

УТВЕРЖДАЮ:

Директор НЦВО РАН  
д.ф.-м.н.



*С.Л. Семенов*  
С.Л. Семенов

«06» *марта* 2019 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научного Центра Волоконной Оптики Российской академии наук

Диссертация «Увеличение производительности однопролетных когерентных линий связи с рамановскими усилителями» прошла апробацию на научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научного Центра Волоконной Оптики Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Шихалиев Игорь Игоревич являлся аспирантом кафедры радиотехники и систем управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ (НИУ))».

В 2014 г. окончил МФТИ (НИУ) по специальности «Прикладная математика и физика», в 2017 г. сдал кандидатские экзамены. Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2019 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель диссертации Шихалиева И.И. - Наний Олег Евгеньевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**1. Актуальность темы исследования.** Диссертационная работа Шихалиева И.И. посвящена исследованию увеличения производительности однопролетных когерентных линий связи. Этот вопрос является актуальным на сегодняшний момент в связи с ростом объема трафика в телекоммуникационных линиях. Все чаще наблюдается картина, когда DWDM – линии используются на предельных возможностях, как по числу каналов, так и по канальной скорости. В данной работе проведено исследование по увеличению производительности однопролетных ВОЛС с применением распределенных рамановских усилителей. Отличительной чертой таких усилителей является то, что усиление сигнала происходит в самом телекоммуникационном волокне. Данные усилители широко используются в сверхдлинных линиях связи и существенно увеличивают дальность и емкость систем связи.

**2. Научная новизна результатов диссертации** заключается в следующем 1). определена погрешность и область применимости приближенного метода экспресс-измерения коэффициента ВКР по спектрам собственного усиленного спонтанного комбинационного рассеяния; 2) предложена методика экспериментального измерения нелинейного интерференционного шума в когерентных линиях связи с попутными рамановскими усилителями; 3) экспериментально установлено, что увеличение

эксплуатационного запаса линии за счет использования попутного рамановского усилителя может достигать 6 дБ и определяется параметрами линии связи; 4) экспериментально установлено, что увеличение производительности линии за счет использования удаленного эрбиевого усилителя с попутной накачкой падает с ростом числа каналов в линии вплоть до отрицательных значений; 5) разработана оригинальная методика оптимизации сверхдлинной однопролетной линии с распределенными рамановскими усилителями и эрбиевыми усилителями с удаленной накачкой с помощью которой созданы однопролетные линии с рекордными параметрами; 6) предложен оригинальный алгоритм стабилизации коэффициента усиления сигнала в попутном широкополосном рамановском усилителе и экспериментально продемонстрирована его работоспособность; 7) создан комплекс программ, предназначенный для моделирования распределенных рамановских усилителей. На основе проведенных измерений создана база данных спектров затухания и коэффициентов ВКР основных телекоммуникационных волокон. Проведена экспериментальная верификация данной модели, показавшая ее высокую точность.

**3. Личный вклад** заключается в проведении численных расчетов и экспериментальных измерений, в написании научных статей и их подготовке к публикации. Все использованные в диссертации экспериментальные результаты получены автором лично или при его определяющем участии. Численные расчеты распределенного рамановского усилителя проведены лично автором или при его определяющем участии. Численные расчеты модели нелинейного гауссового шума в когерентных линиях связи проведены совместно с сотрудниками научного отдела компании «Т8».

**4. Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 57-й международной научной конференции МФТИ, Долгопрудный, 2014 г.; на первой, третьей и четвертой международных конференциях Инжиниринг & Телекоммуникации – En&T, Долгопрудный, 2014, 2016, 2017 гг; на пятой и шестой всероссийских конференциях по волоконной оптике, Пермь, 2015, 2017 гг; на первой конференции по фотонике стран БРИКС, Москва, 2016г.; на XIV Международной научной конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Самара, 2016 г.; на 12 и 13 международной выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики», Москва, 2017, 2018 гг; на VII Международной конференции «Фотоника и информационная оптика», Москва, 2018 г.

**5. Научная и практическая значимость полученных результатов исследования и рекомендации по дальнейшему их использованию.** Значимость заключается в использовании полученных экспериментальных результатов для расчета характеристик телекоммуникационных волоконно-оптических линий связи с когерентным приемником с применением распределенных рамановских усилителей и эрбиевых усилителей с удаленной накачкой. Разработанное программное обеспечение на основе модели и экспериментальных результатов позволяет оценить требуемый объем оборудования для работоспособности проектируемой ВОЛС. Кроме того, создано оборудование для сверхдлинных однопролетных линий связи, в частности гибридный усилитель, представляющий собой совокупность эрбиевого и распределенного рамановского усилителя, и рамановские усилители с попутной и встречной накачкой.

**6. Оценка структуры диссертации, языка и стиля изложения научного материала.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, написана техническим грамотным языком и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

**7. Соответствие содержания диссертации научной специальности.** Тема и содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», по которой она представлена к защите.

**8. Публикации и апробация работы.** По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 6 статей, из которых 4 статьи в изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, 4 статьи, входящие в научные журналы из перечня ВАК, и в 3 тезисах российских конференций.

#### *Статьи в журналах/сборниках из перечня ВАК*

1. Шихалиев, И. Простой метод измерения эффективного коэффициента ВКР в одномодовых волоконных световодах и область его применимости / И.И. Шихалиев, В.В. Гайнов, А.Н. Дорожкин, О.Е. Наний, В.А. Коньшев, В.Н. Трещиков // Квантовая электроника. – 2017. – Т.47, №10, – С. 906-910.

2. Старых, Д. Экспериментальное исследование нелинейного режима работы DP-QPSK 100G линии связи, содержащей распределенный рамановский усилитель с попутной накачкой / Д. Д. Старых, И. И. Шихалиев, В. А. Коньшев, О. Е. Наний, В. Н. Трещиков, Р. Р. Убайдуллаев, Д. Р. Харасов // Квантовая электроника. – 2018. – Т.48, №8, – С. 767-772.

3. Коньшев, В. Улучшение оптического качества сигнала при нелинейном взаимодействии спектральных каналов / В. А. Коньшев, А. В. Леонов, О. Е. Наний, А. Г. Новиков, И. И. Шихалиев, В. Н. Трещиков, Р. Р. Убайдуллаев // Квантовая электроника. – 2016. – Т.46, №10, – С. 924-929.

4. Шихалиев, И. Широкополосный гибридный оптический усилитель: как улучшить существующие ВОЛС / И. Шихалиев, С. Лукиных, О. Наний, В. Трещиков, Д. Старых, В. Коньшев, Р. Убайдуллаев // Первая Миля. — 2018. — № 2. — с. 68-72.

#### *Статьи в журналах/сборниках из перечня Web of Science/Scopus (исключая статьи, входящие в предыдущий список)*

1. Gainov, V. 500 km unrepeated 200 Gbit s<sup>-1</sup> transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only / 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 Nanii and V N Treshchikov // Laser Physics Letters, – 2015. – May. – Vol. 12, no. 6. – P. 066201(1)-066201(6)

#### *В других изданиях*

1. Гайнов, В. Однопролетные оптические линии связи большой протяженности / В.В. Гайнов, В.А. Коньшев, А.В. Леонов, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, П.И. Скворцов, В.Н. Трещиков, И.И. Шихалиев, Р.Р. Убайдуллаев // Прикладная фотоника. – 2015. – Т.2, №1, – С. 5-22.

#### *Тезисы*

1. Шихалиев, И. Простой метод измерения эффективного коэффициента ВКР в одномодовых волоконных световодах и область его применимости / И.И. Шихалиев, В.В. Гайнов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков // материалы конференции "Оптические технологии в телекоммуникациях" ООО "16ПРИНТ". – Самара. – 2015. – с. 52-53

2. Шихалиев, И. Оптимизация однопролетных линий связи / И.И. Шихалиев, В.В. Гайнов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, В.А. Коньшев, С.Н. Лукиных, П.И. Скворцов // Фотон-экспресс, спецвыпуск по материалам Всероссийской конференции по волоконной оптике г. Пермь 7-9 октября 2015 года. – Москва. – 2015. – Т.6, №126, – С. 47-48.

3. Шихалиев, И. Распределенные рамановские усилители в волоконно-оптических линиях связи / И.И. Шихалиев, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, В.А. Коньшев



// Фотон-экспресс, спецвыпуск по материалам Всероссийской конференции по волоконной оптике г. Пермь 3-6 октября 2017 года. – Москва. – 2017. – Т.6, №142, – С. 84.

Исследование Шихалиева И.И. проведено на должном научном уровне и заслуживает самой высокой оценки. Новизна исследования, достоверность и обоснованность его результатов, практическая ценность работы, апробация и публикация основных ее результатов позволяют сделать заключение о соответствии диссертационной работы требованиям, предъявляемым к работам данного характера на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Увеличение производительности однопролетных когерентных линий связи с рамановскими усилителями» Шихалиева Игоря Игоревича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Апробация диссертации Шихалиева И.И. проведена на заседании научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научного Центра Волоконной Оптике Российской академии наук 05 марта 2019 г.

Заключение принято голосованием участников заседания. Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 11 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 3 чел., протокол №1 от «05» марта 2019 г.



(подпись лица, оформившего заключение)

А.С.Бирюков,  
д. ф.-м. н, профессор, секретарь семинара,  
зав. теор. сектором НЦВО РАН