Интегрированные пакетно-оптические транспортные сети большой пропускной способности

Часть 4. Этапы развития и стандартизация решений IPoDWDM/P-OTS

С.С.Коган, к.т.н., советник генерального директора компании "Т8" по формированию технической стратегии / kogan@t8.ru

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2026.139.7.46.55

В цикле статей рассматриваются интегрированные пакетно-оптические решения IPoDWDM (IPoOLS/P-OTS – Packet-Optical Transport System) для передачи данных по оптическим каналам систем OTN/DWDM с пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с и выше, а также управления открытой, построенной на оборудовании разных производителей, сетью. В первой части речь идет о динамической маршрутизации пакетно-ориентированных соединений по каналам (длинам волн) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), во второй – о функциональном назначении сетевых уровней интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуры, в третьей – о вариантах управления (маршрутизации) потоками данных и реализации сменных модулей приемопередатчиков. Четвертая часть цикла посвящена стандартизации и эволюции решений для интегрированных пакетно-оптических транспортных сетей большой пропускной способности.

Этапы развития пакетно-оптических транспортных сетей высокой пропускной способности

В период до 2020 года наблюдался постепенный переход от раздельных оптических сетей DWDM и IP к их интеграции. Идея интеграции "цветной", настроенной на определенную длину волны, оптики систем DWDM напрямую, минуя промежуточные транспондеры/мукспондеры, в интерфейсные платы маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов, появилась на стыке 2004–2005 годов. В 2005 году компания Cisco представила первое коммерческое решение IPoDWDM для своего флагманского терабитного маршрутизатора Cisco CRS-1. В 2008–2009 годах технология стала доступна для других популярных линеек (например, Cisco XR 12000), ее начали точечно тестировать крупные операторы связи [28]. В те годы оптические DWDM-модули были огромными, сильно грелись и занимали столько места, что при их установке общая плотность портов маршрутизатора падала вдвое.

В период после 2020 года в рамках реализации концепции IPoDWDM наблюдался постепенный переход к интегрированным пакетно-оптическим сетевым решениям P-OTS:

- массово внедрялись непосредственно в маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы сменные оптические когерентные линейные модули приемопередатчиков для оптических каналов с пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с и более,
- началось активное использование программно-определяемых решений SDN (Software-Defined Networking) для централизованного управления конвергентной сетевой инфраструктурой, при котором управляющий уровень (интеллект сети) отделен от физических устройств передачи данных.

Стартовой точкой "новой эры" принято считать 2021 год, когда началось коммерческое производство модулей 400ZR и 400ZR+. Эти миниатюрные сменные модули приемопередатчиков позволили устанавливать DWDM-интерфейсы в стандартные слоты обычных маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов без потери плотности портов, благодаря чему концепция IPoDWDM стала основным трендом в операторских сетях и сетях DCi взаимодействия ЦОДов [29].

Этап разделенных сетей (до середины 2000-х гг.)

На этом этапе IP-маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы (OSI уровни L2/3) и оптические транспортные системы OTN/DWDM (OSI уровни L0/1) существовали как отдельные, слабо связанные между собой, системы. Маршрутизатор подключался к транспортной сети через промежуточный клиентский интерфейс с так называемой "серой", не настроенной на определенную длину волны, оптикой, а транспортная сеть обеспечивала "прозрачную" передачу данных. Эти сети планировались и управлялись, как правило, сотрудниками разными отделов одного оператора сети. Из-за избыточности оборудования и дублирования функций, особенно при поиске и локализации неисправностей, отмечались высокая стоимость сетевых решений и медленное внедрение новых услуг.

Концепция IPoDWDM и развитие распределенной плоскости управления GMPLS/ASON в 2000-х годах

Этот этап отличается появлением концепции IPoDWDM, при которой непосредственно в линейные карты IP-маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов интегрируются сменные "цветные" DWDM приемопередатчики с возможностью перестройки длины волны оптического излучения. Технологии мультипротокольной коммутации по меткам GMPLS (Generalized Multi-protocol Label Switching) и оптической сети с автоматической коммутацией каналов ASON (Automatically Switched Optical Network) создавались параллельно и независимо одна от другой в двух разных международных организациях по стандартизации. Но позже, в первой половине 2000-х годов, они были применены для решений IPoDWDM с распределенной плоскостью управления интегрированной сетью.

Концепция GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) была разработана в инженерном совете Интернета IETF (Internet Engineering Task Force) рабочей группой CCAMP (Common Control and Measurement Plane). Основные базовые стандарты RFC (Request for Comments) по сигнализации и архитектуре GMPLS начали активно выпускать в IETF с 2003 года (например, RFC 3471/3473), а официальный документ по архитектуре GMPLS (RFC 3945) вышел в октябре 2004-го.

Концепция ASON (Automatically Switched Optical Network) была разработана МСЭ-Т в виде рекомендации G.8080/Y.1304.

Совместная интеграция технологий, описывающая, как стек протоколов GMPLS от IETF должен управлять архитектурой ASON, была зафиксирована в серии документов в 2004–2005 годах. Важнейшими вехами стали стандарты МСЭ-Т серии G.7713.x (в частности, G.7713.2 для сигнализации RSVP-TE на базе GMPLS), сформированные в 2003–2004 годах, и такие совместные документы IETF, как RFC 4139 (требования к сигнализации GMPLS для ASON, июль 2005 г.) и RFC 4258 (требования к маршрутизации выпущены в ноябре того же года). Появилась возможность строить интегрированную сеть IPoDWDM с использованием распределенной плоскости управления на основе технологий обобщенной мультипротокольной коммутации по меткам GMPLS/ASON, которые позволили IP-маршрутизаторам и/или пакетным коммутаторам напрямую управлять параметрами волоконно-оптического транспортного сетевого уровня.

Развитие концепции IPoDWDM с использованием централизованной плоскости управления в рамках SDN

При централизованном программно-конфигурируемом сетевом решении SDN предлагается принципиально иной подход к управлению сетью по сравнению с распределенным решением GMPLS/ASON. Главное отличие заключается в сетевой архитектуре: SDN переносит "интеллект" сети (Control Plane) на единый централизованный контроллер, в то время как GMPLS/

ASON полагается на распределенные протоколы маршрутизации и сигнализации (OSPF-TE, RSVP-TE), работающие на каждом узле сети отдельно.

Активный процесс стандартизации централизованных сетей SDN продолжался с 2011 по 2016 год. Внедрение централизованной плоскости управления на основе технологии SDN позволило не только автоматически рассчитывать маршруты и гибко управлять трафиком, но и обеспечить, в рамках концепции пакетно-оптических транспортных сетей P-OTS, внедрение оптических каналов (длин волн) с программно-изменяемыми форматами модуляции и пропускной способностью от 400/800 Гбит/с до 1,6 Тбит/с и более. В этом случае интегрированная сеть управляется через единый SDN-контроллер, что позволяет оптимизировать маршрут передачи данных с учетом состояния оптического канала, а также использовать для интеграции решений от разных производителей оборудования открытые интерфейсы, API и новые модели данных (OpenROADM, IETF).

Активная интеграция сетей в середине 2010-х годов

Этот этап отличается внедрением каналов (длин волн) с пропускной способностью 100 Гбит/с и затем 200 Гбит/с. Стандартизированные сменные оптические когерентные модули приемопередатчиков ZR/ZR+ начали устанавливать непосредственно в порты маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов, что в ряде случаев позволило не использовать внешние блоки транспондеров/мукспондеров.

Появление интерфейсов ZR/ZR+ и сменных модулей приемопередатчиков с пропускной способностью 400 Гбит/с в 2020-х годах

Официальные спецификации и соглашения MSA (Multi-Source Agreement) для интерфейсов 400G ZR и расширенных версий ZR+/OpenZR+ появились в 2020 году. Этот этап отличается стандартизацией малогабаритных сменных оптических когерентных модулей приемопередатчиков (Pluggables) для оптических каналов (длин волн) с пропускной способностью 400 Гбит/с в конструктивном исполнении QSFP-DD или OSFP.

Появление интерфейсов ZR/ZR+ и сменных модулей приемопередатчиков с пропускной способностью 800 Гбит/с в 2023–2024 годах

Отраслевой консорциум OIF (Optical Internetworking Forum) опубликовал окончательную спецификацию соглашения о реализации интерфейса 800ZR в октябре 2024 года. Интерфейсы стандартов ZR/ZR+ и первые сменные оптические модули с пропускной способностью 800 Гбит/с появились в период с 2023 по 2025 год.

В августе 2023 года компания Marvell анонсировала первый в индустрии процессор и модуль 800G ZR/ZR+ (COLORZ 800), а в декабре того же года свой вариант представила компания Coherent Corp.

Полноценный запуск в продажу готовых приемопередатчиков 800G ZR/ZR+ в конструктивном исполнении QSFP-DD и OSFP от ведущих производителей состоялся в марте 2025 года. В апреле того же года альянс Open ROADM выпустил версию спецификации 8.0, закрепившую параметры протяженных магистральных сетей с каналами 800G ZR+.

Появление интерфейсов ZR/ZR+ и сменных модулей приемопередатчиков с пропускной способностью 1600 Гбит/с в 2026 году

Выпуск когерентных интерфейсов стандарта 1600ZR/ZR+ и сменных оптических модулей приемопередатчиков для каналов с пропускной способностью 1,6 Тбит/с на сетях взаимодействия ЦОДов инфраструктуры ИИ стало главным технологическим прорывом 2026 года. Когерентные интерфейсы 1,6T ZR/ZR+ представляют собой новейшее поколение сменных оптических модулей высокой плотности.

Основная идея этой технологии в том, что по одной длине волны на сети IPoDWDM обеспечивается передача терабитных объемов данных напрямую из пакетного коммутатора или маршрутизатора без использования внешних транспондеров/мукспондеров. В сентябре 2026 года OIF утвердила соглашение IA (Implementation Agreement) по реализации стандарта 1600ZR/ZR+, открыв дорогу массовой совместимости оборудования разных производителей.

Технологические основы для решений 1600ZR/ZR+:

- переход на 2 нм техпроцесс при производстве когерентных ЦСП (цифровых сигнальных процессоров). Основная проблема модулей 1600ZR/ZR+ – экстремальное энергопотребление и тепловыделение. Использование таких первых в индустрии 2 нм ЦСП, как чипы Marvell Electra и Libra, позволило радикально снизить энергопотребление на бит данных и удержать модуль в рамках теплового пакета форм-фактора OSFP,
- интегрированная безопасность MACsec (Media Access Control Security). Впервые в модули приемопередатчиков на уровне кремния была встроена поддержка сетевого протокола канального уровня (L2 по модели OSI) MACsec, предназначенного для безопасной передачи данных Ethernet по спецификации IEEE 802.1AE. Это свойство критически

важно для коммерческих облачных сетей и распределенных ИИ-кластеров, так как позволяет шифровать терабитные потоки данных между ЦОДами без внесения дополнительных задержек,
- дальность передачи и спектральная эффективность:
  - 1600ZR (OIF) – решение оптимизировано для соединений между ЦОДами внутри кампусов (~20 км) и городских сетей (~120 км),
  - 1600ZR+ (OIF/OpenZR+/OpenROADM) – решение ориентировано на работу на региональных сетях в C- и L-диапазонах длин волн оптического излучения на расстояниях до 1000 км с использованием продвинутых алгоритмов oFEC (Open Forward Error Correction) коррекции ошибок. Open Forward Error Correction – это инициатива индустрии в рамках консорциумов OIF, Open ROADM и OpenZR+ по стандартизации единого высокоэффективного алгоритма FEC.

Флагманом коммерциализации этой технологии выступила компания Marvell, представившая первый коммерческий модуль COLORZ 1600. В гонку за рынок также включились Cisco (Acacia), Ciena и Nokia (после поглощения компании Infinera). Параллельно были продемонстрированы клиентские оптические модули 1,6T-DR8 и 1,6T-FR4 с использованием восьми компонентных потоков 200 Гбит/с с форматом модуляции PAM4 для соединений внутри машинных залов в ЦОДах.

Стандартизация решений IPoDWDM

Стандартизацией решений IPoDWDM занимаются несколько организаций, определяющих архитектуру, интерфейсы и управление сетями:
- МСЭ-Т (Study Group 15) разрабатывает стандарты для оптических транспортных сетей OTN и физического уровня систем DWDM, включая структурные схемы передачи (G.709/Y.1331) и управления (G.874) оптическими сетями,
- OIF разрабатывает официальные стандарты 400ZR/800ZR/1600ZR для обеспечения взаимодействия ЦОДов на сетях DCi в конфигурации "точка-точка" на расстояниях от 80 (без оптических усилителей) до 120 км (с оптическими усилителями). Стандартизация когерентных сменных модулей приемопередатчиков имеет принципиальное значение для их прямой интеграции в IP-маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы и обеспечения совместимости с открытой линейной системой OLS (Open Line System),
- IEEE 802.3 разрабатывает стандарты для пакетных клиентских интерфейсов Ethernet:
  - для подключений с пропускной способностью 400 Гбит/с Ethernet основные технические требования по дальности связи приведены в табл.3.
  - для подключений с пропускной способностью 800 Гбит/с Ethernet основные технически требования по дальности связи приведены в табл.4.

Все доступные интерфейсы 800G по стандарту IEEE 802.3df используют архитектуру 8×100G с форматом модуляции PAM4 (две PCS-структуры по 400G соединены в общий MAC-слой 800G).

Для реализации 800 GbE (800 Gigabit Ethernet) на уровне PCS (Physical Coding Sublayer) используются две основные архитектурные структуры, закрепленные отраслевыми стандартами: ETC (Ethernet Technology Consortium) и IEEE 802.3df/802.3dj. Главная задача PCS в 800 GbE – распределение потока данных по логическим и физическим компонентным потокам (SerDes) с обязательным применением упреждающего исправления ошибок FEC для компенсации затухания сигналов на сверхвысоких частотах (PAM4/PAM8).

В рамках следующего стандарта IEEE 802.3dj (находится в разработке) внедряются PMD (Physical Medium Dependent) интерфейсы, использующие четыре компонентных потока данных по 200G (224 Гбит/с) каждый. PMD – это самый нижний подраздел уровня PHY (Physical Layer) в стандартах IEEE 802.3 для Ethernet. Использование таких PMD позволит сократить число волокон вдвое при сохранении тех же классов дальностей (от 500 м до 10 км).
- подключениями с пропускной способностью 1600 Гбит/с занимается рабочая группа IEEE 802.3dj, в которой предусмотрено использование восьми компонентных потоков данных 224 Гбит/с. Дальность связи регламентирована в зависимости от физической среды (PHY):
  - до 1 м: по медному кабелю (электрический интерфейс Twinax, восемь пар в каждом направлении). Предназначен для внутристоечных соединений DAC (Direct Attach Cable),
  - до 30 м: через активные оптические кабели AOC (Active Optical Cable) или межчиповые соединения AUI (Attachment Unit Interface),
  - до 500 м: по параллельному одномодовому оптическому волокну SMF, например, стандарт 1,6TBASE-DR8 с использованием восьми компонентных потоков по 224 Гбит/с с форматом модуляции PAM4,

Таблица 3. Дальность связи для пакетных клиентских интерфейсов Ethernet с пропускной способностью 400 Гбит/с

Спецификация IEEE	Интерфейс	Максимальная дальность	Особенности архитектуры
IEEE 802.3bs	400GBASE-DR4	500 м	Параллельное одномодовое волокно PSM4 (Parallel Single-Mode 4), четыре компонентных потока данных по 100G передаются в обоих направлениях по восьми одномодовым волокнам SMF. Длина волны оптического излучения в диапазоне O-band: 1310 нм
IEEE 802.3cu	400GBASE-FR4	2 км	Два оптических волокна (дуплексное волокно), разделение каналов по длине волны оптического излучения CWDM. Передача четырех компонентных потоков данных по 100G каждый в диапазоне длин O-band, то есть около 1310 нм, с модуляцией PAM4. Длины волн 1271 нм, 1291 нм, 1311 нм, 1331 нм
IEEE 802.3cu	400GBASE-LR4-6	6 км	Два оптических волокна (дуплексное волокно), разделение каналов по длине волны оптического излучения CWDM. Передача четырех компонентных потоков данных по 100G каждый в диапазоне длин O-band, то есть около 1310 нм, с модуляцией PAM4. Длины волн 1271 нм, 1291 нм, 1311 нм, 1331 нм. Индекс «-6» в спецификации IEEE 800G/400G указывает на максимальную целевую дальность передачи в километрах (6 км)
IEEE 802.3bs	400GBASE-LR8	10 км	LWDM (Local Area Network Wavelength Division Multiplexing / LAN-WDM). Два оптических волокна (дуплексное), разделение каналов по длине волны оптического излучения. Первое поколение на базе восьми компонентных потоков данных (длин волн) по 50G с форматом модуляции PAM4. Сетка частот LAN-WDM (а не CWDM): длины волн с малым шагом (~4,5 нм) около 1310 нм: 1273,54 нм (λ0), 1277,89 нм (λ1), 1282,26 нм (λ2), 1286,66 нм (λ3), 1295,56 нм (λ4), 1300,05 нм (λ5), 1304,58 нм (λ6), 1309,14 нм (λ7)
IEEE 802.3cn	400GBASE-ER8	40 км	LWDM (Local Area Network Wavelength Division Multiplexing/LAN-WDM). Два оптических волокна (дуплексное), разделение каналов по длине волны оптического излучения. Первое поколение на базе восьми компонентных потоков данных (длин волн) по 50G с форматом модуляции PAM4. Сетка частот LAN-WDM (а не CWDM): длины волн с малым шагом (~4,5 нм) около 1310 нм: 1273,54 нм (λ0), 1277,89 нм (λ1), 1282,26 нм (λ2), 1286,66 нм (λ3), 1295,56 нм (λ4), 1300,05 нм (λ5), 1304,58 нм (λ6), 1309,14 нм (λ7)

- до 2 км: по параллельному волокну SMF, например, стандарт 1,6TBASE-DR8-2 или 2×FR4 для межуровневых соединений внутри ЦОД.

Высокая плотность монтажа, которую обеспечивают соединители MPO/MTP, привлекла внимание разработчиков активного оборудования. В системах, где требуются каналы с пропускной способностью сотни гигабит в секунду и более, параллельное расположение волокон дает возможность элегантно организовать параллельные интерфейсы.

Затем были определены следующие целевые параметры дальности связи в зависимости от типа среды передачи при использовании четырех компонентных (параллельных) потоков 448 Гбит/с:

- до 500 м: основной стандарт для связи внутри машинных залов ЦОДов (взаимодействие коммутатор-сервер и Leaf-Spine). Используются параллельные одномодовые волокна с разъемами MPO-16,
- до 2 км (интерфейсы класса FR4): используется для связи между машинными залами в пределах одного здания или соседними корпусами ЦОД,
- до 10 км (интерфейсы класса LR): проектные спецификации для кампусных сетей.

Таблица 4. Дальность связи для пакетных клиентских интерфейсов Ethernet с пропускной способностью 800 Гбит/с

Тип интерфейса (PMD)	Физическая среда (кабель/волокно)	Номинальная дальность	Область применения	Стандарт IEEE
800GBase CR8/CR4	Медный пассивный Twinax (DAC)	До 0,5–1 м	Внутри стойки (intra-rack)	802.3ck / 802.3df
800GBase VR8	Многомодовое волокно (MMF OM3/OM4)	До 30–50 м	Межстоечные соединения	802.3df
800GBase SR8	Многомодовое волокно (MMF OM4)	До 60–100 м	Внутри машинного зала ЦОДа	802.3df
800GBase DR8/DR4	Одномодовое волокно (SMF)	До 500 м	Связь между рядами стоек	802.3df/ 802.3dj
800GBase FR8/FR4	Одномодовое волокно (SMF, CWDM)	До 2 км	Межблочные соединения в ЦОДе	802.3df/ 802.3dj
800GBase LR8/LR4	Одномодовое волокно (SMF)	До 10 км	Кампусные и городские сети	802.3df/ 802.3dj
800GBase ER1 (Coherent)	Одномодовое волокно (SMF, когерентный)	До 40 км	Магистральные и DWDM сети	802.3dj

Для расстояний свыше 40 км на сетях взаимодействия ЦОДов используются, как показано ниже, когерентные линейные интерфейсы 400, 800 и 1600G ZR, которые стандартизированы не классическим клиентским комитетом IEEE 802.3, а индустриальным консорциумом OIF.

- OpenZR+/OpenROADM разрабатываются многосторонние соглашения MSA, объединяющие спецификации OIF и расширяющие возможности использования кодов с обнаружением и исправлением ошибок типа oFEC (Open FEC),
- TIP (Telecom Infra Project – OOPT) – разрабатываются технические требования (спецификации) для открытых линейных систем OLS (Open Line System) на базе сетевой платформы Edgecore Cassini. Модульный оптический транспондер с открытой архитектурой (whitebox) объединяет пакетную коммутацию данных и оптическую передачу (DWDM).

Стандартизация оптических когерентных линейных интерфейсов

- 400ZR/ZR+: разработан в OIF для обеспечения взаимодействия между оборудованием различных производителей на местных, городских и региональных телекоммуникационных сетях, а также на сетях DCi, при использовании компактных сменных модулей с низким энергопотреблением по оптическим каналам пропускной способностью 400 Гбит/с с применением cFEC (concatenated Forward Error Correction) при дальности связи до 80–120 км.

cFEC – это метод упреждающего исправления ошибок, основанный на последовательном (каскадном) соединении двух разных кодов исправления ошибок:

- внешний код (Outer Code): используется аппаратный (жесткий) декодер (Hard-Decision), например, код Хэмминга (Hamming code) или код Рида-Соломона (Reed-Solomon). Его задача – "подчищать" оставшиеся одиночные битовые ошибки после первого этапа.
- внутренний код (Inner Code): используется декодирование с программным (мягким) решением (Soft-Decision). При модуляции Staircase code, например, в этом случае исправляются массовые искажения в зашумленном оптическом канале.

Для сменных линейных оптических когерентных модулей приемопередатчиков 400G, например, 400G ZR/ZR+, применяются сетки частот, соответствующие стандартам МСЭ-Т. Полоса канала 400G выбирается исходя из символьной скорости и ограничений по дисперсии. Типичный канал 400G DWDM занимает полосу 75 или 100 ГГц.

В основном используется диапазон C (около 1530–1565 нм), где в соответствии с G.694.1 для когерентных модулей 400G ZR/ZR+ применяется гибкая сетка FlexGrid, позволяющая выделять спектр под ширину канала с шагом 6,25 или 12,5 ГГц. Основным конструктивным исполнением (форм-фактором) линейных когерентных сменных модулей приемопередатчиков

Таблица 5. Отличия стандарта OpenROADM MSA от OpenZR+ MSA для оптических каналов с пропускной способностью 400 и 800 Гбит/с [33]

Характеристика	OpenZR+ MSA (400G/800G)	OpenROADM MSA (400G/800G)
Основной фокус	DCi, Metro, Edge, IP-over-DWDM	Операторские сети, Metro, DWDM, OTN
Тип трафика	Чистый Ethernet (100–400G)	Ethernet + OTN (FlexO)
FEC (коррекция)	Open FEC (oFEC)	Open FEC (oFEC)
Дальность	До 500–1400 км (в 400G)	Более 500 км (очень высокие требования)
Управление	Упрощенное (через Host)	Полное (SDN, NETCONF/YANG)
Конструктивное исполнение (форм-фактор)	QSFP-DD, OSFP	QSFP-DD, OSFP (и 400G CFP2-DCO)

являются QSFP-DD (Quad Small Form Factor Pluggable Double Density) и OSFP (Octal Small Form Factor Pluggable) [30].

- **800ZR/ZR+**: разработан в OIF (800ZR Coherent Interface Implementation Agreement IA) для обеспечения взаимодействия оборудования разных производителей на местных, городских и региональных телекоммуникационных сетях, а также на сетях DCi с оптическими каналами 800 Гбит/с с применением cFEC при дальности связи до 80–120 км.

  Полоса канала 800G с форматами модуляции 16 или 64 QAM определяется символьной скоростью и ограничениями по дисперсии и обычно составляет от 75 до 100 ГГц. Для сменных линейных оптических когерентных модулей приемопередатчиков 800G с низким энергопотреблением используется форм-фактор QSFP-DD или OSFP [31].
- **1600ZR/ZR+**: в отличие от предыдущих инициатив по стандартизации когерентных технологий для скоростей 400 и 800 Гбит/с, когда спецификации для каналов с улучшенными характеристиками (класса ZR+) разрабатывались за пределами OIF, в этот раз организация OIF запустила процесс одновременной разработки стандартов 1600ZR и 1600ZR+. Параллельное ведение этих работ позволяет OIF рассматривать оба стандарта в рамках общего обсуждения [32].
- **OpenZR+ MSA (Multi-Source Agreement)** – рабочая группа, созданная специально для стандартизации расширенных возможностей ZR+, чтобы обеспечить совместимость модулей разных производителей при более протяженных соединениях, с учетом специфических требований к FEC и различных скоростей передачи от 200 до 800 Гбит/с и более. Для увеличения дальности передачи сигналов Ethernet до 500 км и более используется более мощный алгоритм обнаружения и исправления ошибок oFEC (OpenFEC). Для сменных модулей приемопередатчиков поддерживается решение DCO (Digital Coherent Optics) в форм-факторе CFP2, QSFP-DD и OSFP. На сети с узлами ROADM предусмотрен более высокий уровень оптической мощности (а именно 0 дБм) на передающей стороне. Для 400G и 800G OpenZR+ MSA обычно указывается дальность связи до 400 км, которая достижима с учетом запаса по мощности около 2 дБ на старение (износ), температурный режим и поляризационные искажения. В некоторых реализациях, в зависимости от скорости передачи данных и качества волокна, дальность связи может превышать 1000 км. Такие компании, как Cisco, часто выступают инициаторами разработки технических требований к интерфейсу ZR+, которые затем оформляются в рамках MSA.
- **OpenROADM MSA** – рабочая группа, созданная компаниями для стандартизации решений для сетей, где требуется использовать гибкость узлов ROADM, если необходимо обеспечить дальность связи для сигналов Ethernet и OTN до 450–500 км, что превышает возможности стандартных ZR-модулей. В этой группе определяются параметры сменных линейных оптических когерентных интерфейсов и их функциональная совместимость на местных и зоновых (городских

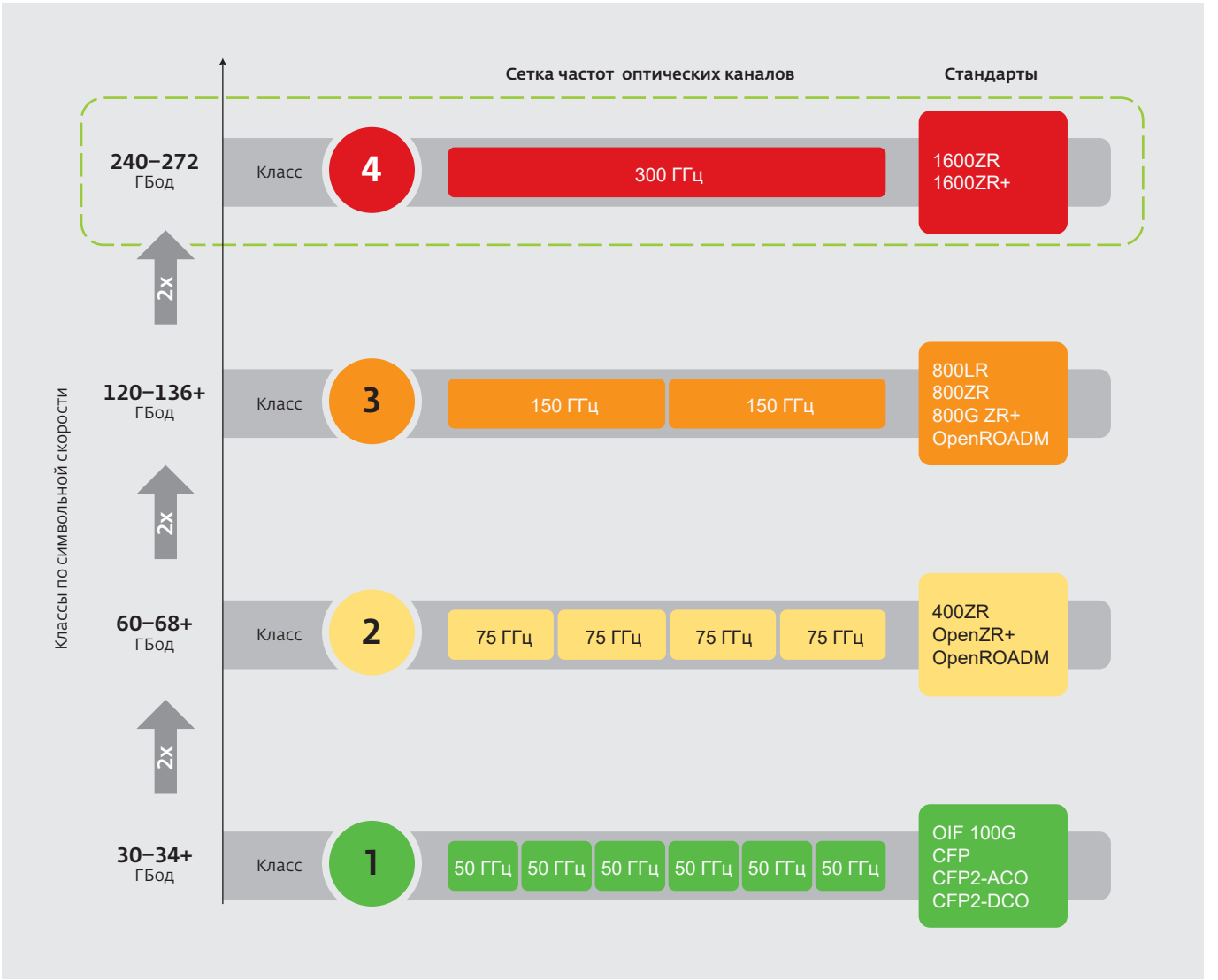


Рис.9. Направления работ по стандартизации передачи данных с учетом символьной скорости [32]

и региональных) сетях, а также на сетях DCi. Для решений OpenROADM MSA 400G используется в основном конструктивное исполнение CFP2-DCO, QSFP-DD и OSFP. В решениях OpenROADM MSA 800G применяются улучшенные алгоритмы прямой коррекции ошибок oFEC и вероятностного формирования созвездия PCS линейного сигнала. Вероятностное формирование созвездия PCS (Probabilistic Constellation Shaping) в контексте подуровня кодирования физического уровня PCS (Physical Coding Sublayer) для сетей 800 GbE – это передовая технология цифровой обработки сигналов ЦСП, используемая в когерентных оптических модулях (например, 800ZR/ZR+ и OpenROADM) для приближения к теоретическому пределу пропускной способности Шеннона. Отличия стандарта OpenROADM MSA от OpenZR+ MSA для оптических каналов с пропускной способностью 400 и 800 Гбит/с представлены в табл.5.

Заключение

Направления развития интегрированных IPoDWDM/P-OTS решений продиктованы необходимостью достижения сверхнизкой задержки и высокой пропускной способности сети, а также снижением (при внедрении рекомендаций рабочих групп Open ROADM, OpenZR+) зависимости операторов от одного производителя оборудования и применением принципа Plug-and-Play.

Результаты OFC 2026 показали следующие направления развития решений IPoDWDM/P-OTS

в 2026–2030 годах, способствующие снижению капитальных и операционных затрат операторов [34]:

- благодаря прорывным решениям в технологии TFLN (Thin Film Lithium Niobate on silicon), модуляторы на ниобате лития могут отличаться небольшими размерами и высокой пропускной способностью,
- открытые линейные системы OLS становятся стандартом для городских и региональных сетей, а также для сетей DCi,
- сменные оптические линейные когерентные модули приемопередатчиков 400/800G ZR+ будут активно внедряться в соответствии с рекомендациями OIF,
- будет обеспечено взаимодействие сетевого оборудования разных производителей,
- искусственный интеллект и машинное обучение поддержат конвергенцию пакетного и оптического сетевых уровней интегрированных пакетно-оптических транспортных систем,
- наиболее эффективные и оптимизированные решения для интегрированных пакетно-оптических транспортных систем будут создаваться благодаря непрерывной стандартизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статическая и динамическая маршрутизация. [Электронный ресурс]. URL: https://mikrotik-training.ru/kb/staticheskaya-i-dinamicheskaya-marshrutizatsiya/ (дата обращения 28.09.2026).
2. Что такое динамическая маршрутизация? [Электронный ресурс]. URL: https://blog.ai-mix.ru/2024/11/18/chto-takoe-dinamicheskaya-marshrutizacziya/ (дата обращения 28.09.2026).
3. Основы технологии DWDM (Брошюра компании Т8). [Электронный ресурс]. URL: https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrarx7a89we9in5xc7cf8e86o4a1/T8_DWDM_basic_web.pdf (дата обращения 28.09.2026).
4. Обзор телекоммуникационных протоколов: MPLS. [Электронный ресурс]. URL: https://skomplekt.com/tools/3811773.html/ (дата обращения 28.09.2026).
5. GMPLS объединяет сетевые уровни. [Электронный ресурс]. URL: https://www.osp.ru/nets/2003/10/148943 (дата обращения 28.09.2026).
6. Концепция принудительной маршрутизации. [Электронный ресурс]. URL: https://opengl.org.ru/upravlenie-trafikom-i-kachestvo-obsluzhevaniya-vseti/kontseptsiya-prinuditelnoi-marshrutizatsii.html (дата обращения 28.09.2026).
7. **Коган С.С.** Транспортные ВОСП большой пропускной способности. Ч. 1. Стандартизация открытых линейных интерфейсов 400G со сменными когерентными оптическими модулями-приемопередатчиками // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. № 2. С. 44–54. [Электронный ресурс]. URL: https://t8.ru/upload/iblock/2eb/isnm7stxfkl9nmob2ha6744ons309rlx/Kogan_part_1_Last_Mile_2024_number_2_pages_44_54.pdf (дата обращения 28.09.2026).
8. **Коган С.С.**, **Наний О.Е.**, **Трещиков В.Н.** Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM. Ч. 1. Пропускная способность и эволюция форматов модуляции // Прикладная фотоника. 2024. Т. 11. № 1. С. 84–98. [Электронный ресурс]. URL: https://t8.ru/upload/iblock/f27/9yive7om7qvdco9btwcpuxw11lmdrifs/S_S_ Kogan_O_E_Nanii_V_N_Treshchikov_Vysokoskorostnye_VOSP_CHast-1.pdf (дата обращения 28.09.2026).
9. Технология DSP в когерентной оптической связи. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fibermall.com/ru/blog/dsp-technology-in-coherent-optics.htm?srsltid=AfmBOopLVpXisIe_XkKoV0h_TkgOGiRVk4zXHsPutGU8mQg5HLijBidO (дата обращения 28.09.2026).
10. **Junho Cho**, **Peter J. Winzer**. Probabilistic Constellation Shaping for Optical Fiber Communications. Journal Of Lightwave Technology. 2019. Vol. 37. No. 6. March 15, 2019. [Электронный ресурс]. URL: https://scispace.com/papers/probabilistic-constellation-shaping-for-optical-fiberzv2jhsi78g.pdf (дата обращения 28.09.2026).
11. Что такое программно-определяемые сети. [Электронный ресурс]. URL: https://cloudnetworks.ru/inf-tehnologii/programmno-opredelyaemye-seti-sdn/ (дата обращения 28.09.2026).
12. **Коган С.С.**, **Наний О.Е.**, **Трещиков В.Н.** Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей. OTN/DWDM. Ч. 2. Дальность связи, спектральная эффективность и символьная скорость // Прикладная фотоника. 2024. Т. 11. № 2. С. 5–25. [Электронный ресурс]. URL: https://t8.ru/upload/iblock/949/1p8fakl7oisl0djbkufwvr1a9srb8gf2/ S_S._Kogan_-O_E_Nanii_-V_N_Treshchikov_Vysokoskorostnye_VOSP_CHast_2.pdf (дата обращения 28.09.2026).
13. **Коган С.С.**, **Наний О.Е.**, **Трещиков В.Н.** Перспективные оптоволоконные системы OTN/DWDM: повышение спектральной эффективности и увеличение протяженности высокоскоростных оптических каналов // Спецвыпуск журнала "Фотон-Экспресс – Наука-2023". 2023. № 6. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/per-

spektivnye-optovolokonnye-sistemy-otn-dwdm-povyshenie-spektralnoy-effektivnosti-i-uvelichenie-protyazhennosti-vysokoskorostnyh/viewer (дата обращения 28.09.2026).
14. **Коган С.С.**, **Конышев В.А.**, **Наний О.Е.**, **Петренко И.И.**, **Трещиков В.Н.**, **Убайдуллаев Р.Р.** Новые форматы модуляции для когерентных волоконно-оптических сетей связи. Ч. 1. Традиционные и гибридные форматы квадратурной модуляции // Фотоника / Photonics Russia. 2026. № 1. [Электронный ресурс]. URL: https://www.photonics.su/journal/article/11405 (дата обращения 28.09.2026).
15. Компания Ribbon. Integrated IP Optical – One Size Does Not Fit All. [Электронный ресурс]. URL: https://learn.rbbn.com/wp-ip-over-dwdm (дата обращения 28.09.2026).
16. **Коган С.С.** IP + оптика: интеграция по трем направлениям // Журнал сетевых решений / LAN. 2015. № 4. [Электронный ресурс]. URL: https://www.osp.ru/ lan/2015/04/13045692 (дата обращения 28.09.2026).
17. **Коган С.С.** О конфигурациях типа Alien Wavelength на оптических транспортных сетях // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2017. № 6. С. 20–27. [Электронный ресурс]. URL: https://www.lastmile.su/files/article_pdf/6/article_6258_210.pdf (дата обращения 28.09.2026).
18. Модель OSI. Почему она важна для облака. [Электронный ресурс]. URL: https://it-grad.kz/blog/it-infrastruktura/model-osi-pochemu-ona-vazhna-dlya-oblaka (дата обращения 28.09.2026).
19. SDN: альтернатива или дополнение к традиционным сетям? [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/hpe/articles/255363/ (дата обращения 28.09.2026).
20. What is intent-based networking (IBN)? [Электронный ресурс]. URL: https://www.cisco.com/site/us/en/solutions/intent-based-networking/index.html (дата обращения 28.09.2026).
21. **Коган С.С.** Волоконно-оптические решения для ЦОДов с пакетными интерфейсами на основе Ethernet. Ч. 3. Эволюция сменных оптических модулей приемопередатчиков (трансиверов) для ЦОДов // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2025. № 4. [Электронный ресурс]. URL: https://www.lastmile.su/files/article_pdf/11/article_11028_491.pdf (дата обращения 28.09.2026).
22. 400G DWDM настраиваемый CFP2 DCO 80 км дуплекс LC/UPC SMF когерентный модуль. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fs.com/ru/products/216689.html (дата обращения 28.09.2026).
23. Оптические модули CFP 2 DCO 100G/200G/400G. [Электронный ресурс]. URL: https://files.qtech.ru/upload/optical_modules/CFP2_DCO_100G_200G_400G/CFP2_DCO_100G_200G_400G_datasheet.pdf (дата обращения 28.09.2026).
24. QSFP 28. [Электронный ресурс]. URL: https://www.dwdm.ru/wiki/86 (дата обращения 28.09.2026).
25. Все, что вы хотели знать о QSFP 56. [Электронный ресурс]. URL: https://prointech.ru/kb/transivery/vsyo-chto-vy-hoteliznat-o-qsfp 56/ (дата обращения 28.09.2026).
26. QSFP-DD против OSFP против QSFP 56 против QSFP 112: преимущества и проблемы. [Электронный ресурс]. URL: https://bouz.ru/blog/oborudovanie/qsfp-dd-protiv-osfp-protiv-qsfp56-protiv-qsfp112-preimushchestva-i-problemy/?srsltid=AYCX9vLxgVYMVX7P4zjBOJVLHk1mnM65Orng-pxyz8ukXD1AnVzYHA5V (дата обращения 28.09.2026).
27. Сравнение трансиверов QSFP-DD и OSFP. [Электронный ресурс]. URL: https://fibotelecom.ru/articles/sravnenie_transiverov_qsfp_dd_i_osfp (дата обращения 28.09.2026).
28. Новые разработки Cisco в области IPoDWDM приближают наступление "эры зеттабайтов" в операторских транспортных сетях. [Электронный ресурс]. URL: https://cbs.ru/news/7661/
29. Архитектура IPoDWDM. [Электронный ресурс]. URL: https://baike.baidu.com/ru/item/Архитектура%20IPoDWDM/4639901 (дата обращения 28.09.2026).
30. 400ZR, OpenZR+, 800ZR, OpenROADM/ITU-T Interoperability Demo OFC 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF_400ZRplus_booth_slides_OFC2024-Final-1-1.pdf (дата обращения 28.09.2026).
31. Оптический трансивер 100G CFP2 DCO. [Электронный ресурс]. URL: https://dwdm-sfp.ru/uplouds/docs/21310/100g-cfp2-dco-dwdm-sfp.pdf (дата обращения 28.09.2026).
32. Looking ahead to 1600G. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ofcconference.org/ofc-blog/2025/looking-ahead-to-1600g (дата обращения 28.09.2026).
33. **Коган С.С.** Волоконно-оптические решения для ЦОДов с пакетными интерфейсами на основе Ethernet. Ч. 4. Стандартизованные когерентные решения для сетей взаимодействия ЦОДов (DCi) // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2025. № 5. С. 58–68. [Электронный ресурс]. URL: https://www.lastmile.su/files/article_pdf/11/article_11081_335.pdf (дата обращения 28.09.2026).
34. SIX COHERENT PRODUCTS RECOGNIZED BY LIGHTWAVE INNOVATION AWARDS. [Электронный ресурс]. URL: https://www.coherent.com/news/press-releases/six-coherent-products-recognized-by-lightwave-innovation-awards (дата обращения 28.09.2026).