



ИНСТИТУТ  
ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ  
им. В.Е. ЗУЕВА СО РАН

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева  
Сибирского отделения  
Российской академии наук  
(ИОА СО РАН)

пл. Академика Зуева, д. 1, г. Томск, 634055  
тел.: (3822) 492-738, факс: (3822) 492-086  
email: contact@iao.ru, www.iao.ru  
ОКПО 03534050, ОГРН 1027000880268  
ИНН/КПП 7021000893/701701001

УТВЕРЖДАЮ



Директор Института оптики  
атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
Д.Ф.И.н., чл.-корр. РАН

И.В. Пташник

10 августа 2026 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Халилова Сервера Искандаровича «Определение орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра–Гаусса», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

#### Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Халилова С.И. посвящена разработке и экспериментальной реализации метода определения орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра–Гаусса и исследованию их преобразований в астигматических оптических системах.

В настоящее время развитие структурированной оптики требует не только формирования световых пучков с заданными пространственными и орбитальными характеристиками, но и создания эффективных методов их диагностики. Существующие интерференционные, дифракционные и голографические методы позволяют определять отдельные характеристики вихревых пучков, однако их применение нередко связано с усложнением измерительной схемы и проведением дополнительных оптических преобразований. Поэтому актуальной задачей является разработка методов, позволяющих по непосредственно регистрируемым распределениям интенсивности получать информацию об орбитальном состоянии структурированного пучка и проследивать его изменение при прохождении оптической системы. В этом отношении использование моментов интенсивности второго порядка и представление состояния пучка на орбитальной сфере Пуанкаре представляют перспективную основу для построения такой диагностики. Диссертация С.И. Халилова направлена на решение данной задачи применительно к структурированным пучкам Лагерра–Гаусса и их астигматическим преобразованиям.

Таким образом, выполненное исследование направлено на развитие методов измерения и анализа орбитальных состояний структурированного света. Решаемые в диссертации задачи являются актуальными для современной оптики и имеют как фундаментальное, так и практическое значение.

Входящий № 101-4441  
Дата 28 АВГ 2026  
Самарский университет

## **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа изложена на 138 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 165 наименований. Работа содержит 37 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, приведены сведения о теоретической и практической значимости, достоверности результатов и личном вкладе автора.

В **первой главе** рассмотрены структурированные пучки Лагерра-Гаусса с двумя управляющими параметрами и исследовано изменение их орбитального углового момента при простом и общем астигматизме. Показано влияние радиального числа на характер осцилляций и величину орбитального углового момента оптического поля (ОУМ). Установлено, что поворот цилиндрической линзы позволяет управлять ОУМ структурированного пучка. Теоретические результаты подтверждены экспериментально.

Во **второй главе** разработан и экспериментально реализован метод определения орбитальных параметров Стокса на основе анализа моментов интенсивности второго порядка. Для определения орбитальных параметров Стокса  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  используются два распределения интенсивности. Полученные значения этих параметров позволяют представить состояние пучка на орбитальной сфере Пуанкаре.

В **третьей главе** исследовано преобразование структурированных пучков в системе, состоящей из двух сферических линз и расположенной между ними цилиндрической линзы. Определены положения двух критических плоскостей, исследовано соответствующее преобразование траектории состояния пучка на орбитальной сфере Пуанкаре и реализован модифицированный метод определения орбитальных параметров Стокса. Получено соотношение между астигматической фазой Гуи и параметрами  $S_2$ ,  $S_3$ , проведена его экспериментальная проверка.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## **Научная новизна полученных результатов**

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан и экспериментально реализован метод определения орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра-Гаусса по моментам интенсивности второго порядка, вычисляемым по двум зарегистрированным распределениям интенсивности: в фокусе сферической линзы и в двойном фокусе цилиндрической линзы. Метод позволяет определить орбитальных параметров Стокса  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и представить состояние пучка на орбитальной сфере Пуанкаре.

2. В системе из двух сферических и одной цилиндрической линзы выявлены две критические плоскости, в которых происходят характерные

преобразования пространственной структуры пучка. Установлено, что на орбитальной сфере Пуанкаре этим плоскостям соответствуют поворот траектории состояния на  $90^\circ$  и ее последующее обратное вращение. Показана возможность использования этих плоскостей для определения орбитальных параметров Стокса.

3. Получено и экспериментально подтверждено соотношение  $\Gamma_{xy} = \arctg(S_3/S_2)$ , связывающее астигматическую фазу  $\Gamma_{ui}$  с орбитальными параметрами Стокса. Это позволяет определять фазу  $\Gamma_{ui}$  по измеряемым орбитальным характеристикам пучка без применения интерферометрической схемы.

4. Исследовано влияние радиального числа на ОУМ структурированных пучков Лагерра–Гаусса при астигматическом преобразовании. Показано возникновение экстремальных значений ОУМ и возможность управления его величиной посредством поворота цилиндрической линзы. Установлено сохранение инварианта  $\sqrt{S_2^2 + S_3^2}$ .

Полученные результаты обладают научной новизной и соответствуют положениям, выносимым на защиту.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Обоснованность и достоверность результатов обеспечиваются использованием математического аппарата параксиальной волновой оптики, ABCD-матричного формализма, метода моментов интенсивности второго порядка, численного моделирования и экспериментальной проверки полученных зависимостей.

Достоверность выносимых на защиту положений подтверждается следующим:

1. Разработанный метод определения орбитальных параметров Стокса проверен экспериментально для различных состояний структурированных пучков. Погрешность определения параметров Стокса в эксперименте составляла менее 4%, а среднеквадратичная ошибка определения  $S_3$  не превышала 5%.

2. Положения критических плоскостей определены теоретически и экспериментально по моментам интенсивности второго порядка  $W_{xx}$ ,  $W_{yy}$  и  $W_{xy}$ . Расхождение экспериментальных и расчетных результатов не превышало 4%.

3. Соотношение между астигматической фазой  $\Gamma_{ui}$  и параметрами  $S_2$ ,  $S_3$  получено теоретически и проверено экспериментально при смещении плоскости наблюдения относительно расчетного положения. Полученные экспериментальные зависимости согласуются с теоретическими.

4. Зависимость ОУМ от радиального числа и установленные инвариантные характеристики астигматического преобразования подтверждены аналитическими расчетами, численным моделированием и экспериментальными измерениями.

Таким образом, основные положения и выводы диссертации являются достаточно обоснованными и достоверными.

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из которых 13 статей индексируются в базах данных Scopus и Web of Science и опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Зарегистрированы две программы для ЭВМ. Основные результаты работы докладывались на девяти международных и всероссийских научных конференциях и школах.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов и выводов диссертационной работы**

Теоретическая значимость работы заключается в развитии метода моментов интенсивности второго порядка для определения орбитальных параметров Стокса структурированных пучков. Установленная связь орбитальных параметров с астигматической фазой Гуи позволяет описывать фазовую эволюцию пучка через непосредственно измеряемые характеристики. Результаты, касающиеся влияния радиального числа на ОУМ, дополняют представления об орбитальных свойствах структурированных пучков при астигматических преобразованиях.

Практическая значимость определяется разработкой метода, позволяющего определять три орбитальных параметра Стокса по двум распределениям интенсивности без восстановления фазового фронта. В эксперименте показано, что для определения  $S_1$  и  $S_2$  используется первое распределение интенсивности, а для определения  $S_3$  – распределение в плоскости двойного фокуса цилиндрической линзы.

### **Рекомендации по использованию полученных результатов**

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать:

- при разработке методов диагностики структурированных и астигматических лазерных пучков;
- при создании экспериментальных систем измерения орбитального углового момента;
- в исследованиях структурированного света и его преобразований в астигматических оптических системах;
- в учебно-исследовательских лабораториях при подготовке специалистов в области оптики и фотоники.

Разработанный метод может также представлять интерес для систем, использующих орбитальные степени свободы света для обработки информации.

### **Замечания по диссертационной работе**

Диссертация не лишена отдельных недостатков.

1. Метод измерения орбитальных параметров Стокса в рассматриваемой оптической системе требует выполнения условия  $z_0 = 2f_{CL}$  (выполнение измерения на удвоенном фокусном расстоянии). В диссертации не приведена количественная оценка влияния отклонения от этого условия на точность определения параметров Стокса.

2. При рассмотрении асимптотического перехода двухпараметрического сЛГ-пучка к ЭЛГ-пучку используются различные значения амплитудного параметра  $\varepsilon$ . Следовало бы более явно указать критерий, при котором значение  $\varepsilon$  можно считать достаточно большим для реализации предельного состояния  $\varepsilon \gg 1$ . В диссертации данный переход действительно формулируется как асимптотический.

3. При использовании аналогии между цилиндрической линзой и четвертьволновой пластинкой недостаточно подробно пояснена физическая природа астигматической разности фаз  $\Gamma_{\text{уи}}$   $\Gamma_{\text{ху}}$ , возникающей между ортогональными пространственными компонентами пучка.

4. Хотя для реализованной экспериментальной схемы приведены значения погрешности определения орбитальных параметров Стокса, отдельно не исследована зависимость погрешности метода от уровня шума в регистрируемом распределении интенсивности.

5. Не убедительно звучит утверждение, что разработанный метод может также представлять интерес для систем, использующих орбитальные степени свободы света для передачи информации.

Имеются также отдельные замечания по оформлению:

- на рисунке 8 диссертации и соответствующем рисунке 1 автореферата требует уточнения используемая шкала интенсивности;
- на рисунке 6(б) по оси  $\ell_z$  для значений  $-1$  и  $-0,4$  пропущен знак «минус».

### Заключение

В диссертационной работе Халилова Сервера Искандаровича получены новые научные результаты в области формирования, преобразования и диагностики структурированных световых пучков. Разработан и экспериментально реализован метод определения орбитальных параметров Стокса по моментам интенсивности второго порядка, исследованы преобразования орбитальных состояний структурированных пучков Лагерра–Гаусса в астигматических оптических системах, установлена связь астигматической фазы  $\Gamma_{\text{уи}}$  с орбитальными параметрами Стокса и исследовано влияние радиального числа на орбитальный угловой момент.

Полученные результаты теоретически обоснованы, подтверждены численным моделированием и экспериментальными исследованиями. Высказанные замечания не снижают научной и практической ценности выполненной работы.

Диссертационная работа является завершенным научным исследованием и соответствует следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 1.3.6 – Оптика:

- п. 1. «Развитие физических основ волновой оптики, включая физические процессы интерференции, дифракции, поляризации и когерентности света»;

– п. 2. «Принципы формирования световых пучков и электромагнитных полей субволновых масштабов. Структурированный свет, в том числе спиральные пучки. Оптика анизотропных, движущихся, нестационарных сред, металлооптика и плазмоники»;

– п. 4. «Развитие физических основ геометрической оптики. Распространение и преобразование световых пучков. Новые принципы построения оптических систем и инструментов. Явления на границах оптических сред. Фотометрия».

Содержание диссертации соответствует положениям, выносимым на защиту. Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы и ее основные научные результаты.

Диссертация Халилова Сервера Искандаровича «Определение орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра-Гаусса» выполнена на высоком научном уровне, содержит результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью, и отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Халилов Сервер Искандарович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Доклад автора по диссертации заслушан на заседании семинара отделения распространения оптических волн Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) 05.08.2026 г.

Проект отзыва ведущей организации на диссертационную работу обсужден и одобрен на семинаре отделения распространения оптических волн ИОА СО РАН. Присутствовало: 15 членов СУС Отделения распространения оптических волн ИОА СО РАН (из них 9 докторов наук, 6 кандидатов наук).

Результаты голосования «за» - 15, «против» - 0, «воздержалось» - 0, протокол № 5 от 05.08.2026.

Отзыв составил:

Зав. лаб. ЛКАО, ИОА СО РАН

д.ф.-м.н., профессор

e-mail: lukin@iao.ru,

тел. 8(3822)492606

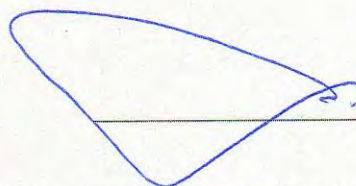


В.П. Лукин

Подпись д.ф.-м.н. Лукина В.П. заверяю

Ученый секретарь ИОА СО РАН,

к.ф.-м.н.



Т.Е. Кураева

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)

Адрес: 634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1.