

На правах рукописи

Горбунов Олег Александрович

**Изучение статистических свойств  
излучения многочастотных квази-  
непрерывных волоконных лазеров**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматике и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН)

Научный руководитель: **Чуркин Дмитрий Владимирович**  
доктор физико-математических наук,  
проректор по научно-исследовательской деятельности,  
Новосибирский государственный университет.

Официальные оппоненты: **Мельников Леонид Аркадьевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
«Приборостроение», Саратовский  
государственный технический  
университет им. Ю.А. Гагарина.

**Фотиади Андрей Александрович**  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Ульяновский государственный  
университет.

Ведущая организация: Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт лазерной физики СО РАН,  
г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится «20» мая 2021 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматике и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматике и электрометрии СО РАН или по адресу [www.iae.nsk.su](http://www.iae.nsk.su).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Ильичёв Л.В.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность**

Статистическая оптика и статистическая радиофизика представляют собой обширные разделы науки, область охвата которых простирается от фундаментальных проблем, таких как когерентные состояния фотонов поля, до чисто технических вопросов, например, обеспечения регистрации радиоволн. С возникновением и развитием физики лазеров сформировалась отдельная ветвь статистической оптики, изучающая временные и статистические свойства лазерного излучения, условно называемая статистической нелинейной оптикой [1]. Одночастотная лазерная генерация исследована достаточно полно [2], однако статистические свойства излучения при многочастотной генерации остаются недостаточно изученными как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Вопрос о свойствах многочастотного излучения не носит отвлеченного характера: непрерывная генерация в твердотельных лазерах практически всегда содержит большое количество продольных мод ввиду значительной ширины контура усиления. Отдельно можно выделить вопрос о статистических свойствах излучения волоконных лазеров, системное изучение которого отсутствовало как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. При этом данный вопрос представляет интерес не только в рамках статистической нелинейной оптики, но и как задача нелинейной физики. Действительно, ввиду малого сечения волокна интенсивность света в нем достигает высоких значений, так что существенными становятся нелинейные эффекты при взаимодействии излучения с волокном [3]; особенности статистических свойств лазерного излучения возникают как проявление нелинейных взаимодействий, позволяя производить их косвенное изучение. Кроме того, в частных задачах может представлять интерес и конкретный вопрос о характере статистики интенсивности определенной конфигурации волоконного лазера. К примеру, от распределения интенсивности зависит коэффициент битовых ошибок при передаче информации [4]; статистические свойства многочастотного излучения влияют на эффективность генерации второй гармоники [1], которая изучалась экспериментально с использованием света от иттербиевого лазера [5]; при генерации суперконтинуума критичным является корректный учет высокочастотных флуктуаций ВКР-лазера, часто используемого в качестве накачки [6]; в волновой кинетической теории результат зависит от начальной ФРВ интенсивности

[7] и др. В работе [8] особо подчеркивалась недостаточная изученность динамических свойств излучения непрерывных волоконных лазеров и была сформулирована необходимость экспериментальных исследований в этом направлении.

## **Цель работы**

Отсутствие не только комплексного анализа проблемы о временных и статистических свойствах излучения волоконных лазеров, но и даже первичных данных по характеру этих свойств позволяло сформулировать цель диссертационной работы достаточно широко: исследование статистических свойств излучения многочастотных квази-непрерывных волоконных лазеров.

## **Задачи работы**

1. Разработка методов анализа данных, полученных при измерениях лазерного излучения в условиях ограниченной полосы измерительного оборудования, меньшей по сравнению со спектром изучаемого излучения.
2. Экспериментальное изучение статистических свойств излучения многочастотных квази-непрерывных волоконных лазеров различных типов. Анализ статистических свойств излучения с помощью разработанных методик.
3. Локализация оптических экстремальных событий, возникающих в излучении многочастотных квази-непрерывных волоконных лазеров, и изучение их свойств.

## **Научная новизна**

В представленной диссертационной работе получены экспериментальные данные по статистическим свойствам излучения непрерывных волоконных лазеров, отсутствовавшие на момент ее начала.

В работе были впервые описаны функции распределения вероятности интенсивности для волоконных иттербиевого, ВКР-лазера и ВКР-лазера со случайно распределенной обратной связью. Впервые был экспериментально установлен факт наличия спектральных корреляций в излучении данных лазеров. Впервые установлено количественное и качественное различие статистических свойств излучения в зависимости от мощности генерации и положения в спектре генерации волоконного лазера. Впервые обнаружены оптические экстремальные события на краю спектра генерации волоконного ВКР-лазера и экспериментально проверено, что процесс их возникновения является пуассоновским.

## **Практическая значимость**

Практическая ценность обусловлена возможностью применения полученных результатов как первичных данных для аналитических и численных моделей, в которых требуется знание статистики интенсивности волоконных лазеров.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Функция распределения вероятности для интенсивности излучения квази-непрерывных волоконных иттербиевого, ВКР-лазера с точечными отражателями и ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью не соответствует функции для полностью стохастического сигнала. Излучение указанных лазеров содержит спектральные корреляции.
2. Статистические свойства излучения квази-непрерывных волоконных ВКР-лазера с точечными отражателями и ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью зависят от положения в спектре генерации. В центре спектра излучение имеет близкий к стохастическому характер. При смещении к краю спектра спектральные корреляции усиливаются.
3. Статистические свойства излучения волоконных лазеров зависят от мощности генерации. В волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью вблизи порога генерации вероятность возникновения интенсивных волн выше по сравнению со стохастическим излучением, высоко над порогом – ниже.
4. На краю спектра генерации волоконных ВКР-лазера с точечными отражателями и ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью генерируются оптические экстремальные события. Процесс возникновения экстремальных событий в ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью является пуассоновским.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: Всероссийская конференция по волоконной оптике (12-14 октября 2011 г., г. Пермь), Российский семинар по волоконным лазерам (27-30 марта 2012 г., г. Новосибирск), Оптика лазеров (25-29 июня 2012, г. Санкт-Петербург), Всероссийская конференция по волоконной оптике (16-18 октября 2013 г., г. Пермь), SPIE Photonics Europe (14-17 апреля 2014 г., г. Брюссель, Бельгия), Всероссийская конференция по волоконной оптике (7-9 октября 2015 г., г. Пермь).

## **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в шести статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией [А1-А6], а также в сборниках тезисов и трудах шести российских и международных конференций [А7-А12].

## **Личный вклад**

Все результаты получены автором лично. Автор самостоятельно осуществлял проведение экспериментов и обработку результатов и принимал активное участие в планировании работ, обсуждении их результатов, формулировке выводов и подготовке статей.

## **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 124 страницы и содержит 84 рисунка. В списке литературы содержится 133 наименования.

## **Содержание работы**

Во введении описывается предмет изучения статистической нелинейной оптики. Дается обзор литературы по статистическим свойствам излучения твердотельных многочастотных лазеров и смежным вопросам лазерной физики. Приводятся цели работы и обосновывается ее актуальность. Дается краткое содержание диссертационной работы и формулируются защищаемые положения.

В первой главе обсуждается методика изучения статистических свойств излучения волоконных лазеров. Разбираются общие вопросы экспериментальной регистрации высокочастотных флуктуаций в лазерном излучении, аппроксимации по измеренным данным функции распределения вероятности интенсивности и автокорреляционной функции и анализа статистических свойств излучения на основе полученных результатов. Рассматриваются основные приборные ограничения, искажающие вид функции распределения вероятности интенсивности, количественно анализируется степень их влияния в реальном эксперименте. Показывается, что в стандартных условиях наибольшие искажения в свойства излучения вносит ограниченная спектральная полоса пропускания осциллографа, меньшая по сравнению с полной шириной спектра излучения. Описывается оригинальная методика, позволяющая выяснить вопрос о наличии спектральных корреляций в излучении при измерениях с ограниченной полосой путем сравнения экспериментальных результатов с универсальными кривыми,

описывающими изменения свойств функции распределения вероятности и автокорреляционной функции модельного полностью стохастического излучения при искусственном ограничении спектральной полосы. Также описывается предложенная методика спектральной фильтрации, заключающаяся в измерении не полного спектра лазерного излучения, а только определенной области, вырезанной спектральным фильтром, установленным перед входом в фотодетектор, что позволяло эффективно сузить спектр, а также сравнивать статистические свойства излучения в различных частях спектра. На примере численного моделирования волоконного ВКР-лазера [9] показывается, что статистические свойства могут различаться количественно и качественно для областей в центре и на краю спектра генерации.

Вторая глава посвящена экспериментальному изучению статистических свойств излучения волоконных иттербиевого и ВКР-лазера с фиксированными резонаторами, образованными точечными отражателями – парой волоконных брэгговских решеток. Описываются схемы экспериментов по изучению статистических свойств излучения. Спектр иттербиевого лазера был достаточно узок для регистрации динамики интенсивности без существенных искажений [5]. Показывается наличие быстрых флуктуаций интенсивности на малых временных масштабах (рис. 1а); подобный характер генерации был характерен для всех лазеров, изучавшихся в рамках работы. Описывается нетривиальная структура автокорреляционной функции интенсивности с регулярными провалами ниже среднего значения, что можно интерпретировать как возникновение антикорреляций (вставка на рис. 1а).

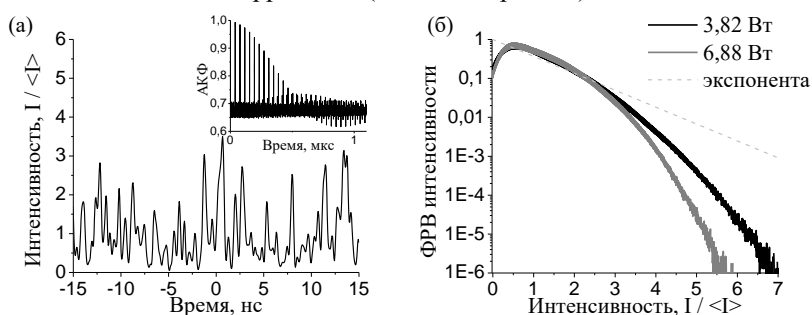


Рисунок 1. (а) Характерный вид зависимости интенсивности от времени и автокорреляционной функции. (б) Функция распределения вероятности интенсивности при мощностях накачки 3,82 и 6,88 Вт для иттербиевого лазера.

Показывается, что функция распределения вероятности интенсивности генерации иттербиевого лазера не соответствует функции стохастического излучения, затухая существенно быстрее экспоненциального закона (рис. 1б), что свидетельствует о наличии спектральных корреляций в излучении.

Для волоконного ВКР-лазера с широким – до 1 нм по уровню 10 дБ – спектром генерации, превосходящим полосу пропускания осциллографа (33 ГГц), показывается, что функции распределения вероятности интенсивности затухают быстрее соответствующей функции модельного стохастического сигнала при одинаковом отношении полосы пропускания к ширине спектра, что обосновывает утверждение о наличии спектральных корреляций в излучении лазера. На рис. 2а приведено сравнение скоростей затухания – показателей экспоненты – для экспериментальной и модельной функции распределения вероятности в зависимости от отношения полосы к ширине спектра. Экспериментальные значения были получены при измерениях с уменьшенной вручную полосой осциллографа.

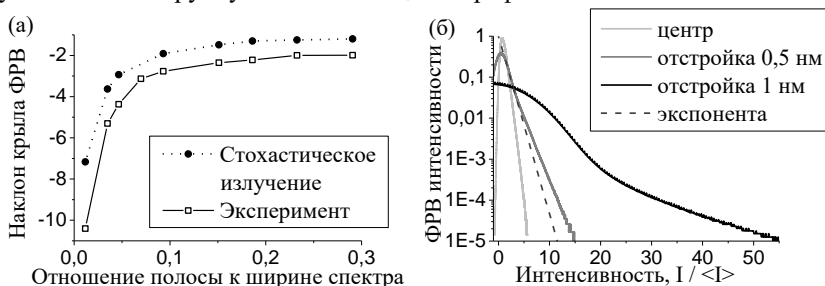


Рисунок 2. (а) Скорость затухания как функция отношения полосы пропускания к ширине спектра для ВКР-лазера (квадраты) и модельного стохастического излучения (круги). (б) Функция распределения вероятности интенсивности при положении фильтра с отстройкой 0 нм (светло-серая линия), 0,5 (серая линия) и 1 нм (черная линия) от центра спектра для ВКР-лазера.

Показывается, что статистические свойства зависят от положения в спектре генерации. Рис. 2б иллюстрирует функции распределения вероятности интенсивности ВКР-лазера для центральной части спектра генерации и удаленных от центра в длинноволновую область на 0,5 нм и 1 нм соответственно (ширина фильтра 0,5 нм). Описывается обнаруженная общая закономерность: с удалением от центра скорость затухания функции распределения вероятности уменьшается.



Третья глава посвящена экспериментальному изучению статистических свойств излучения волоконных ВКР-лазеров со случайной распределенной обратной связью, обратная связь которых реализуется за счет ВКР, но точечные отражатели, формирующие фиксированный резонатор, отсутствуют [10]. Описывается общая экспериментальная методика, применявшаяся при изучении статистических свойств схемы с прямой односторонней накачкой в трех конфигурациях: в первой на конце волокна, обратном по отношению к направлению распространения волны накачки, располагалось широкополосное кольцевое зеркало, во второй – плотная узкая волоконная брэгговская решетка, в третьей – волоконный фильтр Лию. Показывается, что вид функции распределения вероятности при аналогичном соотношении полосы пропускания к ширине спектра отличается от функции распределения модельного стохастического сигнала, что свидетельствует о наличии спектральных корреляций в излучении. Рис. 3а иллюстрирует изменение показателя экспоненты, описывающего скорость затухания крыла функций распределения вероятности, для стохастического сигнала и лазерного излучения. Делается вывод о качественном отличии свойств излучения при относительно малом превышении порога генерации и генерации высоко над порогом: в первом случае вероятность появления интенсивных волн выше по сравнению со стохастическим излучением, во втором – ниже.

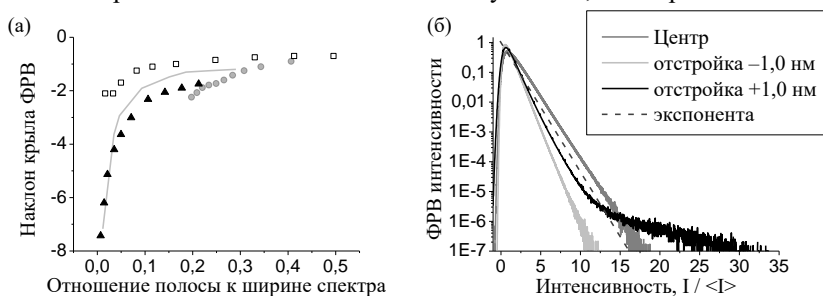


Рисунок 3. (а) Скорость затухания крыла функции распределения вероятности интенсивности как функция отношения полосы к ширине спектра для модельного стохастического излучения (линия) и эксперимента при уменьшении полосы с фиксированной мощностью накачки 1,6 Вт (квадраты) и 3 Вт (треугольники) и при увеличении мощности при полосе 33 ГГц (круги). (б) Функции распределения вероятности по различным частям спектра: центральная (серая линия), с отстройкой 1 нм в коротковолновую (светло-серая линия) и длинноволновую (черная линия) область.

На рис. 3б показаны функции распределения вероятности интенсивности для излучения в центральной части спектра и его левого и правого краев при ширине спектрального фильтра 0,25 нм (31 ГГц) для лазера в конфигурации с кольцевым зеркалом. При отстройке в длинноволновую область спектра крыло функции распределения вероятности становится очень широким, убывая намного медленнее экспоненциального закона.

В четвертой главе обсуждаются оптические экстремальные события, возникающие в излучении волоконных лазеров, применительно к волоконной оптике впервые описанные в [11]. Показывается наличие оптических экстремальных волн на краю спектра генерации волоконных ВКР-лазеров с фиксированным резонатором и со случайной распределенной обратной связью. Описывается формирование, ввиду наличия экстремальных волн, далеких крыльев функции распределения вероятности для излучения на краю спектра генерации (см. рис. 2б и 3б). Приводятся примеры регистрации экстремальных событий амплитудой до 150 средних значений в численном моделировании и свыше 50 – экспериментально. Рис. 4а показывает пример экстремальных волн, возникающих при отстройке 1 нм в длинноволновую область относительно центра спектра генерации, для волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью.

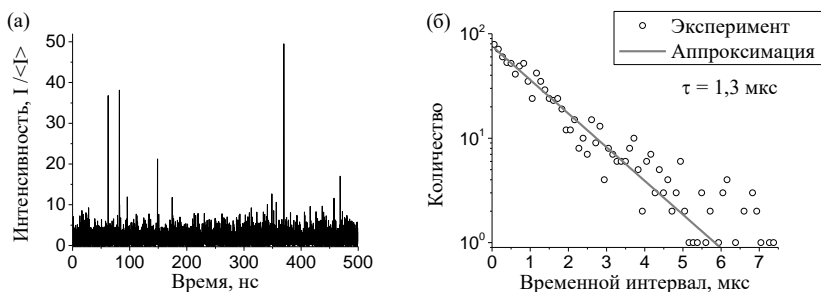


Рисунок 4. (а) Пример оптических экстремальных событий. (б) Распределение волн интенсивностью выше 15 средних значений по величине временного интервала между ними (круги) и аппроксимация экспонентой (линия); указано значение характерного времени возникновения экстремальной волны.

Изучается распределение экстремальных волн во временной динамике интенсивности излучения волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Показывается, что интервал между парами экстремальных событий распределен по экспоненциальному

закону (рис. 4б), что является характерным признаком пуассоновского процесса. Данный вывод подтверждается и для области в центре спектра, несмотря на качественно отличную функцию распределения вероятности интенсивности (рис. 3б). Устанавливается характерное время излучения наиболее интенсивных экстремальных волн – около десяти микросекунд.

## **Основные результаты**

1. Изучено влияние приборных эффектов и разработаны методики изучения статистических свойств излучения при измерениях в условиях ограниченной полосы пропускания измерительного оборудования, меньшей по сравнению с шириной оптического спектра изучаемого сигнала. Предложен метод спектральной фильтрации – изучения статистических свойств излучения по частям спектра, при котором исследуются отдельно взятые узкие спектральные области. Разработана методика, позволяющая выяснить вопрос о наличии корреляций в излучении при превышении оптической ширины спектра полосы пропускания, заключающаяся в установлении характера изменения функции распределения вероятности и автокорреляционной функции модельного стохастического излучения при измерениях с ограниченной полосой и последующем сравнении экспериментальных данных с полученной универсальной зависимостью.
2. Экспериментально изучены статистические свойства излучения квазинепрерывного волоконного иттербиевого лазера с коротким резонатором длиной 4 м и узким спектром шириной около 2 ГГц. Показано, что функция распределения вероятности интенсивности имеет неэкспоненциальную форму, затухая быстрее экспоненциального закона, что говорит о наличии межмодовых корреляций в излучении лазера и подавлении волн большой интенсивности по сравнению со стохастическим излучением. Вид автокорреляционной функции интенсивности свидетельствует о наличии антикорреляций в излучении. В излучении присутствуют устойчивые оптические структуры, затухающие на расстояниях 100-200 м, что соответствует величине нелинейной длины волокна.
3. Экспериментально и с применением численного моделирования изучены статистические свойства излучения квазинепрерывного волоконного ВКР-лазера с широким спектром шириной около 1 нм. Показано, что функция распределения вероятности интенсивности затухает быстрее соответствующей функции для стохастического

излучения при том же соотношении полосы к ширине спектра, что говорит о наличии межмодовых корреляций в излучении. Показано, что статистические свойства излучения различны для центра и края спектра. В центре спектра отличие функции распределения вероятности интенсивности от экспоненциального закона мало (эксперимент) или отсутствует (численный расчет), что является признаком стохастического излучения. На краю спектра генерации функция распределения вероятности затухает медленнее экспоненциального закона, таким образом, излучение содержит спектральные корреляции. С удалением от центра спектра скорость затухания функции распределения вероятности уменьшается.

4. Экспериментально изучены статистические свойства излучения квазинепрерывного волоконного лазера со случайной распределенной обратной связью в схеме с прямой односторонней накачкой в трех конфигурациях. Для конфигураций с плотной узкой волоконной брэгговской решеткой или со спектральным фильтром Лио установлено, что характер функции распределения вероятности интенсивности отличен от функции для стохастического модельного излучения при аналогичном соотношении полосы и ширины спектра, что свидетельствует о наличии корреляций в излучении. Для конфигурации с волоконной брэгговской решеткой показано, что при малых мощностях накачки функция распределения вероятности затухает медленнее функции для стохастического излучения, а при больших – быстрее. Для конфигурации с фильтром Лио показано, что статистические свойства излучения различаются для отдельных линий, формирующих многоволновой спектр.
5. Установлено наличие редких событий на краю спектра генерации волоконных ВКР-лазера и лазера со случайной распределенной обратной связью в схеме с прямой односторонней накачкой в конфигурации с кольцевым зеркалом. При отстройке 1 нм от центра спектра в излучении наблюдаются оптические экстремальные события. Интенсивность волн достигала 150 средних значений при численном моделировании и 60 – в эксперименте. Для лазера со случайной распределенной обратной связью исследован закон распределения временных интервалов между интенсивными волнами и показано, что и в центре, и на краю спектра при стабильной генерации он является экспоненциальным. Установлено, что процесс возникновения оптических экстремальных событий является пуассоновским с характерными временами возникновения до 10 мкс.

## **Публикации автора по теме диссертации**

- A1. Churkin D.V., Gorbunov O.A., and Smirnov S.V. Extreme value statistics in Raman fiber lasers // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36, no. 18. – pp. 3617-3619.
- A2. Bednyakova A.E., Gorbunov O.A., Politko M.O. et. al. Generation dynamics of the narrowband Yb-doped fiber laser // Opt. Express. – 2013. – Vol. 21, no. 7. – pp. 8177-8182.
- A3. Gorbunov O.A., Sugavanam S., and Churkin D.V. Revealing statistical properties of quasi-CW fibre lasers in bandwidth-limited measurements // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22, no. 23. – pp. 28071-28076.
- A4. Gorbunov O.A., Sugavanam S., and Churkin D.V. Intensity dynamics and statistical properties of random distributed feedback fiber laser // Opt. Lett. – 2015. – Vol. 40, no. 8. – pp. 1783-1786.
- A5. Gorbunov O.A., Sugavanam S., Vatik I.D. et. al. Statistical properties of radiation of multiwavelength random DFB fiber laser // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24, no. 17. – pp. 19417-19423.
- A6. Gorbunov O.A., Sugavanam S., Vatik I.D. et. al. Poisson distribution of extreme events in radiation of random distributed feedback fiber laser // Opt. Lett. – 2020. – Vol. 45, no. 8. – pp. 2375-2378.
- A7. Чуркин Д.В., Горбунов О.А., и Смирнов С.В. Статистика редких событий в выходном излучении волоконного ВКР-лазера // Спецвыпуск Фотон-Экспресс. – Материалы конференции ВКВО-2011. – 2011. – Т.6 (94) – с. 97-98.
- A8. Чуркин Д.В., Горбунов О.А., и Смирнов С.В. Численное изучение статистических свойств излучения волоконного ВКР-лазера. // – Материалы конференции "Российский семинар по волоконным лазерам". – 2012. – с. 176-177.
- A9. Gorbunov O.A., Kablukov S.I., Politko M.O. et. al. Experimental investigation of statistical properties of Ytterbium doped fiber laser // in 5th International Conference on Laser Optics 2012. – 2012. – no. TuR8-13. – 3 p.
- A10. Чуркин Д.В., Горбунов О.А., Бабин С.А. и др. Экспериментальное изучение временных характеристик волоконного ВКР-лазера // Фотон-Экспресс. – Материалы конференции ВКВО-2013. – 2013. – Т.6 (110). – с. 213-214.
- A11. Gorbunov O.A., Sugavanam S., and Churkin D.V. Influence of the generated power, measurement bandwidth, and noise level on intensity

statistics of a quasi-CW Raman fiber laser // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 9136, no. 913613. – pp. 1-8.

- A12. Горбунов О.А., Сугаванам Ш. и Чуркин Д.В. Экспериментальное изучение редких событий в излучении волоконного лазера со случайной распределенной обратной связью // Фотон-Экспресс. – Материалы конференции ВКВО-2015. – 2015. – Т.6 (126) – с. 63-64.

## **Список цитируемых работ**

1. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е. и Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику // "Наука", Москва, 1981, 640 с.
2. Лоудон Р. Квантовая теория света. Пер с англ. Колоколова А.А. под ред. Скроцкого Г.В. // "Мир", Москва, 1976, 488 с.
3. Babin S.A., Churkin D.V., Ismagulov A.E. et. al. Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser // J. Opt. Soc. Am. B. – 2007. – Vol. 24, no. 8. – pp. 1729-1738.
4. Liu P.-L., Fencil L.E., Ko J.-S. et. al. Amplitude fluctuations and field statistics in InGaAsP injection lasers // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1983. – Vol. QE-19, no. 9. – pp. 1348-1351.
5. Politko M.O., Kablukov S.I., Nemov I.N. et. al. Second-harmonic generation efficiency for multifrequency ytterbium-doped fibre laser radiation // Quantum Electron. – 2013. – Vol. 43, no. 2 – pp. 99-102.
6. Vanholsbeeck F., Martin-Lopez S., Gonzalez-Herraez M. et. al. The role of pump incoherence in continuous-wave supercontinuum generation // Opt. Express. – 2005. – Vol. 13, no. 17. – pp. 6615-6625.
7. Churkin D.V., Kolokolov I.V., Podivilov E.V. et. al. Wave kinetics of random fibre lasers // Nat. Comm. – 2015. – Vol. 6. – p. 6214 – 6 p.
8. Schroeder J. and Coen S. Observation of high-contrast, fast intensity noise of a continuous wave Raman fiber laser // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17, no. 19. – pp. 16444-16449.
9. Churkin D.V., Smirnov S.V., and Podivilov E.V. Statistical properties of partially coherent cw fiber lasers // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35, no. 19. – pp. 3288-3290.
10. Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher A.E. et. al. Random distributed feedback fibre laser // Nat. Photon. – 2010. – Vol. 4, no. 4. – pp. 231-235.
11. Solli D.R., Ropers C., Koonath P. et. al. Optical rogue waves // Nature – 2007. – Vol. 450, no. 7172. – pp. 1054-1057.