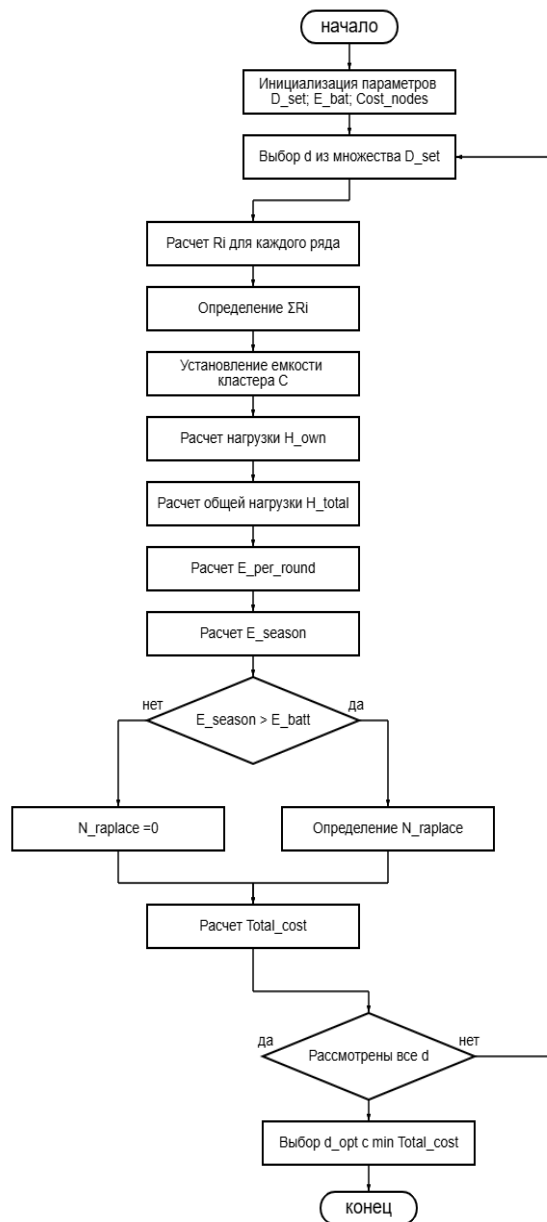
Экономические факторы: стоимость ретрансляционных узлов и сенсоров сбора данных; стоимость резервных ИП и работ по замене отказавших элементов в узлах.

С учетом полученных исходных данных предложен обобщенный алгоритм (рис. 1) проведения исследования:

1. Выбор варианта межузловых расстояний d .
2. Расчет числа ретрансляторов в линейной подсистеме БСС по маршруту передачи пакетов данных R_i .
3. Определение количества ретрансляторов ΣR_i на поле с i рядами.
4. Установление емкости кластера, т.е. числа сенсоров, подключенных к одному ретранслятору.
5. Расчет информационной нагрузки на ретранслятор от кластера сенсоров в течении суток и сезона мониторинга.
6. Расчет общей информационной нагрузки на ретранслятор от предыдущих ретрансляторов и кластера сенсоров.
7. Расчет энергетических потерь сенсорного узла за раунд связи при попытках передачи одного пакета данных.
8. Расчет энергетических потерь каждого из сенсорных узлов в цепочке линейной БСС за сезон мониторинга саженцев.
9. Определение числа замен узловых ИП в случае, если энергетические потери за вегетационный период превышают запас энергии батареи.
10. Расчет экономических затрат на приобретение и эксплуатацию БСС с учетом стоимости всех узлов и затрат на их восстановление при необходимости замены разрядившихся батарей.
11. Выбор оптимального варианта размещения узлов в составе системы мониторинга растений (с учетом межузловых расстояний), при котором минимизируются суммарные финансовые затраты на БСС.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера условий аграрной надсистемы рассмотрим поле размером 1 км на 1 км для выращивания саженцев, расположенных по одному на 1 м². Система мониторинга предусматривает суточный контроль влажности каждого саженца 4 раза в сутки. Средний период вегетации плодовых деревьев, определяемый как интервал между распусканием вегетативных почек весной и естественным листопадом осенью, варьирует в зависимости от вида, сортовых особенностей и климатических условий региона возделывания и составляет период от 150 до 200 суток [18]. Для расчета был взят усредненный показатель: 180 суток.



ПСЕВДО-КОД АЛГОРИТМА.

Оптимизация структуры БСС для мониторинга агрообъектов
INPUT DATA:

$D_set = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ // Множество вариантов межузловых расстояний

L_field, W_field // Длина и ширина поля

N_rows // Количество рядов

$N_sensors_total$ // Общее количество сенсоров

P_data, T_round // Параметры передачи данных

E_batt // Запас энергии батареи

$Cost_sensor, Cost_relay$ // Стоимость радиопередатчиков

$Cost_replacement$ // Стоимость замены ИП

OUTPUT DATA:

d_opt // Оптимальное межузловое расстояние

min_cost // Минимальные суммарные затраты

$optimal_configuration$ // Оптимальная конфигурация сети

START

$min_cost \leftarrow \infty$

$d_opt \leftarrow 0$

ДЛЯ КАЖДОГО d ИЗ D_set ВЫПОЛНЯТЬ

// Блок 1: Расчет структурных параметров

$R_i \leftarrow \text{CEIL}(L_field / d)$ // Число ретрансляторов в ряду i

$\Sigma R_i \leftarrow R_i \times N_rows$ // Общее число ретрансляторов

$C \leftarrow N_sensors_total / \Sigma R_i$ // Емкость кластера

// Блок 2: Расчет информационной нагрузки

$H_own \leftarrow C \times P_data \times T_season$ // Нагрузка от кластера сенсоров

$H_relay \leftarrow \Sigma H_previous$ // Нагрузка от предыдущих ретрансляторов

$H_total \leftarrow H_own + H_relay$ // Общая нагрузка

// Блок 3: Расчет энергетических потерь

$E_per_round \leftarrow f(P_tx, P_rx, T_round)$ // Энергетические потери за раунд связи

$E_season \leftarrow E_per_round \times N_rounds \times \Sigma R_i$ // Потери за сезон

// Блок 4: Анализ надежности и затрат

IF $E_season > E_batt$ TO

$N_replace \leftarrow \text{COUNT}(E_node > E_batt)$ // Число замен ИП

ELSE

$N_replace \leftarrow 0$

END ELSE

▷ Блок 5: Расчет экономических показателей

$Cost_acquisition \leftarrow \Sigma R_i \times Cost_relay + N_sensors_total \times Cost_sensor$

$Cost_maintenance \leftarrow N_replace \times Cost_replacement$

$Total_cost \leftarrow Cost_acquisition + Cost_maintenance$

▷ Блок 6: Выбор оптимального варианта

IF $Total_cost < min_cost$ THEN

$min_cost \leftarrow Total_cost$

$d_opt \leftarrow d$

END ELSE

END

FINISH

Рисунок 1. Алгоритм и псевдо-код проведения исследований
Figure 1. Research Algorithm and Pseudocode

Для проведения аналитических исследований был выбран трансивер CC2500. Данный радиопередатчик – это низковольтный трансивер от компании Texas Instruments, предназначенный для работы в частотном диапазоне 2.4 ГГц. Его ключевыми особенностями являются низкое энергопотребление, что делает его идеальным для устройств с батарейным питанием, высокая интеграция (включая встроенный поддержку протоколов пакетной передачи, шифрование и коррекцию ошибок), а также программно-настраиваемая скорость передачи данных (до 500 кбит/с) и выходная мощность. Благодаря малым габаритам и простому интерфейсу управления, основанному на

SPI, CC2500 широко применяется в системах беспроводных датчиков объектов IoT.

Параметры режима частотной модуляции сигналом и регулировкой мощности представлены в табл. 1.

Для передачи пакета данных за один раунд связи расходуется энергия узла $E_{round}^{(L)}$, которая зависит от вычислительных и коммуникационных процессов в узле ретрансляции, а также от состояния канала между узлами на расстоянии d_i и вероятности битовой ошибки $p_{ber}^{(L)}$ [19]:

$$E_{round}^{(L)}(d_i) = [P_{tx(L)}^{in} T_P + P_{idl} T_{dc} + P_{rx} T_A + P_{set} T_{set}] \times [1 - p_{ber}^{(L)}(d_i)]^{(M_P + M_A)} \quad (1)$$

где $P_{tx(L)}^{in}$, $P_{idl} = 4,5 \text{ mW}$, $P_{rx} = 39,9 \text{ mW}$, $P_{set} = 22,2 \text{ mW}$ - мощности потребления энергии в режимах передачи, ожидания, приема и переходного состояния;

$T_P = 1,024 \text{ ms}$ - длительность пакета данных;

$T_{dc} = 0,2 \text{ ms}$ - продолжительность проверки пакета;

$T_A = 0,384 \text{ ms}$ - длительность пакета с результатом автопроверки данных;

$T_{set} = 0,1 \text{ ms}$ - защитный временной интервал для завершения переходных процессов; длины пакетов данных $M_P = 256$ бит и автопроверки $M_A = 96$ бит.

На рис. 2 представлены графики зависимости энергопотерь узла от межузловых расстояний при различных градациях L

выходной мощности передатчика и глубине замираний сигнала $K=20$ [20].

Результаты промежуточных расчетов технических параметров БСС в соответствии представленным выше алгоритмом отражены в табл. 2.

В качестве источника энергии для узлового трансивера CC2500 предложена литиевая батарея CR2032 с емкостью $C=220 \text{ mAh}$ и начальным запасом энергии $E_{bat}^{CR2032} = 2376 \text{ J}$.

Только при межузловом расстоянии $d_1=20 \text{ м}$ емкости данной батареи достаточно для обеспечения работоспособности всех ретрансляционных узлов в течении 180 суток. При других вариантах выбора дистанций связи между узлами узловые ИП разряжаются до окончания сезона мониторинга поля, особенно это касается последних узлов в линейных БСС. Данную ситуацию отражают табл. 3-5.

Для обеспечения надежности функционирования БСС для межузлового расстояния 40 м. потребуется замена 150 батарей (6*25) в процессе эксплуатации сети.

Таблица 1. Градации и значения выходной и потребляемой мощностей передатчика CC2500
Table 1. Gradations and Values of the Output and Consumed Power of the CC2500 Transmitter

Номер градации мощности L	1	2	3	4	5	6	7
Выходная мощность передатчика $P_{TX}^{(L)}$, mW	1.26	1.0	0.79	0.63	0.50	0.40	0.32
Потребляемая мощность передатчика $P_{tx(L)}^{in}$, mW	64.5	63.6	61.2	58.5	54.9	51.6	48.3

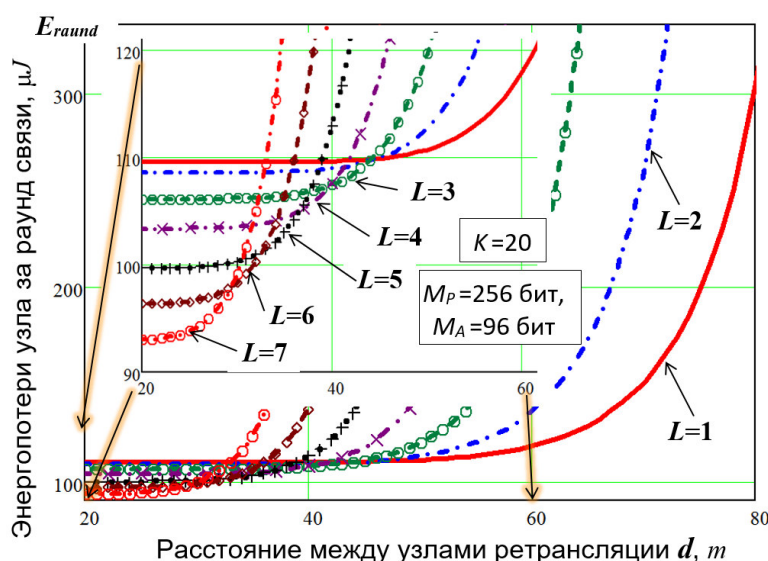


Рисунок 2. Графики зависимости энергетических потерь узла от межузловых расстояний при различных градациях L выходной мощности передатчика
Figure 2. Dependence of Node Energy Loss on Inter-node Distances for Different L Gradations of Transmitter Output Power

Таблица 2. Расчетные технические параметры БСС, развернутой на поле (размером 1 га) для выращивания деревьев (по одному на 1 м²), с модемами CC2500 при условии распространения радиоволн K=20

Table 2. Calculated technical parameters of the WSN deployed in a field (1 ha in size) for tree cultivation (one tree per 1 m²), using CC2500 modems under the radio wave propagation K=20

Наименования параметров	Расстояния между узлами			
	20 м	40 м	60 м	80 м
Количество ретрансляторов в линейной подсистеме БСС, шт.	50	25	17	13
Количество кластеров (узлов ретрансляции) на поле, шт.	2500	625	289	169
Количество датчиков в кластере, шт.	400	1600	3600	6400
Энергетические потери узла за раунд связи, мкДж	93,016	107,49	117,859	303,892
Максимальные энергетические потери крайних узлов за сезон (4 пакета в сутки от каждого датчика в течении 180 дней), Дж	1340	3095	5083	17504
Число резервных источников питания для восстановления отказавших узлов, шт.	0	150	204	598

Таблица 3. Энергетические затраты узлов в линейной БСС в течении 180 суток (расстояние: 40 м)

Table 3. Energy Consumption of Nodes in a Linear WSN Over 180 Days (Distance: 40 m)

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Е _к , Дж	123,8	247,6	374,4	495,1	619	748,8	866,6	990,2	1114	1238	1362	1498	1609
Замены ИП	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

k	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Е _к , Дж	1733	1857	1980	2105	2228	2355	2476	2533	2723	2847	2971	3095
Замены ИП	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Таблица 4. Энергетические затраты узлов в линейной БСС в течении 180 суток (расстояние: 60 м)

Table 4. Energy Consumption of Nodes in a Linear WSN Over 180 Days (Distance: 60 m)

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Е _к , Дж	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
Замены ИП	0	0	0	0	0	0	0	1	1

k	10	11	12	13	14	15	16	17
Е _к , Дж	3050	3355	3660	3965	4270	4575	4880	5081
Замены ИП	1	1	1	1	1	1	2	2

Таблица 5. Энергетические затраты узлов в линейной БСС в течении 180 суток (расстояние: 80 м)

Table 5. Energy Consumption of Nodes in a Linear WSN Over 180 Days (Distance: 80 m)

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Е _к , Дж	1400	2800	4201	5601	7002	8402	9802	11203	12603	14003	15404	16804	17504
Замены ИП	0	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6	6	7

Для обеспечения надежности функционирования БСС для межузлового расстояния 60 м. потребуется замена 204 батарей ($8 \cdot 17 + 2 \cdot 2 \cdot 17$) в процессе эксплуатации сети.

Для обеспечения надежности функционирования БСС для межузлового расстояния 80 м. потребуется замена 598 батарей ($13 \cdot (2 + 4 + 3 + 8 + 10 + 12 + 7)$) в процессе эксплуатации сети.

Результатом исследований стали определенные аналитические значения финансовых затрат на приобретение и эксплуатацию БСС (табл. 6) с учетом полученных данных о количестве сенсорных узлов, их стоимости и финансовых затрат на обслуживание (замена источников питания в процессе эксплуатации).

Таблица 6. Расчетные значения финансовых затрат на приобретение и эксплуатацию БСС
Table 6. Calculated values of financial costs for the acquisition and operation of the WSN

Наименования параметров	Расстояния между узлами			
	20 м	40 м	60 м	80 м
Суммарная стоимость узлов ретрансляции (по стоимости 2 тыс. руб. за единицу), тыс. руб.	5000	1250	578	338
Стоимость работ и материала по замене отказавших источников питания (из расчета 1 т.руб. на обслуживание одного узла), тыс. руб.	0	150	204	598
Общие затраты на приобретение и эксплуатацию БСС в течении сезона, тыс. руб.	5000	1400	782	936

Исходя из полученных данных наиболее оптимальным с экономической точки зрения является выбор варианта с межузловым расстоянием $d_3=60$ м, так как обеспечивает минимальные финансовые затраты.

ДИСКУССИЯ

В настоящее время отсутствует системная методология выбора количества беспроводных сенсорных узлов на базе которых реализуются БСС, используемых в индустрии сельского хозяйства. Различные исследования [5, 6] за основу выбора радиопередающих узлов предлагают выбирать их на основании максимально допустимого расстояния (границы радиосвязи каждого из узлов). Ключевым недостатком данного подхода является снижение надежности в целом и повышенное энергопотребление узлов, связанное с повторной передачей пакетов данных из-за нестабильного приема и воздействия внешних факторов. Полученные научные результаты [12, 13], связанные с экономическим обоснованием применения IoT в индустрии Agriculture 4.0, также не учитывают оптимальное количество узлов связи, а также расход на их содержание, связанное с поддержанием в рабочем состоянии источников питания.

Интерпретация полученных в исследовании результатов позволяет сделать вывод о верности выбора исходных параметров, включающих условия, предоставляемые аграрной надсистемой, технические параметры ретрансляционных узлов в составе БСС, физические характеристики среды распространения сигналов, экономические факторы. Взаимосвязь данных факторов позволила получить алгоритм (рис. 1), который можно при-

менить для подобных исследований, но учитывающих другую совокупность факторов или иные их значения. Предложенная методика может также быть применена для иных радиомодулей. В представленном исследовании в качестве примера для аналитического расчета был взят радиомодуль CC2500 и исходные данные среднестатистического интенсивного сада для выращивания плодовых деревьев.

Последовательная реализация алгоритма, учитывающая зависимости энергетических затрат от межузловых расстояний при различных градациях выходной мощности передатчика, позволила найти оптимальное количество радиопередатчиков (в приведенном примере для расстояний 20, 40, 60, 80 метров). На основании полученных данных возможно определить частоту замены источников питания с учетом количество кластеров (узлов ретрансляции) на поле, энергопотеря узла за раунд связи, максимальных энергетических потерь крайних узлов за сезон (в приведенном примере 4 пакета в сутки от каждого датчика в течении 180 дней).

Итоговые расчеты, учитывающие суммарную стоимость узлов ретрансляции, стоимость работ и комплектующих при замене отказавших источников питания позволили получить расчет общих затраты на приобретение и эксплуатацию БСС в течении сезона. Данный аналитический расчет позволяет сделать оптимальный выбор количества сенсорных узлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый методический подход к экономически обоснованному расчету количества узлов БСС основан на многофакторном учете таких характеристик, как энергопотребление узлов,

расстояние радиопередачи и затраты на функционирование сети. С экономической точки зрения, внедрение этих разработок создает основу для перехода от традиционного, ресурсоемкого сельского хозяйства к высокодоходному точному земледелию. Это позволяет оптимизировать затраты на выращивание растений в садах, минимизировать потери урожая и повысить эффективность агропромышленного производства. Несмотря на первоначальные инвестиции, долгосрочный экономический эффект проявляется в значительном

росте рентабельности, производительности и общей устойчивости агробизнеса. Таким образом, развитие данного направления является не только технологическим прорывом, но и стратегической инвестицией в обеспечение продовольственной безопасности и повышение глобальной конкурентоспособности российского сельского хозяйства.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный статистический ресурс FAO (FAOSTAT) n.d. <https://www.fao.org/faostat>.
2. Астраханцева И.А., Горев С.В., Астраханцев Р.Г. Системный подход к анализу фрактальной природы сложных технических систем. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2023. № 3(57). С. 87-97. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.657. EDN PSPGBG.
3. Татариннов К.А. Сельское хозяйство 4.0: исторические этапы развития и социально-экономические тенденции. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2023. № 4(58). С. 46-51. DOI: 10.6060/ivecofin.2023584.663.
4. Hans M., Benson A., About J.E. Navigating ethics in wireless sensor networks for sustainable agriculture. <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2025.1634643/full>.
5. Jamshidi B., Khabbaz Jolfaee H., Mohammadpour K., Seilsepour M., Dehghanisani H., Hajnajari H., et al. Internet of things-based smart system for apple orchards monitoring and management. *Smart Agricultural Technology*. 2025. N 10. P. 100715. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100715.
6. Кондратюк Е.В., Комарова Л.Ф., Сомин В.А. Новые материалы в технологиях водоочистки. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 2(78). С. 72-76. DOI: 10.6060/snt.20247802.00010.
7. Hamouda F., Puig-Sirera A., Bonzi L., Remorini D., Mas-sai R., Rallo G. Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard. *Agricultural Water Management*. 2024. N 305. P. 109138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109138>.
8. Hamouda F., Puig-Sirera A., Bonzi L., Remorini D., Provenzano G., Rallo G. Productive Response of a Pear Orchard (Pyrus Communis, L.) to the Precision Irrigation Conducted Through a Decision Support System (DSS). *AIIA 2022: Biosystems Engineering Towards the Green Deal*. Cham: Springer International Publishing. 2023. Vol. 337. P. 125–32. DOI: 10.1007/978-3-031-30329-6_13.
9. Boumehez F., Sahour A., Bekhouche A., Maamri F., Djellab H. Smart Irrigation System for Orchards Apple Trees based on Fuzzy Logic and WSNs. *2024 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*. Tunisia: IEEE. 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/IC_ASET61847.2024.10596143.
10. Ahmed S., Marwat S.N.K., Brahim G.B., Khan W.U., Khan S., Al-Fuqaha A., et al. IoT based intelligent pest management system for precision agriculture. *Sci Rep*. 2024. N 14. P. 31917. DOI: 10.1038/s41598-024-83012-3.
11. Hahn F., Martinez F. WSN System Warns “Atta Cephalotes” Climbing in Mango Fruit Trees. *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2022*. Cham: Springer International Publishing. 2023. Vol. 2. (560). P. 284–96. DOI: 10.1007/978-3-031-18458-1_20.
12. Amogi B.R., Ranjan R., Khot L.R. Mask R-CNN aided fruit surface temperature monitoring algorithm with edge compute enabled internet of things system for automated apple heat stress management. *Information Processing in Agriculture*. 2024. N 11. P. 603–11. DOI: 10.1016/j.inpa.2023.12.001.

REFERENCES

1. Official FAO Statistical Resource (FAOSTAT) n.d. <https://www.fao.org/faostat>.
2. Astrakhantseva I.A., Gorev S.V., Astrakhantsev R.G. A Systems Approach to the Analysis of the Complex Technical Systems Fractal Nature. *Ivecofin*. 2023. № 3(57). P. 87-97. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.657. EDN PSPGBG. (in Russian).
3. Tatarinov K.A. Agriculture 4.0: Historical Stages of Development and Socio-Economic Trends. *Ivecofin*. 2023. N 4(58). P. 46-51. DOI: 10.6060/ivecofin.2023584.663. (in Russian).
4. Hans M., Benson A., About J.E. Navigating ethics in wireless sensor networks for sustainable agriculture. <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2025.1634643/full>.
5. Jamshidi B., Khabbaz Jolfaee H., Mohammadpour K., Seilsepour M., Dehghanisani H., Hajnajari H., et al. Internet of things-based smart system for apple orchards monitoring and management. *Smart Agricultural Technology*. 2025. N 10. P. 100715. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100715.
6. Kondratyuk E.V., Komarova L.F., Somin V.A. New Materials in Water Treatment Technologies. *Modern high technologies. Regional application*. 2024. N 2(78). P. 72-76. DOI: 10.6060/snt.20247802.00010. (in Russian).
7. Hamouda F., Puig-Sirera A., Bonzi L., Remorini D., Mas-sai R., Rallo G. Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard. *Agricultural Water Management*. 2024. N 305. P. 109138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109138>.
8. Hamouda F., Puig-Sirera A., Bonzi L., Remorini D., Provenzano G., Rallo G. Productive Response of a Pear Orchard (Pyrus Communis, L.) to the Precision Irrigation Conducted Through a Decision Support System (DSS). *AIIA 2022: Biosystems Engineering Towards the Green Deal*. Cham: Springer International Publishing. 2023. Vol. 337. P. 125–32. DOI: 10.1007/978-3-031-30329-6_13.
9. Boumehez F., Sahour A., Bekhouche A., Maamri F., Djellab H. Smart Irrigation System for Orchards Apple Trees based on Fuzzy Logic and WSNs. *2024 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*. Tunisia: IEEE. 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/IC_ASET61847.2024.10596143.
10. Ahmed S., Marwat S.N.K., Brahim G.B., Khan W.U., Khan S., Al-Fuqaha A., et al. IoT based intelligent pest management system for precision agriculture. *Sci Rep*. 2024. N 14. P. 31917. DOI: 10.1038/s41598-024-83012-3.
11. Hahn F., Martinez F. WSN System Warns “Atta Cephalotes” Climbing in Mango Fruit Trees. *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2022*. Cham: Springer International Publishing. 2023. Vol. 2. (560). P. 284–96. DOI: 10.1007/978-3-031-18458-1_20.
12. Amogi B.R., Ranjan R., Khot L.R. Mask R-CNN aided fruit surface temperature monitoring algorithm with edge compute enabled internet of things system for automated apple heat stress management. *Information Processing in Agriculture*. 2024. N 11. P. 603–11. DOI: 10.1016/j.inpa.2023.12.001.

13. **Aringo M.Q., Ella V.B., Martinez C.G., Pereira G.S.** Ex-ante Cost-Benefit Analysis of High-end and Low-cost Wireless Sensor Network (WSN) Technology Packages for Efficient Irrigation Water Management in the Philippines. *Journal of Economics, Management and Agricultural Development*. 2022. Vol. 8. N 2. Art. 3. DOI: 10.22004/AG.ECON.342303.
14. **Gulzar Y., Reegu F.A., Soomro A.B., Mir M.S., Zahir A., Onn C.W.** Exploring the economic implications of IoT adoption in agriculture: A cost-benefit study in Jazan, Saudi Arabia. *Sarhad Journal of Agriculture*. 2025. N 41(1). P. 51-65. DOI: 10.17582/journal.sja/2025/41.1.51.65.
15. **Mishra H., Mishra D., Tiwari A.K., Nishad D.C.** Cost-Benefit Analysis of Sensing and Data Collection with Drones for IoT Applications. *Machine Learning for Drone-Enabled IoT Networks*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2025. P. 141-68. DOI: 10.1007/978-3-031-80961-3_8.
16. **Papadopoulos G., Arduini S., Uyar H., Psiroukis V., Kasi-mati A., Fountas S.** Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: a review. *Smart Agricultural Technology*. 2024. N 8. P.100441. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100441.
17. **Гонова О.В.** Маржинальный подход к оценке эффективности сельскохозяйственного производства: практический аспект. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 2(78). С. 15-21. DOI: 10.6060/snt.20247802.0002.
18. **Goldschmidt E.E.** The Evolution of Fruit Tree Productivity: A Review. *Econ Bot.* 2013. N 67. P. 51–62. DOI: 10.1007/s12231-012-9219-y.
19. **Samoylenko I., Fedorenko V., Samoylenko V.** Adaptive data relay transmission in wireless sensor networks for reliable crop growth monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. N 234. P. 110367. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110367.
20. **Fedorenko V., Oleinikov D., Samoylenko I., Samoylenko V.** Criteria for the deployment of a heterogeneous linear WSN: Operability vs energy efficiency. *Ad Hoc Networks*. 2023. N 147. P. 103202. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103202.
13. **Aringo M.Q., Ella V.B., Martinez C.G., Pereira G.S.** Ex-ante Cost-Benefit Analysis of High-end and Low-cost Wireless Sensor Network (WSN) Technology Packages for Efficient Irrigation Water Management in the Philippines. *Journal of Economics, Management and Agricultural Development*. 2022. Vol. 8. N 2. Art. 3. DOI: 10.22004/AG.ECON.342303.
14. **Gulzar Y., Reegu F.A., Soomro A.B., Mir M.S., Zahir A., Onn C.W.** Exploring the economic implications of IoT adoption in agriculture: A cost-benefit study in Jazan, Saudi Arabia. *Sarhad Journal of Agriculture*. 2025. N 41(1). P. 51-65. DOI: 10.17582/journal.sja/2025/41.1.51.65.
15. **Mishra H., Mishra D., Tiwari A.K., Nishad D.C.** Cost-Benefit Analysis of Sensing and Data Collection with Drones for IoT Applications. *Machine Learning for Drone-Enabled IoT Networks*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2025. P. 141-68. DOI: 10.1007/978-3-031-80961-3_8.
16. **Papadopoulos G., Arduini S., Uyar H., Psiroukis V., Kasi-mati A., Fountas S.** Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: a review. *Smart Agricultural Technology*. 2024. N 8. P.100441. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100441.
17. **Gonova O.V.** A Marginal Approach to Assessing the Efficiency of Agricultural Production: The Practical Aspect. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2024. N 2(78). P. 15-21. DOI: 10.6060/snt.20247802.0002. (in Russian).
18. **Goldschmidt E.E.** The Evolution of Fruit Tree Productivity: A Review. *Econ Bot.* 2013. N 67. P. 51–62. DOI: 10.1007/s12231-012-9219-y.
19. **Samoylenko I., Fedorenko V., Samoylenko V.** Adaptive data relay transmission in wireless sensor networks for reliable crop growth monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. N 234. P. 110367. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110367.
20. **Fedorenko V., Oleinikov D., Samoylenko I., Samoylenko V.** Criteria for the deployment of a heterogeneous linear WSN: Operability vs energy efficiency. *Ad Hoc Networks*. 2023. N 147. P. 103202. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103202.

Поступила в редакцию 28.10.2025
Принята к опубликованию 11.11.2025

Received 28.10.2025
Accepted 11.11.2025