

# АЛЬЯНС ЛИДЕРОВ

**Я.А. ТЕЗАДОВ,**  
ООО «НТО ИРЭ-Полюс»



**Е.С. ГОЛУБЯТНИКОВ,**  
ООО «НТО ИРЭ-Полюс»



**Н.М. КОРОТКОВ,**  
ООО «Корнинг СНГ»



**С.А. АНПИЛОВ,**  
ООО «НТО ИРЭ-Полюс»



Подробную информацию об авторах см. на сайте [www.fotonexpres.ru](http://www.fotonexpres.ru) раздел «Наши авторы»

*О сотрудничестве мировых лидеров. Рекордные достижения в области сверхдлинных однопролетных «наземных» волоконных линий связи.*

*On cooperation of world leaders. Record achievements in the field of "land" single-flight of extra-long fiber communication lines.*

## ВВЕДЕНИЕ

Современная тенденция постоянного технологического развития телекоммуникационной области в условиях жесткой конкурентной борьбы подталкивает многих производителей к взаимовыгодному и высокопродуктивному сотрудничеству. Данный подход позволяет объединить эффективные наработки каждого из участников альянса, результатом которого является продукт либо решение, согласно эффекту синергии многократно превосходящее разобценное решение. Ярким примером такого высокопродуктивного альянса является сотрудничество двух признанных мировых лидеров: компании ООО «НТО ИРЭ-Полюс» – в области высокомошных волоконных лазеров и телекоммуникационного оборудования, и компании ООО «Корнинг СНГ» – в области специализированного стекла, керамики и оптической физики. Результатом глубокой консолидации отраслевых лидеров - компаний ООО «НТО ИРЭ-Полюс» и ООО «Корнинг СНГ» являются рекордные достижения в области сверхдлинных однопролетных «наземных» волоконных линий связи с

**Ключевые слова:** однопролетные ВОЛС, мировые рекорды, «НТО ИРЭ-Полюс», Corning, ВКР, ROPA, 100G, TXF™.

**Keywords:** Single FOCL, world records, "NTO IRE-Polus", Corning, WRC, ROPA, 100G, TXF™.

применением инновационных технологий в сфере ВКР-преобразования, усилителей с удаленной оптической накачкой (ROPA) и оптических волокон со сверхнизким затуханием и увеличенным модовым размером для «наземных» применений. Актуальность данной задачи обусловлена потребностью современного рынка в строительстве экономически эффективных ВОЛС в жестких климатических условиях малонаселенных регионов Сибири и Дальнего Востока; пустынных районах стран Аравийского полуострова; при организации линий связи на чужих волокнах с целью исключения строительства дополнительных промежуточных пунктов и т.д. В отличие от традиционного многопролетного метода строительства ВОЛС, основным недостатком которого является установка дорогостоящих промежуточных пунктов усиления/регенерации с использованием активных элементов, требующих электропитания, и зачастую вложения собственных средств в организацию и ремонт промежуточного пункта, принадлежащего стороннему оператору, организация однопролетных линий связи значительно снижает стоимость проекта и последующие эксплуатационные затраты.

## ОДНОПРОЛЕТНАЯ СВЕРХДЛИННАЯ ВОЛС С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ ДЛЯ ДОСТАВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НАКАЧКИ

Специалисты компаний ООО «НТО ИРЭ-Полюс» и ООО «Корнинг СНГ» в ответ на потребность рынка в таких высокоэффективных архитектурах ВОЛС и в 2017 году представили собственное видение решения данной задачи [1]. На рис.1 приведена схема организации 100G-одноканальной однопролетной ВОЛС протяженностью 571 км (93.6 дБ), с использованием волокна Corning®SMF-28®ULL и DWDM-оборудования «ПУСК» производства ООО «НТО ИРЭ-Полюс».

В качестве каналообразующего оборудования использовался агрегирующий транспондер производства ООО «НТО ИРЭ-Полус» уровня 100G с форматом модуляции PM-DQPSK и использованием алгоритма упреждающей коррекции ошибок Soft-FEC (15%). Для создания оптимальной предкомпенсации дисперсии (~ -2000 пс/нм) использовался перестраиваемый компенсатор дисперсии (DCM). Далее сигнал усиливался до наиболее оптимального (исходя из запаса OSNR) уровня  $P_{in} = 8$  дБм эрбиевым усилителем мощности (EDFA).

Одним из основных ограничительных факторов для дальности передачи телекоммуникационного оборудования является отношение оптического сигнала к шуму – OSNR. При переходе к высокоскоростным системам передачи требования к OSNR только возрастают, что значительно сокращает максимально возможную дальность передачи информации без регенерации сигнала. С точки зрения оптического волокна, как среды передачи сигнала, существует два способа для улучшения величины OSNR в линии. Первый из них связан с уменьшением погонного затухания в оптическом волокне. Среди волокон для «наземных» сетей связи наилучшими характеристиками по затуханию обладает волокно Corning® SMF-28® ULL, имея типовое значение затухания на длине волны 1550 нм менее 0,163 дБ/км. Второй способ – это увеличение вводимой мощности излучения в волокно. Существует порог на максимально возможную вводимую мощность в оптическое волокно, обусловленный появлением нелинейных эффектов, которые наоборот приводят к ухудшению OSNR. Повысить порог по нелинейности можно увеличением эффективной площади волокна (площадь поперечного сечения в волокне, в котором сосредоточена основная часть излучения). Согласно рекомендации ITU-TG.652 стандартные одномодовые оптические волокна имеют ограничения на диаметр модового пятна. Типовым значением на длине волны 1550 нм является 10,4 – 10,5 мкм.

Особенностью данной работы является использование СТАНДАРТНОГО ОДНОМОДОВОГО ВОЛОКНА для передачи сигнала и доставки рамановской накачки, так как этот тип волокна не требует дорогостоящей модернизации кабельной инфраструктуры, представляя наибольший практический интерес. В таблице 1 приведены показатели затухания для каждого из трех участков передачи сигнала (волокно Corning® SMF-28® ULL).

Акцент в данной работе сделан на оптимизации характеристик усилителей с удаленной накачкой (ROPA) и ВКР источников накачки и последующем подборе конфигурации линии для наибольшей эффективности их совместной работы. Задача

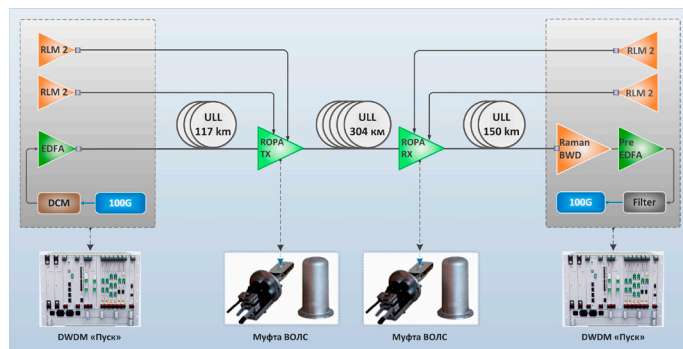


Рис. 1. Схема организации однопролетной ВОЛС для передачи сигнала 100G (1 канал) на 571 км (93.6 дБ).

сводится к поиску оптимального положения ROPA вдоль линии для обеспечения максимального оптического бюджета.

Важнейшим параметром, влияющим на эффективность усилителей типа ROPA, является мощность подводимой к ним рамановской накачки. Основываясь на многолетнем опыте, специалисты компании ООО «НТО ИРЭ-Полус» применили для накачки ROPA с передающей стороны (ROPA\_TX) двухволновый рамановский источник с длинами волн 1425 нм и 1487 нм и мощностью ~1,8 Вт и ~100 мВт соответственно. Данная оптическая конфигурация позволила усилить сигнал до 11 дБм (выход ROPA-TX) на расстоянии 117 км (19,2 дБ). В качестве накачки усилителя с приемной стороны (ROPA\_Rx) был выбран двухволновый рамановский источник с длинами волн 1425 и 1490 нм и мощностями излучения 2 Вт и 60 мВт соответственно. Данные характеристики накачки в совокупности с оптимизированными характеристиками легированного редкоземельными ионами  $Eg^{3+}$  активного волокна ROPA\_Rx позволили усилить экстремально низкий сигнал (< 38 дБм), приходящий после 304 км транспортного волокна на вход ROPA\_Rx.

Дальнейшее усиление сигнала осуществлялось встречной рамановской накачкой (RAU\_BWRD) на длине волны 1480 нм и мощностью 0,8 Вт, которая к тому же являлась дополнительной накачкой для ROPA\_RX, удаленного от приемного пункта на 150 км (24,3 дБ).

Таким образом, использование современных технологий ВКР-усиления компании ООО «НТО ИРЭ-Полус» и волокна со сверхнизкими потерями Corning® SMF-28® ULL позволяет осуществить однопролетную безошибочную передачу 100G-сигнала на расстояние свыше 570 км.

Таблица 1. Показатели затухания для сигнальных участков и участков доставки накачки

Участок	Длина участка, км	Общее затухание, дБ	Километрическое затухание, дБ/км
1-й участок	117	19,2 (1550 нм)	0,164 (1550 нм)
2-й участок	304	50,1 (1550 нм)	0,165 (1550 нм)
3-й участок	150	24,3 (1550 нм)	0,162 (1550 нм)

**РАЗВИТИЕ ВОЛОКОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПАНИИ  
ООО «КОРНИНГ СНГ»**

Необходимость увеличения порога нелинейных эффектов путем увеличения эффективной площади волокна была учтена в новой версии отраслевого стандарта ITU-T Recommendations G.654, выпущенного в ноябре 2016 года, в котором впервые появилась категория волокон для «наземных» применений с большой эффективной площадью – категория G.654.E[2]. До появления этой группы волокна G.654 рекомендовались для использования лишь в подводных линиях связи. Для возможности использования волокон с большой эффективной площадью в «наземных» линиях связи требуется их совместимость с конструкциями кабеля и условиями прокладки, характерными для стандартных волокон. К новой группе волокон G.654.E предъявляются более жесткие требования на изгибные потери – эквивалентные требованиям для волокон G.652.D, то есть, не более 0,1 дБ на длине волны 1625 нм при намотке 100 витков на радиус оправки 30 мм. В свою очередь диаметр модового пятна, от которого зависит эффективная площадь, должен находиться в пределах от 11,5 до 12,5 мкм на длине волны 1550 нм.

Одновременно с выпуском новой версии Рекомендаций G.654, компанией Corning было представлено новое волокно Corning® TXF™, которое относится к волокнам категории G.654.E. Волокно TXF™ имеет эффективную площадь 125 мкм² и типовое значение затухания на длине волны 1550 нм, равное 0,168 дБ/км, что значительно лучше, чем у типичных волокон категории G.652.D [3,4]. Данное волокно полностью пригодно для использования в «наземных» линиях связи и обладает стойкостью к макро- и микроизгибным потерям не хуже, чем типовые волокна G.652. За счет своей большой эффективной площади волокно TXF™ позволяет повысить порог по вводимой оптической мощности сигнала (рис.2) и рамановской накачки в линию примерно на 2 дБ, тем самым увеличивая производительность ВОЛС.

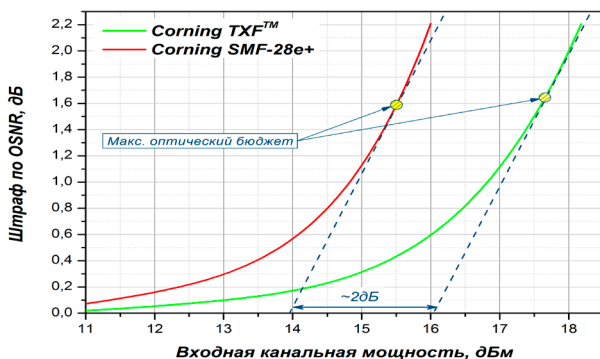


Рис.2. Зависимость штрафа по OSNR, наводимого нелинейными эффектами, от входной мощности для волокон Corning® TXF™ и Corning®SMF-28® для транспондера 100G с форматом модуляции PM-DQPSK

Таким образом, в «наземных» сверхдлинных однопролетных линиях связи суммарный прирост оптического бюджета от использования волокна Corning® TXF™ составит до 4 дБ: увеличение канальной мощности на ~2дБ и увеличение рамановской накачки на ~2дБ.

**ОДНОПРОЛЕТНАЯ ОДНОКАНАЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА 100G СИГНАЛА В ВОЛС С ПЕРЕКРЫВАЕМОМ ЗАТУХАНИЕМ ~95 ДБ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ ДОСТАВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НАКАЧКИ**

Следующим этапом успешного сотрудничества специалистов компании ООО «НТО ИРЭ Полюс» с компанией ООО «Корнинг СНГ» стало достижение рекордных результатов в сегменте однопролётных «наземных» ВОЛС без использования дополнительных волокон накачки, организованных с помощью DWDM-оборудования «ПУСК» и позволивших осуществить безошибочную однопролётную передачу 100G сигнала на расстояние, превышающее 580 км с перекрываемым затуханием ~95дБ [5;6].

В качестве каналообразующего оборудования был взят агрегирующий 100G-транспондер производства ООО «НТО ИРЭ-Полюс» с форматом модуляции DP-QPSK и использованием технологии блоковых кодов-произведения TPC с избыточностью Soft-FEC 25% (maxPreFECBER: 3.4\*10<sup>-2</sup>).

Макет линии был построен на базе волокна Corning® ULL+ G.652B с минимальными потерями ~0.16 дБ/км. С целью повышения порога возникновения нелинейных эффектов, на самых высокоэнергетических участках использовалось волокно Corning® TXF™ G.654.E. Таким образом, вся система полностью удовлетворяла жестким климатическим и деформационным требованиям, предъявляемым к «наземным» волоконно-оптическим линиям связи.

В таблице 2 приведены показатели затухания для каждого из трех участков передачи сигнала (волокно Corning®SMF-28®ULL+ Corning® TXF™).

С целью увеличения оптического бюджета на передающем и приёмном концах линии использовалась

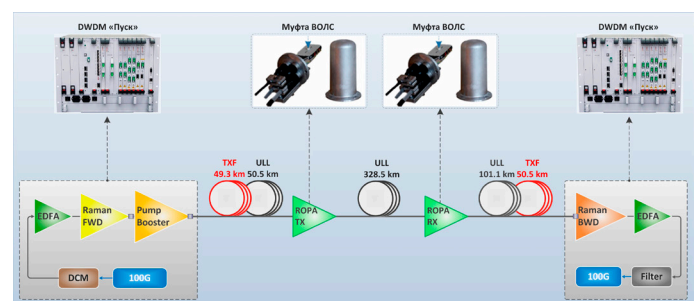


Рис.3. Однопролетная «наземная» передача 100G с использованием волокна Corning TXF™

Таблица 2.

Показатели затухания на участках линии

Участок	Длина участка, км	Общее затухание, дБ	Километрическое затухание, дБ/км
1-й участок	99,8	16,55(1560 нм)	0,166(1560 нм)
2-й участок	328,5	52,72(1560 нм)	0,160 (1560 нм)
3-й участок	151,7	25,27(1560 нм)	0,166 (1560 нм)

многоуровневая рамановская накачка из линейки DWDM-оборудования производства ООО «НТО ИРЭ-Полус» совместно с высокоэффективными усилителями с удалённой накачкой. На передающей стороне схемы был установлен рамановский усилитель второго порядка (RamanFWD), работающий на длинах волн 1425 нм и 1480 нм, и выполняющий функции как распределённого усилителя, так и накачки для усилителя ROPA-TX по сигнальному волокну. На приёмной стороне использовался рамановский усилитель третьего порядка (RamanBWD) со сверхнизким эффективным шум-фактором (~-5,5дБ) и со стартовой длиной волны накачки 1278 нм, эволюционирующей по мере распространения в волокне в длину волны 1480 нм за счёт эффекта ВКР, служащую также для распределённого усиления и накачки ROPA-RX.

Таблица 3. Мировые достижения в секторе однопролетных двухволоконных линий связи

Вендор	Год	Тип волокна*	Кол-во каналов	Общее затухание, дБ	Длина, км	Удельное затухание, дБ/км	Общее затухание в эквивалентном одноканальном режиме, дБ
ALU[7]	2011	G.654	4	76,9	462	0,1665	82,92
Xtera[8]	2013	G.654	8	80,8	480	0,1683	89,83
Xtera[9]	2014	G.654	1	90,2	556,7	0,1620	90,2
T8[10]	2015	G.652	2	80,1	502,1	0,1595	83,11
ALU[11]	2015	G.654	1	93,1	610	0,1526	93,1
IRE-Polus[5,6]	2018	G.654 (TXF™)	1	95	580	0,1638	95

\* Синим цветом представлены варианты исполнения с волокнами для подводных применений, к которым не предъявляется жестких требований к изгибным потерям

Использование данных передовых ВКР-технологий совместно с волокном CorningTXF™ позволили усилить сигнал до 13,5дБм на выходе ROPA-TX, расположенном на расстоянии 99,8 км без использования дополнительных волокон для доставки накачки, а также обеспечить коэффициент усиления >23дБ и шум-фактор ~-5,2дБ для модуля ROPA-RX, расположенного на расстоянии выше 150 км.

Выше представлена схема последних мировых достижений в секторе однопролетных двухволоконных сверхдлинных линий связи. С целью удобства сравнения все результаты были приведены к эквивалентному одноканальному варианту исполнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетнее сотрудничество ООО «НТО ИРЭ-Полус» и ООО «Корнинг СНГ» стало ярким доказательством превосходства объединенного подхода компаний мировых лидеров

к решению поставленных современным рынком задач. Предложенное компаниями решение позволило получить наиболее эффективную сверхдлинную однопролетную двухволоконную передачу 100G-сигнала, превосходящую по характеристикам все известные в мире аналоги. Подобная консолидация является не только одним из факторов роста участников альянса, но и технологическим локомотивом отрасли в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тезадов Я.А., Шуб В.Э., «Однопролетные наземные сверхдлинные ВОЛС. Маркетинг или реальность?», *TransportNetworksRussia Conference 2017*.
2. Рекомендация МСЭ-TG.654 «Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной дисперсией и отсечкой», 2016.
3. Акопов С.Г., Коротков Н.М., Маковой С., Тен С., «Преимущества использования волокон с низким затуханием. Волокна Corning® SMF-28e+®LL, SMF-28®ULL, Vascade®EX2000», *Фотон-Экспресс №8(104)*, 2012
4. Corning® TXF™ Optical Fiber Featuring Ultra-Low-Loss and Large Effective Area for Extended Reach, WP8105, January 2017
5. Анпилов С.А., Голубятников Е.С., Тезадов Я.А., «ВКР-технологии в телекоммуникациях. Прихоть или необходимость?», *Фотон-Экспресс №3(147)*, 2018.
6. Тезадов Я.А., Мусин Р.Х., «ВКР-технологии в телекоммуникациях. Прихоть или необходимость?», *TransportNetworksRussia Conference 2018*.
7. H. Bissessur, P. Bousselet, D. Mongardien, G. Boissy, J. Lestrade, «4x100Gb/s Unrepeated Transmission over 462km Using Coherent PDM-QPSK Format and Real-Time Processing», *37th European Conference and Exposition on Optical Communications, paper Tu.3.B.3*.
8. Do-Il Chang, Pallavi Patki, Sergey Burtsev, and Wayne Pelouch, «8 x 120 Gb/s Transmission over 80.8 dB / 480.4 km Unrepeated Span», *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, paper JTh2A.42*.
9. T. J. Xia, D. L. Peterson, G. A. Wellbrock, D. CHANG, P. Perrier, H. Fevrier, S. Ten, C. Tower, and G. Mills, «557-km Unrepeated 100G Transmission with Commercial Raman DWDM System, Enhanced ROPA, and Cabled Large Aeff Ultra-Low Loss Fiber in OSP Environment», *OFS 2014, paper Th5 A.7*.
10. V. V. Gainov, N. V. Gurkin, S. N. Lukin, I. I. Shikhaliev, P. I. Skvortsov, S. Makovejs, S. G. Akopov, S. Y. Ten, O. E. Nani and V. N. Treshchikov, «500 km unrepeated 200 Gb/s transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only», *Laser Phys. Lett.* 12 (2015).
11. S. Etienne, H. Bissessur, C. Bastide, D. Mongardien, «Ultra-Long 610 km Unrepeated Transmission of 100 Gb/s using Single Fibre Configuration», *ECOC 2015 Proceedings, Th2.2.5*.