

**ХОРИН**  
**Павел Алексеевич**

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ, ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА  
АБЕРРАЦИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА**

1.3.6. Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Самара – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» на кафедре технической кибернетики и в Институте систем обработки изображений РАН – филиале федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук».

Научный руководитель:

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

**Грейсух Григорий Исаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», заведующий кафедрой «Физики и химии»;

**Майорова Александра Михайловна**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник лаборатории когерентной оптики.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится 20 октября 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» [https://ssau.ru/files/resources/dis\\_protection/Khorin\\_P\\_A\\_Primenenie\\_difrakcionnyh\\_opticheskikh.pdf](https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Khorin_P_A_Primenenie_difrakcionnyh_opticheskikh.pdf).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.01  
к.ф.-м.н., доцент

Телегин А. М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Детектирование, идентификация и компенсация аберраций волнового фронта (ВФ) востребованы в различных приложениях, включая коррекцию зрения, улучшение изображающих систем мобильных устройств, оптических микроскопов и телескопов, оптических систем дистанционного зондирования Земли, передачи информации в свободном пространстве.

Датчик волнового фронта является одним из основных элементов адаптивной системы корректировки лазерного излучения. Его задача – измерять аберрации волнового фронта и передавать результаты этих измерений на обрабатывающее устройство. Например, волновой фронт светового поля может быть восстановлен по интерферограмме. Данный метод был предложен ещё в 1800 гг. (Физо, Жамен, Майкельсон, Юнг). Он обладает до сих пор непревзойденной точностью (превышает  $\lambda/100$ ) и позволяет непосредственно получать карту отклонений волнового фронта на весьма значительных размерах апертур. Недостатки интерферометрии общеизвестны – к ним относятся: чувствительность измерительной аппаратуры к вибрациям, а также способность определять фазу с неопределенностью в  $2\pi$ , что накладывает дополнительные ограничения по величине детектируемых аберраций. Метод Гартмана, появившийся на 100 лет позже, отличается тем, что отклонения волнового фронта вычисляются по набору субапертур, с некоторым шагом покрывающих полный размер подлежащей исследованию области. Конечные размеры каждой из субапертур датчика приводят к ограничениям величины детектируемой аберрации. Среди плюсов датчика Шака-Гартмана можно выделить точность, сравнимую с интерференционным методом, и ахроматичность. В 1950 гг. Фриц Цернике разработал метод, при помощи которого появляется возможность прямым способом визуализировать фазу светового поля. Основной принцип заключается в разделении светового пучка на его Фурье-компоненты с использованием линзы и фильтра. Однако восстановление фазы проводится некорректно с увеличением уровня аберрации по причине ограничения линейной аппроксимации разложения волнового фронта в ряд Тейлора.

Адаптивные методы являются наиболее универсальным инструментом для управления волновым фронтом и коррекции оптических аберраций в широком диапазоне величины. Среди недостатков данного метода можно выделить необходимость использования долго сходящихся итерационных или оптимизационных алгоритмов для полной или частичной компенсации аберраций волнового фронта путём подбора комплексной фазы. Стоит отметить вклад научной группы, проводившей исследования модального жидкокристаллического корректора волнового фронта и перестраиваемого фокусатора под руководством С.П. Котовой. Кроме того, в 1990гг. научной школой академика В.А. Сойфера (В.В. Котляр, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина) был предложен метод детектирования аберраций волнового фронта, основанный на многоканальных дифракционных оптических элементах (ДОЭ), осуществляющих в различных

дифракционных порядках согласованную фильтрацию фазовых распределений, соответствующих различным базисным функциям, обеспечивающий чувствительность к отклонениям волнового фронта не хуже  $\lambda/20$ , устойчив к вибрациям и не требуют применения эталонных оптических элементов. Однако этот подход также имеет свои недостатки, при увеличении уровня (величины) абберрации волнового фронта разложение по базису становится нелинейным, и при детектировании обнаруживается вклад «посторонних» абберраций, таким образом восстановление фазы проводится не корректно. При сильных абберрациях, когда происходит существенное размытие фокального пятна, имеет смысл применять методы, ориентированные на анализ картины распределения интенсивности, формируемой абберрированной оптической системой в одной или нескольких плоскостях. Для восстановления фазы в этом случае используются итерационные и оптимизационные алгоритмы, а также машинное обучение и нейронные сети. Применение нейронных сетей в задаче распознавания абберраций волнового фронта является новым, развивающимся подходом. Однако этот подход проблематичен при малых уровнях абберраций, когда картина почти неотличима от дифракционно-ограниченного фокального пятна, поэтому часто для анализа используют картины интенсивности вне фокальной плоскости, что, в свою очередь, вносит неоднозначность в анализ абберраций, так как дефокусировка также является одним из типов абберраций. Начиная с 2000гг. непрерывно разрабатываются модификации методов на основе анализа полиномов Цернике, а также с применением цифровой обработки информации и интеллектуального анализа данных. Рассматриваются альтернативные способы измерения и реконструкции абберраций волнового фронта оптических систем, в том числе глаза человека.

**Объектом исследования** являются абберрации волнового фронта.

**Предметом исследования** служит применение дифракционных оптических элементов для визуализации, детектирования и анализа абберраций волнового фронта.

**Цель диссертационной работы**

Разработка методов детектирования и анализа абберраций волнового фронта с применением дифракционных оптических элементов.

**Задачи исследования**

Для достижения цели исследования были поставлены и решались следующие задачи:

1. Разработать и рассчитать новый тип многоканальных дифракционных оптических элементов, согласованных с фазовыми функциями Цернике, для детектирования абберраций волнового фронта в широком диапазоне их величин. Разработать метод детектирования волновых абберраций на основе применения предложенных ДОЭ. Провести численное исследование и экспериментальную апробацию разработанного метода.

2. Исследовать применение опорных пучков с коническими волновыми фронтами при формировании интерферограмм с целью улучшения распознавания аберраций с использованием свёрточной нейронной сети.

3. Определить соответствие вклада основных канонических аберраций распространённым патологиям роговицы человеческого глаза. Разработать метод компенсации аберрации волнового фронта миопического глаза с учётом возможности коррекции только передней поверхности роговицы.

### **Научная новизна**

В исследовании получены следующие новые научные результаты:

1. Предложены и рассчитаны многоканальные дифракционные оптические элементы, согласованные с фазовыми функциями Цернике для детектирования аберраций волнового фронта в широком диапазоне их величин. В отличие от разложения по базису функций Цернике, обеспечивающего корректное детектирование лишь малых аберраций (до  $0,4$  длины волны  $\lambda$ ), предложенный подход снимает ограничение на величину аберрации (численно и экспериментально подтверждено корректное детектирование до  $\lambda$ ). Разработан метод детектирования волновых аберраций с использованием предложенных ДОЭ и с учётом распределения интенсивности в дифракционных порядках.

2. Предложено применение опорных пучков с коническими волновыми фронтами для улучшения распознавания аберраций по интерферограммам с использованием свёрточных нейронных сетей. Чувствительность интерферограмм (изменение абберрированной интерферограммы по отношению к эталонной) при использовании конического опорного пучка по сравнению с плоским опорным пучком увеличивается не менее, чем в  $1,2$  раза для радиально несимметричных типов аберраций.

3. Выделены группы канонических аберраций, связанных с распространёнными патологиями роговицы глаза (миопии разной степени): для диагноза миопии слабой степени выявлено существенное влияние дисторсии и астигматизма, при миопии средней степени существенным также становится влияние аберраций третьего порядка. Разработан метод компенсации аберрации миопического глаза, описываемых полиномами Цернике, с учётом возможности коррекции только передней поверхности роговицы. Численно показано, что при коррекции выделенных аберраций передней поверхности роговицы обеспечивается улучшение среднего квадратичного отклонения (СКО) абберрированной функции рассеяния точки (ФРТ) от эталонной (картина Эйри) в  $7,5$  раз при миопии средней степени.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В качестве возможных приложений рассчитанных многоканальных дифракционных оптических элементов (фильтров), согласованных с полиномами Цернике и фазовыми функциями Цернике – анализ и детектирование аберраций волнового фронта в широком диапазоне их величин (от  $0,1\lambda$  до  $\lambda$ ). В зависимости от полученного диапазона уровня аберрации появляется возможность выбрать способ анализа волнового фронта без ложно детектируемых аберраций. В диапазоне от  $0,1\lambda$  до  $0,4\lambda$  имеет смысл использовать сенсор, основанный на полиномах Цернике. При исследовании

аббераций в диапазоне от  $0,4\lambda$  до  $\lambda$  для корректного детектирования искажений волнового фронта необходимо использовать фильтр, согласованный с фазовыми функциями Цернике в совокупности с итерационным алгоритмом определения типа и величины отдельных аббераций.

Детектирование малых аббераций при помощи рассмотренных методов важно при контроле качества формы оптических элементов, оценке погрешности при юстировке оптических систем, а также при проведении обследования на наличие и прогрессирование глазных заболеваний на ранних стадиях. Учитывая широкий диапазон корректно детектируемой величины аббераций при помощи предложенного метода, основанного на согласовании фильтра с фазовыми функциями Цернике, областью применения может так же выступать измерение и коррекция аббераций волнового фронта в системах оптической коммуникации и в промышленной лазерной технике.

Интерферограммы с использованием плоского и структурированного опорного пучка, соответствующего радиальной (конической или сферической) и цилиндрической (кубической) несущей, позволяют сформировать более сложную картину распределения интенсивности в результирующей плоскости исследуемой оптической системы и дают возможность более точно детектировать и интерпретировать абберации в анализируемом волновом фронте, в том числе при помощи обучения нейронных сетей. Учитывая, что оптическая интерферометрия уже широко используется во многих приложениях, таких как прецизионные измерения, астрофизика, сейсмология, квантовая информатика, биомедицинская визуализация, а также цифровое контурирование или анализ деформации в механике – расширение метода при помощи различных опорных пучков в совокупности с интеллектуальным анализом данных позволит сохранить достоинства датчика волнового фронта и устранить некоторые недостатки в зависимости от конкретной прикладной задачи.

Найденные соответствия основных канонических аббераций различным патологиям человеческого глаза на основе коэффициентов полиномов Цернике низкого и высокого порядка позволяют, в отличие от стандартной методики корректировки кривизны поверхности роговицы глаза, улучшить качество формируемого изображения и провести более точную формализацию диагноза с точки зрения оптических волновых аббераций.

### **Реализация результатов работы**

Диссертационная работа выполнялась в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С. П. Королева и Институте систем обработки изображений РАН – филиале федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН».

### **Методы исследования**

В диссертационной работе используются методы математического моделирования и реального оптического эксперимента с использованием

динамического транспаранта. Для моделирования распределений интенсивности используются интегральные преобразования Френеля и Фурье.

### **На защиту выносятся**

1. Многоканальные дифракционные оптические элементы, согласованные с фазовыми функциями Цернике, в отличие от разложения по базису функций Цернике, дающего измерение лишь малых aberrаций (до  $0,4\lambda$ ), снимает принципиальное ограничение на величину aberrации (показана корректное детектирование aberrаций до  $\lambda$ ). Метод детектирования волновых aberrаций с использованием предложенных ДОЭ и учётом распределения интенсивности в дифракционных порядках

2. Продемонстрированная целесообразность использования опорных пучков с коническими волновыми фронтами для распознавания aberrаций по интерферограммам при их обработке с помощью свёрточных нейронных сетей. Чувствительность интерферограммы (её изменение в следствии aberrаций интерферирующего фронта) при использовании конического опорного пучка по сравнению с плоским опорным пучком увеличивается не менее, чем в 1,2 раза для радиально-несимметричных типов aberrаций, а средняя абсолютная ошибка распознавания aberrаций снижается с 0,0068 до 0,0019.

3. Метод компенсации канонических aberrаций, описываемых полиномами Цернике, и наиболее характерных для распространённых патологий роговицы глаза - миопии разной степени. Метод обеспечивает улучшение СКО aberrированной ФРТ от эталонной (от картины Эйри) в 7,5 раз при миопии средней степени в результате коррекции формы только одной передней поверхности роговицы.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов проведённого исследования подтверждается согласованием результатов моделирования с результатами оптических экспериментов в части действия рассчитанных многоканальных ДОЭ.

### **Апробация работы**

Основные результаты и положения диссертации были представлены на 16 конференциях, в т.ч.: Международная конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях»; Международная конференция «Информационные технологии и нанотехнологии»; Международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN»; Международная научно-технической конференция Перспективные информационные технологии; International Conference on Transparent Optical Networks; Международная молодёжная научная конференция «XV Королёвские чтения»; International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies.

Исследования по теме диссертации были поддержаны грантом РФФИ № 20-37-90129 «Аспиранты», стипендией правительства РФ (приказ МИНОБР от 12 августа 2020 года № 995), стипендией президента РФ и стипендией президента РФ для обучающихся на направлениях, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики (приказ МИНОБР России от 27 июля 2021 года № 658).

## **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, в том числе 17 статей – в журналах индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования SCOPUS / Web of Science, 3 статьи – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

## **Личный вклад автора**

Изложенные в диссертации оригинальные результаты получены соискателем, либо при его непосредственном участии. Соискателем проводились вычислительные и оптические эксперименты в сотрудничестве с ИСОИ РАН и ИТМО, разрабатывались многоканальные ДОЭ, согласованные с фазовыми функциями Цернике, и метод детектирования волновых aberrаций с использованием предложенных; проводилось исследование чувствительности интерферограмм на основе различных опорных пучков; разрабатывался метод компенсации канонических aberrаций, описываемых полиномами Цернике, и наиболее характерных для распространённых патологий роговицы глаза. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

## **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 138 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 30 таблиц и список литературы из 117 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность темы диссертации, изложены цель и задачи исследования, дана общая характеристика работы, проведён обзор научной литературы, сформулированы научная новизна полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются многоканальные дифракционные оптические элементы (фильтры) для анализа волновых aberrаций, согласованные с базисом функций Цернике и фазовыми функциями Цернике. Проведён анализ aberrаций волнового фронта на основе разложения по базису функций Цернике, рассчитаны советуемые фильтры с комплексной функцией пропускания. Выполнено исследование многопорядковых (многоканальных) ДОЭ при анализе слабых ( $\leq 0,4\lambda$ ) и сильных aberrаций ( $>0,4\lambda$ ). Для рассматриваемого сенсора, согласованного с полиномами Цернике, проведён анализ применимости многоканальных дифракционных оптических фильтров. Проведён детальный анализ порогового уровня, при котором корректно детектируется величина aberrации (до 4-го порядка в терминах функций Цернике). Получено пороговое значение сенсора для каждого типа aberrаций. Показано, что сенсор пригоден для детектирования слабых ( $\leq 0,4\lambda$ ) aberrаций. Из графика на рисунке 1(а) видно, что перекрёстные помехи CS нелинейно увеличиваются с повышением уровня  $a/\lambda$  для каждой из детектируемых aberrаций. Кроме того, отношение полезного сигнала к максимальному



детектируемому шуму TFR (график на рисунке 1(б)) стремительно понижается с увеличением уровня  $\alpha/\lambda$  для каждой из детектируемых aberrаций.

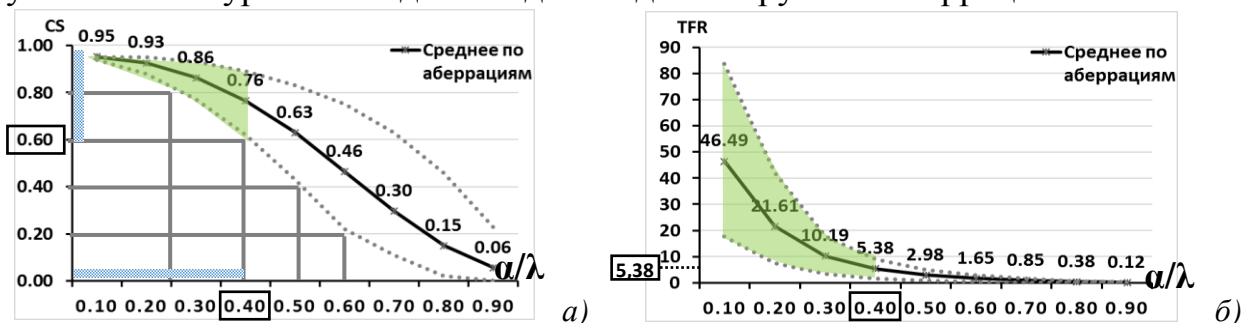


Рисунок 1 – Перекрестные помехи CS – (а), отношение сигнал к шуму TFR – (б): при разном уровне (величине) детектируемой aberrации  $\alpha/\lambda$  для каждой из нескольких aberrаций  $N$  (пунктир – нижняя и верхняя границы значений, сплошная линия – среднее).

На основе анализа отклонения максимальной интенсивности в конкретном дифракционном порядке относительно других порядков показана возможность восстановления aberrаций разной величины до  $0,4$  длины волны. Из рисунка 1 видно, по нижней границе CS можно определить пороговые значения, однако они не могут превышать  $0,4\lambda$  для разложения волнового фронта без ложного детектирования, что соответствует  $CS \geq 0,6$  или  $TFR \geq 5,38$ .

Разработаны и рассчитаны многоканальные дифракционные оптические элементы (фильтры), согласованные с фазовыми функциями Цернике (рисунок 2). Рассчитано несколько вариантов фильтров, согласованных с различными типами aberrаций одного уровня (рисунок 2(а, г)), с одним типом aberrаций разного уровня (рисунок 2(б, д)), и гибридный фильтр (рисунок 2(в, е)). Показано использование гибридного фильтра для предварительного анализа уровня aberrаций (рисунок 3), а фильтра, согласованный с различными типами aberrаций одного уровня (рисунок 4) – для уточнения. Определён порог величины различных aberrаций, требующий применения предложенных фильтров (до  $\lambda$ ). В отличие от разложения по базису функций Цернике, обеспечивающего измерение лишь малых aberrаций ( $\leq 0,4\lambda$ ), предложенный подход снимает ограничение на величину корректно детектируемых aberrаций.

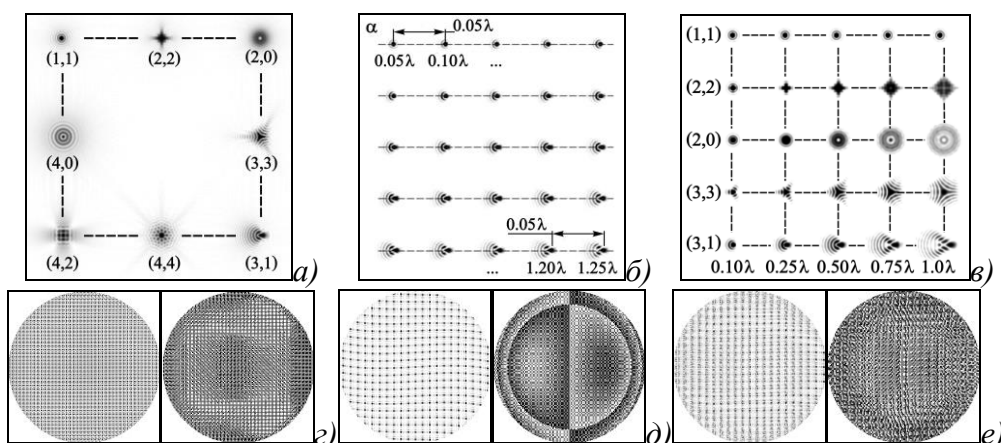


Рисунок 2 – Действие в фокальной плоскости фильтра с соответствующей функцией пропускания (амплитуда и фаза), согласованного с фазовыми функциями Цернике (волновыми aberrациями): (а, г) – с различными типами aberrаций одного уровня  $0,5\lambda$ , (б, д) – с одним типом aberrации (3,1) разного уровня, (в, е) – гибридный фильтр

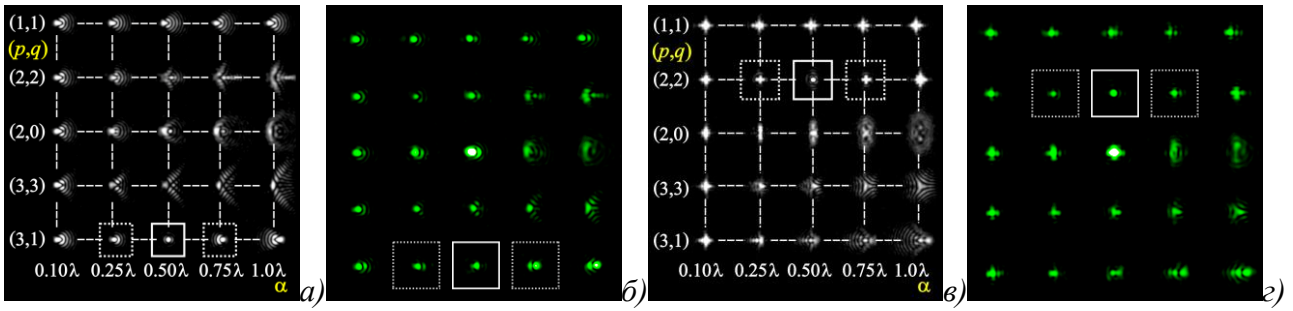


Рисунок 3 – Результаты моделирования (а, в) и оптического (б, г) эксперимента действия многоканального гибридного фильтра при детектировании ВФ, искажённого суперпозицией aberrаций: (а, б) –  $0,5\lambda*(3,1)$ ; (в, г) –  $0,5\lambda*(2,2)$ . Обозначения: изменение ориентации (а, б) или регистрация одинаковых (в, г) дифракционных порядков – пунктирная линия, детектируемая aberrация – сплошная линия.

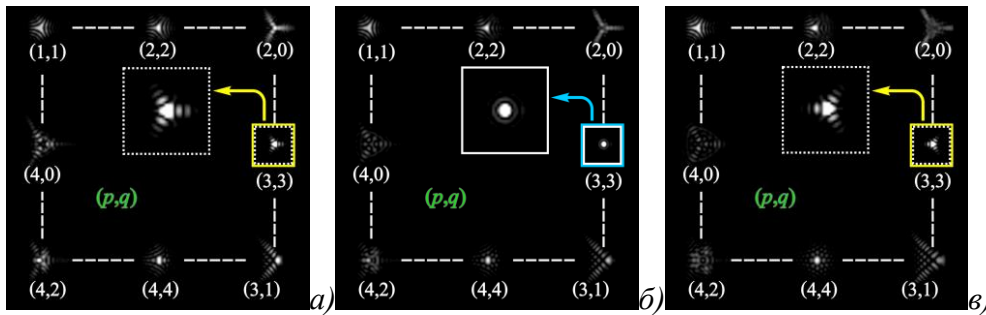


Рисунок 4 – Результаты моделирования действия многоканального фильтра с различными типами aberrаций одного уровня ( $0,5\lambda$  – (а),  $0,7\lambda$  – (б),  $0,9\lambda$  – (в)) при детектировании ВФ искажённого aberrаций:  $0,5\lambda*(3,3)$

Разработан поэтапный алгоритм (рисунок 6) коррекции волнового фронта на основе оптического разложения по волновым aberrациям (фазовым функциям Цернике). Предложены новые критерии успешного детектирования на очередном этапе: максимальная интенсивность и ориентация распределения интенсивности дифракционных порядков. Критерием выхода из поэтапного алгоритма является формирование выраженного корреляционного пика в одном из дифракционных порядков фокальной плоскости фильтра. Проведена экспериментальная апробация при помощи адаптивного детектирования волновых aberrаций на основе применения многоканального фильтра, согласованного с фазовыми функциями Цернике и предложенного алгоритма.

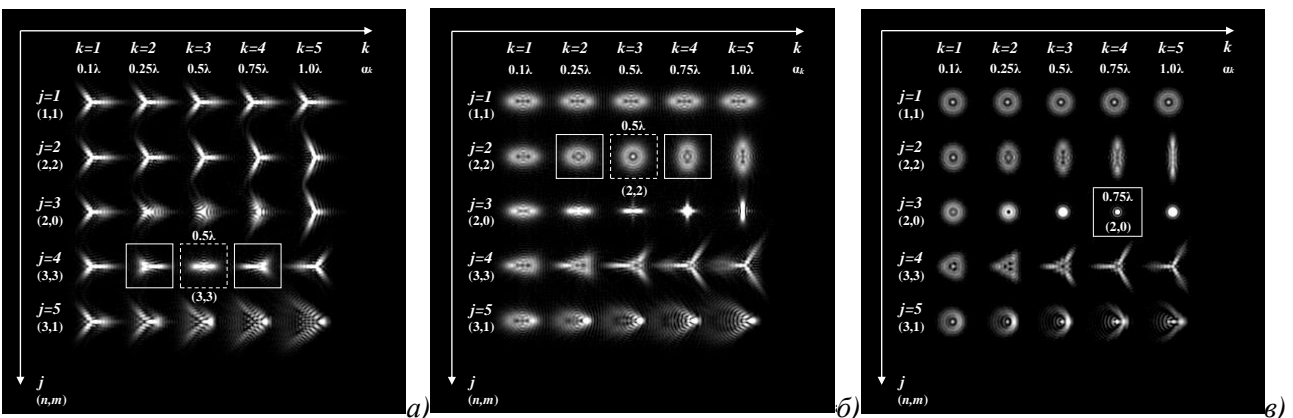


Рисунок 5 – Результаты моделирования действия многоканального фильтра при детектировании суперпозиции волновых aberrаций на основе поэтапного алгоритма:  $0,5\lambda*(2,2)+0,5\lambda*(3,3)+0,75\lambda*(3,3)$  - (а);  $0,5\lambda*(2,2)+0,75\lambda*(3,3)$  - (б);  $0,75\lambda*(3,3)$  - (в);

Показана поэтапная компенсация aberrаций волнового фронта на основе динамически перестраиваемого многоканального фильтра, реализованного на пространственном модуляторе света (рисунок 5; обозначения: изменение ориентации дифракционных порядков – сплошная линия (а, б), детектируемая aberrация – пунктирная линия (а,б), корреляционный пик – сплошная линия(в)).

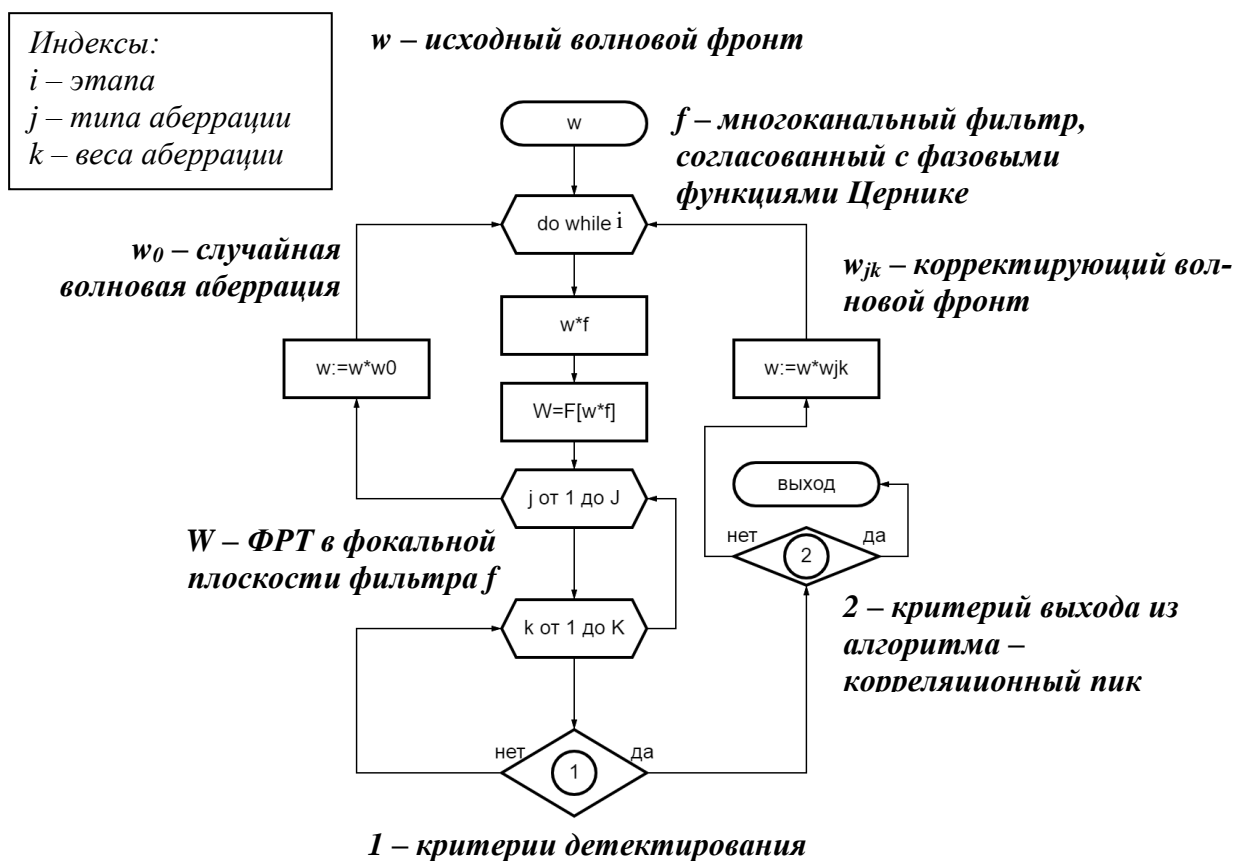


Рисунок 6 – Схематическое описание поэтапного алгоритма для определения типа и величины отдельных aberrаций

**Вторая глава** посвящена исследованию чувствительности и информативности различных типов интерферограмм, формируемых с применением дифракционных оптических элементов, для улучшения визуализации и распознавания aberrаций с использованием свёрточной нейронной сети. Проведён выбор параметров опорного пучка для улучшения визуализации aberrаций в интерферограммах. На основе численных данных о средних квадратичных ошибках показан сравнительный анализ усреднённых по видам aberrаций значений чувствительности и информативности линейной интерферограммы с конической и цилиндрической. Для повышения чувствительности и информативности интерферограмм предложено применение различных опорных пучков, с целью улучшения распознавания aberrаций по интерферограммам с использованием свёрточных нейронных сетей. Проведён расчёт конического и цилиндрического пучка  $E_B$  (таблица 1).

Таблица 1 – Функция пропускания (фаза) опорного пучка  $E_B$  для конической и цилиндрической интерферограммы разной частоты  $\alpha$

$\alpha$				
$2\pi$	$4\pi$	$6\pi$	$8\pi$	$10\pi$
Конический $E_B(x, y) = \exp[iB(x, y)]$ $B(x, y) = \alpha\sqrt{x^2 + y^2}$				
Цилиндрический $E_B(x, y) = \exp[iB(x, y)]$ $B(x, y) = \alpha x^3$				

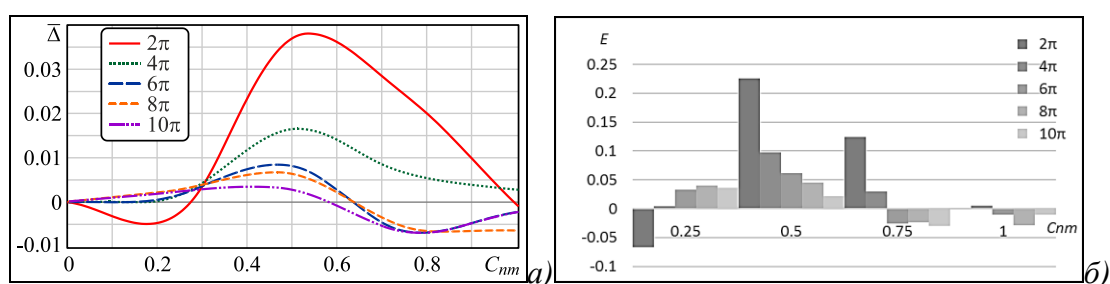


Рисунок 7 – Усреднённые значения чувствительности  $\bar{\Delta}$  (а) и информативности  $E$  (б) конических и линейных интерферограмм для различных параметров  $\alpha$ .

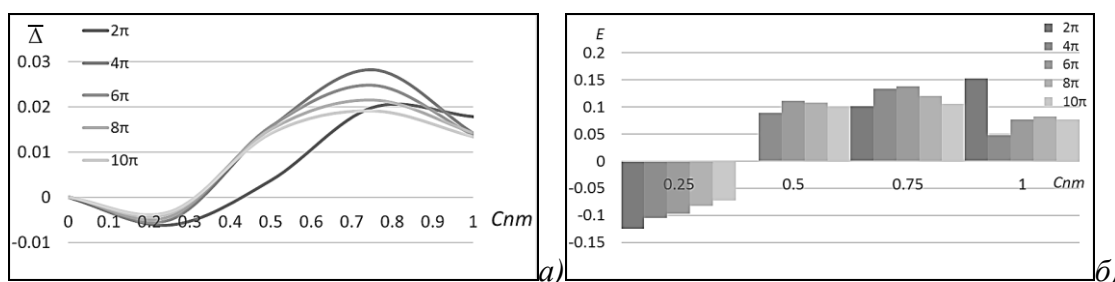


Рисунок 8 – Усреднённые значения чувствительности  $\bar{\Delta}$  (а) и информативности  $E$  (б) цилиндрических и линейных интерферограмм для различных параметров  $\alpha$ .

Максимум информативности для кольцевой (конической) интерферограммы по сравнению с линейной достигается при детектировании средних aberrаций ( $0,5\lambda - 0,75\lambda$ ). В этом случае кольцевая интерферограмма информативнее линейной на 23% (рисунок 7). Эти особенности осевых цифровых голограмм с коническим опорным фронтом позволили повысить эффективность распознавания типов и уровней aberrаций на основе применения свёрточных нейронных сетей, что дает уменьшение средней абсолютной ошибки 3 раза. Максимум информативности цилиндрической интерферограммы достигается при детектировании средних aberrаций ( $\geq 0,5\lambda$ ). В этом случае цилиндрическая интерферограмма информативнее линейной на 15% для определенных волновых aberrаций (дефокусировка, астигматизм, сферическая aberrация и астигматизм 2-го порядка). Средняя информативность

при детектировании средних и больших значений аберраций, независимо от частоты цилиндрической интерферограммы, составляет 9% (рисунок 8).

**В третьей главе** определяется соответствие основных канонических аберраций различным патологиям роговицы человеческого глаза (миопии разной степени) на основе коэффициентов полиномов Цернике, рассчитанных по результатам аберрометрии при медицинских исследованиях. Рассматривается набор данных, полученный на базе ООО ФК, ЭЦ «ЛАЗЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ЗРЕНИЯ» («Глазная клиника Бранчевского» ООО «Региональный медицинский центр», г. Самара), который подготовлен в виде весовых полиномов Цернике передней и задней поверхности роговицы пациентов. На основе полученных данных проведён анализ аберраций роговицы человеческого глаза, в результате которого выделены базисные функции Цернике, наиболее характерные для некоторых патологий роговицы (таблица 2), компенсация которых приводит к улучшению качества формируемого изображения.

Таблица 2 – Сводная таблица для передней и задней поверхности роговицы, связи полиномов Цернике, наиболее ярко выраженных весовых коэффициентов и диагноза

Передняя поверхность роговицы		Задняя поверхность роговицы	
Миопия слабой степени	Миопия средней степени	Миопия слабой степени	Миопия слабой степени
<p>1: 0% 3: 2% 4: 0% 5: 0% 6: 4% 7: 0% 8: 0% 9: 0% 10: 2% 11: 0% 12: 0% 13: 0% 14: 0% 15: 0%</p> <p>2: 92%</p> <p>(1,-1); (2,2)</p>	<p>1: 0% 3: 9% 4: 3% 5: 0% 6: 5% 7: 0% 8: 1% 9: 1% 10: 3% 11: 0% 12: 0% 13: 0% 14: 0% 15: 0%</p> <p>2: 78%</p> <p>(1,±1); (2,2); (3,3)</p>	<p>1: 0% 2: 15% 3: 34% 4: 10% 5: 0% 6: 34% 7: 0% 8: 4% 9: 0% 10: 2% 11: 0% 12: 0% 13: 0% 14: 1% 15: 0%</p> <p>4: 10%</p> <p>6: 34%</p> <p>3: 34%</p> <p>2: 15%</p> <p>(1,±1); (2,±2)</p>	<p>1: 0% 2: 15% 3: 34% 4: 10% 5: 0% 6: 34% 7: 0% 8: 4% 9: 0% 10: 2% 11: 0% 12: 0% 13: 0% 14: 1% 15: 0%</p> <p>4: 10%</p> <p>6: 34%</p> <p>3: 34%</p> <p>2: 15%</p> <p>(1,±1); (2,±2)</p>

По распределению ФРТ (таблица 3, 8-ой столбец «Плоскость формируемого изображения/ФРТ») видно, что достаточно компенсировать коэффициенты базисных функций, которые отклоняются от эталонной модели не менее чем на  $p=30\%$ . В таком случае СКО идеальной ФРТ (таблица 3, 2-ая строка, 9-ый столбец) от аберрированной не превышает 1% или в абсолютных значениях – 0,0081. На основе данных о СКО можно сделать вывод, что компенсации аберраций малой группы (аббераций Цернике типа (1,±1), (2,±2), (4,-4)) достаточно для достижения высокого качества формируемого изображения. Стоит отметить, что данную компенсацию можно провести при помощи рефракционного лазера WaveLight® EX500 или аналога. WaveLight® EX500 – это стационарная эксимерная лазерная система сканирующего пятна, которую используют в рефракционной хирургии, основанной на данных с диагностических приборов WaveLight GmbH или весовых коэффициентах полиномов Цернике. Для миопии слабой степени при уровне компенсации в 90% – (1,±1), (2,±2), (4,-4); при 70% – (1,±1), (2, -2); при 25% – (1,1).



Таблица 3 – Волновой фронт и соответствующие ФРТ для роговицы с патологией по типу миопии слабой степени до и после моделирования компенсации аберраций с отклонением от эталонной модели более чем на  $p\%$  (уровень компенсации  $q=100-p$ )

Уровень компенсации, $q\%$	Передняя поверхность роговицы		Задняя поверхность роговицы		Передняя и задняя поверхность Роговицы		Плоскость формируемого изображения	
	ВФ	ФРТ	ВФ	ФРТ	ВФ	ФРТ	ФРТ	СКО
90%								0,0028
70%								0,0081
25%								0,0240

Таким образом, исследования показали, что оказались наиболее эффективными аберрации высокого порядка для решения конкретной задачи компенсации искажений изображения ФРТ. Интересным фактом является, что среди них присутствуют полиномы высоких порядков  $Z_{31}$ ,  $Z_{44}$  (выше второго порядка). В классической офтальмологии специалисты обращают внимание только на полиномы первой и второй степени, которые отвечают за так называемые «цилиндр» и «сферу». Однако проведённое исследование показывает, что учёт аберраций высокого порядка (абerrации вида кома 3-его порядка и абerrации 4-ого порядка) позволил значительно повысить качество формируемого изображения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложены и рассчитаны многоканальные дифракционные оптические элементы, согласованные с фазовыми функциями Цернике, обеспечивающие детектирование волновых аберраций произвольной величины. Численное моделирование и экспериментальные результаты показали корректное детектирование волновых аберраций с величиной до длины волны  $\lambda$  (средняя относительная ошибка определения величины волновых аберраций не превышает 0,03). Разработан метод детектирования аберраций волнового фронта с использованием предложенных ДОЭ и с учётом распределения интенсивности в дифракционных порядках, который позволяет получить коэффициенты разложения фазы волнового фронта по полиномам Цернике.

2. Предложено применение опорных пучков с коническим волновым фронтом для улучшения распознавания аберраций по интерферограммам с использованием свёрточных нейронных сетей. За счёт использования конического опорного пучка обеспечены инвариантность интерферограмм к повороту исследуемого волнового фронта и увеличение чувствительности интерферограмм (изменение абerrированной интерферограммы по отношению к эталонной) по сравнению с плоским опорным пучком не менее, чем в 1,2 раза для не радиально-симметричных типов аберраций (в том числе, астигматизм, дисторсия, кома). Для распознавания аберраций волнового фронта по

интерферограммам применена свёрточная нейронная сеть с архитектурой на основе Xception, средняя абсолютная ошибка распознавания для конических интерферограмм по сравнению с линейными интерферограммами снижена с 0,0068 до 0,0019.

3. Выделены группы канонических aberrаций, характерных для распространённых патологий роговицы глаза (миопии разной степени) на основе aberрометрии при медицинских исследованиях. Для диагноза миопии слабой степени выявлено существенное влияние дисторсии и астигматизма. При миопии средней степени также обнаружено заметное влияние aberrаций третьего порядка. Разработан метод компенсации aberrации миопического глаза, описываемых полиномами Цернике, с учётом возможности коррекции только передней поверхности роговицы. Численно показано, что при коррекции выделенных aberrаций передней поверхности роговицы для миопии средней степени СКО aberrированной ФРТ от эталонной (картина Эйри) уменьшается с 0,019 (что в 2 раза превышает показатели для здорового глаза) до 0,0025.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с совершенствованием разработанных методов, улучшением алгоритмов цифровой обработки сложной картины распределения интенсивности в фокальной плоскости многоканального дифракционного оптического элемента и разработкой аппаратной реализации датчика aberrаций волнового фронта на основе перестраиваемого многоканального элемента, реализованного на пространственном модуляторе света.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Статьи в реферируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:**

1 **Хорин П.А.** Анализ aberrаций роговицы человеческого глаза / **П.А. Хорин**, С.Н. Хонина, А.В. Карсаков, С.Л. Бранчевский // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 810-817. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-810-817;

2 **Хорин П.А.** Выделение информативных признаков на основе коэффициентов полиномов Цернике при различных патологиях роговицы человеческого глаза / **П.А. Хорин**, Н.Ю. Ильясова, Р.А. Парингер // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 159-166. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-159-166;

3 **Хорин, П.А.** Оптическое детектирование величины отдельных aberrаций при помощи многоканального фильтра, согласованного с фазовыми функциями Цернике / **П.А. Хорин**, С.Г. Волотовский, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 525-533. – DOI: 10.18287/2412-6179-СО-906;

### **Статьи в реферируемых журналах и изданиях, индексируемых реферативными базами данных Web of Science / Scopus:**

1 Kirilenko M.S. Wavefront analysis based on Zernike polynomials / M.S. Kirilenko, **P.A. Khorin**, A.P. Porfirev // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 66-75. – DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-66-75;

2 **Khorin P.A.** Wavefront aberration analysis with a multi-order diffractive optical element / **P.A. Khorin**, S. A. Degtyarev // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1900. – P. 28-33. – DOI: 10.18287/1613-0073-2017-1900-28-33;

- 3 **Khorin P.A.** Increasing the resolution of the aberrated optical system based on quadratic amplitude apodization / **P.A. Khorin**, S.A. Fomchenkov // Journal of Physics: Conference Series IOP JPCS. – 2018, – V. 1124, P. 051004. – DOI: 10.1088/1742-6596/1124/5/051004;
- 4 **Khorin P.A.** Analysis wavefront propagating in free space based on the Zernike polynomials and Gauss-Laguerre modes expansion / **P.A. Khorin** // Journal of Physics: Conference Series IOP JPCS. – 2019. – V. 1096. – P. 012104. – DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012104;
- 5 **Khorin, P.A.** Phase contrast Zernike method with dynamic transparent application / **P.A. Khorin**, S.V. Karpeev // Proceedings of SPIE. – 2019. – V. 1146. P. 111460S. – DOI: 10.1117/12.2527258;
- 6 **Khorin, P.** Generation of scalable wavefront for testing optical systems / **P.A. Khorin**, S.N. Khonina, V.V. Podlopnov // Proceedings of SPIE. – 2020. – V. 11516. P. 115161K. – DOI: 10.1117/12.2566224;
- 7 Volotovskiy S.G. Application of an Optimization Algorithm for Recognizing Wavefront Aberrations from the PSF Picture / S.G. Volotovskiy, **P.A. Khorin** // IEEE Xplore 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2020. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271529;
- 8 **Khorin P.A.** Analysis of the threshold sensitivity of a wavefront aberration sensor based on a multi-channel diffraction optical element / **P.A. Khorin**, S.G. Volotovskiy // Proc. SPIE. – 2021. – V. 11793. – P. 117930B. – DOI: 10.1117/12.2588188;
- 9 **Khorin P.A.** Neural networks application to determine the types and magnitude of aberrations from the pattern of the point spread function out of the focal plane / **P.A. Khorin**, A.P. Dzyuba, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2086, №1. – 012148. – DOI: 10.1088/1742-6596/2086/1/012148;
- 10 Khonina, S.N. Modern types of axicons: New functions and applications / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, **P.A. Khorin**, M.A. Butt // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 19. – 6690. – DOI: 10.3390/s21196690;
- 11 **Khorin, P.A.** Iterative algorithm for wavefront correction based on optical decomposition in wave aberrations / **P.A. Khorin** // IEEE Xplore 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – 2021. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649209;
- 12 **Khorin, P.A.** Adaptive detection of wave aberrations based on the multichannel filter / **P.A. Khorin**, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Photonics. – 2022. – V. 9, №3. – 204. – DOI: 10.3390/photonics9030204;
- 13 Khonina, S.N. Analysis of the wavefront aberrations based on neural networks processing of the interferograms with a conical reference beam / S.N. Khonina, **P.A. Khorin**, P.G. Serafimovich, A.P. Dzyuba, A.O. Georgieva, N.V. Petrov // Applied physics B. – 2022. – V. 128. – 60. – DOI: 10.1007/s00340-022-07778-y;
- 14 **Khorin, P.A.** Detection enhancement of the optical medium spatial anisotropy using the lens supplemented with a diffractive axicon / **P.A. Khorin**, S.N. Khonina // Proc. SPIE. – 2022. – P. 12193. – DOI: 10.1117/12.2622375.