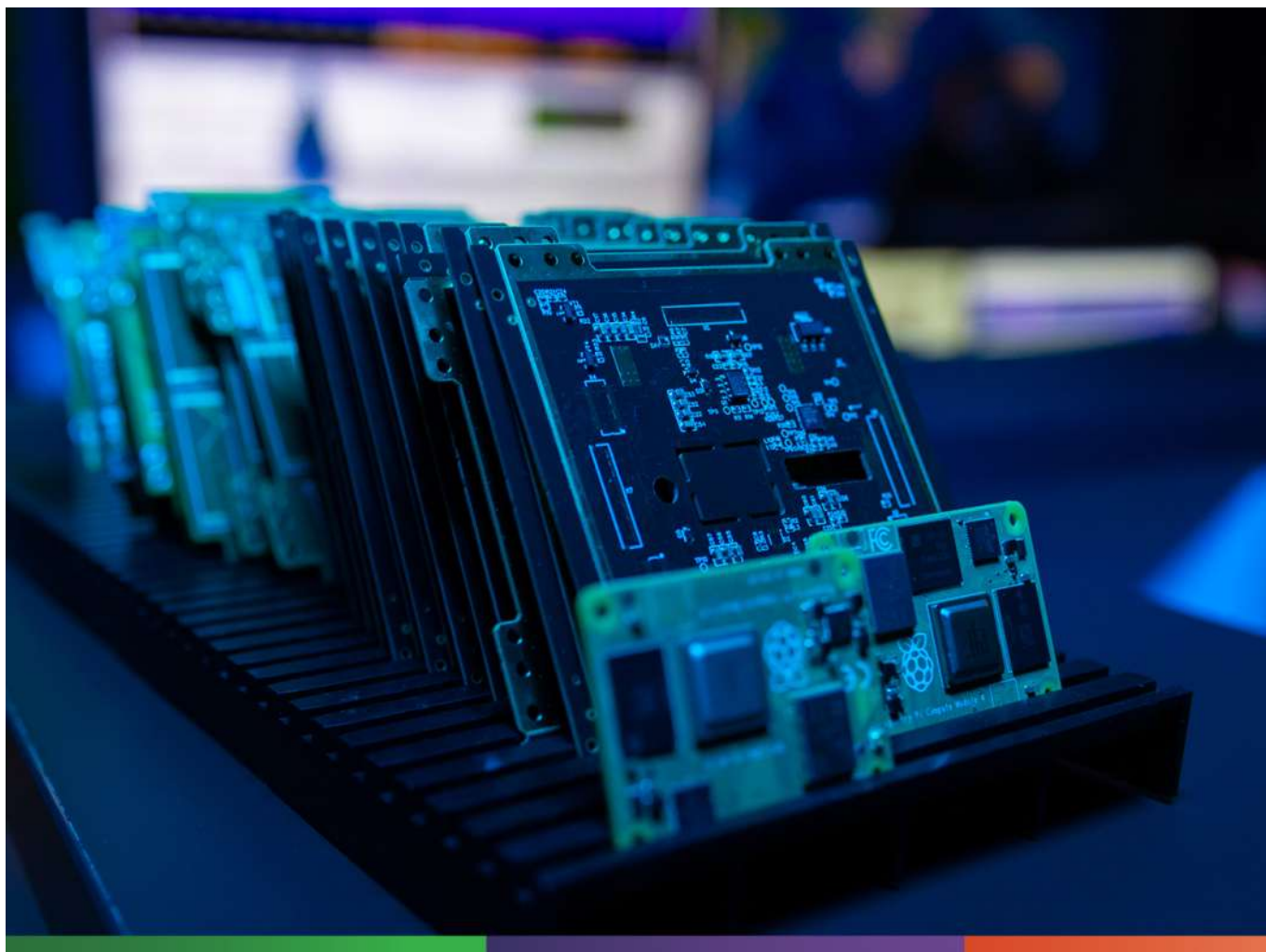


Оптические сети как ключевой фактор развития инфраструктуры ИИ



Современные вычислительные комплексы для искусственного интеллекта упираются не только в производительность графических процессоров, но и в возможности сети передачи данных. По мере роста числа графических процессоров в стойке и увеличения размеров кластеров именно сеть определяет, насколько эффективно можно объединить отдельные вычислительные узлы в единую систему с малой задержкой и высокой пропускной способностью. По оценкам Goldman Sachs, переход к следующему поколению стоек и межсоединений приводит к кратному росту совокупного объема рынка сетевых компонентов: от порядка 15 млрд долларов для текущих конфигураций до примерно 154 млрд долларов для систем следующего поколения.

Авторы отчета связывают этот рост прежде всего с развитием архитектуры сетевых межсоединений в кластерах для обучения и применения моделей искусственного интеллекта, а также с переходом на более высокие скорости передачи данных и более интегрированные оптические решения.

Масштабирование вычислительных систем

В отчете выделяются два взаимосвязанных направления развития архитектуры центров обработки данных, ориентированных на задачи искусственного интеллекта.

Во-первых, масштабирование внутри вычислительного блока числа графических процессоров и специализированных микросхем коммутации в рамках одной стойки или объединенной группы стоек. В новых поколениях систем число ускорителей на вычислительную единицу достигает сотен, а требования к пропускной способности внутренних соединений существенно возрастают: для перспективных конфигураций рассматриваются варианты с 144 и 576 графическими процессорами на вычислительный блок с многоуровневой схемой связи между ними.

Во-вторых, масштабирование на уровне кластера. Кластеры включают десятки и сотни тысяч ускорителей, связанных многоуровневой сетью коммутаторов верхнего уровня, промежуточного уровня и уровня стойки. Для соединений между стойками используются оптические линии со скоростями порядка 800 Гбит/с и 1,6 Тбит/с, а в следующих поколениях — до 3,2 Тбит/с на один порт. На этом фоне усложнение архитектуры внутренних соединений — переход от коротких медных линий к многоуровневым печатным платам и оптическим каналам вплоть до интегрированной оптики в пределах вычислительного модуля — становится одним из ключевых источников роста стоимости сетевой части на единицу вычислительной мощности

Эволюция архитектур

Отчет опирается на дорожную карту Nvidia и выделяет четыре типовых конфигурации стоек для будущих платформ искусственного интеллекта.

- Конфигурация GB300 NVL72 (ориентировочно 2025–2026 годы). Вычислительный блок включает 72 графических процессора на стойку, масштабирование внутри стойки реализовано на основе медных соединений, а масштабирование между стойками — по оптическим линиям со скоростями 800 Гбит/с и 1,6 Тбит/с.
- Конфигурации Vera Rubin NVL72 (2026–2027 годы), варианты А и В. В обоих случаях внутренние соединения строятся преимущественно на меди, но во внешних связях используются либо только съёмные оптические модули (вариант А), либо комбинация съёмных модулей и более интегрированных оптических решений с частичным внедрением ко-упакованной оптики (вариант В).
- Конфигурации Rubin Ultra NVL144 и NVL576 (2027–2028 годы). Для NVL144 предполагается использование печатной платы-мидплейна, к которой напрямую подключаются вычислительные и коммутационные модули внутри стойки, а для NVL576 рассматривается объединение восьми стоек в единый вычислительный блок с использованием многоуровневых медно-оптических соединений.

По оценке аналитиков, при переходе от GB300 NVL72 к Rubin Ultra NVL576 совокупная стоимость сетевой части на вычислительную единицу возрастает примерно в 29 раз — с 315 тыс. до 9,4 млн долларов, а совокупный рынок решений для соединений в этих системах увеличивается с порядка 15 млрд до около 154 млрд долларов. Значительная часть этого прироста связана с развитием внутренних соединений и внедрением новых оптических

технологий.

Сетевые межсоединения - печатные платы, медь и оптика

Сетевые соединения в центрах обработки данных используют три основных класса технологий: линии на печатных платах, медные кабели и оптическое волокно.

- **Линии на печатных платах.** Используются для очень коротких соединений внутри плат и модулей, обеспечивают минимальное энергопотребление, но по мере роста частот и длины трасс возникают серьезные ограничения по целостности сигнала.
- **Медные кабели.** Применяются для соединений внутри стойки и на небольших расстояниях между стойками. Активные варианты с ретактированием сигнала позволяют уверенно работать на расстояниях до нескольких десятков метров, однако при переходе к скоростям порядка триллиона бит в секунду и выше медные решения постепенно уступают оптическим.
- **Оптические линии.** Обеспечивают устойчивое качество сигнала на больших расстояниях и при высоких скоростях передачи данных (до 1,6 и 3,2 Тбит/с), что делает их базовым выбором для межстоечных соединений в крупных кластерах.

Аналитики выделяют три крупных тенденции.

Во-первых, развитие медных кабелей. Пассивные кабели постепенно дополняются активными кабелями с усилителями и ретактированием, что позволяет расширять область их применения с внутристойных на межстоечные соединения на расстояниях до нескольких десятков метров.

Во-вторых, расширение области применения печатных плат. Если ранее линии на платах использовались главным образом внутри отдельных модулей, то в новых конфигурациях они становятся основой для соединения целых лотков внутри стойки через многослойные мидплейны.

В-третьих, смещение оптики «вглубь» системы. Оптические соединения переходят от простых съемных модулей в коммутационном оборудовании к решениям, размещенным ближе к вычислительным кристаллам, включая оптику на плате и ко-упакованную оптику.

Ко-упакованная оптика и интегрированные оптические решения

Особое внимание в отчете уделяется ко-упакованной оптике, при которой оптические элементы размещаются в непосредственной близости от кристалла коммутатора или вычислительного чипа. Сокращение длины электрического участка тракта с сантиметров до миллиметров позволяет снизить энергопотребление и задержку, уменьшить количество вспомогательных микросхем и повысить плотность портов.

С точки зрения архитектуры будущих центров обработки данных именно такие решения рассматриваются как ключевой инструмент для реализации соединений со скоростями 3,2 Тбит/с и выше при приемлемом энергопотреблении. В то же время ко-упаковка усложняет вопросы обслуживания: отказ оптического канала может потребовать замены не модуля, а целой платы, коммутатора или даже вычислительного кристалла, что повышает требования к

надежности и диагностике.

В отчете также показано, что в ближайшие годы ко-упакованная оптика развивается параллельно для двух классов устройств: коммутаторов и специализированных вычислительных чипов, включая графические процессоры. Несколько крупных компаний уже объявили о планах вывода соответствующих решений на рынок в период 2025–2027 годов.

Кремниевая фотоника и изменение экономических параметров

Отдельный блок отчета посвящен кремниевой фотонике, то есть фотонным схемам, реализованным на кремниевой подложке и интегрированным с электронной частью. По прогнозу Goldman Sachs, доля модулей на основе кремниевой фотоники в общем объеме поставок оптических модулей для центров обработки данных увеличится с примерно 6% в первом квартале 2024 года до порядка 45–46% к концу 2028 года.

Приведенные оценки показывают, что для модулей со скоростью 800 Гбит/с переход от традиционной схемы на основе внешних модулирующих лазеров к кремниевой фотонике позволяет сократить себестоимость полного набора компонентов примерно на четверть, при этом отпускная цена модуля снижается не столь существенно, что ведет к росту валовой маржи. Для модулей со скоростью 1,6 Тбит/с экономия на уровне себестоимости становится еще более заметной при одновременном росте доли на рынке.

Вместе с тем аналитики подчеркивают, что традиционные решения сохраняют значение для магистральных и протяженных линий, а также для сценариев, где заказчики исходят из максимально консервативных требований к отработанной надежности, даже ценой более высоких затрат.

Рынок сетевых решений

Суммарные оценки рынка сетевых компонентов для будущих поколений систем искусственного интеллекта строятся на сочетании данных о стоимости межсоединений на одну стойку и прогнозов по поставкам стоек. Согласно расчетам Goldman Sachs, при переходе к конфигурациям Rubin Ultra совокупная стоимость соединений на вычислительную единицу возрастает примерно в 29 раз по сравнению с базовой конфигурацией GB300, а общий объем рынка сетевых решений, включая внутренние и внешние связи, достигает около 154 млрд долларов.

Около двух третей этой суммы приходится на внутренние соединения в пределах вычислительного блока, а значительная часть роста связана с внедрением ко-упакованной оптики и более сложных схем на основе печатных плат.

Для ко-упакованной оптики в отчете сформулирован диапазон возможного объема рынка на период 2026–2028 годов: от примерно 15–16 млрд долларов в консервативном сценарии до порядка 97 млрд долларов при более активном внедрении. В рамках последнего сценария число коммутаторов с ко-упакованной оптикой, используемых для внешних связей, может достигать около 110 тысяч устройств в год к 2028 году при поставках стоек с ускорителями на уровне примерно 120 тысяч.

По мере внедрения новых поколений стоек с сотнями ускорителей и сложной архитектурой межсоединений вклад сетевой части в общую стоимость инфраструктуры заметно возрастает. При благоприятном сценарии суммарный объем рынка компонентов для соединений в таких системах оценивается в десятки и даже порядка ста пятидесяти миллиардов долларов за жизненный цикл рассматриваемых платформ, причем значительная доля приходится на решения, связанные с оптикой и высоким уровнем интеграции.

Ограничения цепочек поставок и роль источников излучения

Существенным ограничением для роста рынка оптических решений в ближайшие годы остается доступность источников излучения и связанных с ними материалов. В отчете отмечается, что спрос на лазерные диоды и приемники, используемые в оптических модулях, растет на фоне ускоренного ввода центров обработки данных и перехода к более высоким скоростям передачи.

Дополнительным фактором риска выступает ограниченность производства подложек из фосфида индия, применяемых как для лазеров, так и для фотоприемников, а также геополитические ограничения на экспорт определенных категорий оптоэлектронных компонентов.

По оценке авторов, дефицит источников света сохранится как минимум до 2027 года, а более устойчивый баланс между спросом и предложением может сформироваться лишь во второй половине 2028 года при условии ввода новых производственных мощностей и возможного замедления темпов роста требований к инфраструктуре.

Прогноз развития инфраструктуры и научные направления

Аналитический прогноз базируется на дорожных картах ведущих производителей ускорителей и сетевого оборудования, а также на оценках динамики скоростей оптических межсоединений.

В ближайшие годы ожидается:

- переход от доминирования модулей со скоростью 800 Гбит/с к значимой доле модулей 1,6 Тбит/с примерно в районе 2026 года;
- начало широкого применения модулей со скоростью 3,2 Тбит/с в конце рассматриваемого периода, с последующим распространением таких решений на различных региональных рынках;
- постепенное смещение оптики от межстоечных соединений к внутристойным и внутрисистемным, включая размещение оптических элементов рядом с кристаллами коммутаторов и вычислительных устройств.

С научной точки зрения это определяет несколько блоков задач, которые будут формировать повестку исследований.

Во-первых, физика и схемотехника высокоскоростных межсоединений. Необходимы модели и

методики проектирования линий передачи на печатных платах и в медных кабелях для частот, соответствующих скоростям 1,6–3,2 Тбит/с, с учетом всех видов искажений сигнала и электромагнитных помех. Сюда же относятся исследования новых материалов для печатных плат и кабелей, а также методов снижения задержек и нестабильности временных характеристик в таких линиях.

Во-вторых, интегрированная фотоника и совместное проектирование оптических и электронных схем. Поскольку оптические решения фактически «заходят внутрь» вычислительных модулей, возрастает роль совместного рассмотрения фотонных и электронных подсистем при проектировании. Перспективными выглядят работы по кремниевой фотонике, гибридным структурам на основе кремния и соединений третьей и пятой групп, а также по тепловому режиму и надежности в условиях высокой плотности размещения элементов.

В-третьих, архитектура кластеров для искусственного интеллекта. Структура соединений между ускорителями — топологии, уровни иерархии, схемы маршрутизации — становится одним из основных ограничений производительности крупных систем. Это открывает поле для исследований по моделированию различных схем межсоединений, оценке их устойчивости к отказам и оптимизации соотношения между скоростями внутренних и внешних связей.

В-четвертых, надежность и эксплуатационные характеристики оптоэлектронных подсистем. Высокая степень интеграции оптики и электроники в перспективных системах усложняет обслуживание и повышает цену ошибки. Это ставит задачи разработки методов мониторинга состояния, диагностики неисправностей и прогнозирования ресурса на уровне оптических и электронных подсистем, включая ко-упакованные решения.

В-пятых, вопросы цепочек поставок и технологического развития. Дефицит ключевых фотонных компонентов и материалов, а также экспортные ограничения подчеркивают важность развития собственной компетенции в области лазерных источников, фотоприемников, интегрированной фотоники и высокоскоростной электроники. Для университетов и научных центров это означает устойчивый интерес к фундаментальным и прикладным исследованиям в области материаловедения, технологий выращивания кристаллов и созданию интегральных оптоэлектронных схем.

Возможные приоритеты для российских научных центров и университетов

Прогнозы Goldman Sachs по развитию оптической инфраструктуры в центрах обработки данных для искусственного интеллекта задают понятную рамку для формирования национальных научных приоритетов в области фотоники, электроники и системной архитектуры. Ниже приведены направления, которые выглядят естественными кандидатами для университетских лабораторий и академических институтов.

Экспериментальные стенды высокоскоростных межсоединений. С учетом перехода к скоростям 1,6–3,2 Тбит/с становится актуальной отработка конфигураций, близких к промышленным: многоуровневые соединения на медных кабелях и печатных платах, макеты стоек с несколькими уровнями коммутации, имитация нагрузок, характерных для крупных кластеров искусственного интеллекта. Такие стенды могут стать базой для исследований по

целостности сигнала, электромагнитной совместимости и энергетической эффективности

Лаборатории интегрированной фотоники и оптоэлектронной совместной компоновки. Переход мировой индустрии к кремниевой фотонике и ко-упакованной оптике создает окно возможностей для развития собственных технологий интегральных фотонных схем, гибридных структур и решений для короткодействующих оптических соединений в вычислительных системах. Здесь востребованы работы по проектированию и моделированию фотонных устройств, разработке технологических маршрутов их изготовления и исследованию тепловых и надежности характеристик.

Архитектура и моделирование кластеров искусственного интеллекта. Учитывая, что структуру межсоединений крупные компании уже рассматривают как один из главных ограничивающих факторов производительности, для университетов перспективны проекты по моделированию сетевых топологий, оценке их масштабируемости и устойчивости, а также по исследованию взаимодействия между архитектурой сети и алгоритмами распределенного обучения. Такие исследования могут опираться на комбинацию симуляторов, экспериментальных стендов и анализа открытых данных о конфигурациях зарубежных систем.

Исследования по надежности и диагностике оптических подсистем. Высокая степень интеграции оптики и электроники в перспективных системах усложняет обслуживание и повышает цену ошибки, что делает актуальными работы по методам мониторинга состояния оптических каналов, диагностике деградации компонентов, прогнозированию отказов и построению схем резервирования с учетом специфики ко-упакованных решений.

Исследования в области материалов и технологий для источников излучения и фотоприемников. Отчет Goldman Sachs отдельно фиксирует дефицит мощностей по выпуску лазерных диодов и ограниченность подложек из фосфида индия, что делает развитие собственных компетенций в этой области фактором технологической устойчивости. Для университетов это означает востребованность фундаментальных и прикладных работ по полупроводниковым лазерам, технологиям эпитаксии и разработке новых материалов для интегральной фотоники.

Суммарно результаты отчета Goldman Sachs позволяют рассматривать сетевые межсоединения не как вспомогательную часть инфраструктуры искусственного интеллекта, а как один из ее определяющих компонентов. Рост скоростей, переход к интегрированной оптике и усложнение архитектуры соединений выводят на первый план задачи, лежащие на стыке фотоники, электроники и системной архитектуры, и формируют долгосрочный запрос на исследования в этих областях.

Материал Goldman Sachs