

УДК 004.94:631.3

ТЕХНОЛОГИЯ LI-FI БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ ВИДИМОГО СПЕКТРА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ: АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ

Субаева А.К., доктор экономических наук, доцент,
subaeva.ak@mail.ru

Газизова З.Ф., магистрант

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

Александрова Н.Р., кандидат экономических наук, доцент,
anr73@mail.ru

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Ключевые слова: *Li-Fi, Visible Light Communication, оптическая беспроводная связь, сельское хозяйство, умные теплицы, Интернет вещей, RF-free среда*

В статье представлены результаты системного анализа технологии Li-Fi как перспективного решения для беспроводной связи в агропромышленном комплексе. На основе данных аналитического агентства Mordor Intelligence (2025) показано, что мировой рынок Li-Fi в 2025 году оценивается в 2,80 млрд, а к 2030 году прогнозируется его рост до 32,14 млрд при среднегодовом темпе роста 62,9%. Особое внимание уделено применению Li-Fi в сельском хозяйстве: представлены результаты эмпирических исследований по созданию RF-free сред для выращивания растений с использованием технологий видимой световой связи, а также концепции battery-free Li-Fi-enabled IoT-сенсоров для тепличных хозяйств. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по внедрению Li-Fi в агропромышленном комплексе с учётом выявленных ограничений технологии.

Введение. Цифровая трансформация агропромышленного комплекса сопровождается активным внедрением технологий Интернета вещей (IoT), систем точного земледелия и автоматизированных систем управления. Традиционные беспроводные

решения (Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN), функционирующие в радиочастотном (RF) диапазоне, обладают рядом ограничений при использовании в сельскохозяйственном производстве. Экспериментальные исследования показывают, что RF-излучение может негативно влиять на прорастание семян и рост растений: семена, подвергавшиеся длительному воздействию, демонстрировали значительно более длительное время прорастания или полное отсутствие всходов [2].

Альтернативным решением выступает технология Li-Fi (Light Fidelity), предложенная профессором Харальдом Хаасом в 2011 году. Li-Fi использует видимый свет (400–700 нм) для передачи данных, модулируя интенсивность свечения светодиодов (LED) с частотой, неразличимой для человеческого глаза. Этот подход обеспечивает ряд принципиальных преимуществ: (1) скорость передачи данных до 224 Гбит/с, что примерно в 100 раз превышает возможности современных Wi-Fi систем; (2) отсутствие электромагнитных помех; (3) повышенная безопасность передачи данных, так как световой сигнал не проникает через непрозрачные преграды [1]

Цель исследования – системный анализ технологии Li-Fi как средства беспроводной связи в сельском хозяйстве, включающий оценку текущего состояния рынка, анализ преимуществ и ограничений технологии по сравнению с Wi-Fi, а также обобщение эмпирических данных о применении Li-Fi в агропромышленном комплексе.

Материалы и методы исследований. В качестве эмпирической базы использованы: данные отраслевых аналитических агентств – Mordor Intelligence (2025), оценивающие динамику мирового рынка Li-Fi и VLC [1, 4]; научные публикации по VLC и Li-Fi – исследования эффективности видимой световой связи в сельском хозяйстве, представленные в рецензируемых журналах (MDPI Sensors, IEEE Communications Magazine) [2, 3]; диссертационные исследования – работы по практическому внедрению гибридных Li-Fi/RF-сетей в тепличных хозяйствах [5]; технические стандарты – анализ протокола IEEE 802.11 bb (глобальный стандарт световой связи) [1].

Методы исследования: статистический анализ рыночных данных, сравнительный анализ технологических характеристик Li-Fi и

Wi-Fi, структурно-функциональный анализ архитектур Li-Fi-систем для АПК, контент-анализ научной литературы.

Результаты исследований и их обсуждение. Li-Fi – технология оптической беспроводной связи, использующая световые волны видимого и инфракрасного диапазонов для передачи данных. Стандартная Li-Fi-система включает три основных компонента: (1) передатчик – LED-лампа, выполняющая функции как освещения, так и передачи данных; (2) приёмник – фотодетектор (фотодиод), регистрирующий изменения интенсивности светового потока; (3) канал связи – среда распространения света, требующая прямой видимости между передатчиком и приёмником [1].

Проведённый анализ позволяет систематизировать ключевые различия между технологиями (таблица 1).

Таблица 1 – Различия Li-Fi и Wi-Fi

Параметр	Li-Fi	Wi-Fi
Скорость передачи данных	До 224 Гбит/с	До 10 Гбит/с (Wi-Fi 6)
Рабочий диапазон	Видимый свет, ИК	RF-спектр (2,4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц)
Проникновение через стены	Отсутствует	Присутствует
Безопасность передачи	Высокая (сигнал ограничен помещением)	Средняя (возможен перехват)
Энергоэффективность	Высокая (LED-освещение + связь)	Средняя

Согласно отчёту Mordor Intelligence, Li-Fi может обеспечить «военную безопасность по умолчанию», поскольку свет не проникает через стены, что исключает возможность атак типа «man-in-the-middle» за пределами зоны покрытия [1].

По данным Mordor Intelligence (2025), объём мирового рынка Li-Fi в 2025 году оценивается в 2,80 млрд, а к 2030 году прогнозируется его рост до 32,14 млрд при среднегодовом темпе роста (CAGR) 62,9% [1]. Рынок видимой световой связи (VLC) в 2025 году оценивается в 4,86 млрд с прогнозируемым ростом до 27,11 млрд к 2030 году (CAGR 41%) [4]. Северная Америка занимает доминирующее положение, что обусловлено высокими инвестициями в оборонную промышленность и развитием инфраструктуры умных городов [1, 4].

Применение Li-Fi в сельском хозяйстве:

1. RF-free среды для выращивания растений. Одним из наиболее перспективных направлений применения Li-Fi в АПК является создание RF-free (свободных от радиочастотного излучения) сред для выращивания растений. Исследование, проведённое An et al. (2021), показало, что традиционные Wi-Fi-маршрутизаторы могут негативно влиять на жизненный цикл растений: «сообщалось, что семена, подвергавшиеся длительному воздействию RF-излучения, прорастали значительно дольше или не всходили; растения, подвергавшиеся облучению, имели более мелкие листья и были короче по размеру» [2].

Авторами предложена энергоэффективная RF-free архитектура умной фермы, в которой используются светодиодные лампы для выращивания (grow lights) и технология видимой световой связи (VLC). В предложенной системе: (1) нисходящий канал (downlink) реализован через белые потолочные LED-лампы и фотодетекторы; (2) восходящий канал (uplink) – через модулированный зелёный свет, отражаемый от растений, с использованием оптических камер. Экспериментально подтверждена максимальная скорость передачи данных 840 бит/с для восходящего канала и 20 Мбит/с для нисходящего канала [2].

2. Battery-free Li-Fi-enabled IoT для теплиц. В работе Guzmán et al. (2023), опубликованной в IEEE Communications Magazine, представлена концепция устойчивых теплиц с использованием Li-Fi-enabled IoT [3]. Авторы предлагают создание батарейно-свободной беспроводной сети IoT-сенсоров, которые используют Li-Fi одновременно для связи и сбора энергии (power harvesting). Сенсоры мониторят параметры окружающей среды (температуру, влажность, уровень CO₂, освещённость) для оптимального функционирования теплиц [3]. Ключевые преимущества подхода: энергоэффективность (отсутствие необходимости замены батарей), RF-free среда (исключение негативного влияния электромагнитного излучения) и масштабируемость.

3. Гибридные Li-Fi/RF-решения. Диссертационное исследование Frómeta Fonseca (2024) посвящено практическому внедрению гибридных сетей Li-Fi/RF [5]. Автором предложена архитектура LoW-Fi, которая повторно использует существующую инфраструктуру освещения и Wi-Fi для обеспечения масштабируемости и низкого энергопотребления, необходимых для battery-free IoT-развёртываний.

Предложенные решения были реализованы и протестированы в реальном тепличном хозяйстве [5].

Несмотря на значительный потенциал, широкое внедрение Li-Fi в АПК сталкивается с рядом системных ограничений [1, 4, 5]:

1. Ограниченный радиус действия и требование прямой видимости – Li-Fi-сигнал не проникает через стены и другие непрозрачные преграды, что требует размещения множества LED-передатчиков для обеспечения покрытия.

2. Влияние внешней засветки – интенсивный солнечный свет может создавать помехи для фотодетекторов, что актуально для открытых сельскохозяйственных территорий.

3. Отсутствие нативной поддержки в массовых устройствах – смартфоны, планшеты и ноутбуки по-прежнему поставляются без встроенных Li-Fi-трансиверов.

4. Высокая стоимость внедрения – необходимость замены существующих осветительных приборов на Li-Fi-совместимые LED-лампы требует значительных начальных инвестиций.

Заключение. Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

Технология Li-Fi представляет собой перспективную альтернативу традиционным RF-решениям для беспроводной связи в сельском хозяйстве. Мировой рынок Li-Fi демонстрирует высокие темпы роста (CAGR 62,9%), что свидетельствует о растущем интересе к данной технологии.

Ключевыми преимуществами Li-Fi для АПК являются: (а) возможность создания RF-free сред, исключаящих негативное влияние электромагнитного излучения на растения; (б) высокая скорость передачи данных (до 224 Гбит/с); (в) возможность интеграции с LED-освещением теплиц, выполняющим одновременно функции фотосинтеза и передачи данных; (г) повышенная безопасность передачи данных.

Эмпирические исследования подтверждают эффективность Li-Fi для мониторинга параметров теплиц: экспериментальные системы демонстрируют скорость нисходящего канала до 20 Мбит/с и обеспечивают сбор данных о температуре, влажности и освещённости без использования RF-излучения.

Основными барьерами внедрения Li-Fi в АПК остаются: ограниченный радиус действия, требование прямой видимости, высокая стоимость оборудования и отсутствие нативной поддержки в массовых устройствах. Для преодоления этих ограничений перспективным направлением является разработка гибридных Li-Fi/Wi-Fi-решений.

Библиографический список:

1. Mordor Intelligence. Light Fidelity (Li-Fi) Market - Share Analysis, Industry Trends & Statistics, Growth Forecasts (2025-2030). – 2025. – 158 p.
2. An, J., Chung, G., Kim, S., et al. Utilization of LED Grow Lights for Optical Wireless Communication-Based RF-Free Smart-Farming System // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 20. – P. 6833. DOI: 10.3390/s21206833.
3. Guzmán, B.G., Talavante, J., da Fonseca, M.S. Mir, et al. Toward Sustainable Greenhouses Using Battery-Free LiFi-Enabled Internet of Things // IEEE Communications Magazine. – 2023. – Vol. 61, No. 5. – P. 129–135.
4. Mordor Intelligence. Visible Light Communication Market - Share Analysis, Industry Trends & Statistics, Growth Forecasts (2025-2030). - 2025. - 120 p.
5. Frómeta Fonseca, D. Towards practical LiFi networks with hybrid radio-frequency and optical wireless communication technologies: Doctoral thesis. – Universidad Carlos III de Madrid, 2024. – 187 p.

VISIBLE LIGHT COMMUNICATION IN AGRICULTURE: EFFICIENCY ANALYSIS AND IMPLEMENTATION PROSPECTS

Subaeva A.K., Gazizova Z.F.

Kazan National Research Technical University named after

A.N. Tupolev – KAI

Alexandrova N.R.

FSBEI HE Ulyanovsk SAU

Keywords: *Li-Fi, Visible Light Communication, optical wireless communication, agriculture, smart greenhouses, Internet of Things, RF-free environment*

This article presents the results of a systems analysis of Li-Fi technology as a promising wireless communication solution in the agricultural sector. Based on data from the analytical agency Mordor Intelligence (2025), the global Li-Fi market is estimated at \$2.80 billion in 2025 and is projected to reach \$32.14 billion by 2030, with a CAGR of 62.9%. Particular attention is paid to the application of Li-Fi in agriculture: the results of empirical studies on the creation of RF-free plant growing environments using visible light communication technologies are presented, as well as the concept of battery-free Li-Fi-enabled IoT sensors for greenhouses. Scientifically based recommendations for the implementation of Li-Fi in the agro-industrial complex are formulated, taking into account the identified limitations of the technology.