



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

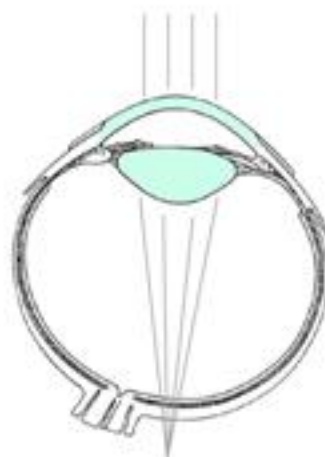
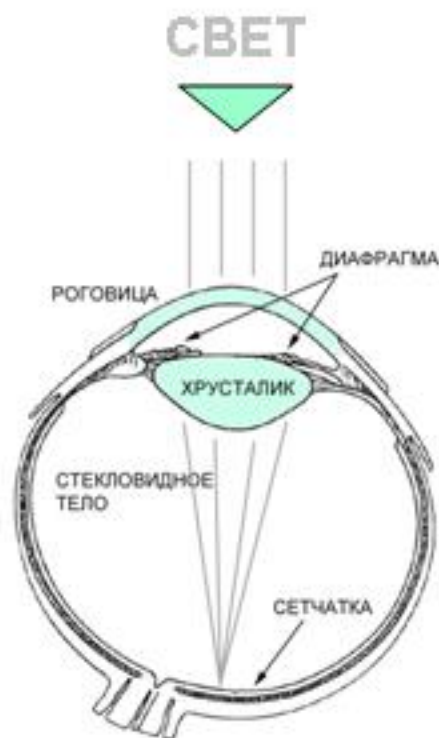


МОДАЛЬНАЯ ТОМОГРАФИЯ АБЕРРАЦИЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА

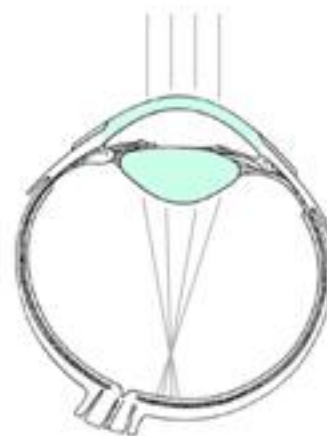
Гончаров А.С., Ларичев А.В.
Физический Факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

- Введение
- Метод модальной томографии
- Результаты численного моделирования
- Результаты эксперимента
- Заключение

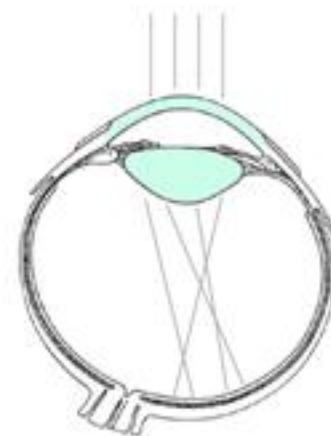
ВВЕДЕНИЕ. Глаз человека. Нарушения зрения



дальнозоркость



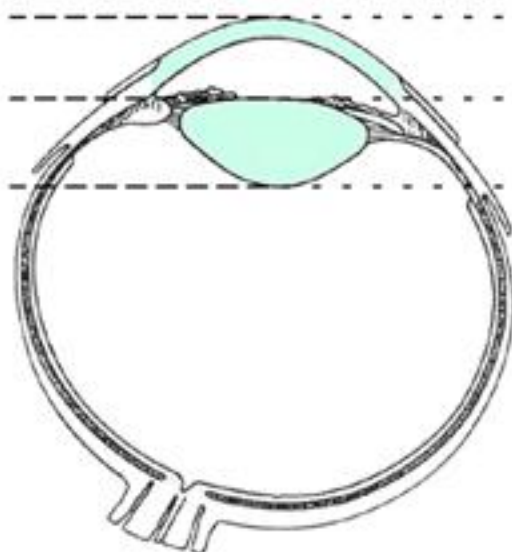
близорукость



абберации
высоких
порядков

ВВЕДЕНИЕ. Локализация источников аберраций

Основные
источники
аббераций



Роговица
Хрусталик (передн. пов.)
Хрусталик (задн. пов.)

АВТОРЕФРАКТОРЫ

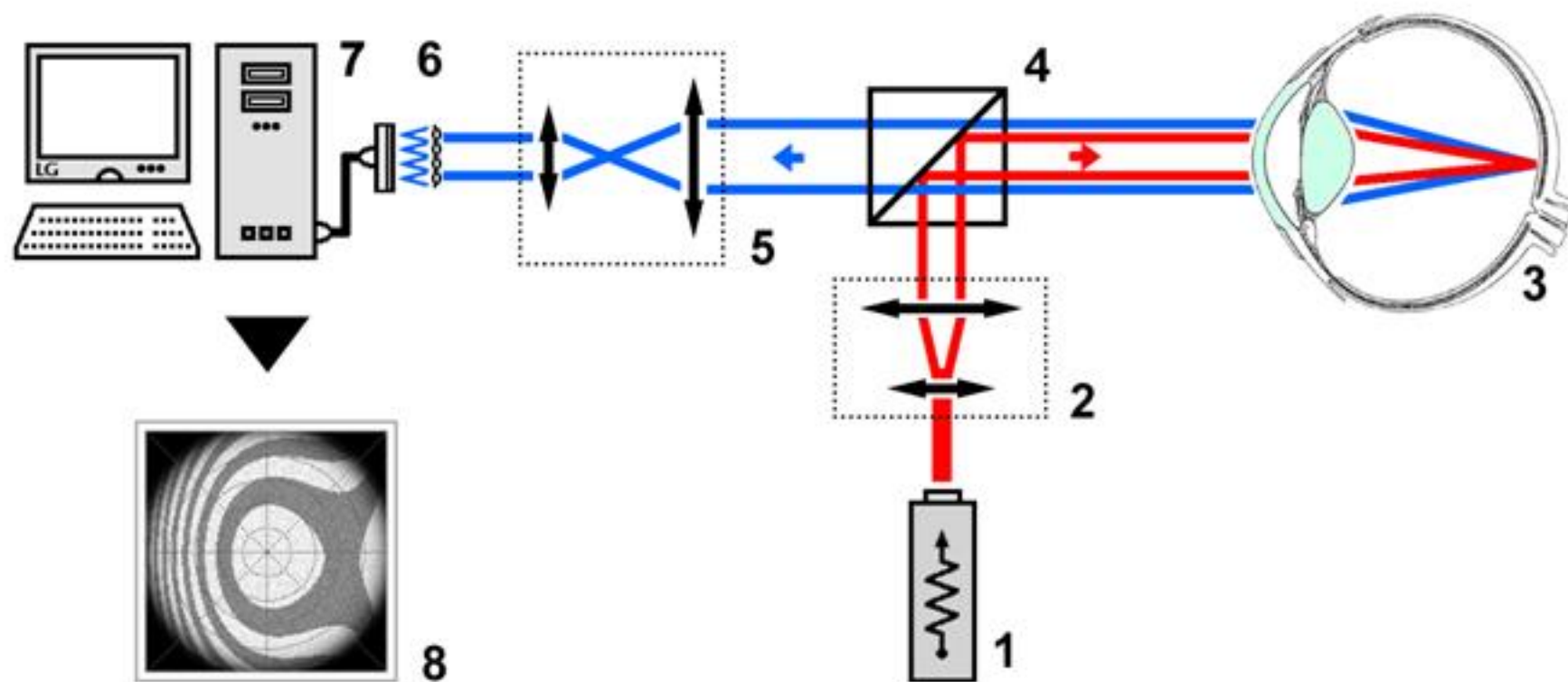
КОРНЕАЛ-ТОПОГРАФЫ

Система Шака-Гартманна



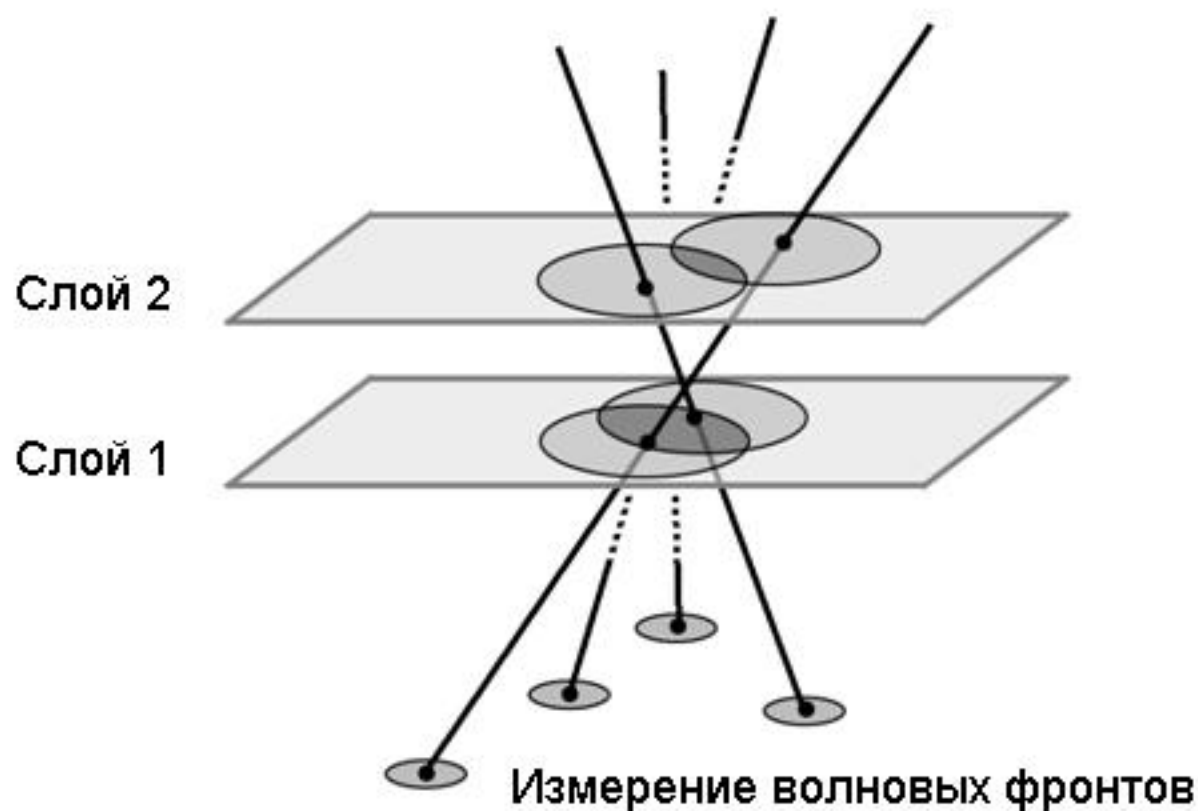
НЕ ПОЗВОЛЯЮТ
ЛОКАЛИЗОВАТЬ
ИСТОЧНИКИ АБЕРРАЦИЙ

ВВЕДЕНИЕ. Метод измерения аберраций глаза



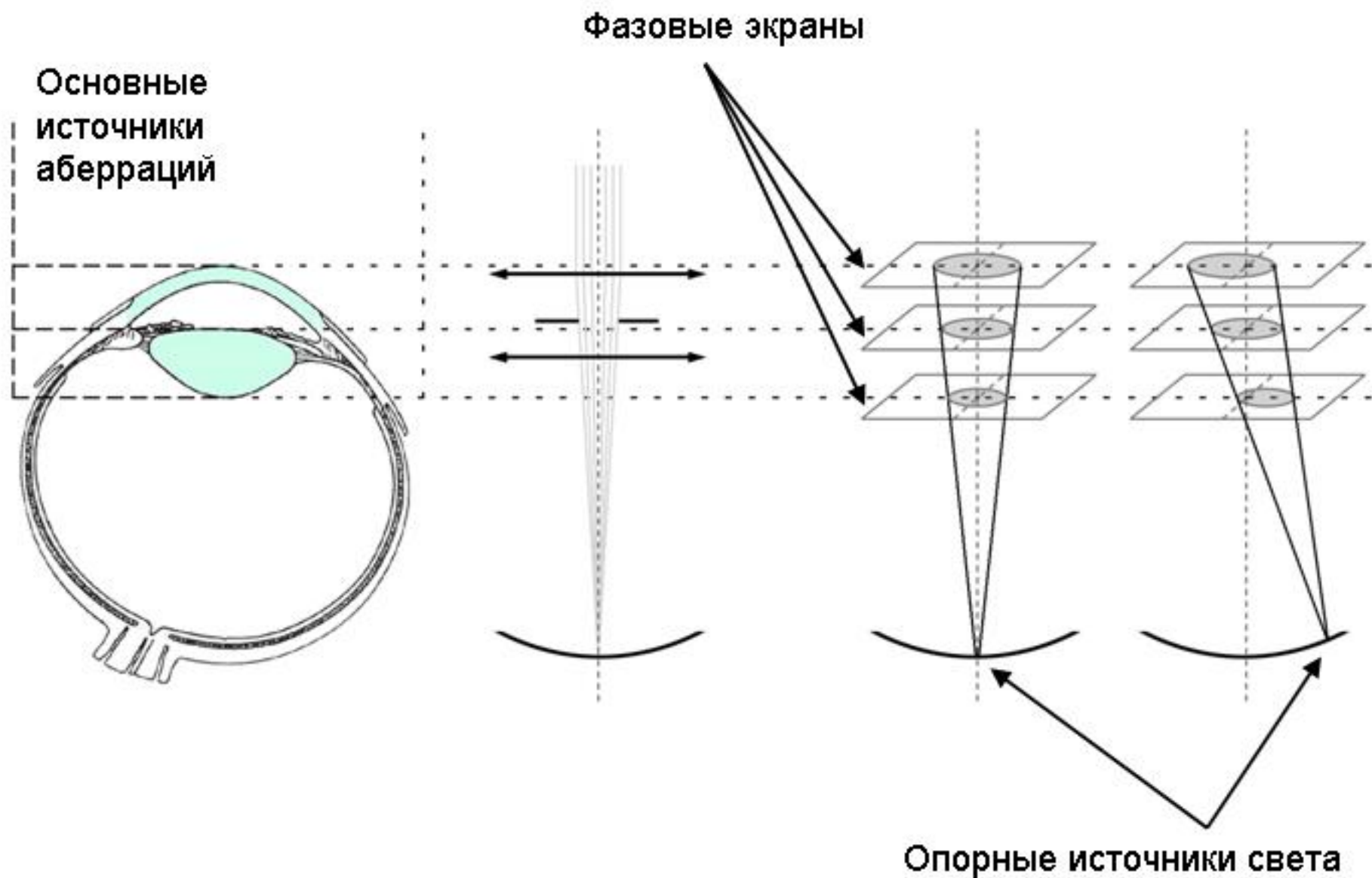
1. Лазер 2. Коллиматор 3. Глаз 4. Кубик 5. Объектив
6. Датчик Шака-Гартманна 7. ПК
8. Восстановленный волновой фронт

ВВЕДЕНИЕ. Метод модальной томографии в атмосфере

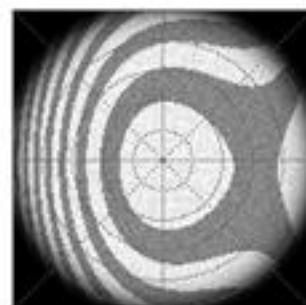
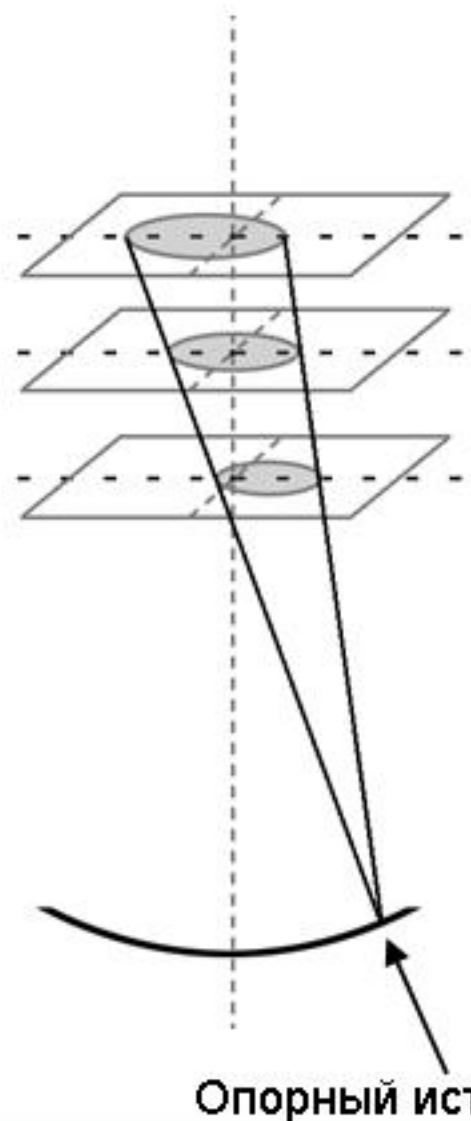


МЕТОД ПОЗВОЛЯЕТ РАЗДЕЛИТЬ ВКЛАД ОТДЕЛЬНЫХ ИСКАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СУММАРНЫЕ АБЕРРАЦИИ

МЕТОД МОДАЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ. Измерение



МЕТОД МОДАЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ. Измерение



РЕЗУЛЬТАТ ОДНОГО
ИЗМЕРЕНИЯ

Tip	1.34
Tilt	0.22
Astig.	0.21
Def.	1.05
Astig.	-0.15
Tref.	0.05
Coma	-0.20

$$\Phi^g(x, y) = \sum_{i=0}^N f_i^g Z_i^0(x', y')$$

Опорный источник света

МЕТОД МОДАЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ. Измерение

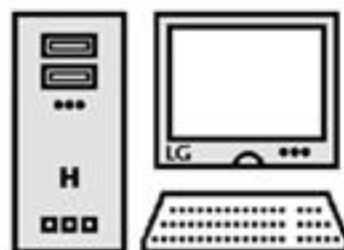
РЕЗУЛЬТАТ НЕСКОЛЬКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

КОЭФФИЦИЕНТЫ
РАЗЛОЖЕНИЯ ФАЗОВЫХ
ЭКРАНОВ

Матрица C

Tip	1.34	0.15	0.93	1.01
Tilt	0.22	1.12	1.36	0.92
Astig.	0.21	0.36	0.41	0.29
Def.	1.05	1.12	0.70	0.89
Astig.	-0.15	-0.34	-0.22	-0.19
Tref.	0.05	0.21	0.17	0.07
Coma	-0.20	-0.11	-0.09	-0.21

$$BX=C$$

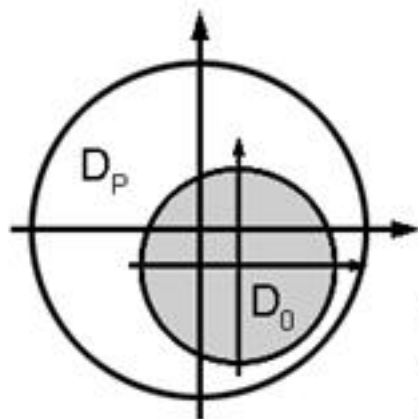


Матрица X

Tip	1.34	0.15	0.93
Tilt	0.22	1.12	1.36
Astig.	0.21	0.36	0.41
Def.	1.05	1.12	0.70
Astig.	-0.15	-0.34	-0.22
Tref.	0.05	0.21	0.17
Coma	-0.20	-0.11	-0.09

Матрица B

$$b_{ij}^{pg} = \iint_{D_0} Z_i^p(x_p^g, y_p^g) Z_j^0(x, y) dx dy$$

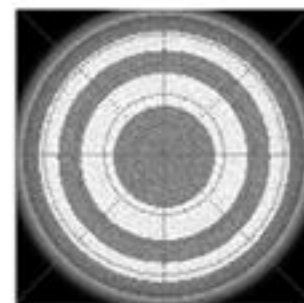
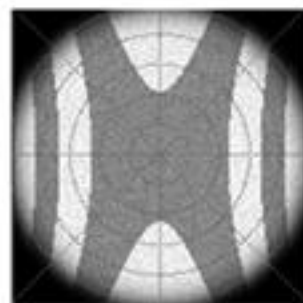
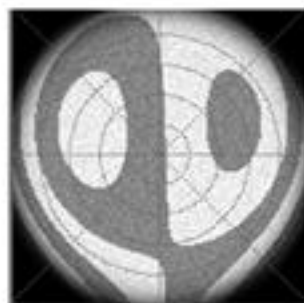


коэффициенты выражения полиномов,
определенных в области D_1 через полиномы,
определенные в области D_0

МЕТОД МОДАЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ. Измерение

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗЛОЖЕНИЯ ФАЗОВЫХ ЭКРАНОВ

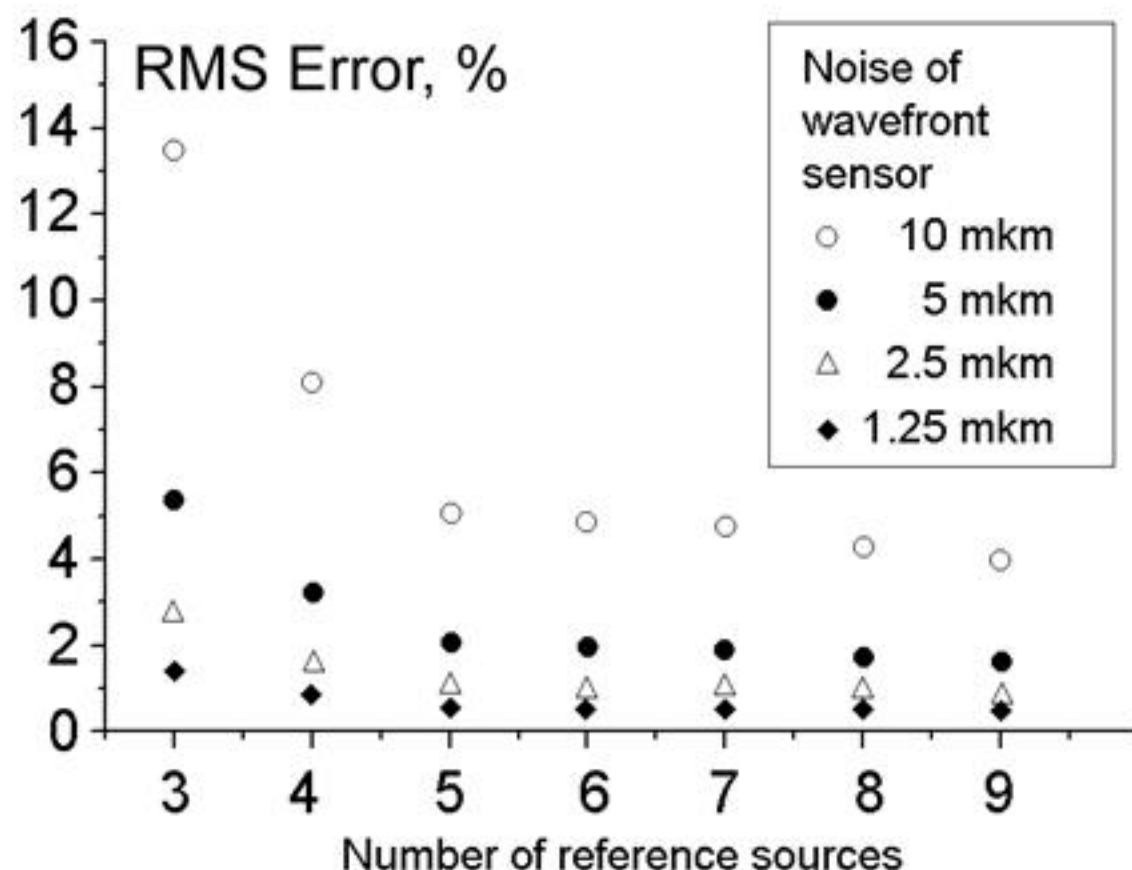
Tip	1.34	0.15	0.93
Tilt	0.22	1.12	1.36
Astig.	0.21	0.36	0.41
Def.	1.05	1.12	0.70
Astig.	-0.15	-0.34	-0.22
Tref.	0.05	0.21	0.17
Coma	-0.20	-0.11	-0.09



ВОССТАНОВЛЕННЫЕ АБЕРРАЦИИ:

1. Роговица
2. Хрусталик (передняя поверхность)
3. Хрусталик (задняя поверхность)

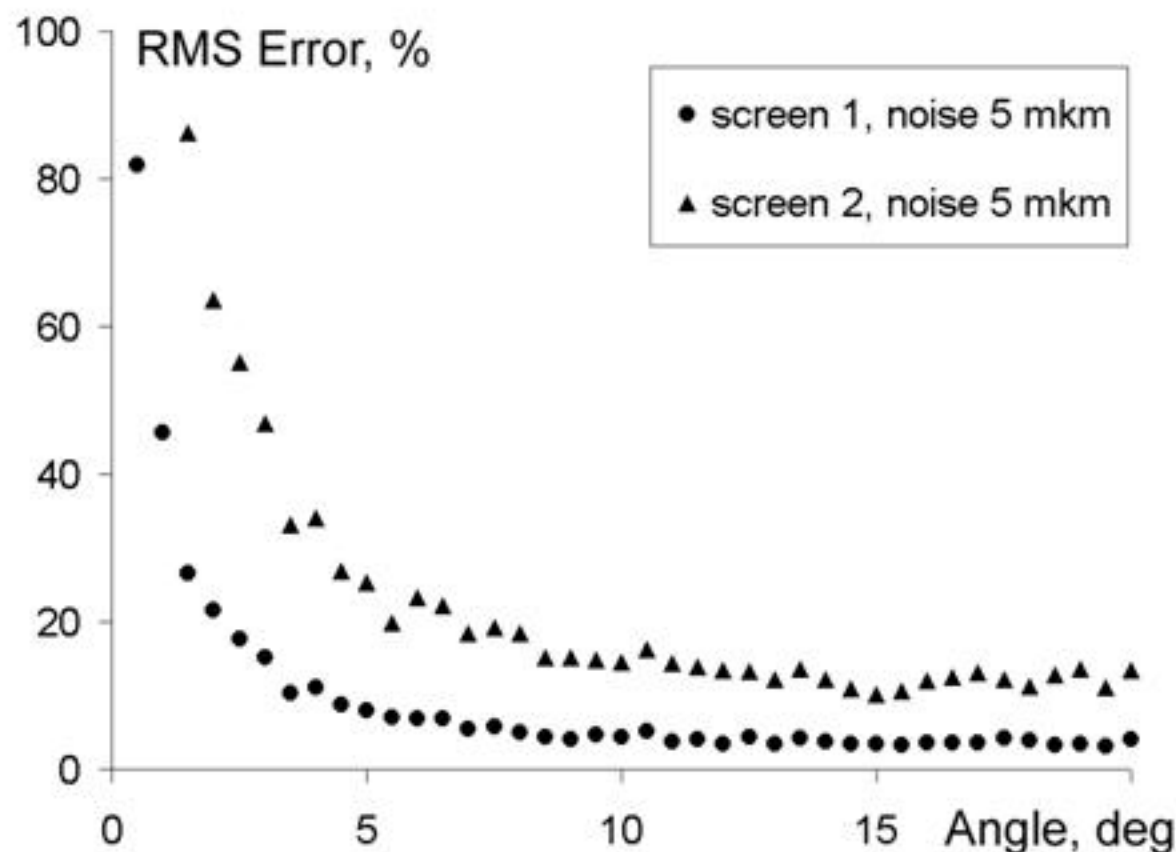
РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Среднеквадратичная ошибка восстановления фазовой функции в зависимости от количества опорных источников

Вычисления проводились с шумящим датчиком волнового фронта Шака-Гартманна (при стандартном отклонении позиции фокальных пятен 1.25, 2.5, 5 и 10 мкм, фокусное расстояние линзового растра 5 мм)

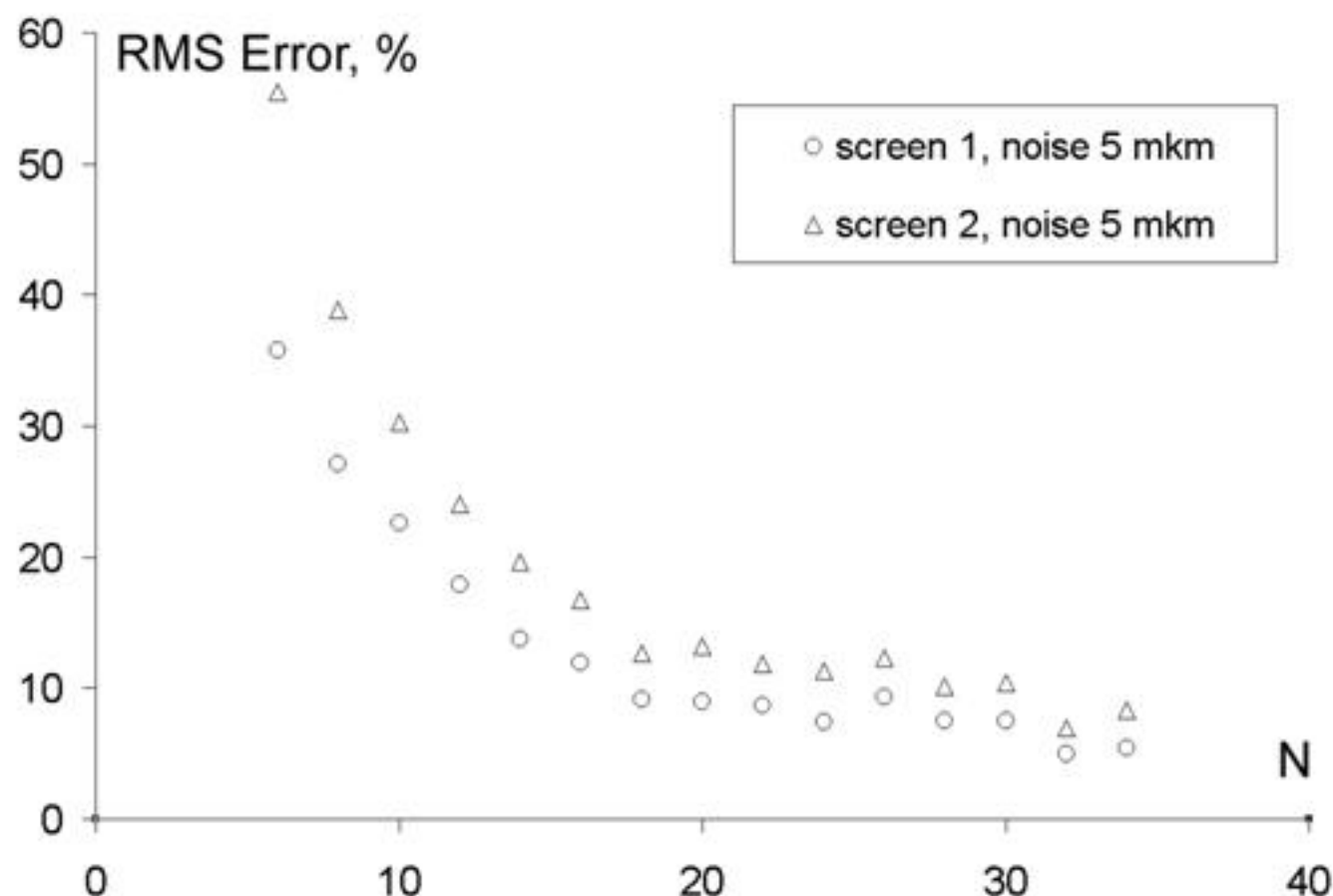
РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Среднеквадратичная ошибка восстановления фазовой функции в зависимости от углового расположения опорных источников света
Модель глаза с двумя фазовыми экранами

Вычисления проводились с шумящим датчиком волнового фронта Шака-Гартманна (при стандартном откл. позиции фокальных пятен 5 мкм, фокусное расст. линзового раstra 5 мм)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Среднеквадратичная ошибка восстановления фазовой функции в зависимости от количества субапертур датчика Шака-Гартмана на диаметр пучка ($N \times N$)

Вычисления проводились с шумящим датчиком волнового фронта Шака-Гартманна (при стандартном откл. позиции фокальных пятен 5 мкм, фокусное расст. линзового растра 5 мм)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

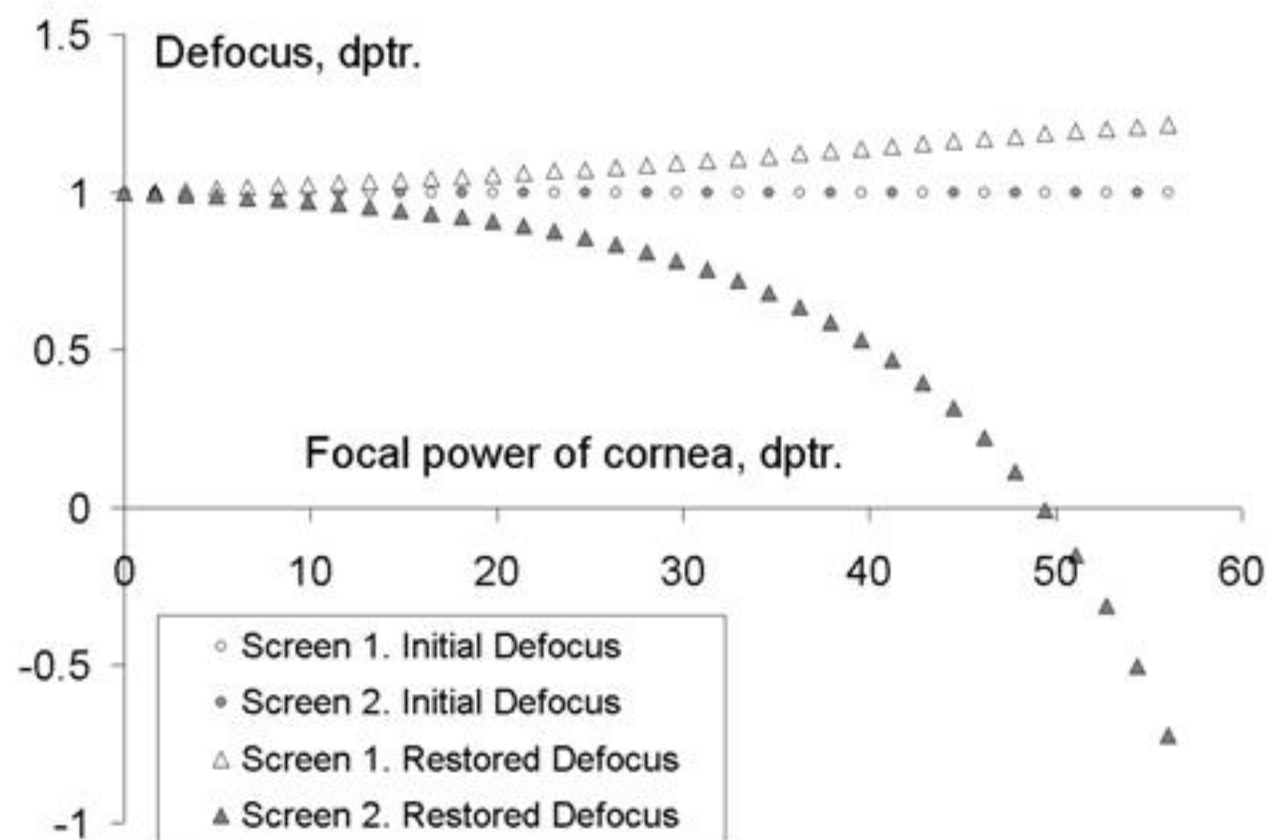


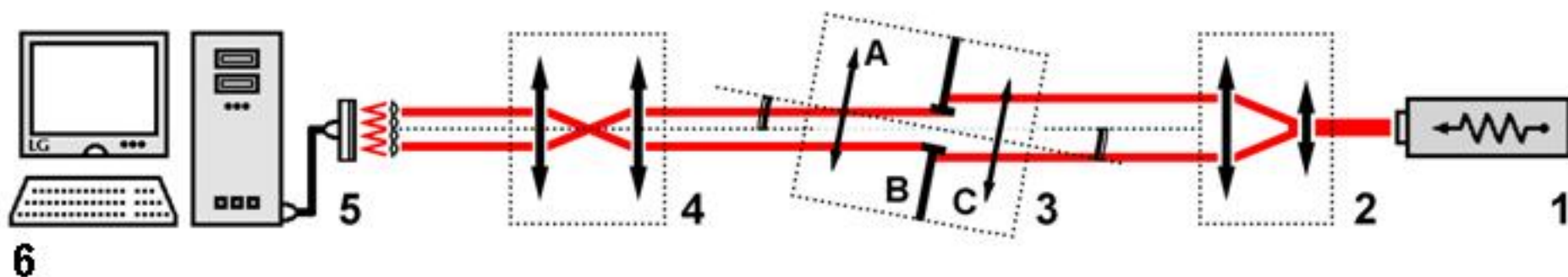
Иллюстрация влияния оптической силы роговицы на точность восстановления фазовых функций в случае неучёта происходящего изменения хода лучей:

Исходный и восстановленный дефокус в зависимости от оптической силы роговицы

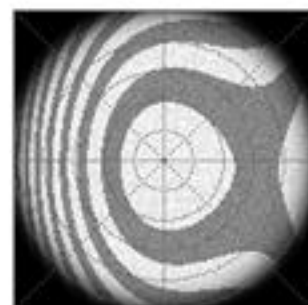
Вычисления проводились с нешумящим датчиком волнового фронта Шака-Гартманна

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА. Установка первая

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА



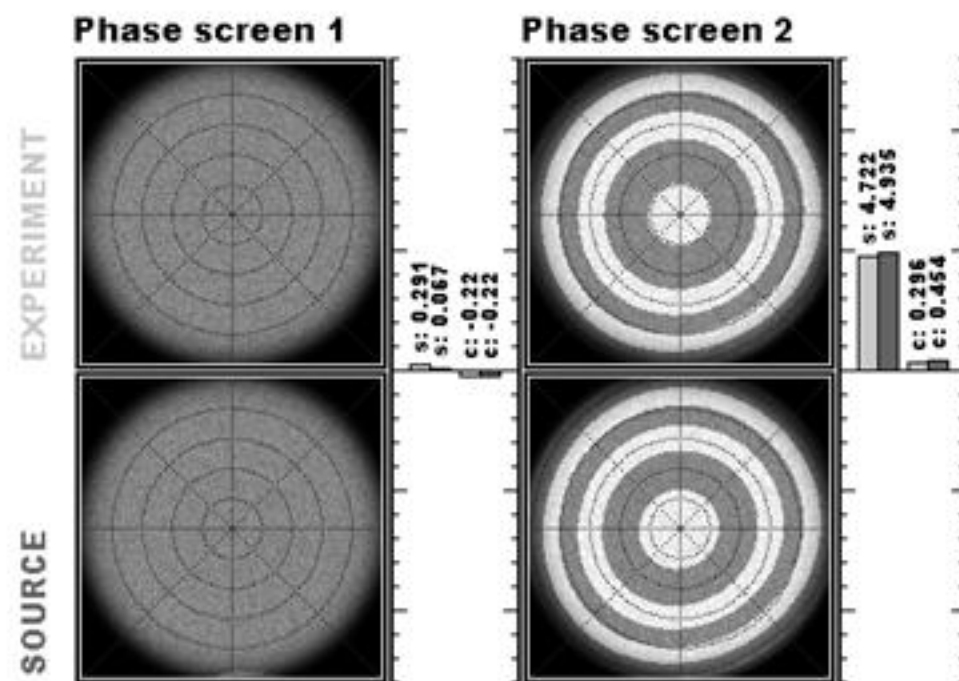
6



7

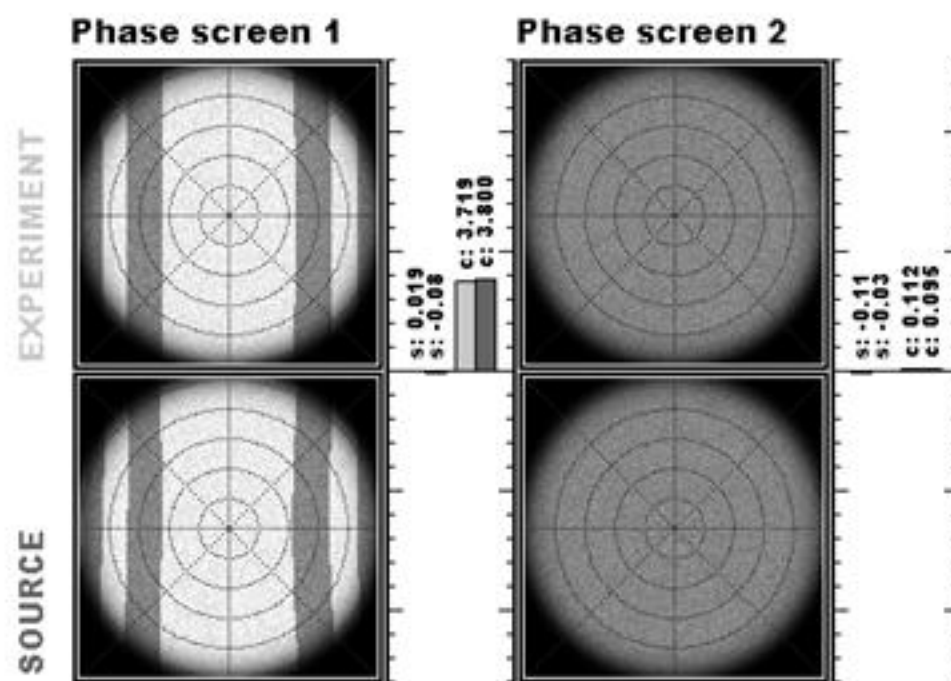
1. Лазер
2. Коллиматор
3. Глаз:
A) передняя линза B) диафрагма C) задняя линза
4. Объектив
5. Датчик Шака-Гартманна
6. ПК
7. Данные одного измерения

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 1



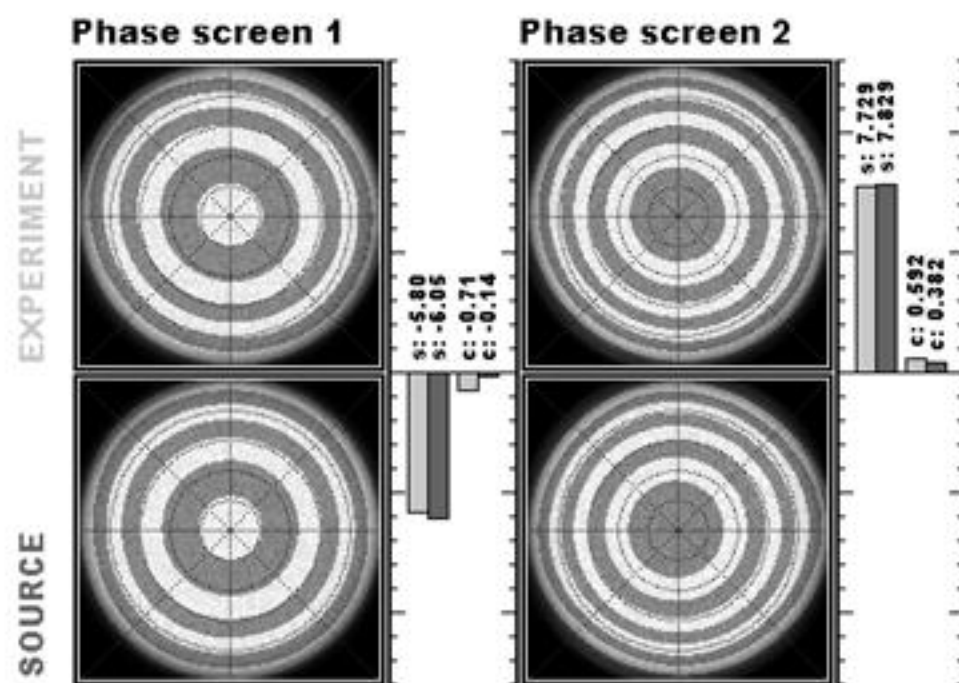
Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 1



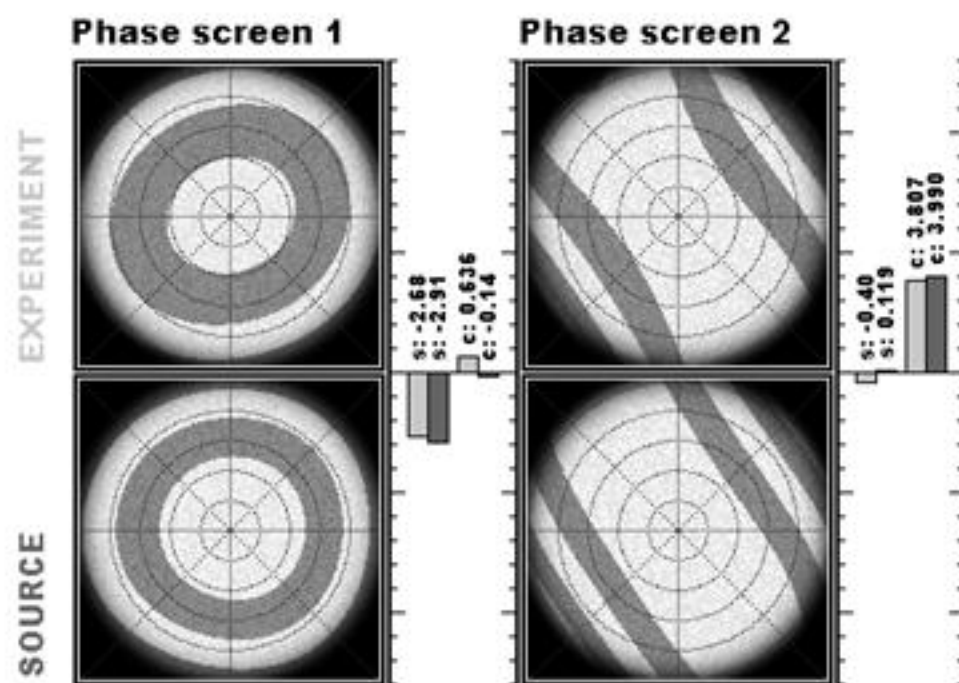
Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 1



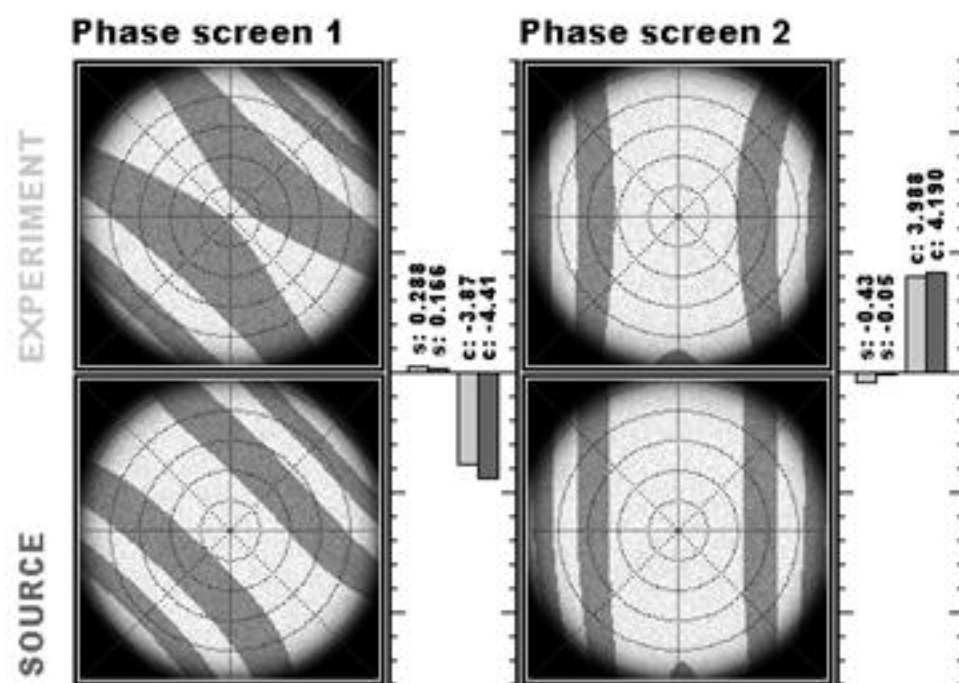
Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 1



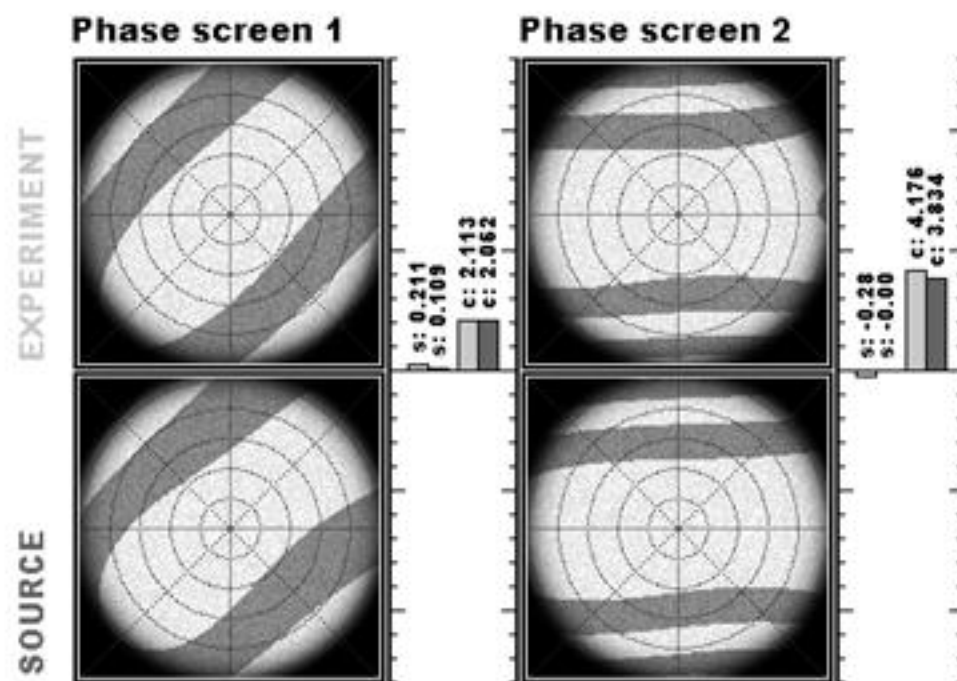
Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 1



Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

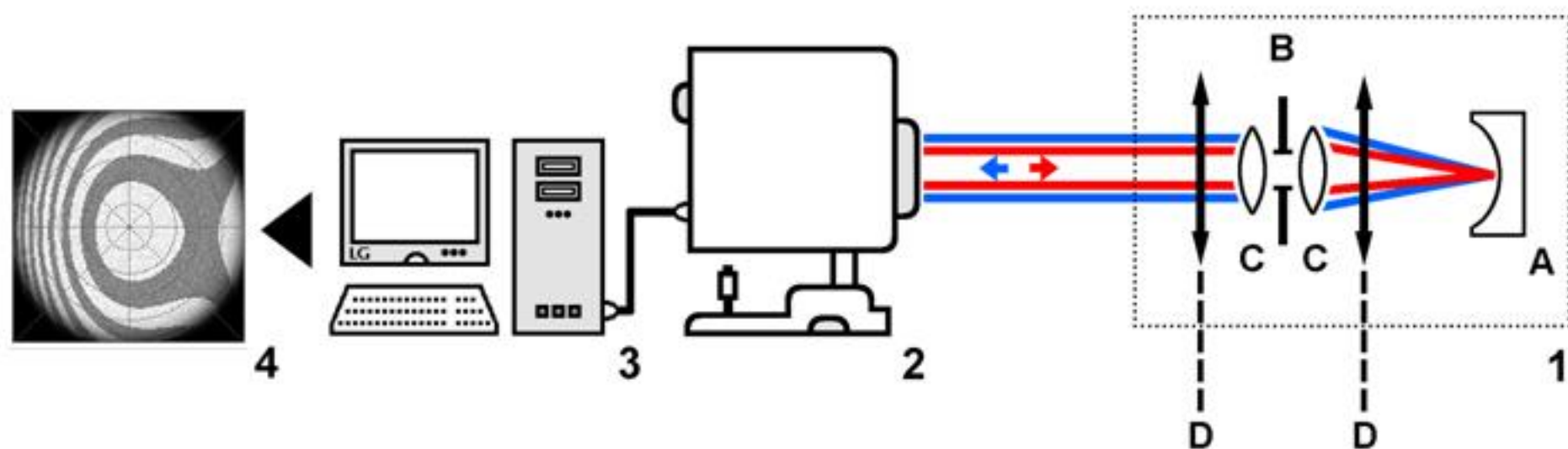
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 1



Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА. Установка вторая

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА



1. Искусственный глаз:

А) стекловолоконная шайба (сетчатка)

В) диафрагма (зрачок)

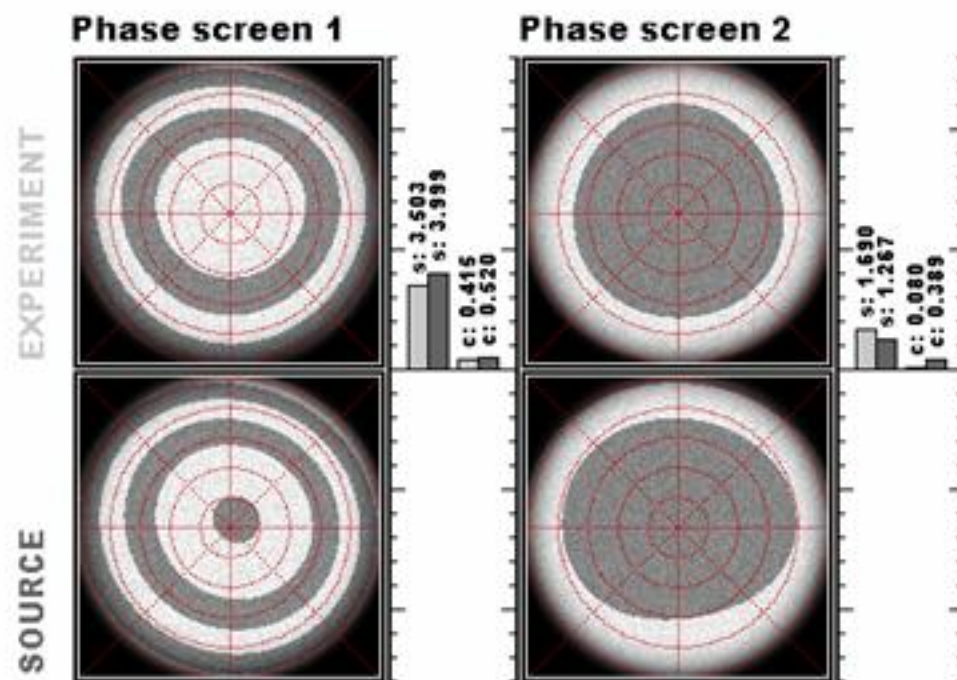
С) линзы (роговица и хрусталик)

Д) фазовые экраны

2. Аберрометр

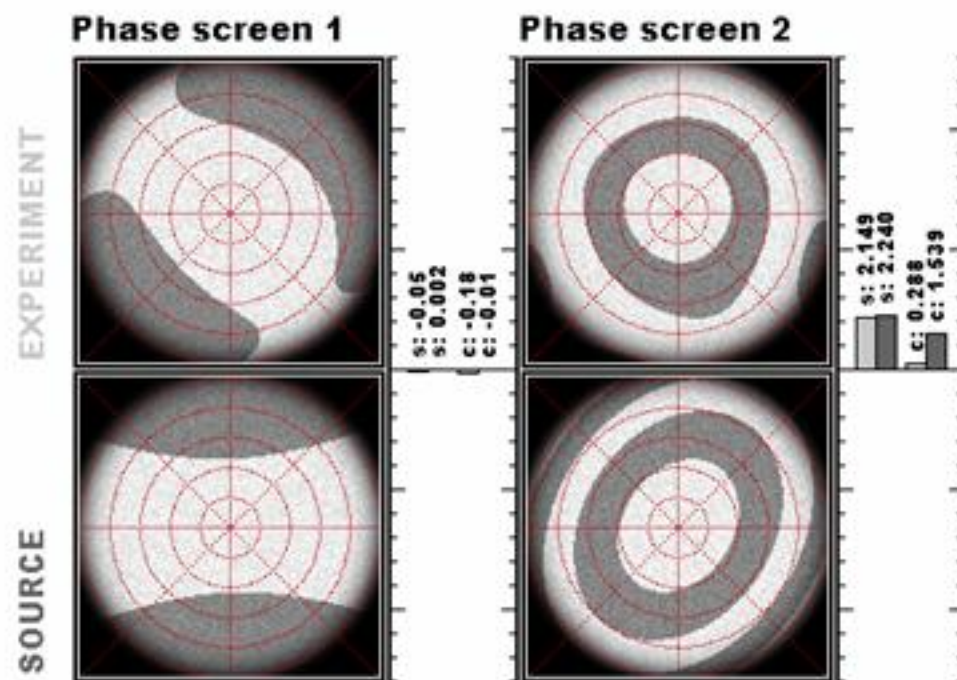
3. ПК 4. Данные одного измерения

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 2



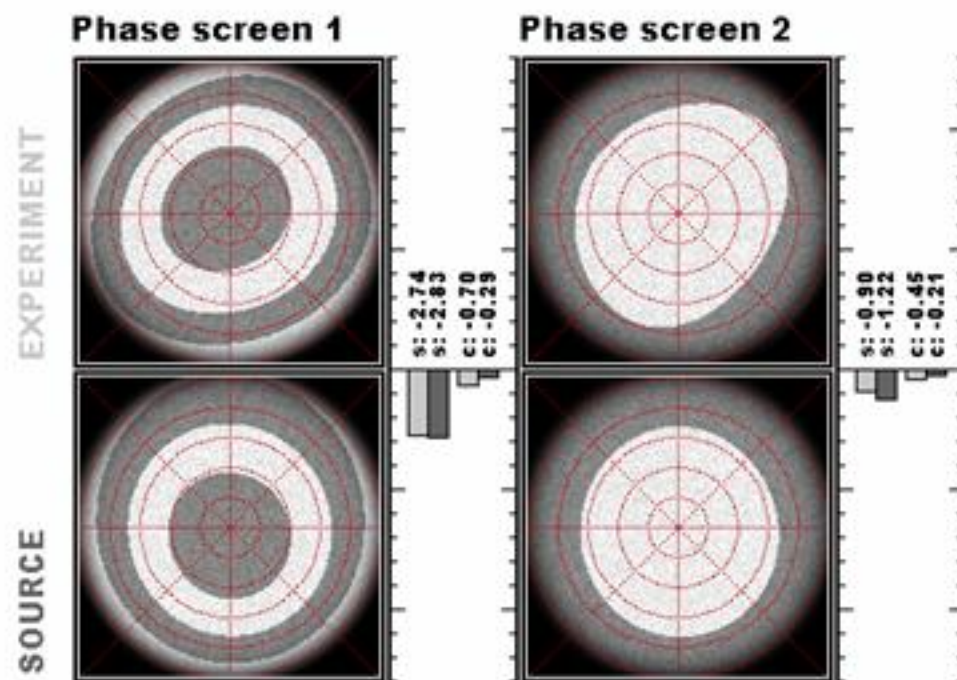
Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 2



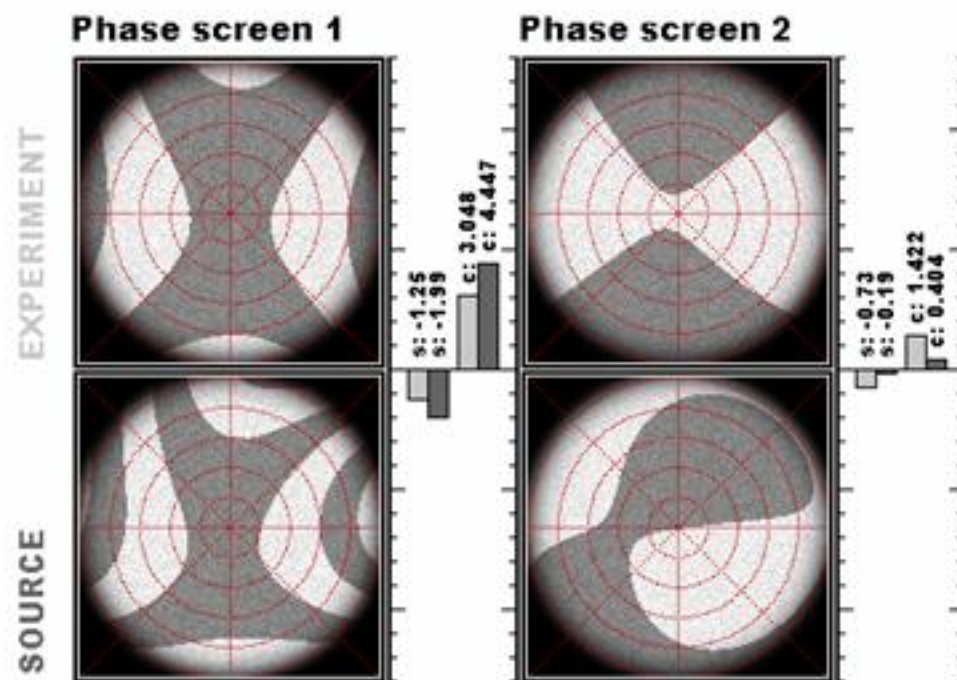
Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 2



Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА 2



Результаты экспериментов по восстановлению функций фазовых экранов.
Волновые фронты исходного и восстановленного фазовых экранов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных данных показывает эффективность методов модальной томографии применительно к модели глаза.

Результаты эксперимента согласуются с результатами численного моделирования и показывают возможность разделения аберраций между их источниками.

Рассматривая результаты численного моделирования, можно сделать несколько выводов по поводу оптимальных параметров модели и условий экспериментов:

- Оптимальным числом субапертур на диаметр апертуры датчика является число 10-15, так как дальнейшее увеличение этого числа влияет совсем не значительно на точность восстановления.
- Для датчиков волнового фронта со среднеквадратичной ошибкой определения волнового фронта не превышающей $1/5$ длины волны оптимальное число опорных источников для двухэкранной модели является 3 и 5 — для трехэкранной.
- Оптимальный диапазон углов к оси глаза, под которыми расположены опорные источники, равен от 5 до 15 градусов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Гончаров А.С., Ларичев А.В.
Физический Факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

goncharov@bk.ru, larichev@optics.ru
www.optics.ru