



## РОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ В СЕТЯХ 5G, 6G

**С. А. Обухов\***, **В. С. Елагин**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: [stasstas1155@yandex.ru](mailto:stasstas1155@yandex.ru)

**Аннотация**—Статья посвящена подбору технологии для беспроводной передачи данных в сетях 5G, 6G со скоростью больше 1 Гбит/с. В научной литературе отмечаются недостатки при использовании способа передачи данных с помощью радиоволн и невозможность эффективного использования радиосвязи в качестве канала связи в сетях 5G, 6G. В этой связи в статье описаны особенности, ключевые характеристики, требования к сетям сотовой связи нового поколения. Рассмотрены различные технологии беспроводной оптической связи и их физические характеристики. Научная новизна заключается в освящении и обобщении данной проблематики на русском языке. По результатам исследования сделан вывод, что оптическая связь можно использовать в качестве эффективного решения для успешного развертывания сетей 5G, 6G.

**Ключевые слова**—сотовая связь, 5G, 6G, интернет вещей, оптическая связь.

### **Информация о статье**

УДК 004.7

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 11.04.2022, принята к печати 30.06.2022.

**Для цитирования:** Обухов С. А., Елагин В. С. Роль оптических беспроводных технологий связи в сетях 5G, 6G // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 2. С. 14–24. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-2-14-24.



# THE ROLE OF OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN 5G, 6G

**S. Obukhov\*, V. Elagin**

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\*Corresponding author: [stasstas1155@yandex.ru](mailto:stasstas1155@yandex.ru)

**Abstract**—The article is devoted to the selection of technology for wireless data transmission in 5G, 6G networks with a speed of more than 1 Gbit/s. In the scientific literature noted the disadvantages in the use of the method of data transmission via radio waves and the inability to effectively use radio as a communication channel in 5G, 6G networks. In this regard, the article describes the features, key characteristics, requirements for new generation cellular networks. Various wireless optical communication (OWC) technologies and their physical characteristics are considered. The scientific novelty lies in the consecration and generalization of this problem in Russian. According to the results of the study, it was concluded that optical communication can be used as an effective solution for the successful deployment of 5G, 6G networks.

**Keywords**—cellular communication, 5G, 6G, Internet of things, optical communication.

## Article info

Article in Russia.

Received 11.04.2022, accepted 30.06.2022.

**For citation:** Obukhov S., Elagin V.: The Role of Optical Wireless Communication Technologies in 5G, 6G // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 2. pp. 14–24. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-2-14-24.



## Введение

Сотовая связь – это разновидность радиосвязи, при которой абоненты выходят на связь друг с другом с использованием сети базовых станций. Эти станции принимают и ретранслируют сигнал от приемопередатчиков пользователей.

Радиосвязь – это способ передачи сообщений на расстояние посредством радиоволн.

В настоящее время радиосвязь широко используются для различных беспроводных соединений, но связь на основе радиочастот сталкивается с рядом ограничений, таких как [1]:

- ограниченный спектр;
- зависимость от погодных условий;
- большой эффект помех;
- строгое регулирование.

Технологии мобильной радиосвязи 3G и 4G используются повсеместно, их характеристики обусловлены каналом передачи данных. Однако, технологий беспроводной связи на основе радиочастот недостаточно для удовлетворения всех потребностей сетей 5G и 6G. В следствии чего исследователи стремятся определить новый вид связи, который будет удовлетворять экспоненциально растущим требованиям к коммуникационным сетям [2].

Беспроводная связь на основе оптического спектра активно рассматривается в качестве основного вида для будущих сетей связи, включая сети пятого и шестого поколений (5G и 6G, соответственно).

Цель данной научной статьи – рассмотреть технологии беспроводной оптической связи в качестве эффективного решения для успешного развертывания сетей 5G, 6G.

Задачи исследования:

- Описать ключевые характеристики и требования к сетям 5G,6G.
- Рассмотреть различные технологии OWC.
- Обозначить физические возможности оптических технологий связи.
- Определить потенциал применения технологий OWC в сетях 5G,6G.
- Привести пример актуальных работ и систем на базе OWC.

## Обзор предметной области

Optical wireless communications (OWC) – это форма оптической связи, в которой для передачи сигнала используются видимое, ультрафиолетовое и инфракрасное излучения.

OWC привлекли обширный интерес исследователей благодаря своим характеристикам.

Сети связи пятого и шестого поколений, искусственный интеллект, интернет вещей станут основой современной цифровой экономики.

Интернет вещей (*Internet of Things, IoT*) – это концепция сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой.



Сеть IoT позволяет в режиме реального времени коммутировать различные системы с целым рядом социальных, промышленных и бизнес приложений. Непрерывно растёт количество устройств конечных пользователей, которые подключаются к IoT, в следствии чего постоянно генерируется большой объём данных в сети IoT. Технология OWC может играть важную роль в зондировании, мониторинге и совместном использовании ресурсов в сетях IoT с массовым подключением устройств. Ключевое преимущество OWC заключается в том, что оптическая связь отвечает требованиям низкого энергопотребления и высокой безопасности, что необходимо при построении сети IoT [2].

Перечень специфических особенностей и требований, предъявляемый к системе связи 5G уже сформулирован. Технология разработана и ожидалось, что сеть 5G будет полностью развернута к 2020 году. Пятое поколение сотовой связи предлагает новые услуги с очень высоким качеством обслуживания (*Quality of Service, QoS*). QoS включает в себя две наиболее важные характеристики сети – производительность и надежность.

Услуги связи 5G характеризуются<sup>1</sup>:

- сверхвысокой пропускной способностью системы;
- сверхнизкой задержкой;
- сверхвысокой безопасностью;
- массовым подключением устройств;
- сверхнизким энергопотреблением.

Запуск системы связи 6G ожидается между 2027 и 2030 годами. Спецификация 6G еще точно не определена, но уже сформулирован перечень исследовательских вопросов. Основными пунктами являются [2]:

- повышение пропускной способности;
- увеличение количества подключений;
- снижение задержки;
- повышение безопасности;
- повышение энергоэффективности;
- повышение уровня QoS пользователя;
- повышение надежности.

Стоит отметить, что основные направления развития и улучшения систем связи схожи. Однако, ожидается, что система связи 6G станет глобальным средством связи, а уровень обслуживания будет в несколько раз лучше по сравнению с 5G.

### Предмет исследования

Широкий оптический диапазон считается перспективным решением для развития сетей 5G, 6G и IoT.

Преимущества технология OWC в сравнении с радиосвязью [3]:

- широкий спектр;
- высокая скорость передачи данных;
- низкая задержка;
- высокая безопасность;

<sup>1</sup> Пятое поколение мобильной связи. URL: <https://clck.ru/atGLV> (дата обращения 23.03.2022).



- низкая стоимость;
- низкое энергопотребление.

Расстояние между объектами связи может варьироваться от нескольких нанометров до нескольких тысяч километров, что достигается благодаря развертыванию различных систем OWC.

Основные технологии систем OWC [2]:

- коммуникация видимого света (*Visible Light Communication, VLC*);
- Light Fidelity (*Li-Fi*);
- оптическая камерная связь (*Optical Camera Communication, OCC*);
- оптическая связь в свободном пространстве (*Free-Space Optics, FSO*).

Вышеперечисленные технологии обладают различиями и сходствами, в частности используют разный вид излучения и приёмо-передающее оборудование, поэтому каждая из технологий имеет свои достоинства, недостатки и ограничения по применению.

Таким образом, технологии OWC, из-за своих актуальных характеристик, могут сыграть важную роль в развитии и внедрении сетей 5G, 6G и IoT.

## Обзор требований к сетям 5G, 6G и IoT

### Сети 5G

Пятое поколение мобильной связи обеспечит улучшение некоторых ключевых характеристик сети на порядок по сравнению с прошлыми поколениями. Это необходимо для эффективной поддержки современных гетерогенных мультимедийных приложений.

Основные требования к сетям 5G сводятся к следующему<sup>2</sup> [2]:

- Высокий объем трафика (*high traffic volume*). Объем данных на единицу площади в сотни раз больше, чем в сетях 4G.
- Масштабное массовое подключение (*massive connectivity*). Количество подключенных устройств в десятки раз больше, чем в сетях 4G.
- Высокая скорость передачи данных пользователей (*high user data rate link*). Скорость передачи данных достигает 10 Гбит/с, что в 10–100 раз выше по сравнению с 4G.
- Низкое энергопотребление (*extremely low latency*). Энергопотребление систем 5G будет на 90 % меньше чем у систем 4G.
- Чрезвычайно низкая задержка (*extremely low latency*). Задержка сети 5G должна быть субмиллисекундной/миллисекундной.

Основные концепции и характеристики сетей 5G [2, 3]:

- Сверхплотная сеть (*ultra-high-dense network*). Для обеспечения высокого QoS, пропускной способности и массового подключения развертывание сетей 5G будет гораздо более плотным по сравнению с сетями 4G.
- Сети малых сот (*small-cell networks*). В системах связи 5G применяется концепция высокоплотных сетей малых сот.
- Высокая спектральная эффективность (*higher spectral efficiency*). Системы 5G будут гарантировать эффективное использование частотного спектра за счет

<sup>2</sup> Пятое поколение мобильной связи. URL: <https://clck.ru/atGLV> (дата обращения 23.03.2022).



использования многоканального ввода, многоканального вывода и передовых схем кодирования. За счёт этого спектральная эффективность в сетях 5G должна быть как минимум в три раза выше, чем в сетях 4G.

– Низкая стоимость (*low cost*). Недорогое сетевое оборудование, более низкая стоимость развертывания и уменьшение энергопотребления сетевого и пользовательского оборудования.

– Перераспределение трафика на малые соты (*offloading of heavy traffic to indoors*). Разгрузка макросот и распределение объёма данных по локальным малым сотам.

### **Сети 6G**

Требования к сетям 6G ещё не стандартизированы. Учитывая современные тенденции развития сетей связи, можно предположить, что скорости передачи данных на устройство от десятков Гбит/с до нескольких Тбит/с станет одним из основных требований к сетям шестого поколения.

Ожидается, что сети 6G [2]:

– будут характеризоваться скоростью передачи данных в 1000 раз выше, чем 5G;

– организуют сверхдальнюю связь с ультранизким энергопотреблением и задержкой менее 1 мс;

– будут использовать пространственное мультиплексирование, высокая спектральная эффективность (100 бит/с/Гц);

– обеспечат сверхвысокую безопасность, сверхнадежность, сверхнизкое энергопотребление в сравнении с существующими поколениями сотовой связи.

### **Сети IoT**

Ключевые требования к системам IoT следующие:

– низкая стоимость устройств;

– низкая стоимость развертывания;

– высокая энергоэффективность;

– высокая безопасность и конфиденциальность;

– поддержка огромного количества устройств.

### **Обзор технологий OWC**

Ранее в статье были выделены четыре основные технологии систем OWC. Эти технологии имеют различия в типе передатчика, приёмника, виде излучения. Схематично они представлены на рис. 1 (см. ниже).

В VLC используются светоизлучающие диоды (LED) или лазерные диоды (LD) в качестве передатчиков и фотодетекторы (PD) в качестве приёмников.

В качестве среды связи в VLC используется видимое излучение (LV).

Технология Li-Fi – это беспроводная двунаправленная оптическая высокоскоростная коммуникационная технология.

Эта технология также использует LED в качестве передатчиков и PD в качестве приёмников.



Технология OCC использует светодиодную матрицу в качестве передатчика и датчик изображения в качестве приёмника<sup>3</sup>.

В качестве датчика изображения используется видеокамера с глобальным или скользящим затвором. Встроенные металлооксидные полупроводниковые камеры с датчиками изображения облегчают «съёмку изображений».

В качестве средства связи OCC обычно использует LV или ИК-излучение. Ультрафиолетовый (UV) спектр также может быть использован в качестве средства связи.

Технология FSO обычно использует LD и PD в качестве передатчика и приёмника, соответственно [4].

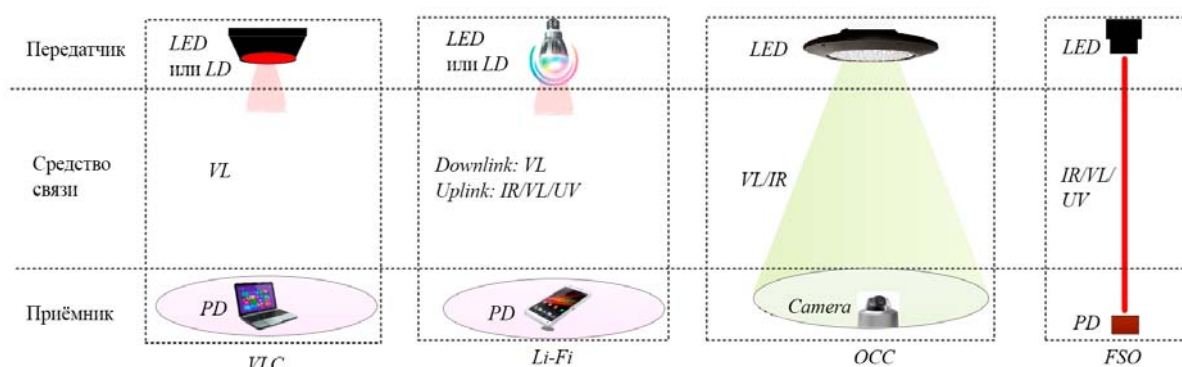


Рис. 1. Технологии OWC для систем 5G,6G и IoT

В таблице представлено сравнение показателей производительности различных технологий OWC [2].

Таблица.

Сравнение показателей производительности в различных технологиях OWC

Параметр	VLC	Li-Fi	OCC	FSO	Сотовая связь 4G
Вид топологии	Однонаправленная или двунаправленная	Двунаправленная	Однонаправленная	Однонаправленная или двунаправленная	Двунаправленная
Расстояние передачи	20 метров	10 метров	60 метров	более 10 000 км	13,4 км
Мобильность	да	да	да	нет	да
Уровень помех	низкий	низкий	нет	низкий	средний
Скорость передачи	10 Гбит/с LED 100 Гбит/с LD	10 Гбит/с LED 100 Гбит/с LD	55 Мбит/с	40,665 Гбит/с	100 Мбит/с
Уровень защищённости	высокий	высокий	высокий	высокий	средний

<sup>3</sup> A Tensor-Based Optical Camera Communication (OCC) System With Joint Data Detection and Video Restoration. URL: [https://www.techrxiv.org/articles/preprint/A\\_Tensor-Based\\_Optical\\_Camera\\_Communication\\_OCC\\_System\\_With\\_Joint\\_Data\\_Detection\\_and\\_Video\\_Restoration/16586357/1](https://www.techrxiv.org/articles/preprint/A_Tensor-Based_Optical_Camera_Communication_OCC_System_With_Joint_Data_Detection_and_Video_Restoration/16586357/1) (дата обращения 23.03.2022).



## Физические возможности и технические особенности сетей OWC (на примере технологии Li-Fi)

Пропускная способность Li-Fi сетей на данный момент достигает 1 Гбит/с. Вероятность ошибки на бит (*Bit Error Rate*, BER) на расстоянии 90 см в сети Li-Fi составляет  $2 \cdot 10^{-5}$  [5].

Радиус действия сетей Li-Fi позволяет полностью покрыть сигналом помещение площадью 10–20 м<sup>2</sup>.

В сетях Li-Fi повышается защищённость данных, так как LV не выходит за пределы посещения.

Сети Li-Fi может обслуживать неограниченное число пользователей без негативного влияния сигналов друг на друга. Выделение дополнительной полосы частот происходит бесплатно и не требует процедуры лицензирования [2].

Использование энергосберегающих светодиодных ламп, нередко установленных в помещениях, позволяет уменьшить затраты на энергоносители. Для их модернизации и подключения к сети Li-Fi достаточно установить несколько дополнительных компонентов. Кодер, который будет заставлять мерцать лампу, и приёмопередатчик, содержащий в себе фотодиодный приёмник, декодер, инфракрасный излучатель и USB-интерфейс [6].

Таким образом, преимущества систем на базе технологий Li-Fi:

- широкая полоса частот;
- высокая пропускная способность;
- простота и дешевизна реализации;
- не требуются лицензии на использование;
- радиодиапазон не используется;
- при взаимодействии видимого света с электромагнитными волнами других частот не образуются помехи.

Недостатки:

- необходима прямая видимость между приёмником и передатчиком;
- при засветке фотодетектора возможны сбои и ошибки в работе;
- Li-Fi работает только внутри световых конусов.

На рис. 2 показан пример локальной сети Li-Fi.

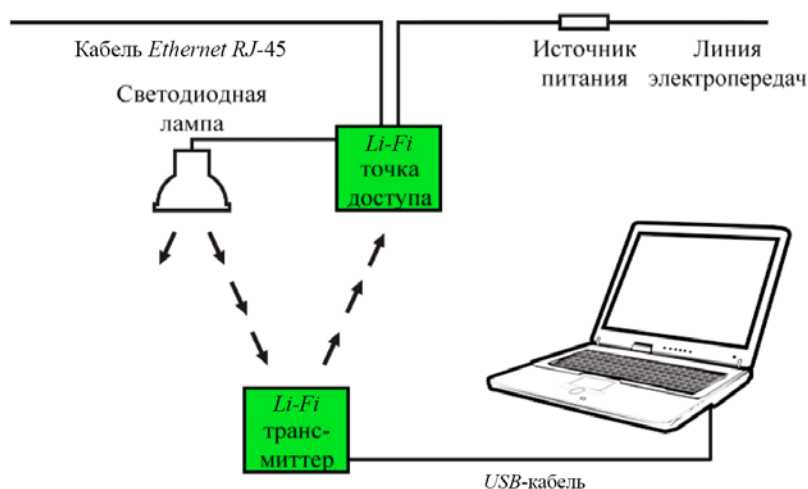


Рис. 2. Схематичное представление локальной сети Li-Fi





## Сети 5G, 6G и IoT на базе технологий OWC

Во время организации канала радиосвязи используются частоты в диапазоне от 3 кГц до 3 000 ГГц. Часть диапазона радиочастот (3 кГц – 10 ГГц) повсеместно используется существующими беспроводными технологиями из-за благоприятных коммуникационных свойств. Эта часть диапазона практически исчерпана, оставшаяся не соответствует высоким требованиям сетей 5G, 6G и IoT. Кроме того, распределение и использование частотного диапазона во всем мире регулируется Международным союзом электросвязи (*International Telecommunication Union, ITU*) и национальными организациями различных стран, которые распределяют частоты на основе правил ITU.

Технологии OWC обладают отличными характеристиками для создания каналов связи в сетях 5G, 6G и IoT. OWC может использоваться для широкого спектра приложений, реализовывать различные типы коммуникаций, такие как [2]:

- межмашинное взаимодействие (*machine-to-machine*);
- взаимодействие между устройствами (*device-to-device*);
- взаимодействие между микросхемами (*chip-to-chip*);
- взаимодействие между транспортными средствами (*vehicle-to-vehicle*);
- взаимодействие разных инфраструктур.

Оптическая связь позволяет осуществлять коммутацию устройств на расстояниях от нескольких нанометров до более чем 10 000 км.

OWC обеспечивает [2]:

- высокую скорость передачи данных (до 100 Гбит/с);
- высокую пропускную способность;
- высокий уровень безопасности;
- низкое энергопотребление;
- низкую стоимость инфраструктуры и устройств;
- отсутствие помех;
- простоту интеграции в устройства;
- отсутствие необходимости лицензирования допустимой полосы частот.

Таким образом физические возможности технологии OWC перекрывают все недостатки радиосвязи, а также превосходят беспроводную связь на основе радиочастот по ряду параметров.

## Применение технологий OWC в других областях

Исследователи по всему миру работают над созданием коммуникационных сетей будущего на основе OWC сетей.

Сети OWC легко встраиваются в существующую инфраструктуру, могут быть использованы в системах регулирования дорожного движения, для коммуникации компьютеров и мобильных устройств между собой [6, 7].

Разрабатывается универсальная система управления движением (*The uplink visible light communication beacon system for universal traffic management*) на базе OWC, предоставляющая информацию о скоростях движения автомобилей на дорогах и автомагистралях. Эта система использует LED в качестве передатчика и несколько PD с линзой в качестве дорожного приёмника [7, 8].



Сети Li-Fi могут использоваться в салоне пассажирских самолётов для передачи видеосигналов на персональные мониторы, установленные перед пассажирами, что позволит убрать несколько километров кабелей и снизит вес самолёта больше чем на 100 кг [5].

### Заключение

Сети 5G должны появиться в ближайшее время. Связь 6G, по прогнозам, будет запущена в период между 2027 и 2030 годами. Системы на основе радиочастот не способны соответствовать высоким требованиям будущих сетей 5G/6G и IoT.

Таким образом, использование технологий OWC для построения сетей сотовой связи нового поколения позволит решить проблемы, присущие системам связи на основе радиочастот. OWC обеспечит эффективные каналы связи для сетей 5G, 6G и развертывания IoT.

### Литература

1. Петрусь И. П. Перспективы развития беспроводных технологий передачи данных // Технические науки – от теории к практике. № 10 (23). Ч. I: сб. статей по материалам XXVII международной научно-практической конференции. Новосибирск: Изд. «СибАК», 2013. С. 30–34.
2. Zaman M., Shahjalal M., Khalid M., Min Y. The Role of Optical Wireless Communication Technologies in 5G/6G and IoT Solutions: Prospects, Directions, and Challenges // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, Iss. 20. 4367. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4367> (дата обращения 23.03.2022).
3. Мухизи С., Киричек Р. В. Анализ технологии слайсинга в сетях связи пятого поколения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 4. С. 57–63. URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/20174/57-63.pdf> (дата обращения 23.03.2022).
4. Мусалитин А. А. К вопросу об атмосферных линиях связи // Направления совершенствования автоматизированных систем управления: сборник статей Молодежной научно-технической конференции, Ульяновск, 19–20 марта 2014 г. / под общ. ред. Э. Д. Павлыгина. Ульяновск: ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», 2014. С. 158–164. URL: [http://www.npomars.com/db/ru/news/ofic\\_inf/178-2014-04-07/sec1/19.pdf](http://www.npomars.com/db/ru/news/ofic_inf/178-2014-04-07/sec1/19.pdf) (дата обращения 23.03.2022).
5. Петрусь И. П. Основные тенденции становления сетей Li-Fi // Перспективы развития информационных технологий. 2014. № 18. С. 73–78. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnyetendentsii-stanovleniya-setey-li-fi> (дата обращения 23.03.2022).
6. Хаас Х. Беспроводная информация из каждой лампочки. URL: <https://clck.ru/eksEs> (дата обращения 23.03.2022).
7. Петрусь И. П. Технология «общения» дорожного транспорта // Интернет-журнал «Наукоеведение». 2014. № 2 (21). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/03TVN214.pdf> (дата обращения 23.03.2022).
8. Arnon S., Barry J., Karagiannidis G., Schober R., Uysal M. Advanced Optical Wireless Communication Systems. URL: <https://rizkia.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2016/02/Advanced-Optical-Wireless-Communication-Systems-.pdf> (дата обращения 23.03.2022).

### References

1. Petrus' I. P. Perspektivy razvitiya besprovodnyh tekhnologij pereda-chi dannyh // Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike. № 10 (23). CH. I: sb. statej po materialam XXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Novosibirsk: Izd. «SibAK», 2013. С. 30–34 (in Russian).
2. Zaman M., Shahjalal M., Khalid M., Min Y. The Role of Optical Wireless Communication Technologies in 5G/6G and IoT Solutions: Prospects, Directions, and Challenges // Applied Sciences. 2019.



Vol. 9, Iss. 20. 4367. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4367> (date of the application 23.03.2022).

3. Muhizi S., Kirichek R.: Analysis of network slicing technology for 5G networks // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 4. pp. 57–63 (in Russian). URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/20174/57-63.pdf> (date of the application 23.03.2022).

4. Musalitin A. A. K voprosu ob atmosferynykh liniyakh svyazi // Napravle-niya sovershenstvovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya: sbor-nik statej Molodezhnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Ul'yanovsk, 19–20 marta 2014 g. / pod obshch. red. E. D. Pavlygina. Ul'yanovsk: FNPC OAO «NPO «Mars». S. 158–164 (in Russian). URL: [http://www.npomars.com/db/ru/news/ofic\\_inf/178-2014-04-07/sec1/19.pdf](http://www.npomars.com/db/ru/news/ofic_inf/178-2014-04-07/sec1/19.pdf) (date of the application 23.03.2022).

5. Petrus' I. P. Osnovnye tendencii stanovleniya setej Li-Fi // Perspektivy razvitiya informacionnykh tekhnologij. 2014. № 18. S. 73-78 (in Russian). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-tendentsii-stanovleniya-setey-li-fi> (date of the application 23.03.2022).

6. Haas H. Besprovodnaya informaciya iz kazhdoj lampochki (in Russian). URL: <https://clck.ru/eksEs> (date of the application 23.03.2022).

7. Petrus' I. P. Tekhnologiya «obshcheniya» dorozhnogo transporta // Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2014. № 2 (21) (in Russian). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/03TVN214.pdf> (date of the application 23.03.2022).

8. Arnon S., Barry J., Karagiannidis G., Schober R., Uysal M. Advanced Optical Wireless Communication Systems. URL: <https://rizkia.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2016/02/Advanced-Optical-Wireless-Communication-Systems-.pdf> (date of the application 23.03.2022).

**Елагин Василий Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [v.elagin@spbgut.ru](mailto:v.elagin@spbgut.ru)

**Elagin Vasilij S.**

Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [v.elagin@spbgut.ru](mailto:v.elagin@spbgut.ru)

**Обухов Станислав Андреевич**

студент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [stasstas1155@yandex.ru](mailto:stasstas1155@yandex.ru)

**Obukhov Stanislav A.**

student, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [stasstas1155@yandex.ru](mailto:stasstas1155@yandex.ru)