

УДК 621.372.8.082.5

**В.А. Конышев^{1,2}, А.В. Леонов², О.Е. Наний^{2,3},
В.Н. Трещиков², Р.Р. Убайдуллаев²**

¹ Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН,
Москва, Россия

² ООО «Т8», Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

ОПТИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ И ЕЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Емкость оптических систем связи возросла более чем в 100 000 раз за 40 лет своего существования. К настоящему времени емкость коммерческих систем достигла примерно 10 Тбит/с по одному волокну (~100 DWDM-каналов со скоростью 100 Гбит/с в каждом). Основные причины роста трафика – экономическая доступность персональных электронных устройств с камерами и экранами высокого разрешения, развитие сетей широкополосного доступа и подключение к ним все большего количества абонентов, индивидуализация видеоконтента, развитие дата-центров и «интернета вещей». Скоростные сети связи являются технической основой для социальных сетей, которые трансформируют общество, и уже превратились в мощные инструменты связи и пропаганды. Меняется структура самих телекоммуникационных сетей связи (от жесткой иерархии ко все более широкому развитию «горизонтальных» связей), растет скорость клиентских портов (впервые в истории она сравнялась с емкостью магистральных оптических каналов и вскоре, вероятно, превысит ее). Быстрый рост трафика продолжается, что требует разработки когерентных систем с канальной скоростью 400G и 1T, включая технологию суперканалов на нескольких поднесущих, а также активизирует исследования многомодовых и многосердцевинных волкон.

Ключевые слова: DWDM, история, волоконно-оптическая сеть связи, трансформация общества, гаджет, визуальный образ, видеоконтент, «интернет вещей», дата-центр, рост трафика, когерентная система, суперканал.

**V.A. Konyshov¹, A.V. Leonov², O.E. Nanii^{1,3},
V.N. Treshchikov², R.R. Ubaidullaev²**

¹ Institute of History of Natural Sciences and Equipment of S.I. Vavilov
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Company "T8", Moscow, Russian Federation

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

OPTICAL REVOLUTION IN COMMUNICATION SYSTEMS AND ITS SOCIAL AND ECONOMIC IMPACT

Capacity of fiber optic communication systems increased more than 100 000 times during 40 years of their existence. For the moment, the capacity of commercial systems reached approximately

10 Tbit/s per 1 fiber (~100 DWDM channels with a speed of 100 Gbit/s in each channel). The constantly increasing traffic is caused by several reasons: affordability of personal electronic devices with high resolution cameras and screens, development of broadband access networks and connection of more and more subscribers to them, individualization of video content, development of data centers and the Internet of things (IoT). Fast communication networks are the technical basis for the social networks that transform the society and already became the powerful tool of communication and propaganda. The structure of telecommunication systems is changed itself (from strict hierarchy to wider development of "horizontal" links); the speed of client ports increases (first time in history it became equal to the capacity of backbone fiber optic channel, and soon probably exceeds it). Fast increase of traffic is going on that requires development of coherent systems with a channel speed of 400G and 1T, including super-channels technology using several subcarriers, and also stimulates researches of multimode and multi-core optical fibers.

Keywords: DWDM, history, fiber optic communication network, social transformation, gadget, visual image, video-content, Internet of Things (IoT), data center, traffic increase, coherent system, superchannel.

К настоящему времени в мире проложено более 2 млрд км оптического волокна [1], по которому передается более 80 % от общего объема передаваемой информации. Емкость оптических систем связи выросла более чем в 100 000 раз за 40 лет своего существования: если в начале 1970-х гг. по одному волокну передавали менее 100 Мбит/с [2], то к настоящему времени емкость коммерческих систем составляет примерно 10 Тбит/с по одному волокну (~100 DWDM-каналов со скоростью 100 Гбит/с в каждом). Такая емкость оптических систем связи казалась невообразимой в ранний период развития оптических систем связи, а главное – казалось, что такая емкость никогда и не требуется.

Колоссальный скачок в емкости оптических систем связи произошел в конце 1990-х гг. с внедрением технологии спектрального уплотнения. Первая коммерческая DWDM-система появилась в 1995 г. а к 2000 г. технология DWDM позволяла передавать уже более сотни каналов по одному волокну на разных длинах волн. Канальная скорость в коммерческих системах достигла 10 Гбит/с (STM-64) в 1995 г. и 40 Гбит/с (STM-256) – в 2002 г. [3]. Таким образом, к 2000 г. емкость коммерческих систем связи достигла примерно 1 Тбит/с, что значительно превышало потребности в передаче трафика, существовавшие на тот момент. Такая ситуация сохранялась на протяжении всех «нулевых» годов. Например, академик РАН Е.М. Дианов с соавтором в 2006 г. отмечали в своей статье: «благодаря созданию волоконно-оптических систем связи впервые в истории человечества технические возможности обмена информацией превысили (в настоящее время) потребности человеческого общества» [4]. Это привело к рез-

кому падению рынка оптических систем связи и существенному снижению инвестиций в развитие оборудования [5].

Однако на протяжении всех «нулевых» годов трафик продолжал расти с постоянным темпом – более 50 % в год, или в 100 раз за 10 лет [5]. Уже к 2010 г. специалистам стало очевидно, что емкость магистральных систем связи, установленных операторами связи в конце 1990-х – начале 2000-х гг., практически исчерпана, и в ближайшее время потребуется масштабное обновление оптической инфраструктуры и повышение емкости транспортных сетей.

Технологическим ответом на рост трафика стало развитие систем когерентного приема оптического сигнала и внедрение на магистральных сетях когерентных каналов 40G и 100G. В 2013–2014 гг. ведущими операторами связи Северной Америки был осуществлен переход на каналы 100G как основные транспортные каналы магистральных DWDM-сетей (так называемая «перезагрузка оптических сетей» – *optical reboot*). Типовая емкость коммерческих систем с каналами 100G составляет 8,0–9,6 Тбит/с (80–96 каналов). Переход на 100G-каналы позволил на какое-то время удовлетворить потребности операторов связи в передаче трафика.

В настоящее время рост трафика в мировом масштабе продолжается практически теми же темпами, что и в «нулевых» годах. Например, на сети British Telecom трафик вырос в 100 раз за последние 10 лет, при этом в среднем рост составил 65 % в год (рис. 1). В России показатели роста в среднем составляют 10–20 % в год.

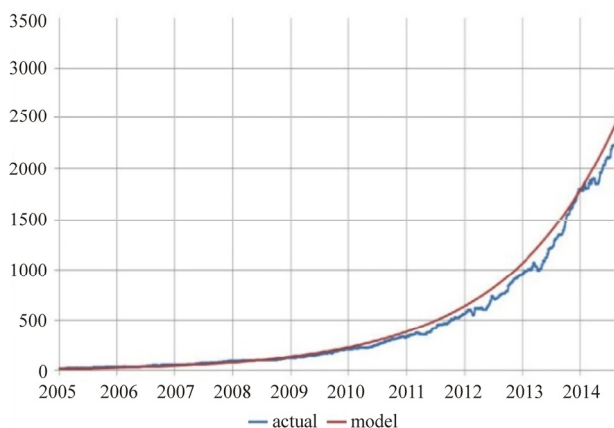


Рис. 1. British Telecom. Рост трафика в 100 раз за 10 лет + 65 % в год (ECOC-2015 Market Focus). По вертикали отложена пиковая нагрузка, Гбит/с

Очевидно, что емкость DWDM-систем на основе 100G-каналов также будет исчерпана в ближайшее время. Ведущие мировые производители активно ведут разработку более скоростного оборудования [6], а операторы связи уже проектируют под это оборудование свои перспективные сети. Системы с передачей каналов 200G, 2×200G были представлены на рынке в первой половине 2015 г. (Acacia, Inc.). Коммерческая доступность систем 400G ожидается в 2016 г. К 2020 г. ожидается коммерческое внедрение каналов 1T [5].

Таким образом, тот период времени в «нулевых» годах, когда технологические возможности магистральных сетей связи превышали имеющиеся потребности, оказался достаточно коротким. Сегодня производители вновь вынуждены искать возможности повышения скорости магистральных систем, что является непростой задачей. Предельная производительность систем связи (произведение дальности на спектральную эффективность¹) была, похоже, достигнута в 100G-системах [6]. В настоящее время основной тенденцией развития DWDM-оборудования является переход к более сложным форматам модуляции (16QAM и 64QAM) и использование нескольких поднесущих [7].

Что же является причиной столь быстрого и непрекращающегося роста трафика в магистральных сетях? Насколько развитие технологий влияет на рост потребностей пользователей Интернета, и наоборот – как потребности пользователей влияют на развитие технологий?

Причины роста трафика

Корни наблюдаемого эффекта следует, вероятно, искать в экономике, а точнее – «рейганомике», экономической системе, установившейся в Соединенных Штатах в период президентства Рональда Рейгана (1981–1989 гг.). Именно тогда была заложена экономическая модель стимулирования спроса за счет кредитования, причем существенная часть этого спроса была направлена на высокотехнологичные

¹ Спектральная эффективность – отношение скорости передачи информации в канале связи к ширине спектральной полосы, занимаемой этим каналом. Обычно при сравнении различных систем связи учитывается скорость передачи полезной информации (без FEC). Например, для канала 100 Гбит/с в полосе 50 ГГц спектральная эффективность равна 2 бит/с/Гц.

продукты начинающегося пятого «кондратьевского» цикла: электронику, вычислительную технику, телекоммуникационные системы. Широкое распространение персональных компьютеров, цифровой фото- и видеотехники, экранов высокого разрешения, мобильных телефонов, а позже – объединивших все это в одном корпусе портативных устройств (смартфонов, планшетов и других гаджетов) в мировом масштабе напрямую связано с экономическим стимулированием платежеспособного спроса на них.

Персональная электронная техника, подключенная к Интернету, и стала главным первичным источником постоянно растущего трафика. Разрешение фото- и видеокамер постоянно растет, соответственно, увеличивается и объем создаваемых файлов. Увеличение разрешения экранов влечет за собой повышение потребности зрителей в качестве видеоконтента – соответственно, растет и его объем. Пересылка все большего количества объемных файлов между пользователями, сохранение их на удаленных серверах и скачивание с них – основной источник нагрузки на магистральные сети.

Вторичным источником трафика являются внутренние коммуникации «дата-центров». Для надежного хранения пользовательских данных в «облаке» эти данные многократно дублируются, как правило, не менее чем четырехкратно. Периодическая перезапись и обновление пользовательских файлов на серверах дата-центров происходят даже в том случае, если пользователь не обращается к ним. По внутренним линиям связи, соединяющим между собой дата-центры таких компаний, как Google, Facebook и др., идет трафик, сопоставимый с трафиком национальных сетей связи. Не случайно к настоящему времени крупнейшим оператором связи в мире (по суммарной емкости телекоммуникационных линий связи) является Google.

Период «нулевых» годов, когда емкость магистральных сетей значительно превосходила имевшиеся объемы трафика, был связан с запаздыванием развития оптических (кабельных) и беспроводных сетей широкополосного доступа (ШПД). Например, необходимость внедрения широкополосного оптического доступа по технологии PON (пассивная оптическая сеть) в России обсуждалась с 2003 г., тогда же было установлено первое коммерческое оборудование на сетях операторов связи. Однако долгое время эта технология оставалась в сегменте В2В (т.е. «бизнес для бизнеса»). Массовое подключение индивиду-

альных абонентов в Москве (GPON от МГТС) началось лишь десять лет спустя – в 2013 г., т.е. примерно через 10 лет после появления самого стандарта. Аналогичная картина наблюдается и в широкополосном беспроводном доступе: массовое развертывание сетей LTE на территории Москвы началось в 2014 г.

Разумеется, есть и другие источники трафика: например, игровые приложения (прежде всего, рендеринг в «облаке» и интерактивная «виртуальная реальность») или картографические сервисы. В последние годы все большее количество трафика генерируется микрокомпьютерами, встроенными в различную бытовую и промышленную технику и подключенными к сети Интернет (так называемый «интернет вещей»). По оценке Cisco & Strategy Analytics, в настоящее время к Интернету подключено 9 млрд устройств, к 2020 г. их количество увеличится до 50 млрд. Еще одна быстро растущая область применения оптической связи – обмен данными между процессорами в суперкомпьютерах, которые последние несколько десятилетий развиваются практически с постоянной скоростью [8]. Однако именно видеоконтент и развитие оптического и беспроводного ШПД стали основными драйверами роста трафика в магистральных сетях.

Пределы этому росту пока не видны. В 2015 г. компания Facebook объявила, что впервые в истории в течение суток в социальную сеть зашло более 1 млрд абонентов. Это значит, что еще 6 млрд жителей Земли социальными сетями пока не охвачены. Разрешение встроенных камер в современных смартфонах сегодня доходит до 20 мегапикселей, разрешение экранов уже превышает Full HD. Вопрос «зачем?» не стоит ни для потребителей, ни для производителей: пока позволяет технология и существует платежеспособный спрос, рост разрешения камер и экранов в гаджетах будет продолжаться.

Перенос больших массивов данных в «облако» (т.е. на системы распределенных серверов хранения и обработки данных) постепенно ведет к изменению общей структуры сети Интернет. Для передачи трафика между серверами в «облаке» требуется все большая емкость транспортной инфраструктуры, что стимулирует развитие более плотных «горизонтальных» связей между взаимодействующими сетями (рис. 2).

Интересно отметить, что «горизонтальные» связи между сетями активно используются программными приложениями типа peer-to-peer

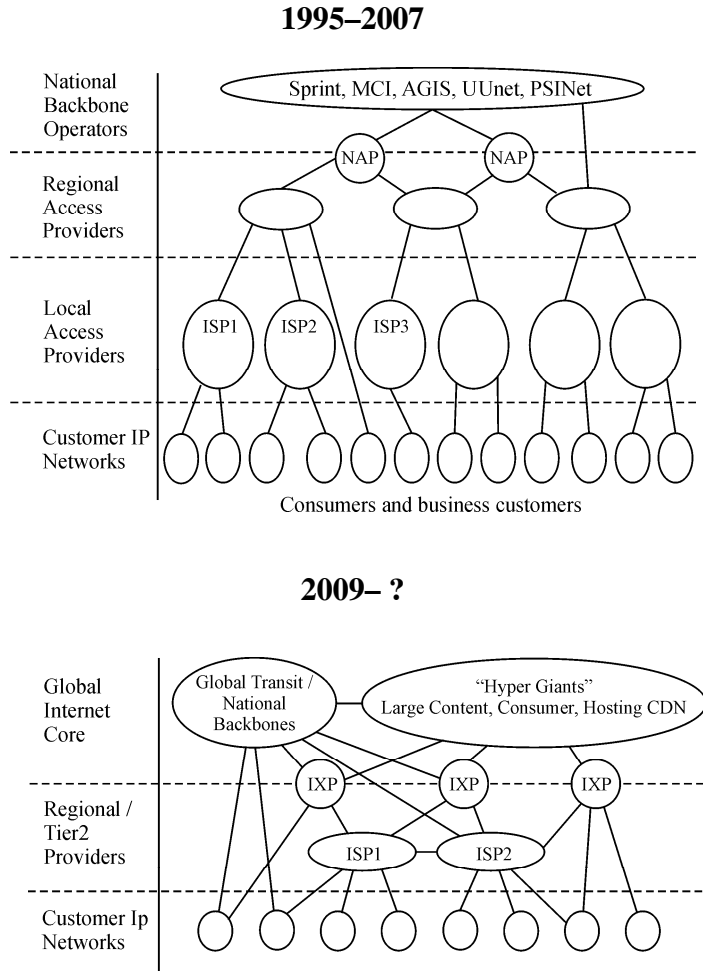


Рис. 2. Эволюция структуры Интернета в связи с возрастающей ролью провайдеров «облачных» услуг на основе дата-центров [9]

(например, «торрентами»), которые, таким образом, разгружают магистральные транспортные сети.

Таким образом, причины роста трафика лежат в социально-экономической плоскости: люди обладают потребностью взаимодействовать друг с другом посредством визуальных образов высокого качества (прежде всего, видеоконтента), а экономическая система предоставляет им возможность приобрести соответствующую технику и каналы доступа. Технологическое развитие магистральных оптических сетей связи является ответом на рост трафика; в ситуации, когда емкость транспортных систем достаточна, скорость их развития существ-

венно снижается (как это случилось в «нулевых» годах из-за запаздывания развития ШПД после прорыва DWDM-технологий).

Влияние скоростных оптических сетей на общество

В то же время развитие скоростных каналов связи, безусловно, оказывает и обратное влияние на социально-экономические процессы. На наших глазах происходит разрушение монополии телевидения на видеоконтент и в принципе отказ от телевидения значительной части общества. Социальные сети, благодаря развитию транспортных технологий и «облачных» сервисов, предоставляют пользователям визуальный контент сопоставимого, а то и лучшего качества, чем ТВ – при этом более разнообразный и индивидуализированный, что привлекает к ним наиболее активную часть молодежи. Значимость пропаганды в социальных сетях сегодня не уступает значимости телевидения. Если в ходе традиционных избирательных компаний ТВ по-прежнему остается основным каналом воздействия на электорат, то в периоды революционных преобразований, осуществляемых в основном силами активной молодежи, ключевым механизмом связи и пропаганды становятся социальные сети, что хорошо видно на многочисленных примерах «арабской весны».

Скоростная связь, доступная в каждом доме и на каждом гаджете, формирует не только новые привычки работы с информацией, способы общения с друзьями и коллегами, но и открывает возможности создания недоступных ранее экономических механизмов. Наглядный пример – современные сервисы заказа такси, полностью изменившие правила игры на стабильном, казалось бы, в течение десятилетий «извозчицком» рынке. В конце 2015 г. уже Правительство Москвы вынуждено было договариваться с сервисами Uber, Gett и Яндекс.Такси о правилах работы! А ведь в основе этих сервисов лежит скоростная связь и современные картографические приложения.

Наконец, необходимо отметить, что волоконно-оптические системы связи стали драйвером роста многочисленных отраслей промышленности. В их числе полупроводниковые лазеры и сопутствующие технологии упаковки и сопряжения с волокнами, низкочастотная и высокочастотная электроника с требуемыми стандартами размеров в десятки нанометров, высокочастотная оптоэлектроника для модулирования оптического сигнала, а также полный спектр пассивных оптоволо-

конных компонентов, производство волокон (включая легированные специальные волокна), кабелей, полимеров для покрытия волокон и кабелей, программного обеспечения. К этому необходимо добавить сопутствующие производства измерительной и калибровочной техники, применяемой как для тестирования продукции, так и для обслуживания линий.

Перспективы развития транспортных сетей

Общий долгосрочный тренд роста трафика и соответствующего повышения емкости DWDM-систем не вызывает сомнений. Однако в рамках этого общего тренда сегодня наблюдается интересный переход, изображенный на рис. 3. Скорость клиентских интерфейсов впервые за историю развития сетей сравнялась со скоростью в канале на одной оптической несущей, а в ближайшей перспективе, вероятно, превысит ее.

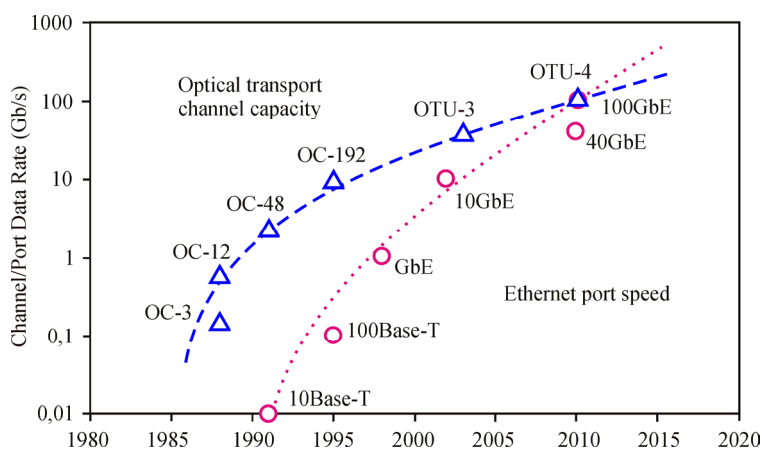


Рис. 3. Рост канальной скорости, регламентируемой стандартами транспортных систем связи, и рост скорости Ethernet-портов [10]

Как отмечалось выше, в настоящее время IP-трафик является основным видом трафика в сетях операторов связи. IP-маршрутизаторы передают информационный поток в транспортную сеть с использованием портов Ethernet, а транспортная сеть доставляет этот трафик в нужную точку.

До 2010 г. максимальная доступная емкость транспортных каналов всегда превышала максимальную используемую емкость клиент-

ских портов Ethernet. Таким образом, на уровне транспортной сети либо клиентский канал передавался в соответствующем транспортном канале (например, 10 GE в OTN2), либо клиентский трафик с нескольких портов агрегировался в более скоростной транспортный канал (например, 10 каналов 10 GE в OTN4).

Скорость портов IP-маршрутизаторов сравнивалась с канальной скоростью DWDM-систем (100 Гбит/с) в 2010 г. В 2017 г. ожидается принятие очередного стандарта 400G Ethernet, в перспективе – 1T Ethernet (Terabit Ethernet). Из рис. 3 видно, что при сохранении существующих трендов скорость транспортного канала по одной несущей уже скоро окажется недостаточной для передачи одного клиентского Ethernet-канала.

Технологическое решение данной коллизии состоит в использовании нескольких оптических поднесущих для передачи клиентского трафика. Такая архитектура уже реализована в наиболее современных системах 2×200G. Сейчас эти две поднесущие используются для передачи клиентского трафика 4×100G; однако при появлении клиентского интерфейса 400GE он также будет передаваться по этим двум поднесущим.

Таким образом, наблюдается смена самого принципа передачи клиентских каналов по оптической сети, сдвиг в сторону «децентрализации». На протяжении всего периода развития оптических транспортных систем типичной задачей DWDM-оборудования была агрегация клиентских каналов в более скоростные оптические транспортные каналы. Сегодня актуальность приобретает противоположная задача: декомпозиция скоростных клиентских каналов на несколько оптических поднесущих, которые затем управляются на уровне оптической транспортной сети как единое целое (так называемый «суперканал»). В лабораторных системах уже успешно тестируются суперканалы 1T (10 несущих по 100G).

100 Тбит/с и выше (вместо заключения)

Вопрос о предельной емкости систем по одному волокну пока остается открытым. Предельная емкость, которую, по оценкам экспертов, можно достичь в среднесрочной перспективе, составляет 100 Тбит/с. Например, эта емкость достигается при расширении диапазона до C+L (270 каналов) и использовании каналов 400G в 50 ГГц (что теоретиче-

ски возможно при символьной скорости 45 Гбод и формате модуляции DP-64QAM, хотя и с существенным снижением дальности передачи).

Создание системы емкостью выше 100 Тбит/с представляет собой серьезный технологический вызов из-за фундаментальных ограничений традиционного одномодового волокна с одной сердцевиной. В настоящее время активно ведутся лабораторные исследования многомодовых и многосердцевинных волокон, которые, как считается, могут позволить преодолеть эти ограничения. Однако достижение экономической эффективности таких решений и коммерческая реализация соответствующих DWDM-систем требуют усилий по исследованию и разработке, и их возможная реализация относится к долгосрочной перспективе [11].

Список литературы

1. Ларин Ю.Т., Мещанов Г.И. Состояние производства оптических кабелей в России и странах СНГ в условиях мировых и локальных кризисных явлений // Фотон-Экспресс. – 2015. – № 6(126). – С. 25.

2. Essiambre R.-J., Tkach R.W. Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks // Proc. of the IEEE. – 2012. – Vol. 100, no. 5, pp. 1035–1055.

3. Govind P. Agrawal. Lightwave Technology: Telecommunication Systems. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. – 2005. – P. 17.

4. Дианов Е.М., Курков А.С. Волоконная оптика // Физика. – 2006. – № 23.

5. Tkach R.W. Scaling Optical Communications for the Next Decade and Beyond // Bell Labs Technical Journal. – 2010. – Vol. 14, no. 4. – P. 3–9.

6. Рекордная производительность систем 100G как маркер перехода к эволюционному развитию волоконно-оптических систем связи / В.А. Кобышев, А.В. Леонов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев // Первая Миля. – 2015. – № 6. – С. 40–43.

7. Леонов А.В., Слепцов М.А., Трещиков В.Н. Развитие скоростных DWDM-систем по нескольким поднесущим // Первая Миля. – 2016. – № 2.

8. ATLAS Internet Observatory Annual Report / C. Labovitz [et al.]. – 2009. – URL: https://www.nanog.org/meetings/nanog47/presentations/Monday/Labovitz_ObserveReport_N47_Mon.pdf.

9. Toward Transparent Optical Networking in Exascale Computers / S. Rumley [et al.] // ECOC. – 2015.

10. Xia T.J., Wellbrock G.A. Commercial 100-Gbit/s Coherent Transmission Systems in in Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. Elsevier Inc. – 2013.

11. New Trends and Challenges in Optical Digital Transmission Systems / C. Schubert [et al.] // ECOC. – 2012. – We.1.C.1.

References

1. Larin Iu.T., Meshchanov G.I. Sostoianie proizvodstva opticheskikh kabelei v Rossii i stranakh SNG v usloviakh mirovykh i lokal'nykh krizisnykh iavlenii [The state of production of optical cables in Russia and CIS countries in the conditions of global and local crisis events]. *Foton-Ekspress*, 2015, no. 6 (126), pp. 25.

2. Essiambre R.-J., Tkach R.W. Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks. *Proc. of the IEEE*, 2012, vol. 100, no. 5, pp. 1035-1055.

3. Govind P. Agrawal. Lightwave Technology: Telecommunication Systems. Hoboken, New Jersey: John Wiley&Sons, Inc., 2005, pp. 17.

4. Dianov E.M., Kurkov A.S. Volokonnaia optika [Fiber optics]. *Fizika*, 2006, no. 23.

5. Tkach R.W. Scaling Optical Communications for the Next Decade and Beyond. *Bell Labs Technical Journal*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 3-9.

6. Konyshchikov V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Rekordnaia proizvoditel'nost' sistem 100G kak marker perekhoda k evoliutsionnomu razvitiuu volokonno-opticheskikh sistem sviazi [Record efficiency of 100G systems as a marker of the transition to the evolutionary development of fiber-optic communication systems]. *Pervaia Milia*, 2015, no. 6, pp. 40-43.

7. Leonov A.V., Sleptsov M.A., Treshchikov V.N. Razvitie skorostnykh DWDM-sistem po neskolk'im podnesushchim [The development of high-speed DWDM systems across multiple subcarriers]. *Pervaia Milia*, 2016, no. 2.

8. Labovitz C. [et al.] ATLAS Internet Observatory Annual Report. 2009, available at: https://www.nanog.org/meetings/nanog47/presentations/Monday/Labovitz_ObserveReport_N47_Mon.pdf.

9. Rumley S. [et al.] Toward Transparent Optical Networking in Exascale Computers. *ECOC*, 2015.

10. Xia T.J., Wellbrock G.A. Commercial 100-Gbit/s Coherent Transmission Systems in Optical Fiber Telecommunications VI B: Systems and Networks. Elsevier Inc., 2013.

11. Schubert C. [et al.] New Trends and Challenges in Optical Digital Transmission Systems. *ECOC*, 2012, We.1.C.1.

Получено 2.03.2016