Форма «Т». Титульный лист отчета(итогового отчета) о выполнении проекта

Название проекта Управляемая генерация негауссовых квантовых состояний в схемах с измерениями	Номер проекта **24-22-00004**	
	Тип проекта: **МОНГ**	
	Отрасль знания: 02	
Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта: **Голубева Татьяна Юрьевна**	Контактные телефон и e-mail руководителя проекта: **+79112136356** **tania.golubeva@gmail.com**	
Полное и краткое название организации, через которую осуществляется финансирование проекта: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет"** **СПбГУ, Санкт-Петербургский государственный университет**		
	Год начала проекта: **2024**	Год окончания проекта: **2025**
Руководитель проекта и Организация гарантируют, что при подготовке отчета не были нарушены авторские и иные права третьих лиц и/или имеется согласие правообладателей на представление в РНФ материалов и их использование РНФ для проведения экспертизы и для их обнародования. **В соответствии с Соглашением о признании электронной подписи равнозначной собственноручной подписи Организация обеспечила подписание отчета простой электронной подписью руководителя проекта в Информационно-аналитической системе РНФ в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».**		
Подпись руководителя организации Либо уполномоченного представителя (в т.ч. – руководителя филиала), действующего на основании доверенности или распорядительного документа. В этом случае к представляемому в Фонд печатному экземпляру отчета **прилагается копия распорядительного документа или доверенности**, заверенная печатью организации (при наличии). Подпись должна быть расшифрована. Форма может быть подписана квалифицированной электронной подписью руководителя организации с представлением в ИАС файла, содержащего информацию об электронной подписи руководителя организации. **В указанном случае представление отчета в печатном виде в Фонд не требуется.** _____ /_____ / Печать (при наличии) организации		Дата регистрации отчета руководителем проекта 08.12.2025

К отчету прилагаются (прошиваются в составе бумажной версии отчета) копии всех публикаций* по проекту. Если отчет подписывается квалифицированной подписью, то прикладывается текст статьи целиком.

*К печатному экземпляру отчета прикладываются только копии первой (с указанием авторов) страницы и страницы со ссылкой на поддержку от РНФ.

Форма 1о
Отчет о выполнении проекта № 24-22-00004
«Управляемая генерация негауссовых квантовых состояний в схемах с измерениями»
в 2025 году

Номер регистрации сведений о начинаемой научно-исследовательской работе в единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских , опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения (rosrid.ru):
В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2013 г. № 327 «О единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения».
124022800137-4
Приоритетное направление научно-технологического развития, критическая технология, сквозная технология
Указывается согласно перечню (Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий») в случае, если тематика проекта может быть отнесена к одному из приоритетных направлений, а также может внести вклад в развитие критических и/или сквозных технологий.
4. Безопасность получения, хранения, передачи и обработки информации.
11. Технологии микроэлектроники и фотоники для систем хранения, обработки, передачи и защиты информации.
23. Технологии создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками.
Направление из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (далее – Стратегия НТР РФ)
Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
Н1 переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, новых материалов и химических соединений, результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта
Тематика проекта соответствует научному направлению профильной деятельности организации
Да
Описание.

Согласно приоритетному направлению развития университета: развитие исследований, накопление компетенций, трансфер знаний и технологий в областях, а именно цифровые технологии, искусственный интеллект, новые материалы, утвержденному Программой развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на 2021-2030 годы

1.1. Заявленный в проекте план работы научного исследования на отчетный период
Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе

Во второй год выполнения проекта предполагается провести следующие работы:

1. Будет продолжен анализ множества негауссовых состояний, генерируемых при вычитании частиц из двухмодового гауссова состояния. Поскольку было показано, что рассматриваемая схема позволяет генерировать как сжатые состояния котов Шредингера, так и сжатые состояния Фока, анализ будет акцентирован на выявлении критерия «близости» того или иного состояния к выбранному классу негауссовых состояний. Будут рассмотрены различные метрики на пространстве состояний и выявлены подходы построения оценок, применимые для рассматриваемого класса состояний.
2. Мы продолжим разработку протокола коррекции ошибок с помощью состояний генерируемых в рассматриваемом протоколе вычитания фотонов из двухмодового запутанного состояния. На данном этапе проекта мы планируем провести расчет верности канала после применения процедуры коррекции ошибок. Эта процедура весьма трудоемка в случае коррекции с помощью рассматриваемых не идеализированных состояний. Сперва требуется провести ортогонализацию квантовых состояний, подверженных ошибкам. В нашем случае нарушение ортогональности состояний обусловлено двумя причинами: во-первых, еще до действия ошибок состояния не вполне ортогональны, условие ортогональности выполняется асимптотически при больших степенях сжатия. Во-вторых, действие ошибок дополнительно влияет на ортогональность квантовых состояний. Предполагается проводить ортогонализацию Грама-Шмидта. Дальнейший анализ связан с построением процедуры восстановления после действия ошибки. Этот расчет связан с многопараметрической оптимизацией, которая должна производиться численно. Предполагается выбрать стратегию оптимизации, сокращающую размерность оптимизационного пространства исходя из свойств рассматриваемых состояний.
3. Еще одна поисковая задача связана с попыткой построения аналитического описания схем с «зацикливанием», то есть схем, в которых негауссово квантовое состояние, генерируемое на выходе схемы при первом проходе, подается в качестве одного из входных состояний на вход той же схемы на втором проходе. Мы планируем проанализировать множество квантовых состояний, генерируемых в такой конфигурации с точки зрения их свойств негауссовости и достижимого сжатия.
4. Задача о генерации сжатых состояний Фока высокого порядка довольно требовательна к ресурсу сжатия и к точности настройки параметров линейного преобразователя мод. Мы попробуем понизить эти требования, обобщив гамильтониан взаимодействия и добавив в него кроме одномодовых сжатий в каждом канале и унитарного смешения мод, еще операцию двухмодового сжатия. Такая постановка задачи адекватна как для рассмотрения чисто световых систем (обе моды на входе соответствуют сжатым световым осцилляторам), так и для свето-атомных систем (один из входных осцилляторов соответствует световой моде, а второй — бозонному оператору коллективной когерентности атомного ансамбля).
Предполагается представить результаты работы по проекту на Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям ХОЛОЭКСПО 2025 в Калининграде, а также на Молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань).

1.2. Заявленные научные результаты на конец отчетного периода

Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе

1. Будет проведен анализ существующих метрик негауссовых состояний. Мы планируем выявить критерий, указывающий на близость генерируемого состояния к

тому или иному классу негауссовых состояний. Постановка задачи не относится к общей классификации негауссовых состояний, а касается классификации состояний, генерируемых в рассматриваемой схеме с измерением числа частиц. Множество состояний, генерируемых в рассматриваемом протоколе вычитания числа частиц из двухмодового гауссова состояния, будет оценено с точки зрения их близости к сжатым состояниям Фока или к сжатым состояниям кота Шредингера.
2. Будет детально рассмотрен протокол коррекции ошибок с помощью одного из квантовых негауссовых состояний, генерируемых в рассматриваемой схеме. Выбор квантового состояния для расчета будет произведен в ходе выполнения задачи, исходя из построения восстановительной процедуры после действия ошибок. Будет произведен расчет верности информационного канала после процедуры коррекции ошибок. Мы свяжем параметры генерации негауссова состояния и верность коррекции, и укажем входные экспериментальные параметры, требуемые для работы бозонных кодов коррекции на рассматриваемых состояниях.
3. Численно будут оценены квантовые состояния, получаемые в результате «зацикливания» рассматриваемой схемы. Мы покажем возможно ли повысить характеристики генерируемого состояния путем его повторной отправки на вход линейного интерферометра. В частности, будет проанализировано изменение негауссовости генерируемого состояния, степень сжатия генерируемого состояния и вероятность генерации. Будет проанализировано множество состояний, недоступных в схеме с гауссовым входом.
4. Эволюция сжатых квантовых состояний в линейном интерферометре (с последующим измерением числа частиц) будет дополнена операцией двухмодового сжатия. Мы покажем, возможно ли с помощью такой модификации снизить требования к параметрам схемы. Мы рассмотрим режимы работы, доступные для экспериментальной реализации на световых и свето-атомных системах. Как известно, каждая из этих реализаций в принципе допускает все рассматриваемые гауссовы операции. Однако, трудность экспериментальной реализации тех или иных операций на световых или свето-атомных системах различна. Соответственно, мы ограничим себя экспериментально реализуемым набором входных параметров и доступных операций, и оценим, какие преимущества нам предоставляет каждая из систем.

1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период (фактически проделанная работа, от 3 до 10 стр. (6-20 тыс. символов))

На второй год выполнения проекта было запланировано выполнение четырех задач:

1. Будет проведен анализ существующих метрик негауссовых состояний. Мы планируем выявить критерий, указывающий на близость генерируемого состояния к тому или иному классу негауссовых состояний. Постановка задачи не относится к общей классификации негауссовых состояний, а касается классификации состояний, генерируемых в рассматриваемой схеме с измерением числа частиц. Множество состояний, генерируемых в рассматриваемом протоколе вычитания числа частиц из двухмодового гауссова состояния, будет оценено с точки зрения их близости к сжатым состояниям Фока или к сжатым состояниям кота Шредингера.
В рамках первой задачи мы провели анализ метрик на пространстве состояний, которые можно использовать для классификации негауссовых состояний, генерируемых в схеме с измерением числа частиц над гауссовым двухмодовым состоянием [1]. Существуют достаточно много различных метрик на пространстве квантовых состояний, например расстояние Гильберта-Шмидта [2], расстояние Буре [3], расстояние Хеллингера [4] и другие. Однако для случая чистых

состояний, что соответствует нашей задаче, все эти меры так или иначе сводятся к проекции векторов состояний и между ними нет принципиальных отличий. Поэтому в качестве метрики нами использовался квадрат расстояния Буре.
Также, в качестве возможных “метрик” на пространстве состояний рассматривались взаимная энтропия [5] и энтропия Верла [6]. Однако, выяснилось, что они обладают свойствами, которые делают их непригодными для нашей задачи. Так, взаимная энтропия S_N не является метрикой в том смысле, что в общем случае $S_N(\rho_1|\rho_2) \neq S_N(\rho_2|\rho_1)$. В то же время энтропия Верла оказывается чувствительной к сжатию рассматриваемых состояний, поскольку мы хотим классифицировать состояния, основываясь на их негауссовой структуре, то подобное для нас неприемлемо. Таким образом аналоги “метрик” на основе энтропий нами далее не рассматривались.
Исследуемая нами схема обычно рассматривается для генерации сжатых состояний кота Шредингера [7] и сжатых состояний Фока [1]. Поэтому далее мы исследовали множество генерируемых состояний с точки зрения “близости” к этим двум множествам, согласно выбранной нами метрики. Мы провели расчёты при различных значениях измеренного числа фотонов m и построили зависимости расстояния от генерируемого состояния до множеств в зависимости от обобщенного параметра z [8] (который содержит в себе информацию о параметрах схемы генерации). Такой анализ позволил выделить диапазоны параметров z при которых генерируемые состояния ближе к сжатым состояниям Фока, чем к сжатым состояниям кота Шредингера, и наоборот. Кроме того, для каждого m были найдены состояния, которые максимально удалены от множества сжатых состояний Фока, но при этом расположены близко к множеству сжатых состояний кота Шредингера.
Затем мы оценили фазовую чувствительность генерируемых состояний. Предполагалось, что она может коррелировать с рассчитанными ранее расстояниями – поскольку рассматриваемые классы состояний обладают существенно различной структурой на фазовой плоскости. Для этого была рассчитана квантовая информация Фишера [9] при различном измеренном числе фонтов в зависимости от обобщенного параметра z. Однако дальнейший анализ на позволил выявить желаемых закономерностей в поведении квантовой информации Фишера.

2. Будет детально рассмотрен протокол коррекции ошибок с помощью одного из квантовых негауссовых состояний, генерируемых в рассматриваемой схеме. Выбор квантового состояния для расчета будет произведен в ходе выполнения задачи, исходя из построения восстановительной процедуры после действия ошибок. Будет произведен расчет верности информационного канала после процедуры коррекции ошибок. Мы свяжем параметры генерации негауссова состояния и верность коррекции, и укажем входные экспериментальные параметры, требуемые для работы бозонных кодов коррекции на рассматриваемых состояниях.
Аналитически рассмотрена проблема коррекции ошибок в квантовом канале, в котором присутствуют ошибки потери фотонов и дефазировки. В качестве ресурсных состояний для протокола коррекции ошибок были рассмотрены ортогональные сжатые состояния Фока. Выбор данных квантовых негауссовых состояний обусловлен тем, что рассматриваемые состояния имеют определенную четность и ассиметричную структуру в фазовом пространстве, которая позволяет им корректировать ошибку потери фотонов и дефазировки. Полный квантовый канал состоит из операций кодирования, действия шумов, процедуры восстановления и декодирования. Процедуры кодирования и декодирования задаются выбором кодовых

слов. Выбор ортогональных сжатых состояний Фока позволил нам исключить влияние ошибок процедур декодирования на квантовый канал. Однако, сжатые состояния Фока ортогональны только при определенных значениях параметров сжатия r и номере состояния n. Для состояний с номерами n>2 можно подобрать уровень сжатия r такой, что ортогонально сжатые фоковские состояния будут ортогональны в терминах скалярного произведения. Однако, вероятность генерации таких состояний будет уменьшаться с увеличением номера n [1]. Так вероятность генерации второго сжатого состояния Фока равна 14.81%, третьего - 10.55%, а четвертого - уже 8.19%. Поэтому мы использовали именно сжатые состояния Фока с номером n=2, поскольку они характеризуются наибольшей вероятностью генерации среди множества ортогональных сжатых состояний Фока. Для данных состояний ортогональность достигается при уровне сжатия r=0.57. Данные параметры сжатых состояний Фока являются достижимыми в эксперименте. Используя данные квантовые негауссовы состояния в качестве кодовых слов, нам впервые удалось построить протокол коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки в малошумящем квантовом канале. В качестве восстановительной операции была построена Petz восстановительная процедура и рассчитана верность квантового канала. Использование данной восстановительной процедуры имеет преимущество, поскольку доказано, что такая восстановительная операция всегда может быть физически реализуема [10].
Для демонстрации эффективности работы предложенного нами протокола коррекции ошибок мы сравнили его с протоколами коррекции, построенными на основе сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками. Такое сравнение продиктовано тем, что, используя данные состояния, возможно построить протокол коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки [7]. Кроме того, данные протоколы похожи с точки зрения экспериментальной реализации. Как и сжатые состояния Фока, так и состояния близкие к сжатым состояниям котов Шредингера, можно получать экспериментально в оптических схемах с измерениями числа частиц [1,11].
Мы продемонстрировали, что при построении протокола коррекции ошибки потери фотонов в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока значение верности канала имеет тот же порядок, что и для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками. В то же время наши результаты показали, что второе сжатое состояние Фока лучше подходит для коррекции ошибок дефазировки с точки зрения Petz верности канала, чем рассмотренные сжатые состояния котов Шредингера. При сравнении рассмотренных нами состояний в качестве кодовых слов стоит отдельно подчеркнуть, что сжатые состояния Фока имеют весомое преимущество в экспериментальной реализации. Так в работе [1] нами был предложен протокол генерации сжатых состояний Фока с высокими значениями верности и вероятности. В свою очередь, генерация сжатых состояний котов Шредингера в оптических схемах возможна только приближенно. При сравнительном анализе протоколов коррекции ошибок мы использовали идеализированные сжатые состояния котов Шредингера, недостижимые в эксперименте.

3. Численно будут оценены квантовые состояния, получаемые в результате «зацикливания» рассматриваемой схемы. Мы покажем возможно ли повысить характеристики генерируемого состояния путем его повторной отправки на вход линейного интерферометра. В частности, будет проанализировано изменение негауссовости генерируемого состояния, степень сжатия генерируемого состояния

и вероятность генерации. Будет проанализировано множество состояний, недоступных в схеме с гауссовым входом.
В ходе работы были исследованы состояния, генерируемые в каскадной схеме с измерением числа частиц. Под каскадной схемой мы понимаем схему, состоящую из двух итераций. На первой итерации два сжатых вакуумных состояния с различными параметрами сжатия смешиваются на светоделителе; в результате получается перепутанное гауссово состояние, одна из мод которого измеряется с помощью детектора числа частиц. В результате получается негауссово состояние, которое используется далее. На второй итерации мы берем негауссово состояние, полученное ранее, и смешиваем его еще с одним сжатым вакуумным состоянием с помощью светоделителя. Далее одна мода полученного перепутанного состояния измеряется с помощью детектора числа частиц. Оставшееся неизмеренным состояние исследовалось нами в рамках этого этапа проекта.
Чтобы исследовать свойства полученных состояний мы описали эволюцию волновых функций сжатых вакуумных состояний на светоделителях. Далее построили процедуру измерения числа частиц, как проекцию на состояния Фока. Произведя вычисления полученных интегралов нам удалось аналитически, без каких-либо приближений, записать волновую функцию состояния, генерируемого на первой, а затем – на второй итерации каскадной схемы. Полученная волновая функция явным образом зависит от числа измеренных частиц на двух итерациях, а также от параметров схемы: сжатий сжатых вакуумных состояний на входе и коэффициентов пропускания используемых светоделителей. Варьируя все эти параметры мы можем получать различные негауссовы состояния.
Для сравнения различных состояний друг с другом мы использовали величину, называемую верностью состояний. Для вычисления верности мы считали интеграл перекрытия волновых функций двух состояний. Чем ближе интеграл перекрытия состояний к единице, тем ближе одно состояние к другому.
Нами было показано, что при одинаковом уровне верности в каскадной схеме можно генерировать состояния кота Шредингера с большей амплитудой. Например, при измерении 10 фотонов и для уровня верности в 0.99 в каскадной схеме можно получать состояния кота Шредингера с амплитудой alpha=4.87 в то время, как использование только первой итерации схемы позволяет генерировать состояния кота с амплитудой alpha=4.61. Таким образом, в данной частиц работы было показано, что увеличение итераций в схеме позволяет генерировать Негауссовы состояния с лучшими характеристиками.
Важным результатом также является то, что каскадная схема позволяет снизить требования на детекторы числа частиц. В настоящее время, создавать детекторы, способные одновременно различать большое число фотонов проблематично. По этой причине стратегия с разделением общего числа фотонов на несколько детекторов выглядит перспективной с экспериментальной точки зрения.

4. Эволюция сжатых квантовых состояний в линейном интерферометре (с последующим измерением числа частиц) будет дополнена операцией двухмодового сжатия. Мы покажем, возможно ли с помощью такой модификации снизить требования к параметрам схемы. Мы рассмотрим режимы работы, доступные для экспериментальной реализации на световых и свето-атомных системах. Как известно, каждая из этих реализаций в принципе допускает все рассматриваемые гауссовы операции. Однако, трудность экспериментальной реализации тех или иных операций на световых или свето-атомных системах различна. Соответственно, мы ограничим себя экспериментально реализуемым набором входных параметров и доступных операций, и оценим, какие преимущества нам

предоставляет каждая из систем.
В рамках решения данной задачи нами был рассмотрен протокол, обобщающий ранние исследования по генерации негауссовых состояний, в том числе сжатых состояний Фока, в линейном интерферометре с последующим измерением числа частиц в одном из каналов. В частности, мы рассмотрели дополнительное (к уже рассмотренному ранее взаимодействию на светоделителе) взаимодействие двух изначально сжатых мод квантовых полей не сохраняющее число возбуждений, а именно взаимодействие с гамильтонианом двумодового сжатия, называемого также гамильтонианом параметрической генерации. В изучаемой модели мы, таким образом, рассматривали влияние на генерацию негауссовых состояний восьми вещественных параметров, управляющих взаимодействием: четыре отвечали за параметры сжатия входных мод, два параметра — за амплитудный коэффициент отражения светоделителя и его фазовый множитель, и ещё два — за параметрическую генерацию. Естественно, использование подобной модели требует оговорок относительно физической природы состояний квантовых полей. Как известно, двумодовое взаимодействие с гамильтонианом параметрической генерации достаточно сложно реализуется экспериментально, если речь идёт о двух модах электромагнитного поля. При рассмотрении свето-атомного взаимодействия, многие экспериментальные требования для реализации такого взаимодействия смягчаются. Мы рассмотрели дипольное фарадеевское взаимодействие одномодового электромагнитного поля с ансамблем холодных четырёхуровневых атомов. Эффективной бозонной модой (модой гармонического осциллятора) в атомной системе можно считать коллективную спиновую когерентность между нижними уровнями в приближении Хольштейна_Примакова, когда проекция общего коллективного атомного спина на ось квантования много больше, чем малые проекции в плоскости, перпендикулярной оси квантования. В такой системе, возможна реализация как гамильтониана по типу светоделителя, так и гамильтониана параметрического взаимодействия, в зависимости от геометрии эксперимента. Кроме того, важной особенностью оказывается возможность гибкой настройки эффективных констант связи реализуемого гамильтониана через время взаимодействия и интенсивность управляющего поля. Это представляется значительным преимуществом перед линейно-оптическими системами, где коэффициент светоделителя, даже при интегральном исполнении схемы, перестраивается в достаточно ограниченных пределах.
Однако, становится достаточно сложным реализовать одномодовое сжатие в атомной моде, так как это потребует дополнительных действий — реализацию протокола QND квантовой памяти, то есть чтобы инициировать входное сжатое состояние атомной моды, нам необходимо предварительно записать в эту моду сжатое состояние поля. Исходя из этого, наш анализ ограничивался нулевым параметром одномодового сжатия атомной моды.
Из результатов, полученных на предыдущем этапе исследования, нам известно, что среди всего множества негауссовых состояний особый интерес представляют сжатые состояния Фока, и режим, в котором при измерении числа частиц в одной из мод, вторая оказывается в сжатом фоковском состоянии, накладывает ограничения на управляющие параметры схемы. Второй важной характеристикой, которую мы хотели бы максимизировать, является параметр сжатия выходного состояния. И, наконец, третьей немаловажной величиной является вероятность генерации. Таким образом, мы свели задачу к многопараметрической оптимизации с ограничениями на физические параметры схемы. Количественная оценка эффекта и дальнейший анализ системы с целью расчета вероятностей генерации сжатых состояний Фока с различными числами заполнения являются предметом для

дальнейшего изучения.
[1] S.B. Korolev, E.N. Bashmakova, A.K. Tagantsev, and T.Yu. Golubeva. Phys. Rev. A 109, 052428 (2024).
[2] V.V. Dodonov, O.V. Man'Ko, V.I. Man'Ko, A. Wunsche, J. Modern Opt., 47(4), 633–654 (2000).
[3] I. Ghiu, P. Marian and T. A. Marian, Physica Scripta, 2013(T153), 014028 (2013).
[4] Luo S and Zhang Q. Phys. Rev. A 69 032106 (2004).
[5] V. Vedral, Rev. Modern Phys., 74(1), 197–234 (2002).
[6] A. Wehrl, Rev. Modern Phys., 50(2), 221–260 (1978).
[7] Schlegel D.S., Minganti F., Savona V. Phys. Rev. A. 106, 022431 (2022).
[8] S. B. Korolev, E. N. Bashmakova, T. Yu. Golubeva. Laser Phys. Lett. 21, 095204 (2024).
[9] Алоджанц, А. П., Царёв, Д. В., Куц, Д. А., Подошведов, С. А., Кулик, С. П. Успехи физических наук, 194(7), 711–739 (2024).
[10] D. Biswas, G. M. Vaidya, and P. Mandayam, Noise-adapted recovery circuits for quantum error correction, Phys. Rev. Res. 6, 043034 (2024).
[11] E. N. Bashmakova, S. B. Korolev, T. Yu. Golubeva, Effect of entanglement in the generalized photon subtraction scheme. Laser Phys. Lett. 20 115203 (2023).

Все планируемые в отчетный период работы выполнены полностью:
Да

1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде (от 1 до 5 стр. (2-10 тыс. символов))

Была выбрана метрика на пространстве состояний, удобная для классификации генерируемых состояний.
Были построены зависимости расстояния от генерируемого состояния до множеств сжатых состояний кота Шредингера и сжатых состояний Фока в зависимости от параметра z, определяемого параметрами схемы генерации.
Были определены диапазоны параметров z при которых генерируемые состояния ближе к сжатым состояниям Фока, чем к сжатым состояниям кота Шредингера, и наоборот.
Рассчитана квантовая информация Фишера для оценки фазовой чувствительности генерируемых состояний.
Продемонстрировано построение протокола коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки в малошумящем квантовом канале при использовании сжатых состояний Фока. Доказана возможность построения Petz восстановительной процедуры в таком протоколе.
Предложены оптимальные параметры сжатых состояний Фока с точки зрения экспериментальной реализации протокола коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки.
При построении протокола коррекции ошибки потери фотонов в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока продемонстрирована верность канала того же порядка, что и для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками.
При построении протокола коррекции ошибки дефазировки в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока продемонстрированы большие значения верности канала чем для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими

характеристиками.
Найдено множество состояний, получаемых в каскадной схеме с последовательным измерением числа частиц. Данное множество состоит из состояний являющихся конечной суперпозицией сжатых состояний Фока. Максимальное состояние Фока, входящее в суперпозицию, имеет номер равный суммарному числу измеренных чисел частиц на двух итерациях каскадной схемы. Кроме того, полученные состояния имеют заданную четность, определяемую четностью суммарного числа измеренных частиц. Коэффициенты разложения зависят от параметров схемы генерации.
Нами было показано, что добавление второй итерации в схему с измерением числа частиц приводит к увеличению множества генерируемых состояний. С практической точки зрения это увеличение приводит к возможности генерировать негауссовы состояния с лучшими характеристиками.
Помимо этого, нами было показано, что множество состояний, генерируемых в каскадной схеме, меньше, чем множество состояний, получаемых при двух одновременных измерениях мод трехмодового гауссова состояния. Другими словами, с помощью последовательных измерений можно генерировать меньшее число различных негауссовых состояний. Для иллюстрации этого факта мы исследовали сжатые состояния Фока. Нами было доказано, что второе сжатое состояние Фока не может быть получено в каскадной схеме, но может генерировать в схеме с одновременным измерением двух мод трехмодового гауссова состояния.
В рамках рассматриваемой модели взаимодействия одномодового электромагнитного поля с модой спиновой когерентности атомного ансамбля, нами были получены значения физических параметров системы, таких как параметр двумодового сжатия и эффективная константа взаимодействия по типу светоделителя, позволяющие генерировать сжатые состояния Фока с произвольными числами заполнения даже при вакуумном входном состоянии атомной моды.
Показано, что при этом сжатие выходного состояния оказывается больше, чем сжатие моды световой, так как в результате квантовой интерференции процессов двумодовое сжатие также вносит вклад в одномодовое сжатие результирующего состояния.

Все запланированные в отчетном периоде научные результаты достигнуты:
Да
В ходе реализации проекта выполнялись эксперименты с участием лабораторных животных:
Нет
1.5. Описание выполненных в отчетном периоде работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РНФ
До 3 страниц (6 тыс. символов) текста, также указываются ссылки на информационные ресурсы в сети Интернет (url-адреса), посвященные проекту.
на русском языке

Главным результатом этого этапа следует считать построение нового бозонного кода коррекции ошибок, основанного на сжатых состояниях Фока. Используя состояния, схема точной генерации которых предложена нами на предыдущем этапе проекта, мы показали возможность коррекции как ошибки потери фотонов, так и ошибки дефазировки в малошумящем квантовом канале. Построена в явном виде Petz восстановительная процедура. Близость исходного квантового состояния и состояния, подвергшегося действию ошибок в канале и восстановленного с помощью построенной процедуры, сравнивается путем оценки верности.
При построении протокола коррекции ошибки потери фотонов в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока

продемонстрирована верность канала того же порядка, что и для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками.
При построении протокола коррекции ошибки дефазировки в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока продемонстрированы большие значения верности канала чем для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками.

на английском языке

The main result of this stage is the construction of a new bosonic error-correction code based on squeezed Fock states. We used the states whose scheme of precise generation we proposed in the previous stage of the project. We demonstrated the possibility of correcting both photon loss errors and dephasing errors in a low-noise quantum channel. An explicit Petz-map recovery procedure was constructed. The closeness of the original quantum state and the state affected by channel errors and restored is compared by assessing the fidelity.

By constructing a photon loss error correction protocol in a low-noise quantum channel using a second squeezed Fock state, we demonstrated channel fidelity of the same order as for a correction protocol constructed using squeezed Schrödinger cat states with the same energy characteristics. When constructing a dephasing error correction protocol in a low-noise quantum channel using the second squeezed Fock state, higher fidelity values were demonstrated than for a correction protocol constructed using squeezed Schrödinger cat states with the same energy characteristics.

1.6. Файл с дополнительными материалами (при необходимости представления экспертному совету РНФ дополнительных графических материалов к отчету по проекту)
1.7. Перечень публикаций в отчетном периоде по результатам проекта (добавляются из списка зарегистрированных участниками проекта публикаций)

1

Башмакова Е.Н., Королев С.Б., Голубева Т.Ю. **Bosonic quantum error correction using squeezed Fock states PHYSICAL REVIEW A** (2025) wos, scopus, rsci, иные, РИНЦ, «Белый список», Q1
1.8. В отчетном периоде возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта:
Нет
РИД является продуктивным результатом интеллектуальной деятельности, а именно:
РИД передан квалифицированному заказчику на возмездной основе;
квалифицированному заказчику переданы права на использование РИД на основе возмездного лицензионного договора.
1.9. Показатели реализации проекта
Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.
Показатели кадрового состава научного коллектива рассчитываются как округленное до целого отношение суммы количества месяцев, в которых действовали в отчетном периоде в отношении членов научного коллектива приказы о составе научного коллектива, к количеству месяцев, в которых действовало в отчетном периоде соглашение.

Показатели	Единицы измерения	2025 год	
		План	Факт
Число членов научного коллектива	человек	4	4
Число исследователей в возрасте до 39 лет (включительно) среди членов научного коллектива	человек	3	3
Число аспирантов (интернов, ординаторов, адъюнктов) очной формы обучения среди членов научного коллектива	человек		0
Количество лиц категории «Вспомогательный персонал»	человек		0

Значения показателей формируются автоматически на основе данных, представленных в форме 2о (накопительным итогом). Показатели публикационной активности приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку Российского научного фонда и на организацию (в последнем случае – за исключением публикаций, созданных в рамках оказания услуг сторонними организациями).

Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

Публикационные показатели реализации проекта (нарастающим итогом)	Единица измерения	План	Факт
Количество содержащих результаты исследований по проекту различных публикаций членов научного коллектива в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях *К указанным публикациям не относятся публикации, содержащие ссылки на иные, помимо данного гранта РНФ, источники финансирования; публикации, направленные в издательство до начала практической реализации проекта (до заключения грантового соглашения) ; публикации типа «тезисы».*Издания, индексируемые в библиографических зарубежных базах данных публикаций и/или Russian Science Citation Index (RSCI).	Ед.	3	3
в том числе:			
в изданиях, индексируемых в библиографических базах данных Web of Science и/или SCOPUS	Ед.		3
в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных http://www.scimagojr.com/)	Ед.		1
в российских изданиях, входящих во второй квартиль (Q2) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q2 в Scopus определяется по базе данных http://www.scimagojr.com/)	Ед.		0
в изданиях, индексируемых в библиографической базе данных RSCI	Ед.		3
в изданиях, индексируемых в иных зарубежных библиографических базах данных	Ед.		3
в научных изданиях «Белого списка» https://journalrank.rcsi.science/ru/record-sources/	Ед.		3
Количество публикаций с учетом квартилей Указанное количество публикаций может изменяться в случае принятия экспертным советом РНФ решения об отказе учета публикации в качестве отчетной или отказа от действия повышающих коэффициентов в отношении публикации в случае принадлежности издания к Q1 или Q2.	Ед.	3	4

1.10. Информация о представлении достигнутых научных результатов на научных мероприятиях (конференциях, симпозиумах и пр.) (в том числе форма представления – приглашенный доклад, устное выступление, стендовый доклад)

Вашукевич, Е. А., Голубева Т.Ю., "Параллельные перепутывающие операции над ансамблем двухкубитных систем на основе многомодового светоатомного взаимодействия". XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике, устный доклад, МИФИ, Москва, 29-31 января 2025.

Силин А.А., Королев С.Б., "Универсальная генерация сжатых состояний Фока в N-мерном интерферометре в схеме с измерениями числа частиц". XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике, стендовый доклад, МИФИ, Москва, 29-31 января 2025.
Е. Н. Башмакова, С. Б. Королев, Т. Ю. Голубева, "Применение сжатых состояний Фока в квантовых кодах коррекции ошибок", ХОЛОЭКСПО 2025: XXII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, устный доклад. Уфа, 7–12 сентября 2025 года.

Т. Ю. Голубева, Е. Н. Башмакова, С. Б. Королев, "Квантовая коррекция ошибок в непрерывных переменных", ХОЛОЭКСПО 2025: XXII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, приглашенный доклад. Уфа, 7–12 сентября 2025 года.
Е. А. Вашукевич, В. А. Леонов, Р. Сурмай, Е. Н. Башмакова, Т. Ю. Голубева, "Оптические квантовые вычисления в дискретных переменных", ХОЛОЭКСПО 2025: XXII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, пленарный приглашенный доклад. Уфа, 7–12 сентября 2025 года.
E. Nesterova, S.Korolev, "Multiuser quantum teleportation network in continuous variables", 8th International School on Quantum Technologies, poster. Khosta, Sochi, Russia, September 28 - October 4, 2025.

1.11. Все публикации, информация о которых представлена в пункте 1.9, имеют указание на получение финансовой поддержки от Фонда:
Да
1.12. Информация (при наличии) о публикациях в СМИ, посвященных результатам проекта, с упоминанием Фонда:
Нет
-не указаны-
1.13. Привлекались ли в отчетном периоде к реализации проекта добровольцы (волонтеры) и иные специалисты?
Нет
1.14. Форма трудового договора с руководителем проекта соответствует указанной в исходной заявке на участие в конкурсе (п. 2.16 Формы 2):
Организация являлась основным местом работы (характер работы – не дистанционный)
Да
Заключенный с руководителем проекта трудовой (срочный трудовой) договор не является дистанционным, предусматривает продолжительность рабочего времени исходя из ежедневого или **еженедельного** графика работы. Руководитель проекта при его реализации проживает и осуществляет трудовую деятельность **на территории Российской Федерации.**Организация в соответствии с подпунктом «е» пункта 2.3.13 грантового соглашения своевременно информировала Фонд о предоставлении руководителю проекта отпуска (отпусков) без сохранения заработной платы общей длительностью более 90 дней в течение предшествующих 365 календарных дней.
Да
1.15. План работ научного исследования в отчетном периоде не изменялся и выполнен в полном объеме:
Да
1.16. Реализация проекта была направлена на проведение исследований в целях развития новых для научных коллективов тематик (в том числе, на определение объекта и предмета исследования, составление плана исследования, выбор методов исследования) и формирование исследовательских команд.

Да
1.17. Результаты исследований по проекту представлены в виде доклада на очной научной конференции, тематика которой включает в себя тематику проекта.
Да
Необходимо указать ссылку на Программу конференции в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

https://holoexpo.ru/programme/
https://holoexpo.ru/wp-content/uploads/archive/%D0%A5%D0%9E%D0%9B%D0%9E%D0%AD%D0%9A%D0%A1%D0%9F%D0%9E%202025%20%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0%20v3.pdf

Заключение органа экспортного контроля организации (комиссии по экспортному контролю организации), а также информация об обеспечении обязательных требований по защите контролируемой научно-технической информации в рамках реализации проекта и о мерах, принимаемых в части осуществления экспортного контроля, файл с материалами*(**представляется в случае возможного возникновения и (или) использования** в ходе реализации проекта результатов интеллектуальной деятельности (прав на них), оборудования и (или) материалов, которые могут быть использованы при создании оружия массового поражения, средств его доставки, иных видов вооружения и военной техники либо при подготовке и (или) совершении террористических актов в соответствии с Федеральным законом от 18.07.1999 № 183-ФЗ «Об экспортном контроле», другими федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации)*
Уведомление организации о возникновении и (или) использовании указанных сведений, а также информация об обеспечении обязательных требований по защите контролируемой информации в рамках реализации проекта и о мерах, принимаемых в части осуществления контроля за ее распространением *(**представляется в случае возможного возникновения и (или) использования** в ходе реализации проекта установленных Приказом ФСБ России от 4 ноября 2022 г. № 547 сведений в области военной, военно-технической деятельности Российской Федерации, которые при их получении иностранными источниками могут быть использованы против безопасности Российской Федерации).*

Настоящим подтверждаю:

- самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
- при обнародовании результатов, полученных в рамках поддержанного РНФ проекта, научный коллектив ссылался на получение финансовой поддержки проекта от РНФ и на организацию, на базе которой выполнялось исследование;
- согласие с опубликованием РНФ сведений из отчета (итогового отчета) о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
- проект не имеет других источников финансирования;
- проект не является аналогичным[1] по содержанию проекту, одновременно финансируемому из других источников;
- проект не содержит сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа.

---

[1]Проекты, аналогичные по целям, задачам, объектам, предметам и методам исследований, а также ожидаемым результатам. Экспертиза на совпадение проводится экспертным советом Фонда.

В соответствии с Соглашением о признании электронной подписи равнозначной собственноручной подписи Форма подписана простой электронной подписью руководителя проекта в ИАС.

Подпись руководителя проекта _____ /Т.Ю. Голубева/

Подписывается в случае представления в Фонд печатного экземпляра формы.

Форма 2о
Сведения о публикациях по результатам проекта
№ 24-22-00004
«Управляемая генерация негауссовых квантовых состояний в схемах с измерениями»
в 2025 году

Приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку РНФ. (заполняется отдельно на каждую публикацию, для формирования п.1. отчета)

Указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав.

Сведения о публикациях регистрируются в разделе «Публикации» персональной страницы пользователя в ИАС РНФ. В карточке публикации все данные приводятся на языке и в форме, используемой базами данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection), «Скопус» (Scopus), RSCI или иных баз данных; каждая публикация регистрируется только один раз (независимо от языков опубликования).

1

Сведения о публикации

Приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку РНФ.

Все данные приводятся на языке и в форме, используемой базами данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection), «Скопус» (Scopus), RSCI или иных баз данных; каждая публикация регистрируется только один раз (независимо от языков опубликования).

Указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав.

WOS SCOPUS RSCI иные ББД РИНЦ «Белый список» Q1
2.1. Авторы публикации
Указывается в порядке, приведенном в публикации в формате Фамилия И.О, Фамилия2 И2.О2., ...
на русском языке
Башмакова Е.Н., Королев С.Б., Голубева Т.Ю.
на английском языке
Bashmakova E.N., Korolev S.B., Golubeva T.Yu.
WoS Researcher ID члена научного коллектива (при наличии)
Можно получить, зарегистрировавшись по адресу www.researcherid.com
I-7558-2013
Scopus AuthorID члена научного коллектива (при наличии)
Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.
16021827600

ORCID члена научного коллектива (при наличии)
Можно получить, зарегистрировавшись по адресу orcid.org
0000-0002-1139-8531
SPIN-код члена научного коллектива (при наличии)
SPIN-код указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных РИНЦ в результатах поискка нажать на фамилию автора
1189-5807
РИНЦ AuthorID члена научного коллектива (при наличии, не учитывается в качестве публикационного показателя реализации проекта)
РИНЦ AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске в базе данных РИНЦ в результатах поиска нажать на фамилию автора
31447
В состав авторов публикации входит аспирант(ы) (интерн, ординатор, адъюнкт) очной формы обучения
Да
2.2. Название публикации
Bosonic quantum error correction using squeezed Fock states
2.3. Год публикации
2025
2.4. Ключевые слова

```
quantum error correction, Petz map fidelity, open system, squeezed Fock
state, Kraus operator
```

2.5. Вид публикации
статья
2.6. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

```
112, 032434
```

Дата поступления публикации в издательство
04.06.2025
Дата принятия публикации к печати (Принятия к публикации)
05.09.2025
Месяц и год публикации
09.2025
Адрес полнотекстовой электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии)

2.7. DOI
Цифровой идентификатор объекта (digital object identifier)
https://doi.org/10.1103/97yt-nzg2
Accession Number WoS (при наличии)
Accession Number формируется в базе данных Web of Science автоматически при индексации публикации в данной базе. Accession Number указан в профиле публикации, который становится доступен если при поиске публикации в базе данных Web of Science в результатах поиска нажать на наименование публикации
Scopus EID (при наличии)
Scopus EID формируется в базе данных Scopus автоматически при индексации публикации в данной базе. Scopus EID указан в адресной строке страницы, возникающей, если нажать на название публикации в базе данных Scopus

2.8. Еще не опубликована, но имеется подтверждение* издательства о принятии в печать (принятия к публикации)
(указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)
Заполняется только для еще не опубликованных работ.
Для принятых к публикации материалов п.2.7 не заполняется.
* К указанным подтверждениям **не относятся** письмо издательства о принятии публикации для рассмотрения, письмо рецензентов.
Письмо из редакции или издательства с извещением об официальном принятии рукописи к публикации
2.9. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

PHYSICAL REVIEW A

ISSN (при наличии)
2469-9926
e-ISSN (при наличии)
2469-9934
ISBN (при наличии)
2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection:
Да
Издание индексируется базой данных Scopus:
Да
Издание индексируется базой данных Russian Science Citation Index:
Да
Издание включено в «Белый список»:
Не учитывается в качестве публикационного показателя реализации проекта
Да
Издание индексируется базой данных РИНЦ:
Не учитывается в качестве публикационного показателя реализации проекта
Да
Издание индексируется иными зарубежными базами данных:
Да
Укажите наименования баз данных

Inspec, Google Scholar

2.11. Импакт-фактор издания
По JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, для Scopus – CiteScore (при отсутствии индексирования в Web of Science Core Collection).
2.9
Издание входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition SJR:
принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных
http://www.scimagojr.com/
Да
Российское издание входит во второй квартиль (Q2) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition по SJR:
принадлежность издания к Q2 в Scopus определяется по базе данных
http://www.scimagojr.com/
2.12. Публикация аффилирована с организацией:
Да

2.13. В публикации:
В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда на выполнение данного проекта :
Да
Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда :
Нет
2.14. Файл с текстом публикации
для материалов в открытом доступе, можно не размещать; для монографий представляются отдельные страницы с выходными данными и информацией о поддержке РНФ; размер до 3 Мб в формате pdf
Открыть файл

В соответствии с Соглашением о признании электронной подписи равнозначной собственноручной подписи Форма подписана простой электронной подписью руководителя проекта в ИАС.

Подпись руководителя проекта _____ /Т.Ю. Голубева/

Подписывается в случае представления в Фонд печатного экземпляра формы.

5.1. Заявленный в проекте план работы на весь срок выполнения проекта, предлагаемые методы и подходы (в соответствии с исходной заявкой на участие в конкурсе)

В настоящее время предложен ряд протоколов генерации состояний типа котов Шредингера [12-15], однако нет понимания, являются ли предложенные схемы оптимальными для генерации таких состояний, какие именно параметры влияют на формирование негауссовости, можно ли ее максимизировать, варьируя элементы схемы. Прямой расчет возможен лишь для очень простых схем, которые можно характеризовать минимальным числом параметров. При усложнении схем требуется разработка аналитических методов описания систем. Разработка таких методов будет первым шагом научной программы проекта. Мы планируем применить два подхода для поиска аналитических решений. Первый подход связан с использованием приближений и обрыванием рядов в разложении волновых функций по состояниям Фока. Этот метод может быть использован, когда есть основания предполагать общее малое число фотонов в эволюционирующей системе.
Другой подход связан с построением аналитического решения для функции Вигнера на основе пошагового описания процедуры эволюции и проецирования квантового состояния.

Важным этапом решения задачи является анализ существующих мер негауссовости и выделение мер и оценок, напрямую связанных с информационными приложениями негауссовых состояний. Среди известных нам подходов можно выделить оценки на основе интегральных характеристик функции Вигнера (мера отрицательности) [16], вычисление расстояния между гауссовым эталонным состоянием и негауссовым состоянием по мере Гильберта-Шмидта [17]; одна из широко используемых мер – это относительная энтропия [18-20]. Энтропия Верла характеризует неопределенность негауссовых состояний в терминах распределений Хусими на фазовом пространстве [21-27]. Наконец, рассматривают меру негауссовости в терминах верности (фиделити) на основе расстояния Бюреса [28-29] или расстояния Хеллингера [30].

Главной перспективной задачей нашего исследования является выделение негауссовых состояний применимых для проведения процедуры коррекции ошибок, но в то же время доступных для реализации на уровне современного эксперимента. С другой стороны, мы не планируем ограничиваться только протоколами коррекции ошибок, и надеемся далее расширить подход на другие квантовые информационные приложения.

К сожалению, в настоящее время нет достаточно надежных и управляемых протоколов получения негауссовых состояний. При этом многие исследования сосредоточены на достижении максимального сходства (высокой фиделити) с конкретными негауссовыми состояниями. Одним из таких «эталонных» состояний можно назвать состояния котов Шредингера. Однако процедура измерений порождает гораздо более широкий класс негауссовых состояний. В этой связи

встает вопрос, следует ли нам стремиться к получению именно состояния кота Шредингера (достаточно трудное для генерации), или же можно расширить требования и использовать и другие результаты процедуры генерации для протокола коррекции ошибок.

[1] D. Sychev, et al. //Nature Photon. 11, p. 379-382 (2017).
[2] V. Buzek, et al. // Progress in Optics, Editor(s): E. Wolf, Elsevier, 34, p. 1-158 (1995).
[3] A. L. Grimsmo, et al. // Phys. Rev. X. 10, №. 1. p. 011058 (2020).
[4] D. Gottesman, et al. // Phys. Rev. A 64, p. 012310 (2001).
[5] N. Kyungjoo, et al. // Phys. Rev. A. 101, № 1, p. 012316 (2020).
[6] K. Fukui, et al. // Phys. Rev. X. 8, № 2, p. 021054 (2018).
[7] A. Ourjoumtsev, et al. // Phys. Rev. Lett. 98, № 3, p. 030502 (2007).
[8] C. Navarrete-Benlloch, et al. // Phys. Rev. A. 86, № 1, p. 012328 (2012).
[9] T. J. Bartley, et al. // Phys. Rev. A. 87, № 2, p. 022313 (2013).
[10] T. Opatrny, et al. // Phys. Rev. A. 61, № 3, p. 032302 (2000).
[11] P. T. Cochrane, et al. // Phys. Rev. A. 65, № 6, p. 062306 (2002).
[12] W. Asavanant, et al. // Phys. Rev. A. 103, № 4, p. 043701 (2021).
[13] K. Takase, et al. //Phys. Rev. A. 103, №. 1, p. 013710 (2021).
[14] H. Takahashi, et al. // Phys. Rev. Lett. 101, № 23, p. 233605 (2008).
[15] A. Ourjoumtsev, et al. //Science. 312, p.83-86 (2006).
[16] A. Kenfack, et al.// Journ. Optics B. 6, № 10, p. 396 (2004).
[17] M.G. Genoni, et al.// Phys. Rev. A, 76, № 4, 042327 (2007).
[18] M.G. Genoni, et al.// Phys. Rev. A, 78, №6, 060303 (2008)
[19] M.G. Genoni, et al.// Phys. Rev. A, 82, №5, 052341(2010).
[20] P. Marian, et al.// Phys. Rev. A, 88, №1, 012322, (2013).
[21] A. Wehrl, et al.// Rev. Modern Phys., 50, №2, p. 221-260 (1978).
[22] A. Wehrl, et al.// Rep. Math. Phys., 16, № 3, p. 353-358 (1979).
[23] E. H. Lieb// Commun. Math. Phys., 62, №1, p. 35-41 (1978).
[24] A. Orlowski// Phys. Rev. A, 48, №1, p. 727-731 (1993).
[25] S. Luo// J. Phys. A: Math. Gen., 33, № 16, p. 3093-3096 (2000).
[26] F. Mintert, et al.// Phys. Rev. A, 69, № 2, 022317(2004).
[27] J.S. Ivan, et al.// Quantum Inf. Process., 11, № 3, p. 853-872 (2012).
[28] I. Ghiu, et al.// Phys. Scr., T 153, 014028, (2013).
[29] D. Bures// Trans. Amer. Math. Soc., 135, p. 199-212 (1969).
[30] P. Marian, et al.// J. Phys. A: Math. Theor., 48, № 11, 115301 (2015).

Общий план работ на два года:

1. Построить общее аналитическое описание процедуры генерации квантового негауссового состояния света на основе квантово-коррелированных (сжатых) гауссовых входных состояний, претерпевающих эволюцию в линейно-оптической схеме требуемой конфигурации, с измерениями чисел фотонов в каналах. (1-ый год)
2. Оптимизировать протокол генерации с точки зрения характеристик негауссовости, связанных с использованием состояний в протоколе коррекции ошибок. (1-ый и 2-ой годы)
3. Построить протокол коррекции ошибок на основе генерируемых негауссовых состояний, и оценить работу протокола в терминах устойчивости квантовых вычислений к ошибкам. (2-ой год)

Ожидаемые результаты:

- разработать аналитическое описание схем генерации негауссовых состояний с измерениями; (1-ый год)
- выявить механизмы управления характеристиками негауссовых квантовых состояний на этапе их генерации. (1-ый год)
- выявить класс состояний, доступный для приготовления и пригодный для выполнения процедуры коррекции ошибок; (2-ой год)
- построить протокол коррекции ошибок квантовых вычислений на генерируемых квантовых состояниях с учетом несовершенств схемы генерации. (2-ой год)

5.2. Содержание фактически проделанной работы, полученные результаты (за все годы, от 3 до 10 стр. (6–20 тыс. символов))

Общий ход работ по проекту можно условно разделить на два направления: генерацию негауссовых состояний и разработку протоколов коррекции ошибок. При этом генерация состояний ориентирована именно на их использование в схемах коррекции, а схемы коррекции, наоборот, базируются не на идеализированных состояниях, а на тех, что можно получить в экспериментах с измерением числа частиц. Обе процедуры оптимизируются для согласования друг с другом.

1. Генерация негауссовых состояний, пригодных для бозонных кодов коррекции ошибок.

Аналитически рассмотрена линейно-оптическая схема генерации квантовых негауссовых состояний, где на вход линейно-оптического преобразователя подаются два сжатых вакуумных состояния, а состояние на одном из выходов измеряется с помощью детектора числа фотонов (PNRD). Опираясь на математический аппарат полиномов Эрмита и обобщенных полиномов Эрмита мы смогли записать как волновую функцию, так и функцию Вигнера выходного состояния в максимально общем виде без каких-либо приближений. При этом вероятность измерения некоторого числа n фотонов также удалось выразить аналитически с помощью гипергеометрической функции. Таким образом мы напрямую связали параметры выходного состояния с параметрами сжатых квантовых состояний на входе схемы и параметром, характеризующим линейное преобразование сжатых осцилляторов. Найденная аналитическая связь позволила выполнить многопараметрическую оптимизацию протокола.
Выполнив аналитическое построение для произвольного двухмодового унитарного преобразования в рассматриваемой схеме, мы сосредоточили внимание на двух частных случаях, позволяющих получить квантовое состояние с максимальной негауссовостью: на преобразовании несимметричного светоделителя и на Controlled-Z (CZ) гейте.
Дальнейший анализ был связан с разложением волновой функции полученного выходного состояния по известным состояниям. Наиболее естественный базис для такого разложения представляют сжатые состояния Фока. Мы показали, что волновая функция выходного состояния формируется из двух независимых частей: негауссовой суперпозиции состояний Фока и гауссовых преобразований, примененных к этой суперпозиции. При том, само гауссово преобразование является комбинацией операторов поворота и сжатия, а негауссова суперпозиция — конечная (ограниченная сверху числом измеренных частиц □) суперпозиция состояний Фока с определенной четностью (зависящей от четности измеренного числа частиц □). Проделанный анализ позволил выявить управляющие параметры,

определяющие величину и поведение гауссовой и негауссовой частей по отдельности. Это позволило нам ввести параметр негауссовости z, характерный для рассматриваемого протокола и полностью определяющий негауссовы свойства выходного состояния.
При измерении n фотонов в одном из выходных каналов схемы, в разложении волновой функции выходного состояния по состояниям Фока в другом канале образуется суперпозиция n вкладов. Однако, выделенный интересный случай реализуется тогда, когда из всех членов суперпозиции отличным от нуля оказывается один старший член. Именно этот случай соответствует точной генерации сжатого состояния Фока с известным номером в рассматриваемой схеме.
Мы провели анализ множества генерируемых квантовых состояний в различных конфигурациях интерферометра и процедуры измерений.
Особое внимание было уделено конфигурациям, наиболее просто реализуемым экспериментально. Оказалось, что уже двухмодовая конфигурация снабжает нас необходимым числом параметров для управления результирующим состоянием. Двухмодовое гауссово перепутанное состояние (до измерения) определяется тремя параметрами. Мы смогли найти их значимые комбинации, по которым можно классифицировать множество выходных состояний.
Важным вопросом всех вероятностных протоколов является повышение вероятности желаемого результата. Мы продемонстрировали, что тип выходного состояния зависит лишь от двух (из трех введенных) параметров (и). Свободным параметром можно управлять для оптимизации схемы генерации выходного состояния. В частности, он позволяет максимизировать вероятность генерации требуемых состояний. Другой подход связан с возможностью использования свободного параметра для снижения требований к входному ресурсу.
В ходе работы были исследованы состояния, генерируемые в каскадной схеме с измерением числа частиц. Под каскадной схемой мы понимаем схему, состоящую из двух итераций. На первой итерации два сжатых вакуумных состояния с различными параметрами сжатия смешиваются на светоделителе; в результате получается перепутанное гауссово состояние, одна из мод которого измеряется с помощью детектора числа частиц. В результате получается негауссово состояние, которое используется далее. На второй итерации мы берем негауссово состояние, полученное ранее, и смешиваем его еще с одним сжатым вакуумным состоянием с помощью светоделителя. Далее одна мода полученного перепутанного состояния измеряется с помощью детектора числа частиц. Оставшееся неизмеренным состояние исследовалось нами в рамках этого этапа проекта.
Чтобы исследовать свойства полученных состояний мы описали эволюцию волновых функций сжатых вакуумных состояний на светоделителях. Далее построили процедуру измерения числа частиц, как проекцию на состояния Фока. Произведя вычисления полученных интегралов нам удалось аналитически, без каких-либо приближений, записать волновую функцию состояния, генерируемого на первой, а затем – на второй итерации каскадной схемы. Полученная волновая функция явным образом зависит от числа измеренных частиц на двух итерациях, а также от параметров схемы: сжатий сжатых вакуумных состояний на входе и коэффициентов пропускания используемых светоделителей. Варьируя все эти параметры мы можем получать различные негауссовы состояния.
Для сравнения различных состояний друг с другом мы использовали величину, называемую верностью состояний. Для вычисления верности мы считали интеграл перекрытия волновых функций двух состояний. Чем ближе интеграл перекрытия состояний к единице, тем ближе одно состояние к другому.
Нами было показано, что при одинаковом уровне верности в каскадной схеме

можно генерировать состояния кота Шредингера с большей амплитудой. Например, при измерении 10 фотонов и для уровня верности в 0.99 в каскадной схеме можно получать состояния кота Шредингера с амплитудой alpha=4.87 в то время, как использование только первой итерации схемы позволяет генерировать состояния кота с амплитудой alpha=4.61. Таким образом, в данной частиц работы было показано, что увеличение итераций в схеме позволяет генерировать Негауссовы состояния с лучшими характеристиками.
Важным результатом также является то, что каскадная схема позволяет снизить требования на детекторы числа частиц. В настоящее время, создавать детекторы, способные одновременно различать большое число фотонов проблематично. По этой причине стратегия с разделением общего числа фотонов на несколько детекторов выглядит перспективной с экспериментальной точки зрения.

2. Бозонные коды коррекции ошибок на основе квантовых состояний, генерируемых в схемах с измерениями.

Убедившись, что рассматриваемая нами схема позволяет точно генерировать сжатые квантовые состояния Фока, мы исследовали возможность использования этих состояний в качестве кодовых слов в процедуре коррекции ошибок. Для этого мы обратились к условиям Книлла-Лафламе, применимости квантовых состояний для бозонных кодов коррекции ошибок и построили на основании этих условий функцию цены (cost function). Мы провели сравнение различных кодировок на основании построенной функции цены, а также на основании аналогичного функционала, построенного на операторах Крауса.
Далее аналитически нами была рассмотрена проблема коррекции ошибок в квантовом канале, в котором присутствуют ошибки потери фотонов и дефазировки. В качестве ресурсных состояний для протокола коррекции ошибок были рассмотрены ортогональные сжатые состояния Фока. Выбор данных квантовых негауссовых состояний обусловлен тем, что, как мы показали, рассматриваемые состояния могут быть сгенерированы в схемах с измерениями и имеют определенную четность и ассиметричную структуру в фазовом пространстве, которая позволяет им корректировать ошибку потери фотонов и дефазировки. Полный квантовый канал состоит из операций кодирования, действия шумов, процедуры восстановления и декодирования. Процедуры кодирования и декодирования задаются выбором кодовых слов. Выбор ортогональных сжатых состояний Фока позволил нам исключить влияние ошибок процедур декодирования на квантовый канал. Однако, сжатые состояния Фока ортогональны только при определенных значениях параметров сжатия r и номере состояния n. Для состояний с номерами n>2 можно подобрать уровень сжатия r такой, что ортогонально сжатые фоковские состояния будут ортогональны в терминах скалярного произведения. Однако, вероятность генерации таких состояний будет уменьшаться с увеличением номера n. Так вероятность генерации второго сжатого состояния Фока равна 14.81%, третьего - 10.55%, а четвертого - уже 8.19%. Поэтому мы использовали именно сжатые состояния Фока с номером n=2, поскольку они характеризуются наибольшей вероятностью генерации среди множества ортогональных сжатых состояний Фока. Для данных состояний ортогональность достигается при уровне сжатия r=0.57. Данные параметры сжатых состояний Фока являются достижимыми в эксперименте. Используя данные квантовые негауссовы состояния в качестве кодовых слов, нам впервые удалось построить протокол коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки в малошумящем квантовом канале. В качестве восстановительной операции была построена Petz восстановительная

процедура и рассчитана верность квантового канала. Использование данной восстановительной процедуры имеет преимущество, поскольку доказано, что такая восстановительная операция всегда может быть физически реализуема.
Для демонстрации эффективности работы предложенного нами протокола коррекции ошибок мы сравнили его с протоколами коррекции, построенными на основе сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками. Такое сравнение продиктовано тем, что, используя данные состояния, возможно построить протокол коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки. Кроме того, данные протоколы похожи с точки зрения экспериментальной реализации. Как и сжатые состояния Фока, так и состояния близкие к сжатым состояниям котов Шредингера, можно получать экспериментально в оптических схемах с измерениями числа частиц.
Мы продемонстрировали, что при построении протокола коррекции ошибки потери фотонов в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока значение верности канала имеет тот же порядок, что и для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками. В то же время наши результаты показали, что второе сжатое состояние Фока лучше подходит для коррекции ошибок дефазировки с точки зрения Petz верности канала, чем рассмотренные сжатые состояния котов Шредингера. При сравнении рассмотренных нами состояний в качестве кодовых слов стоит отдельно подчеркнуть, что сжатые состояния Фока имеют весомое преимущество в экспериментальной реализации. Так нами был предложен протокол генерации сжатых состояний Фока с высокими значениями верности и вероятности. В свою очередь, генерация сжатых состояний котов Шредингера в оптических схемах возможна только приближенно. При сравнительном анализе протоколов коррекции ошибок мы использовали идеализированные сжатые состояния котов Шредингера, недостижимые в эксперименте.

Все планируемые работы выполнены полностью:
Да
5.3. Основные результаты выполнения проекта (от 1 до 10 стр. (2-20 тыс. символов))

Разработано аналитическое описание схем генерации негауссовых состояний с измерениями. Описание удалось построить на языке волновых функций Шредингера. Получено явное аналитическое выражение для волновой функции выходного состояния, зависящее от параметров двухмодового запутанного состояния, которые, в свою очередь, явно выражаются через параметры входных квантовых состояний (параметры сжатия и углы поворота эллипсов сжатия). Для двух частных случаев реализации унитарного преобразования (светоделитель и гейт CZ) получены простые соотношения, указывающие конкретные экспериментальные параметры для генерации сжатых состояний Фока. Показано, что эти состояния генерируются в рассматриваемой схеме точно (с единичной верностью) и наиболее интересны с точки зрения возможных приложений.
Выявлены параметры схемы, отвечающие отдельно за сжатие генерируемых состояний и отдельно за уровень негауссовости генерируемого состояния. Показано, что вероятность генерации негауссовых состояний в рассматриваемой схеме не зависит от уровня сжатия этого состояния.
Показано, что максимальный уровень отрицательности функции Вигнера отвечает случаю генерации сжатых состояний Фока (при значении параметра негауссовости $|z|=0$). Этот уровень нарастает с ростом числа измеренных фотонов. При стремлении к бесконечности параметра негауссовости, четные и нечетные суперпозиции состояний Фока стремятся к разным значениям. Удалось найти

значения параметров, при которых из всей суперпозиции остается только один старший член. Эти параметры могут быть достигнуты экспериментально.
Было выявлено, что уже двухмодовая конфигурация обеспечивает достаточное число параметров для управления свойствами генерируемых состояний. Можно отдельно управлять параметром негауссовости квантового состояния и его сжатием. Более того, третий свободный параметр позволяет максимизировать вероятность генерации требуемого состояния.
Показано, что сжатые состояния Фока могут использоваться в качестве кодовых слов в бозонных кодах коррекции ошибок. Этот результат подтверждается рассчитанными значениями функции цены от сжатия и номера состояний Фока для каналов с различными ошибками.
Была выбрана метрика на пространстве состояний, удобная для классификации генерируемых состояний.
Были построены зависимости расстояния от генерируемого состояния до множеств сжатых состояний кота Шредингера и сжатых состояний Фока в зависимости от параметра z, определяемого параметрами схемы генерации.
Были определены диапазоны параметров z при которых генерируемые состояния ближе к сжатым состояниям Фока, чем к сжатым состояниям кота Шредингера, и наоборот.
Рассчитана квантовая информация Фишера для оценки фазовой чувствительности генерируемых состояний.
Продемонстрировано построение протокола коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки в малошумящем квантовом канале при использовании сжатых состояний Фока. Доказана возможность построения Petz восстановительной процедуры в таком протоколе.
Предложены оптимальные параметры сжатых состояний Фока с точки зрения экспериментальной реализации протокола коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки.
При построении протокола коррекции ошибки потери фотонов в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока продемонстрирована верность канала того же порядка, что и для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками.
При построении протокола коррекции ошибки дефазировки в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока продемонстрированы большие значения верности канала чем для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками.
Найдено множество состояний, получаемых в каскадной схеме с последовательным измерением числа частиц. Данное множество состоит из состояний являющихся конечной суперпозицией сжатых состояний Фока. Максимальное состояние Фока, входящее в суперпозицию, имеет номер равный суммарному числу измеренных чисел частиц на двух итерациях каскадной схемы. Кроме того, полученные состояния имеют заданную четность, определяемую четностью суммарного числа измеренных частиц. Коэффициенты разложения зависят от параметров схемы генерации.
Нами было показано, что добавление второй итерации в схему с измерением числа частиц приводит к увеличению множества генерируемых состояний. С практической точки зрения это увеличение приводит к возможности генерировать негауссовы состояния с лучшими характеристиками.
Помимо этого, нами было показано, что множество состояний, генерируемых в каскадной схеме, меньше, чем множество состояний, получаемых при двух

одновременных измерениях мод трехмодового гауссова состояния. Другими словами, с помощью последовательных измерений можно генерировать меньшее число различных негауссовых состояний. Для иллюстрации этого факта мы исследовали сжатые состояния Фока. Нами было доказано, что второе сжатое состояние Фока не может быть получено в каскадной схеме, но может генерировать в схеме с одновременным измерением двух мод трехмодового гауссова состояния.
В рамках рассматриваемой модели взаимодействия одномодового электромагнитного поля с модой спиновой когерентности атомного ансамбля, нами были получены значения физических параметров системы, таких как параметр двумодового сжатия и эффективная константа взаимодействия по типу светоделителя, позволяющие генерировать сжатые состояния Фока с произвольными числами заполнения даже при вакуумном входном состоянии атомной моды.
Показано, что при этом сжатие выходного состояния оказывается больше, чем сжатие моды световой, так как в результате квантовой интерференции процессов двумодовое сжатие также вносит вклад в одномодовое сжатие результирующего состояния.

Все запланированные научные результаты достигнуты:
Да
5.4. Описание выполненных работ и полученных научных результатов (в том числе степень выполнения проекта) для публикации на сайте РНФ
До 3 страниц (6 тыс. символов) текста, также указываются ссылки на информационные ресурсы в сети Интернет (url-адреса), посвященные проекту.
на русском языке

Общий ход работ по проекту можно условно разделить на два направления: генерацию негауссовых состояний и разработку протоколов коррекции ошибок. При этом генерация состояний ориентирована именно на их использование в схемах коррекции, а схемы коррекции, наоборот, базируются не на идеализированных состояниях, а на тех, что можно получить в экспериментах с измерением числа частиц. Обе процедуры оптимизируются для согласования друг с другом.

В ходе выполнения первого этапа проекта рассмотрены методы генерации различных негауссовых состоянии˘с помощью схемы измерения числа частиц, где в качестве входных используются сжатые состояния. Мы демонстрируем возможность построения аналитического выражения волновои˘функции выходного состояния, которое позволяет проводить полныи˘анализ выходных состоянии˘в зависимости от параметров рассматриваемои˘схемы. Обсуждается набор условии˘на параметры двухмодового перепутанного гауссова состояния, так называемыи˘режим "универсального решения", которые гарантируют точную генерацию сжатых состоянии˘Фока. Показано, что в качестве перепутывающеи˘операции в протоколе генерации сжатых состоянии˘Фока можно использовать преобразование светоделителя и Controlled-Z операцию.

Главным результатом второго этапа следует считать построение нового бозонного кода коррекции ошибок, основанного на сжатых состояниях Фока. Используя состояния, схема точной генерации которых предложена нами на предыдущем этапе проекта, мы показали возможность коррекции как ошибки потери фотонов, так и ошибки дефазировки в малошумящем квантовом канале. Построена в явном виде Petz восстановительная процедура. Близость исходного квантового состояния и состояния, подвергшегося действию ошибок в канале и восстановленного с

помощью построенной процедуры, сравнивается путем оценки верности.

При построении протокола коррекции ошибки потери фотонов в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока продемонстрирована верность канала того же порядка, что и для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками. При построении протокола коррекции ошибки дефазировки в малошумящем квантовом канале с использованием второго сжатого состояния Фока продемонстрированы большие значения верности канала чем для протокола коррекции, построенного с помощью сжатых состояний котов Шредингера с теми же энергетическими характеристиками.

на английском языке

The overall progress of the project can be roughly divided into two areas: the generation of non-Gaussian states and the development of error correction protocols. State generation is focused specifically on their use in correction schemes, while the correction schemes, conversely, are based not on idealized states, but on those obtainable in particle number measurement experiments. Both procedures are being optimized to align with each other.

The methods for generating various non-Gaussian states by measuring the number of particles using squeezed states as input are addressed theoretically during the first stage of the project. A complete analysis of the output states can be provided by an analytical expression of the output state wave function. We discussed a set of conditions for the parameters of a two-mode entangled Gaussian state, the so-called "universal solution" regime, which guarantees accurate generation of squeezed Fock states. Furthermore, we demonstrated that the beam splitter and Controlled-Z gate can be used as entangling operations for generating squeezed Fock states.

The main result of the second stage is the construction of a new bosonic error-correction code based on squeezed Fock states. We used the states whose scheme of precise generation we proposed in the previous stage of the project. We demonstrated the possibility of correcting both photon loss errors and dephasing errors in a low-noise quantum channel. An explicit Petz-map recovery procedure was constructed. The closeness of the original quantum state and the state affected by channel errors and restored is compared by assessing the fidelity.

By constructing a photon loss error correction protocol in a low-noise quantum channel using a second squeezed Fock state, we demonstrated channel fidelity of the same order as for a correction protocol constructed using squeezed Schrödinger cat states with the same energy characteristics. When constructing a dephasing error correction protocol in a low-noise quantum channel using the second squeezed Fock state, higher fidelity values were demonstrated than for a correction protocol constructed using squeezed Schrödinger cat states with the same energy characteristics.

5.5. Перечень публикаций по проекту за весь срок выполнения проекта (заполняется автоматически на основании форм 2о)

1

Королев С.Б., Башмакова Е.Н., Голубева Т.Ю. Error correction using squeezed Fock states **Quantum Information Processing** (2024) wos, scopus, rsci, иные, РИНЦ, «Белый список»

2

Башмакова Е.Н., Королев С.Б., Зинатуллин Э.Р., Голубев Ю.М., Голубева Т.Ю. **Сжатые состояния Фока: генерация и применение Оптический журнал (Journal of Optical Technology)** (2025) wos, scopus, rsci, иные, РИНЦ, «Белый список»

3

Башмакова Е.Н., Королев С.Б., Голубева Т.Ю. **Bosonic quantum error correction using squeezed Fock states PHYSICAL REVIEW A** (2025) wos, scopus, rsci, иные, РИНЦ, «Белый список», Q1
Файл с копиями первых (с указанием авторов) страниц и страниц со ссылкой на поддержку от РНФ всех публикаций по проекту,
Открыть файл
5.6. Возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта:
Нет
5.7. Публикационные показатели реализации проекта (нарастающим итогом, данные формируются автоматически)
Показатели публикационной активности приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку Российского научного фонда.
Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

Показатели	Единица	2024 г. план / факт	2025 г. план / факт
Количество содержащих результаты исследований по проекту различных публикаций* членов научного коллектива в ведущих рецензируемых** российских и зарубежных научных изданиях * К указанным публикациям не относятся публикации, содержащие ссылки на иные, помимо данного гранта РНФ, источники финансирования; публикации, направленные в издательство до начала практической реализации проекта (до заключения грантового соглашения) ; публикации типа «тезисы». ** Издания, индексируемые в библиографических зарубежных базах данных публикаций и/или Russian Science Citation Index (RSCI).	Ед.	1/2	3/3
в том числе:			
в изданиях, индексируемых в библиографических базах данных Web of Science и/или SCOPUS	Ед.	2	3
в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR Принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных http://www.scimagojr.com/	Ед.	0	1
в **российских** изданиях, входящих во второй квартиль (Q2) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR Принадлежность издания к Q2 в Scopus определяется по базе данных http://www.scimagojr.com/	Ед.	0	0
в изданиях, индексируемых в библиографической базе данных RSCI	Ед.	2	3
в изданиях, включенных в «Белый список»	Ед.	2	3

Показатели	Единица	2024 г. план / факт	2025 г. план / факт
в изданиях, индексируемых в иных зарубежных библиографических базах данных	Ед.	2	3
Количество публикаций с учетом квартилей Указанное количество публикаций может изменяться в случае принятия экспертным советом РНФ решения об отказе учета публикации в качестве отчетной или отказа от действия повышающих коэффициентов в отношении публикации в случае принадлежности издания к Q1 или Q2.	Ед.	1/2	3/4

5.8. Научным коллективом опубликовано с указанием на получение финансовой поддержки от Фонда по направлению научного исследования не менее 3 содержащих результаты исследований по проекту различных публикаций членов научного коллектива в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях (с учетом квартилей):
Да

5.9. Возможность практического использования результатов проекта в экономике и социальной сфере (в том числе, формирование научных и технологических заделов, обеспечивающих экономический рост и социальное развитие Российской Федерации, создание новой или усовершенствование производимой продукции (товаров, работ, услуг), создание новых или усовершенствование применяемых технологий).
Информация приводится при наличии такой возможности.

Результаты данного проекта могут быть использованы в качестве технологического задела при создании оптического квантового компьютера на основе непрерывных переменных. Оптические квантовые компьютеры являются многообещающим кандидатом на роль эффективных и доступных квантовых технологий, так как характеризуются высокой скоростью передачи данных (скорость света), низким взаимодействием с окружающей средой и способностью работать при комнатных температурах. Круг практических задач, для которых квантовые вычисления могут обеспечить заметный выигрыш, постоянно расширяется и затрагивает практически все сферы экономики.

5.10. Информация о возможности использовании результатов выполнения проекта в осуществлении хозяйственной деятельности предприятий Российской Федерации, в том числе о способе использования, о намерениях по внедрению на основании прогнозируемых результатов проекта новой или усовершенствованию производимой продукции (товаров, работ, услуг), новых или усовершенствованных применяемых технологий; о формировании по итогам реализации проекта научных и технологических заделов, обеспечивающих экономический рост и социальное развитие Российской Федерации (с приложением подтверждающих документов, при наличии).

не очевидно

5.11. Информация о возможности дальнейшего развития проекта за счет иных инструментов государственного или внебюджетного финансирования.

Планируется использовать полученные результаты в качестве задела при подаче заявки по более масштабным мероприятиям Российского научного фонда.

Настоящим подтверждаю:

- самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
- при обнародовании результатов, полученных в рамках поддержанного РНФ проекта,

научный коллектив ссылался на получение финансовой поддержки проекта от РНФ и на организацию, на базе которой выполнялось исследование;
- согласие с опубликованием РНФ сведений из итогового отчета о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
- проект не имеет других источников финансирования;
- проект не является аналогичным[1] по содержанию проекту, одновременно финансируемому из других источников;
- проект не содержит сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа.

---

[1]Проекты, аналогичные по целям, задачам, объектам, предметам и методам исследований, а также ожидаемым результатам. Экспертиза на совпадение проводится экспертным советом Фонда.

В соответствии с Соглашением о признании электронной подписи равнозначной собственноручной подписи Форма подписана простой электронной подписью руководителя проекта в ИАС.

Подпись руководителя проекта _____ /Т.Ю. Голубева/

Подписывается в случае представления в Фонд печатного экземпляра формы.

Подпись руководителя организации (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа), **печать** (при ее наличии) **организации.**

Форма может быть подписана квалифицированной электронной подписью руководителя организации с представлением в ИАС файла, содержащего информацию об электронной подписи руководителя организации.**В указанном случае представление формы в печатном виде в Фонд не требуется.**

В случае представления в Фонд печатного экземпляра заявки и подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала), действующим на основании доверенности или распорядительного документа, к представляемому в Фонд печатному экземпляру заявки прилагается **копия распорядительного документа или доверенности**, заверенная печатью организации.

_____ /_____ /
М.П.