

УДК 532.317.2:004.9(5-191.2)+(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-104-113

ОПТИКА В ЭПОХУ ЭКЗАСКЕЙЛ-ВЫЧИСЛЕНИЙ: ОТ ТЕОРИИ К ВНЕДРЕНИЮ В НАЦИОНАЛЬНУЮ ЦИФРОВУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ

А.А. Сагымбаев, Ж.Б. Мамадалиева, А.В. Ушаков

Аннотация. Рассматривается роль фотонных технологий в эволюции информационно-коммуникационных технологий, начиная от волоконно-оптических линий связи и заканчивая перспективами квантовых вычислений и 6G-коммуникаций. Анализируются глобальные инициативы по развитию фотонных интегральных схем, оптических процессоров и квантовой фотоники. Особое внимание уделено перспективам внедрения фотонных технологий в Центральной Азии, включая возможности их использования в Кыргызстане. Приведены ключевые вызовы, ограничивающие распространение фотонных решений, и сформулированы рекомендации по развитию национальной стратегии в области фотоники.

Ключевые слова: информационно-коммуникационные технологии; фотонные интегральные схемы; оптические процессоры; квантовая фотоника; оптические сети.

ЭКЗАСКЕЙЛДИК ЭСЕПТӨӨЛӨР ДООРУНДАГЫ ОПТИКА: ТЕОРИЯДАН УЛУТТУК САНАРИП ИНФРАСТРУКТУРАГА ЧЕЙИН

А.А. Сагымбаев, Ж.Б. Мамадалиева, А.В. Ушаков

Аннотация. Заманбап маалыматтык-коммуникациялык технологиялар (МКТ) оптикалык системалардын интеграциясы жок өңүгө албайт, анткени алар жогорку ылдамдыктагы маалымат берүү, энергияны үнөмдөө жана ишенимдүүлүк менен камсыз кылат. Бул макалада фотондук технологиялардын МКТнын эволюциясындагы ролу изилденет - бул волокон-оптикалык байланыштардан тартып кванттык эсептөөлөр жана 6G-коммуникациялардын келечегине чейин камтыйт. Фотондук интегралдык схемалар, оптикалык процессорлор жана кванттык фотоника багытындагы дүйнөлүк демилгелерге талдоо жүргүзүлгөн. Борбордук Азияда, анын ичинде Кыргыз Республикасында фотондук технологияларды колдонуу мүмкүнчүлүктөрүнө өзгөчө көңүл бурулган. Фотоникалык чечимдердин жайылышына тоскоол болгон негизги көйгөйлөр баяндалып, улуттук фотоника стратегиясын өнүктүрүү боюнча сунуштар берилген.

Түйүндүү сөздөр: маалыматтык-коммуникациялык технологиялар; фотондук интегралдык схемалар; оптикалык процессорлор; кванттык фотоника; оптикалык тармактар.

OPTICS IN THE ERA OF EXASCALE COMPUTING: FROM THEORY TO IMPLEMENTATION IN THE NATIONAL DIGITAL INFRASTRUCTURE

A.A. Sagymbaev, Zh.B. Mamadalieva, A.V. Ushakov

Abstract. This article explores the role of photonic technologies in the evolution of ICT – from fiber-optic communication lines to the prospects of quantum computing and 6G–communications. Global initiatives for the development of photonic integrated circuits, optical processors, and quantum photonics are analyzed. Particular attention is given to the potential for implementing photonic technologies in Central Asia, including their application in the Kyrgyz Republic. The key challenges hindering the widespread adoption of photonic solutions are outlined, and recommendations are proposed for the development of a national photonics strategy.

Keywords: information and communication technologies; photonic integrated circuits; optical processors; quantum photonics; optical networks.

Введение. Современный этап развития общества характеризуется стремительным переходом к цифровым технологиям, которые становятся неотъемлемым элементом экономических, социальных и научных процессов. Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) формируют архитектуру глобальной среды обмена данными, где критическими факторами становятся пропускная способность, надежность и энергоэффективность каналов связи. Однако бурный рост числа устройств, подключенных к сети (включая элементы Интернета вещей), развитие технологий искусственного интеллекта и переход к квантовой парадигме вычислений многократно усиливают нагрузку на традиционные электронные системы, ограниченные физическими законами проводимости и тепловыми потерями [1].

В ответ на эти вызовы на передний план выходят оптические технологии, представляющие собой альтернативную концепцию передачи и обработки информации с использованием фотонных носителей. Волоконно-оптические системы связи, обладая низкими потерями, высокой полосой пропускания и невосприимчивостью к электромагнитным помехам, уже стали базисом магистральной связи в телекоммуникационных сетях. Однако дальнейшее развитие требует перехода к более совершенным решениям – фотонным интегральным системам, в которых процессы генерации, маршрутизации, обработки и хранения данных реализуются на уровне взаимодействия света и материала [2].

Фотонные технологии открывают путь к созданию вычислительных архитектур нового поколения, включая оптические процессоры и суперкомпьютеры, способные выполнять параллельную обработку больших данных с минимальными задержками. Интеграция фотонных компонентов в интегральные микросхемы и системы способствует снижению энергозатрат, уменьшению размеров устройств и увеличению скорости информационного обмена. Особое значение приобретают нанофотонные структуры, оптические интерконнекты, а также элементы квантовой фотоники, применяемые в распределенных системах безопасности и высокоточной обработке информации [3].

Цель настоящего исследования – провести комплексный анализ возможностей и перспектив применения оптических и фотонных технологий в контексте развития информационно-вычислительной инфраструктуры. Особое внимание уделяется проблемам межсоединений в суперкомпьютерах, разработке фотонных интегральных схем, а также потенциальным сценариям применения данных технологий в Центральной Азии, включая Кыргызстан. На основании обзора современных исследований и технологических тенденций сформулированы практические рекомендации по внедрению оптических решений в региональную цифровую экосистему.

Оптическая связь в высокопроизводительных вычислительных системах

Переход к параллельным вычислениям, рост объемов обрабатываемых данных и расширение применения искусственного интеллекта предъявляют беспрецедентные требования к пропускной способности и энергоэффективности вычислительных платформ. В этих условиях традиционные электрические межсоединения (интерфейсные каналы передачи сигналов на основе металлических проводников) становятся узким местом, ограничивая производительность систем из-за задержек распространения сигнала, тепловых потерь и взаимных помех [1–3].

Оптические технологии, и прежде всего волоконно-оптические линии связи, являются ключевым инструментом преодоления этих ограничений. Их использование на различных уровнях архитектуры – от межпроцессорных соединений до глобальных вычислительных кластеров – обеспечивает значительное повышение эффективности обработки данных [2].

Среди основных преимуществ оптических межсоединений можно выделить:

- **Ультравысокая пропускная способность.** Благодаря частотному ресурсу, присущему оптическому диапазону ($\nu = c/\lambda$, где c – скорость света; λ – длина волны), можно достигать скорости передачи информации, превышающей 1 Тбит/с в одном канале связи [3]. Использование одномодовых волокон в сочетании с мультиплексированием по длине волны (DWDM) позволяет реализовывать десятки параллельных потоков в одном физическом канале.

- **Минимальные задержки.** Скорость распространения света в кварцевом волокне (порядка 2×10^8 м/с при $n \approx 1,5$) обеспечивает существенно более короткое время передачи сигнала по сравнению с электрическими соединениями. Это критически важно при построении масштабируемых архитектур, где задержки ограничивают производительность всей системы.
- **Высокая энергоэффективность.** Энергозатраты на передачу фотонного сигнала значительно ниже благодаря отсутствию сопротивления, характерного для металлических проводников. В полностью оптических системах расход энергии может составлять менее 5 фемтоджоулей на один бит информации [4].
- **Иммунитет к электромагнитным помехам.** В отличие от медных трасс, оптические каналы невосприимчивы к внешним электромагнитным наводкам и не создают перекрестных помех, что позволяет существенно повысить плотность интеграции компонентов микросхем и снизить требования к экранированию [2].

Применение оптики особенно критично в экзаскейл-суперкомпьютерах, где протяженные межмодульные соединения должны обеспечивать передачу терабитных потоков без искажения и потерь. Так, в системе *Aurora*, разрабатываемой в рамках инициативы U.S. DOE Exascale Computing Project, применяется технология DWDM, позволяющая одновременно передавать множество оптических сигналов через одномодовое волокно, снижая потребление энергии и увеличивая масштабируемость [5].

Современный технологический подход – это интеграция оптики непосредственно в вычислительные модули. Кремниевая фотоника дает возможность совмещать на одном кристалле лазерные источники, фотодетекторы, модуляторы и волноводные элементы. Примером является технология *Co-packaged Optics*, в рамках которой оптические компоненты монтируются вблизи вычислительных ядер. Это позволяет:

- *сократить физическую длину критических соединений*, снижая задержку до уровня ≤ 10 пс на 1 мм;
- *уменьшить тепловую нагрузку*, так как свет не выделяет джоулевых потерь при распространении;
- *увеличить плотность каналов передачи*, достигая значений до 800 Гбит/с на модуль [6].

Дальнейшее развитие оптических решений связано с нанофотоникой – областью, где свет управляется на субволновом уровне при помощи фотонных кристаллов и плазменных структур. Это направление обеспечивает миниатюризацию систем, улучшение показателей масштабируемости и открывает путь к формированию оптических логических элементов и вычислительных ядер.

Кроме того, оптические каналы становятся платформой для реализации квантовых вычислений, где в качестве носителей информации используются отдельные фотоны, несущие квантовые состояния. Технологии квантовой криптографии и распределения квантовых ключей уже демонстрируют работоспособность на расстояниях в сотни километров при использовании одномодовых волокон [7–9].

Таким образом, оптические технологии формируют новую парадигму построения вычислительных систем, в которой критически важные параметры – задержка, масштабируемость и энергопотребление – выводятся на принципиально иной уровень. Эти разработки уже выходят за рамки лабораторных экспериментов, трансформируя глобальную инфраструктуру обработки и передачи данных.

Физико-технические ограничения межсоединений в микроэлектронике

Несмотря на значительный прогресс в развитии микро- и наноэлектроники, классические проводниковые межсоединения в интегральных схемах продолжают оставаться ключевым ограничивающим фактором на пути к дальнейшему увеличению производительности цифровых систем. Это связано с фундаментальными физическими явлениями, проявляющимися при уменьшении геометрических размеров и повышении плотности компонентов на интегральных микросхемах [1–5].

С уменьшением сечения металлических трасс резко возрастает их удельное сопротивление. Согласно зависимости $R = \rho L/S$, где ρ – удельное сопротивление; L – длина токопроводящей трассы; S – площадь поперечного сечения трассы, даже незначительное уменьшение S приводит к существенному

увеличению сопротивления R . Это, в свою очередь, приводит к росту RC-задержек (временной константы цепи), которая рассчитывается по формуле:

$$\tau = RC,$$

где C – паразитная емкость линии передачи. При увеличении плотности компонентов и длины трассы величина задержки τ может достигать величин, критичных для современных ГГц-диапазонов тактовых частот, что ограничивает масштабируемость и быстродействие [2, 3].

Одновременно наблюдается рост энергозатрат. Энергия, потребляемая при переключении линии связи, выражается как:

$$P = CV^2f,$$

где V – напряжение питания, а f – тактовая частота переключений. При увеличении тактовой частоты и снижении напряжения питания до технологических пределов, дальнейшее снижение энергопотребления становится крайне затруднительным. Нагрузка на системы охлаждения и обеспечение теплового режима процессоров возрастает, особенно в гетерогенных вычислительных системах с большим количеством межмодульных интерфейсов.

Дополнительные проблемы возникают при распространении сигналов на высоких частотах, где токопроводящие трассы начинают вести себя как волноводы, что приводит к:

- индуктивным потерям;
- эффектам отражения и затухания;
- росту перекрестных наводок и помех.

Результатом становится снижение качества передачи сигнала, необходимость использования повторителей и активных согласующих схем, что увеличивает суммарное энергопотребление и задержки.

В этих условиях оптические межсоединения представляют собой технологически обоснованную альтернативу, благодаря следующим характеристикам:

- **Отсутствие омических потерь.** В оптическом волокне не происходит рассеяния энергии на сопротивление, что исключает нагрев линий и устраняет необходимость в термостабилизации.
- **Идеальная защита от помех.** Фотоны, в отличие от электронов, не взаимодействуют с внешними электромагнитными полями в тех же масштабах, что дает возможность плотной укладки межсоединений без потери качества сигнала.
- **Минимальные задержки на передачу сигнала.** Время распространения оптического импульса определяется формулой $\tau = L/c$, L – длина соединения, а c – скорость света в среде (для кремниевых волноводов порядка 2×10^8 м/с, при $n \approx 1,5$). Это особенно важно для суперкомпьютеров и систем с распределенной архитектурой.

В экспериментальных работах, таких как разработка фотонных интегральных схем (ФИС) на платформе кремниевой фотоники, достигнуты скорости передачи данных более 100 Гбит/с на линию при энергопотреблении менее 5 фемтоджоулей на бит [3]. Интеграция активных и пассивных фотонных компонентов на одном кристалле также снижает паразитные емкости и индуктивности, что невозможно в рамках традиционной микроэлектроники.

В целом, оптические межсоединения позволяют радикально пересмотреть подход к проектированию высокопроизводительных вычислительных архитектур, делая возможным переход к энергоэффективным, масштабируемым и сверхплотным цифровым системам. Это особенно актуально в контексте разработки вычислительных комплексов экзаскейл-класса, где электрические соединения уже достигли своих физических пределов.

Перспективы интеграции оптических технологий в суперкомпьютеры

Современные суперкомпьютеры стремительно приближаются к границе экзаскейл-производительности – уровня, при котором система способна выполнять свыше 10^{18} операций с плавающей точкой в секунду. Однако этот прогресс сталкивается с фундаментальными проблемами, связанными

с ограниченной пропускной способностью, высоким тепловыделением и физическими пределами традиционной межпроцессорной связи [8–10]. В этих условиях оптические технологии становятся не просто альтернативой, а критическим компонентом архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем.

Одним из главных вызовов является организация эффективных *межсоединений между вычислительными узлами*, количество которых в суперкомпьютерах экзаскейл-уровня превышает миллион. Электрические линии связи при таких масштабах требуют чрезмерного количества энергии и не обеспечивают стабильной работы при высоких частотах, особенно на больших расстояниях. Применение технологии DWDM позволяет в разы увеличить пропускную способность магистралей за счет одновременной передачи сигналов на разных длинах волн через одномодовое волокно.

Одним из примеров успешной интеграции фотонных технологий в архитектуру высокопроизводительных вычислений является суперкомпьютер *Frontier*, разработанный в 2022 году в Национальной лаборатории Ок-Ридж (Oak Ridge National Laboratory, США). Эта система стала первым в мире подтвержденным экзаскейл-компьютером, способным выполнять свыше одного квинтиллиона операций с плавающей точкой в секунду. В качестве основы межпроцессорной и межузловой связи в *Frontier* применяются волоконно-оптические соединения, что позволило реализовать масштабируемую и энергоэффективную архитектуру [10].

Благодаря широкому использованию оптических каналов передачи данных в модулях маршрутизации, коммутации и внутрикластерных сетей, системе удалось достичь выдающегося показателя энергоэффективности – 52 гигафлопс на Ватт потребляемой мощности. Суммарное энергопотребление комплекса при этом не превышает 21 мегаватта, что является одним из лучших результатов среди систем экзаскейл-класса. Использование фотонных компонентов минимизирует задержки и потери при передаче сигнала, снижает тепловую нагрузку и обеспечивает устойчивую работу при высоких скоростях передачи данных и большом количестве одновременных вычислительных потоков.

Следующим этапом развития высокопроизводительных вычислений является внедрение ФИС – устройств, объединяющих источники света, модуляторы, волноводы и фотодетекторы на одном полупроводниковом кристалле. Эти схемы позволяют минимизировать длину межсоединений, что критически важно для сверхплотной интеграции компонентов в серверных стойках.

Ключевые преимущества ФИС:

- **Масштабируемость.** Возможность интеграции свыше 100 каналов передачи на одной интегральной микросхеме с пропускной способностью до 400 Гбит/с на канал обеспечивает поддержку сложных топологий с минимальными задержками.
- **Снижение энергопотребления.** За счет отказа от активных повторителей и переходников, а также малых потерь при передаче света, достигается экономия энергии до 50 % по сравнению с электронными решениями [11].
- **Компактность и термостабильность.** В отличие от традиционных интегральных микросхем, ФИС не требуют мощного охлаждения, что открывает возможности для построения более плотных модулей обработки данных.

Интеграция ФИС также создает предпосылки для *синергии с квантовыми вычислениями*, где фотоны используются в качестве носителей кубитов. В квантовых вычислениях кубит – это *единица квантовой информации* (аналог бита в обычной информатике). Уже сегодня реализуются прототипы гибридных платформ, где фотонные каналы обеспечивают сверхбыструю синхронизацию между квантовыми узлами, что невозможно в электрических средах из-за шумов и рассеяния.

Кроме того, оптические технологии находят широкое применение в *облачных вычислительных платформах и распределенных системах хранения данных*, где минимизация задержек и увеличение полосы пропускания имеют решающее значение. Использование ФИС в дата-центрах позволяет значительно снизить суммарную нагрузку на инфраструктуру и упростить масштабирование сетей передачи данных [12].

Несмотря на очевидные преимущества, массовое внедрение оптики в суперкомпьютерах сопряжено с рядом вызовов:

- **Технологическая сложность.** Разработка и производство ФИС требуют высокоточной литографии и контроля на наноуровне, что повышает себестоимость.
- **Тепловые эффекты в плотных интеграциях.** Хотя сами оптические компоненты не нагреваются, побочные электронные элементы (лазеры, драйверы) требуют дополнительных решений по отводу тепла.
- **Недостаточная стандартизация.** Отсутствие единых промышленных стандартов тормозит совместимость между различными разработками и платформами.

Тем не менее, с учетом международных тенденций, поддерживаемых программами типа *Horizon Europe* и *DARPA Photonics*, ожидается, что к 2030 году доля оптических решений в суперкомпьютерах возрастет в несколько раз. Кыргызстан, при наличии государственной и исследовательской поддержки, может включиться в эту технологическую волну за счет локализации прототипирования, подготовки кадров и участия в международных проектах.

Глобальные инициативы и региональные перспективы развития оптических технологий

Развитие оптических и фотонных технологий на глобальном уровне осуществляется в рамках масштабных межгосударственных и научно-технологических программ, направленных на создание энергоэффективной цифровой инфраструктуры, развитие суперкомпьютерных платформ и переход к высокоскоростным сетям нового поколения.

Одним из ключевых механизмов стимулирования таких разработок в Европе является рамочная программа «*Horizon Europe*», реализуемая Европейским союзом в 2021–2027 гг. В рамках этой инициативы финансируются проекты по разработке фотонных интегральных схем, их промышленной стандартизации и внедрению в цифровую экосистему ЕС. В частности, в проектах *PhotonHub Europe* и *PIXAPP* достигнуто снижение энергопотребления оптических систем на 30 % при одновременном двукратном увеличении полосы пропускания в мультиканальных оптических магистральных [13].

В США оптические технологии развиваются при поддержке **Национальной фотонной инициативы** (*National Photonics Initiative, NPI*), запущенной с участием Министерства обороны, научных агентств и университетов. Особое внимание в рамках программ *DARPA Photonics* и *LIFT Photonics Foundry* уделяется созданию компактных фотонных компонентов для телекоммуникаций, квантовых вычислений и защищенных информационных систем [14]. Эти проекты ориентированы не только на фундаментальные исследования, но и на ускоренное внедрение в промышленность за счет механизмов государственной кооперации с технологическими компаниями.

Азиатские лидеры, такие как Япония, Южная Корея и Китай, также реализуют собственные национальные стратегии. В Японии активно развиваются платформы *Integrated Photonics Roadmap* и *Society 5.0*, в которых оптические технологии рассматриваются как основа для построения распределенных интеллектуальных систем с низким энергопотреблением. Китай делает ставку на создание локальных экосистем фотоники в рамках инициативы *Made in China 2025*, включая масштабное производство ФИС и разработку квантово-оптических сетей [15].

На этом фоне регионы Центральной Азии, включая Кыргызскую Республику, могут использовать международный опыт для создания собственных точек роста в области оптики и фотоники. На сегодняшний день важными направлениями становятся:

- **Развитие оптической инфраструктуры связи** – строительство магистральных волоконно-оптических линий, объединяющих ключевые регионы страны и обеспечивающих устойчивый доступ к высокоскоростному интернету.
- **Интеграция оптических решений в образование и науку** – формирование исследовательских лабораторий и академических курсов по фотонике, в том числе при вузах технического профиля.
- **Создание экспериментальных и пилотных зон** для тестирования распределенных оптических платформ в отраслях экономики – сельском хозяйстве, энергетике, телекоммуникациях.

Программа «**Цифровой Кыргызстан–2040**», включающая меры по развитию ИКТ-инфраструктуры и цифровизации государственного управления, может служить основой для системного внедрения оптических технологий. Одним из ее элементов является строительство национальных оптоволоконных сетей, охватывающих труднодоступные и приграничные регионы [16].

Тем не менее, для активного включения страны в международную технологическую повестку необходимо преодоление ряда барьеров:

- **Финансовый и технологический разрыв** – высокая стоимость оборудования и отсутствие локальных производств требуют привлечения инвестиций, в том числе через механизмы государственно-частного партнерства.
- **Кадровый дефицит** – в регионе ощущается нехватка специалистов в области фотоники, оптоэлектроники и микроинтеграции. Решением может стать организация программ академической мобильности, стажировок и совместных лабораторий с зарубежными партнерами.
- **Недостаточная координация политики в регионе** – страны Центральной Азии обладают схожими вызовами и могут добиться синергетического эффекта при координации усилий, в том числе в рамках ЕАЭС, ШОС или инициатив ООН.

Таким образом, развитие оптических технологий в Кыргызстане возможно при условии адаптации лучших международных практик, создания собственной научной и производственной базы, а также активного участия в международных партнерствах. Региональные инициативы, подкрепленные государственной поддержкой, могут превратить страну из потребителя цифровых решений в активного участника глобального фотонного перехода.

Перспективы и рекомендации по развитию фотонных технологий

Фотонные технологии в начале XXI века формируют один из важнейших векторов развития информационно-вычислительной инфраструктуры. Возможность манипулирования светом на уровне микронов и нанометров открывает путь к созданию высокоскоростных, энергоэффективных и масштабируемых решений для обработки, передачи и хранения данных. Потенциал фотоники выходит далеко за рамки телекоммуникаций – он охватывает квантовые вычисления, сенсорику, биофотонику, информационную безопасность и даже энергетические приложения [1–7].

Одним из ключевых направлений остается интеграция фотонных компонентов в микросхемы. Современные фотонные интегральные схемы на базе кремния демонстрируют возможность передачи информации со скоростью до 1 Тбит/с на канал при минимальном энергопотреблении [8, 9]. Это позволяет закладывать архитектуры, устойчивые к масштабированию, и заменять традиционные интерфейсы в процессорных, графических и сетевых модулях.

Другим стратегическим направлением становится разработка **оптических процессоров**, в которых квант используется не только как средство передачи, но и как вычислительный ресурс. Такие устройства, основанные на эффекте интерференции и фотонных логических элементах, позволяют выполнять матричные операции и операции свертки в миллиарды раз быстрее, чем их электронные аналоги, что особенно актуально для задач машинного обучения и анализа больших данных [17, 18].

Перспективы открываются и в области **квантовой фотоники**, где реализуются алгоритмы распределенной обработки и защищенной передачи информации при помощи однофотонных источников и запутанных состояний. Здесь фотоны выступают в качестве носителей кубитов, а оптические волокна становятся каналами передачи квантовой информации на дальние расстояния. Это направление является ключевым для создания так называемого **квантового интернета** [18, 19].

Для Кыргызской Республики использование фотонных технологий может стать мощным катализатором цифрового роста и инновационного развития. Среди приоритетных шагов предлагается:

- **Создание исследовательских и образовательных платформ по фотонике** при профильных университетах и академических институтах. Это включает развитие магистратур, аспирантур, докторантур и научных лабораторий, также участие в международных проектах и цифровых платформах обмена.

- **Разработка пилотных проектов в приоритетных отраслях** – энергетике, телекоммуникациях, медицине и сельском хозяйстве. Например, внедрение волоконных сенсорных сетей в гидросооружениях, применение оптических решений в медицине для неинвазивной диагностики, или создание фотонных шлюзов в спутниковой связи.
- **Формирование национальной программы поддержки фотонных технологий**, направленной на стимулирование частных инвестиций, создание технологических кластеров, локальное прототипирование и стандартизацию.
- **Сотрудничество с международными инициативами** – участие в проектах «Horizon Europe», международных программах ЮНЕСКО по науке и технологии, и двусторонних соглашениях с университетами и компаниями из Китая, Японии, ЕС и США.
- **Поддержка стартапов и малых технологических компаний**, работающих в области IoT, телеком-инфраструктуры, квантовой криптографии и интегральной оптоэлектроники. Для этого могут быть созданы центры при университетах и технопарках.
Среди вызовов, препятствующих быстрому внедрению фотоники, остаются:
- **Отсутствие производственной базы** для создания высокоточных компонентов – что требует импортозамещения, либо участия в транснациональных производственных цепочках.
- **Дефицит специалистов и проектных команд**. Для его устранения необходимы не только обучение студентов, но и программы переквалификации, международные стажировки, доступ к открытым учебным курсам.
- **Низкий уровень координации между наукой, бизнесом и государством**. Рекомендуются создание координационного совета или экспертной платформы при Министерстве цифрового развития и инновационных технологий Кыргызской Республики, способной объединять ресурсы разных секторов.

Таким образом, фотонные технологии могут сыграть решающую роль в переходе Кыргызстана к цифровой экономике нового типа – высокоскоростной, защищённой и энергоэффективной. При поддержке государства, науки и бизнеса возможен переход от роли потребителя к активному участнику глобального технологического процесса.

Заключение. На рубеже цифровой трансформации информационно-коммуникационные технологии сталкиваются с пределами традиционной электронной парадигмы. Возрастающие требования к скорости, масштабируемости и энергоэффективности обработки данных требуют принципиально новых решений, которые обеспечиваются оптическими и фотонными системами. Проведённый в статье анализ демонстрирует, что фотонные технологии являются не просто альтернативой, а необходимым условием устойчивого развития вычислительной и сетевой инфраструктуры XXI века.

Оптические межсоединения, фотонные интегральные схемы и квантово-оптические платформы открывают новые горизонты в архитектуре суперкомпьютеров, облачных вычислений и телекоммуникационных сетей. Их внедрение позволяет значительно снизить энергозатраты, устранить физические ограничения на масштабирование и повысить надёжность передачи данных. Особенно важно, что фотоника формирует основу для следующего поколения технологий – квантовых коммуникаций, распределённых вычислений и оптического машинного обучения.

Ведущие страны мира уже реализуют масштабные стратегии по разработке и внедрению фотонных решений, ориентированных на переход к цифровым экономикам нового типа. Примеры программ «Horizon Europe», «National Photonics Initiative», «Integrated Photonics Roadmap» в Азии и успешные реализации на уровне экзаскейл-компьютеров показывают эффективность системной государственной поддержки и межотраслевой кооперации.

Кыргызская Республика обладает всеми предпосылками для включения в эти глобальные технологические тренды. Развитие магистральной оптической инфраструктуры, интеграция фотоники в сферу образования и науки, а также формирование механизмов поддержки инновационных разработок могут создать базу для перехода от потребления к производству передовых цифровых решений.

Основные выводы:

- **Фотонные технологии обеспечивают прорывные характеристики** по сравнению с электронными системами: минимальные задержки, высокая пропускная способность, иммунитет к помехам и низкое энергопотребление.
- **Интеграция оптики и электроники на уровне фотонных интегральных микросхем** формирует основу для построения энергоэффективных и масштабируемых вычислительных платформ.
- **Кыргызстану необходима комплексная стратегия**, включающая научно-образовательные программы, участие в международных инициативах и создание условий для технологического предпринимательства.

Рекомендации:

- Разработать национальную дорожную карту по развитию фотонных технологий в приоритетных отраслях экономики и ИКТ.
- Поддерживать создание исследовательских и инженерных центров в области фотоники и квантовой оптики.
- Содействовать международному научному и технологическому сотрудничеству с центрами компетенций в ЕС, США и Восточной Азии.

Будущее оптических систем – это не только ответ на технологические вызовы современности, но и шанс для Кыргызской Республики занять активную позицию в формирующейся архитектуре глобального цифрового пространства.

Поступила: 06.05.2025; рецензирована: 21.05.2025; принята: 23.05.2025.

Литература

1. *Saleh B.E.A. Fundamentals of Photonics* / B.E.A. Saleh & M.C. Teich. 3rd Edition. Wiley, 2019. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Photonics%2C+3rd+Edition-p-9781119506874> (дата обращения: 03.06.2024).
2. *Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems* / G.P. Agrawal. 5th Edition. Wiley, 2019. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Fiber+Optic+Communication+Systems%2C+5th+Edition-p-9781119495222> (дата обращения: 14.07.2024).
3. *Miller D.A.B. Attojoule Optoelectronics for Low-Energy Information Processing and Communications* / D.A.B. Miller // *Proceedings of the IEEE*. 2017. 105(9). P. 1831–1855. URL: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2726540> (дата обращения: 22.08.2024).
4. *Sun C. Single-chip microprocessor that communicates directly using light* / C. Sun, M.T. Wade, Y. Lee, et al. // *Nature*. 2015. 528. P. 534–538. URL: <https://www.nature.com/articles/nature16454> (дата обращения: 05.09.2024).
5. U.S. Department of Energy. Aurora Supercomputer Overview. URL: <https://www.alcf.anl.gov/aurora> (дата обращения: 17.09.2024).
6. *Kaminow I. Optical Fiber Telecommunications VI* / I. Kaminow, T. Li, & A.E. Willner (Eds.) // Academic Press. 2013. URL: <https://www.elsevier.com/books/optical-fiber-telecommunications-vi-a/kaminow/978-0-12-396958-3> (дата обращения: 01.10.2024).
7. *Alferov Z.I. The Double Heterostructure Concept and its Applications in Physics, Electronics, and Technology* / Z.I. Alferov // Nobel Lecture. 2000. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2000/alferov/lecture> (дата обращения: 20.09.2024).
8. *Soref R. The Past, Present, and Future of Silicon Photonics* / R. Soref // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2015, 12(6). P. 1678–1687. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7364205> (дата обращения: 05.09.2024).
9. *Lee B.G. Monolithic Silicon Integration of Scaled Photonic Switch Fabrics* / B.G. Lee, S. Assefa, A.V. Rylyakov, et al. // *Optics Express*. 2010 18(25). P. 26890–26898. URL: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-18-25-26890&id=196286> (дата обращения: 21.10.2024).
10. Top500. (2023). The Frontier Supercomputer. URL: <https://www.top500.org/system/179807/> (дата обращения: 04.11.2024).

11. *Bergman K.* Silicon Photonic Network-on-Chip for High-Performance Computing Systems / K. Bergman, et al. // *IEEE Micro*. 2018. 38(6). P. 42–53. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8570805> (дата обращения: 14.12.2024).
12. *Shalf J.* The Future of Computing Beyond Moore’s Law / J. Shalf // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2020. 378(2166), 20190061. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0061> (дата обращения: 02.10.2024).
13. PhotonHub Europe – European Photonics Innovation Hub. URL: <https://www.photonhub.eu> (дата обращения: 28.03.2025).
14. National Photonics Initiative. URL: <https://www.lightourfuture.org> (дата обращения: 24.06.2024).
15. *Lin H.* Photonic Integration in China: Progress and Perspectives / H. Lin, et al. // *Photonics Research*. 2022. 10(5). B20–B33. URL: <https://www.osapublishing.org/prj/fulltext.cfm?uri=prj-10-5-B20&id=470306> (дата обращения: 27.09.2024).
16. Министерство цифрового развития Кыргызской Республики. Программа «Цифровой Кыргызстан – 2040». URL: <https://digital.gov.kg/ru/strategy> (дата обращения: 19.12.2024).
17. *Willner A.E.* Optical Signal Processing Using Nonlinear Optical Effects / A.E. Willner, et al. / *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019. 25(6). P. 1–13. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8728143> (дата обращения: 15.01.2025).
18. *Feldman J.* Parallel optical logic operations in integrated photonic circuits / J. Feldmann, et al. // *Nature*. 2021, 589. P. 52–58. URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-03070-1> (дата обращения: 09.01.2025).
19. *Kimble H.J.* The Quantum Internet / H.J. Kimble // *Nature*. 2008. 453. P. 1023–1030. URL: <https://www.nature.com/articles/nature07127> (дата обращения: 24.02.2025).