

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра оптики и биофотоники

**Исследование статистики лазерных спекл-полей при распространении
лазерного излучения в неоднородной среде с управляемым многократным
рассеянием**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2223 группы
направления 03.04.02 «Физика»
Института физики
Харченко Антона Андреевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н., профессор



дата, подпись

В. В. Тучин

Заведующий кафедрой

профессор, д.ф.-м.н., доцент



дата, подпись

В. В. Тучин

Саратов 2023 год

ВВЕДЕНИЕ

Спекл, спекл-структура— случайная интерференционная картина, которая образуется при взаимной интерференции когерентных волн, имеющих случайные сдвиги фаз и/или случайный набор интенсивностей. На такой картине, как правило, можно отчётливо наблюдать светлые пятна, крапинки (их и называют спеклами), которые разделены тёмными участками изображения.

Спекл-картина образуется, например, при когерентном освещении случайно-неоднородных объектов, таких, как шероховатая поверхность, или при пропускании когерентного излучения через прозрачную среду с флуктуирующим в пространстве показателем преломления. Когерентное излучение может быть реализовано как лазерами, так и обычными источниками света широкого спектрального диапазона с протяжённым телом светимости, излучающим частично когерентный свет с малой длиной временной когерентности и малой областью пространственной когерентности.

В общем случае существует два типа спеклов: субъективные спеклы, которые получаются в пространстве изображений оптической системы (включая глаз), и объективные спеклы, которые формируются в свободном пространстве и обычно наблюдаются на экране, расположенном на некотором расстоянии от объекта. Поскольку большинство биообъектов оптически неоднородны, освещение их когерентным светом всегда вызывает появление спекл-структур, которые либо искажают результаты измерений и, следовательно, должны быть каким-либо образом исключены, либо несут новую информацию о структуре и движении биообъекта и его компонентов.

Здесь мы обсудим, в основном, возможность извлечения информации из спекл-поля.

Так, в актуальных статьях представлена система мульти-спекловой диффузной корреляционной спектроскопии для измерения кровотока в мозге здорового взрослого человека. В отличие от методов, где измеряется автокорреляционная функция интенсивности нескольких спеклов, используется камера с низкой частотой кадров для измерения автокорреляции с использованием многошагового интегрального метода Вольтера (МИМВ).

Показано моделирование методом Монте-Карло описан эксперимент по лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ) кровотока в толстой ткани. Используя метод Монте-Карло теоретически сравнены представления спекл-полей в виде прошедшего и отраженного излучения.

Пространственно-взвешенный фильтр был использован в диффузно-корреляционной томографии (ДКТ) для удаления нежелательной экстрацеребральной интерференции и других артефактов, и получения большей глубины локализации реконструированного изображения кровотока. В недавних работах показана возможность моделирования лазерных спеклов на основе стохастических дифференциальных уравнений, а прогнозирование поведения кровотока при мультиэкспозиционной спекл-контрастной визуализации дано в работе .

Целью данной работы является описание теории спеклов и демонстрация актуальности применения спеклоскопии, как метода визуализации неоднородных рассеивающих сред, в том числе биологической ткани, а также анализ проблем для разных способов получения спекл-картин и их моделирования и постановка двух экспериментов с последующей обработкой полученных результатов.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится теория по принципам спекл-интерферометрии.

Рисунок 1 схематически иллюстрирует принципы формирования и распространения спеклов, сформированных в режиме пропускания и отражения когерентного света в оптически неоднородной среде. Средний размер спекла в дальнем поле оценивается как

$$d_{av} \sim \lambda / \phi, \quad (1)$$

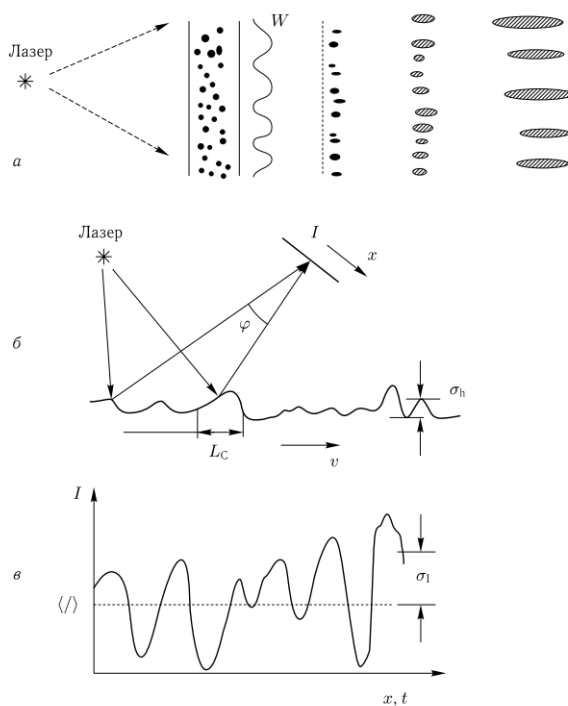


Рисунок 1. Формирование и распространение спеклов (а); наблюдение спеклов (б) и модуляция интенсивности (в); W — рассеянная волна.

Для идеальных условий, когда комплексная амплитуда рассеянного света имеет гауссову статистику, контраст $V_I=1$ (развитые спеклы), и функция распределения вероятности (ФРВ) интенсивности есть экспонента с отрицательным показателем :

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(\frac{-I}{\langle I \rangle}\right). \quad (2)$$

Спекл-структуры могут интерферировать как когерентно, так и некогерентно. В случае когерентной комбинации статистические свойства результирующей третьей спекл-структуры остаются принципиально теми же, что и у двух исходных структур, и в типичном случае следуют (2). Однако в случае некогерентной комбинации двух спекл-полей результирующая ФРВ интенсивности подчиняется не экспоненциальной статистике (2), а распределению

$$p(I) = \frac{4I}{\langle I \rangle^2} \exp\left(\frac{-2I}{\langle I \rangle}\right), \quad (3)$$

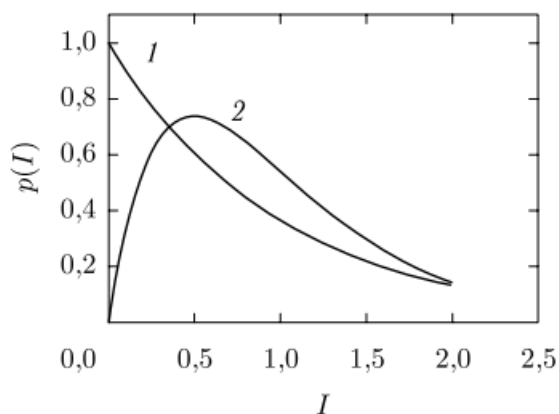


Рисунок 2. Теоретические функции распределения плотности вероятности для интенсивности $p(I)$ полностью развитой спекл-структуры (кривая 1, формула (2)) и некогерентной комбинации двух спекл-полей (кривая 2, формула (3)).

Статистика второго порядка показывает, насколько быстро интенсивность меняется от точки к точке спекл-структуры, т. е. она характеризует размер и распределение размеров спеклов в структуре. Статистика второго порядка обычно описывается с помощью автокорреляционной функции флуктуаций интенсивности,

$$g_2(\Delta\xi) = \langle I(\xi + \Delta\xi)I(\xi) \rangle. \quad (4)$$

Для анализа обычно используются нормированные автокорреляционная и структурная функции.

В второй главе описана методика исследования и эксперименты.

На базе кафедры оптики и биофотоники было поставлено два эксперимента, целью которых было получить спекл-картины различных биологических тканей и наблюдать изменение статистики спекл-полей при изменении кратности рассеяния света в этих тканях. Схема экспериментальной установки представлена на рис.3.

Необходимо было получить и проанализировать спекл-картины ткани миокарда(толщиной (620 ± 30) мкм) и кожи крысы(толщиной (500 ± 20) мкм) аллоксановой модели сахарного диабета до и после воздействия гиперосмотического просветляющего агента (70% глицерин)

Протокол исследования:

1. Получить спекл-картину. В течение 5 минут было сделано несколько снимков спекл-картины до воздействия глицерина, далее в течение 60 минут после воздействия агента делались снимки через каждые 5 минут, для регистрации изменений в спекл-картинах.

2. Получить зависимость интенсивности от координат.

С помощью программы ImageJ определялся максимум интенсивности на изображении, эта точка центр пучка, далее через центр откладывались отрезки по вертикали и горизонтали до границ лазерного пучка, вдоль этих отрезков снималась картина интенсивности, всего два среза, по оси X и по оси Y.

3. Построить функцию распределения вероятностей. Через программу ImageJ в изображении выделялось окно интенсивности, на изображении выделялись все точки удовлетворяющие этому, далее информация о точках (интенсивность каждой, местоположение на изображении и номер) переводилась в программу OriginPro, где с помощью встроенной функции распределения строился график.

Таких окон должно быть несколько, в лучшем случае для каждого оттенка серого от 0 до 255 нужно снять данные и в последующем обработать. Ввиду технической ограниченности пришлось ограничиться 3-4 окнами, на вид функции подобное допущение не влияло чем больше разбивка - тем больше точек получится.

4. Построить корреляционную функцию второго порядка. Из пункта 2. были взяты значения интенсивности от координаты X далее ряд данных сдвигался на некоторое Δx далее использовалась встроенная корреляционная функция для оригинального ряда и сдвинутого в программе OriginPro.

Полное представление о полученных спекл-структурах нам дают данные из пунктов 3-4.

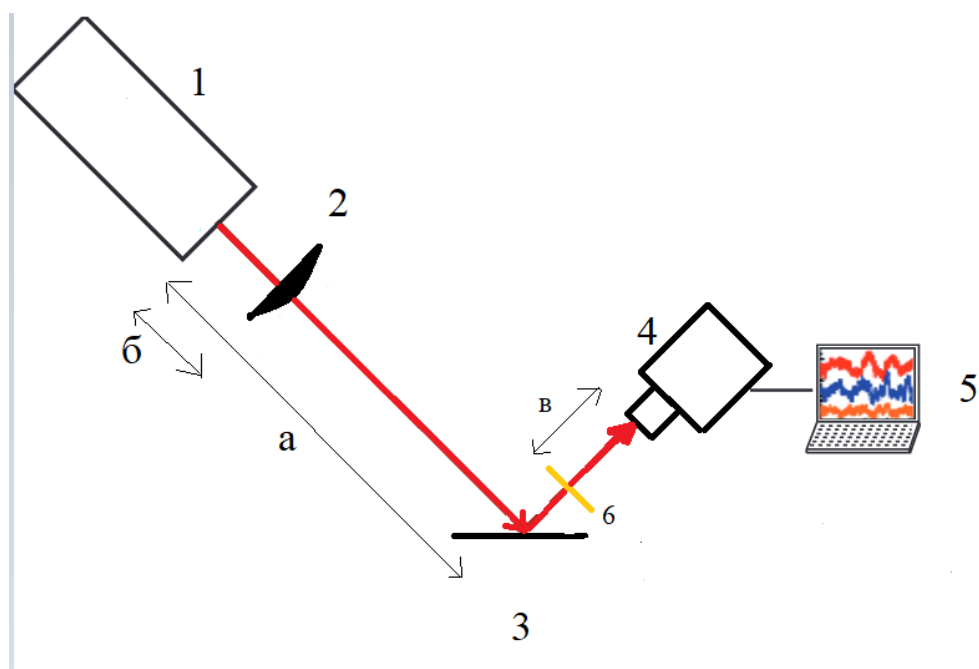


Рисунок 3. Схема установки. Числами указаны элементы. Буквами расстояния.

1- He-Ne лазер (633нм), линейно-поляризованное излучение, мощность 21 мВт, диаметр пучка 2 мм; 2 - коллимирующая оптика; 3 — зеркало; 4 - камера с разрешением 1920*1200 пикселей, режим работы 8-бит (по оттенкам серого) апертура 0,11, увеличение 3,7; 5- компьютер; 6- образец. а - расстояние от лазера до зеркала 210 мм; б - расстояние от лазера до коллимирующей оптики 60 мм; в - расстояние от образца до камеры 27 мм.

Далее на рисунках представлены полученные данные из двух экспериментов.

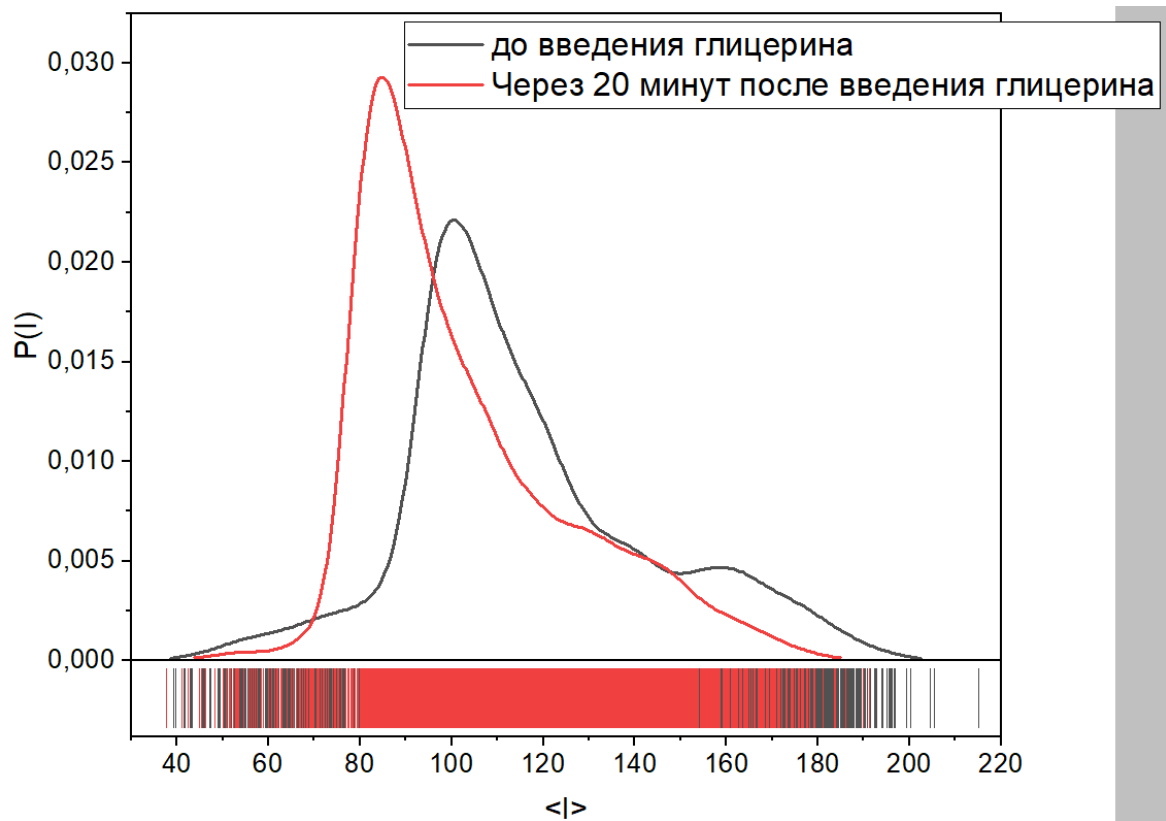


Рисунок 4. Функция распределения вероятности от средней интенсивности (оттенков серого) ткани миокарда крысы. Графики были нормированы на соответствующую формулу (3).

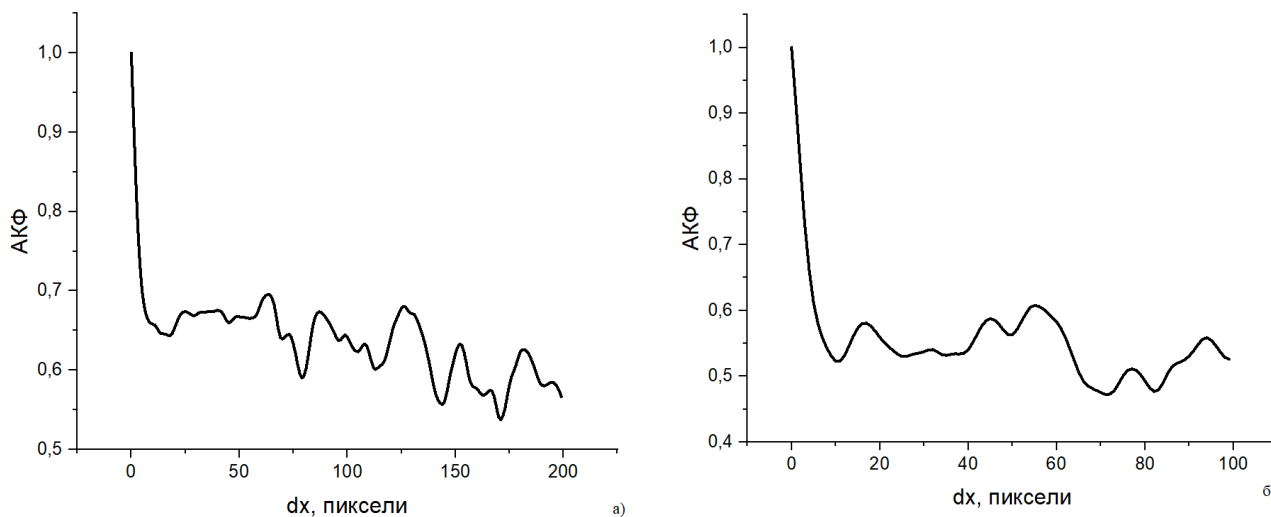


Рисунок 5. Автокорреляционная функция ткани миокарда крысы. а) До воздействия глицерина. б) через 20 минут воздействия глицерина.

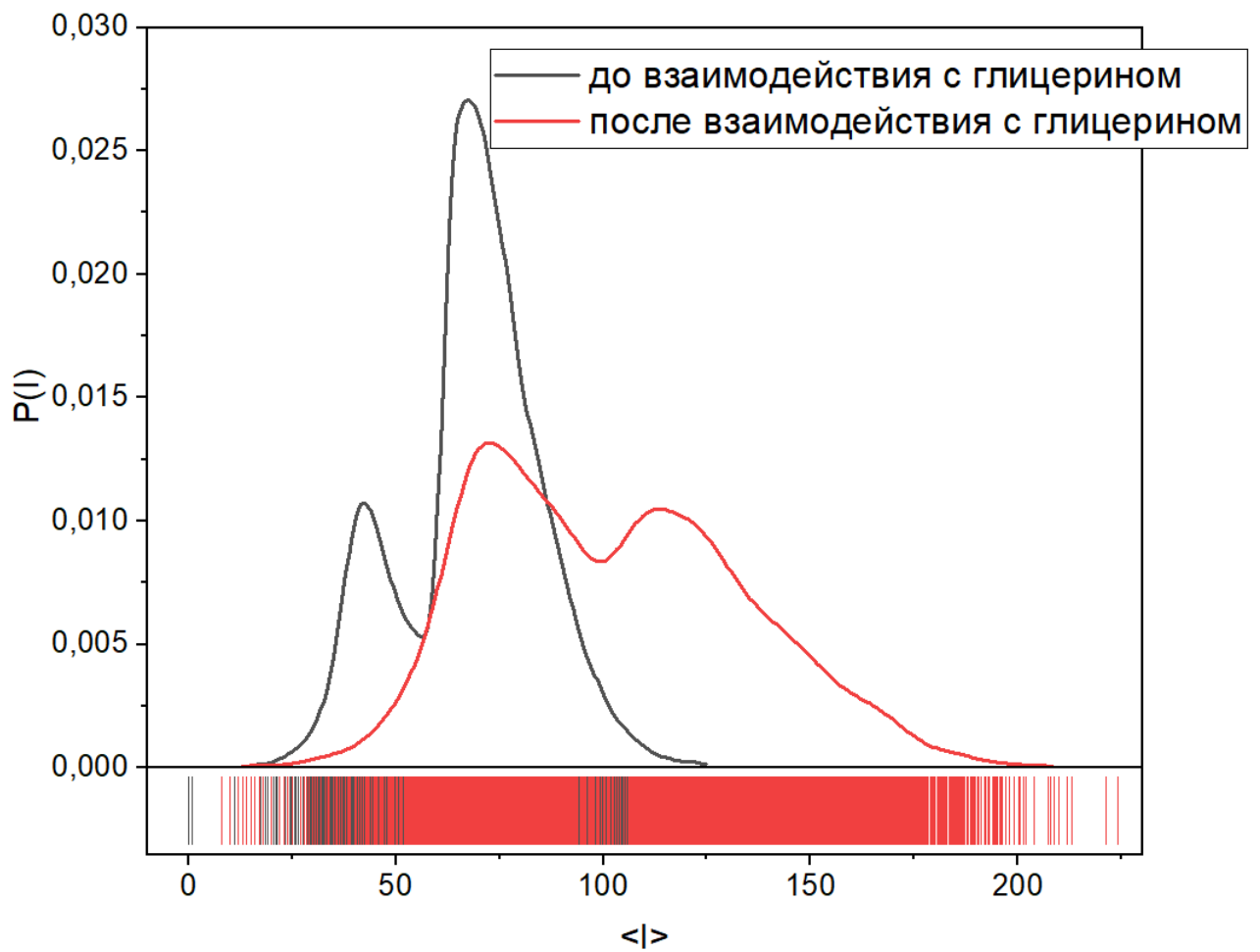


Рисунок 6. Функция распределения вероятности от интенсивности (оттенков серого) кожи крысы. Графики были нормированы на соответствующую формулу (3).

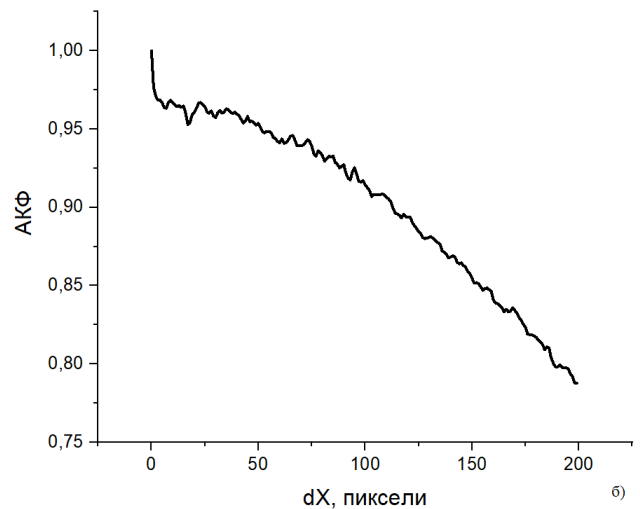
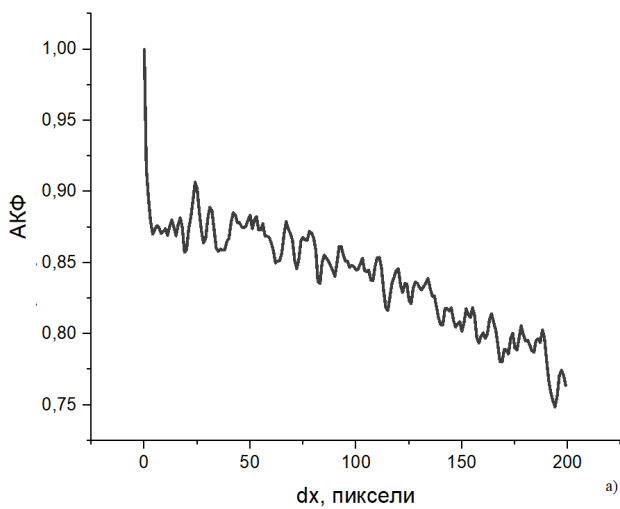


Рисунок 7. Автокорреляционная функция кожи крысы. а) До воздействия глицерина. б) через 60 минут воздействия глицерина.

В третьей главе представлен обзор методов моделирования и обработки данных, а в частности применение корреляционного дифференциального уравнения(КДУ) для моделирования интенсивностей спеклов.

В результате КДУ имеет вид

$$dI(t) = a(I(t) - \mu)dt + \sqrt{2a\mu I(t)}dW(t), \quad (5)$$

решение которого дает интенсивность спеклов с предварительно известной функцией распределения вероятностей и автокорреляцией. Стоит заметить, что приведенное КДУ в уравнении (5) известна как модель Кокса-Ингерсолла-Росса ($dX(t) = -\alpha(X - \mu)dt + \sigma\sqrt{X(t)}dW$) в математических финансах, где $X(t)$ представляет процентную ставку. Очевидно, что для нашего случая $I(t)$ должно быть положительным, что обеспечивается условием Феллера, заданным как $2\frac{\alpha\mu}{\sigma^2} \geq 1$. В нашем случае $2\frac{\alpha\mu}{\sigma^2} = \frac{2\alpha\mu}{2\alpha\mu} = 1$ и, следовательно, $I(t) > 0$ для всех t .

Решение КДУ по интенсивности дает получения картины спеклов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были изложены теоретические основы формирования спеклов, показано применение автокорреляционной функции для описания спекл-картин.

Были поставлены эксперименты с учетом новых методов по спекл-визуализации неоднородных объектов. Разработана методика обработки результатов измерений с помощью программ ImageJ и OriginPro.

При исследовании диабетической ткани миокарда крысы наблюдался процесс перехода от одной функции распределения вероятности интенсивности

к другой в процессе действия агента – 70% глицерина. Функция распределения вероятности интенсивности сместилась больше к виду формулы (3), изначально распределение удовлетворяло соотношению (4). Корреляции после введения агента стали слабее, что видно из графиков автокорреляционных функций. Визуальный анализ показал уменьшение размеров спеклов. Автокорреляционная функция так же подтвердила такое изменение статистики спеклов.

При исследовании диабетической кожи крысы наблюдался процесс оптического просветления под действием 70%-глицерина. Функция распределения вероятности сместилась больше в светлые оттенки серого. Корреляции после воздействия агента стали сильнее, что видно из графиков автокорреляционных функций. Визуальный анализ показал увеличение размеров спеклов. Характер автокорреляционной функции также это подтвердил. Из-за высокой яркости изображения произошло насыщение камеры, что частично отразилось на результатах измерений.

23.06.23 *А.Карц*