

На правах рукописи

ВИЛЕНСКИЙ МАКСИМ АЛЕКСЕЕВИЧ

**СПЕКЛ-КОРРЕЛОМЕТРИЯ ПОЛНОГО ПОЛЯ: МЕТОДЫ И
ПРИЛОЖЕНИЯ В ДИАГНОСТИКЕ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ
СРЕД**

01.04.21 - лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2010

Работа выполнена на кафедре биомедицинской физики Саратовского
Государственного Университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Зимняков Д.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Рябухо В.П.
доктор физико-математических наук,
профессор Ушаков Н.М.

Защита состоится «29» июня 2010 г. В 15-30 на заседании диссертационного
совета Д 212.243.05 в Саратовском государственном университете (410012, г.
Саратов, ул. Астраханская, 83).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке СГУ

Автореферат разослан « » мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор

В.Л. Дербов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время методы статистического и корреляционного анализа динамических спеклов широко применяются в материаловедении, медицине, биологии, химии и других областях современной науки. Данные методы, предполагающие анализ флуктационной составляющей лазерного излучения, рассеянного зондируемым объектом, базируются на совокупности наиболее значимых фундаментальных и прикладных результатов, полученных в последние десятилетия в статистической оптике и оптике случайно-неоднородных сред. В них используются различные подходы к анализу многократно рассеянных световых полей, формируемых при взаимодействии когерентного или частично когерентного зондирующего излучения с объектами со слабоупорядоченной структурой. Формируемые при многократном рассеянии лазерного излучения спекл-поля обладают высокой чувствительностью к изменениям конфигурации ансамбля рассеивающих центров в зондируемом объеме, обусловленным нестационарным характером исследуемой среды. Анализ последовательностей изображений динамических спеклов, отображающих эволюцию структуры зондируемого объекта в процессе зондирования, позволяет на основе решения обратной задачи многократного квазиупругого рассеяния лазерного света в зондируемой среде определить структурные и динамические характеристики рассеивающих центров (в частности, установить тип их движения, определить их подвижность, выражаемую в зависимости от типа движения через значения средней скорости или коэффициента трансляционной диффузии, оценить эффективные значения концентрации и среднего размера рассеивателей и т.д.). С учетом возможностей современных специализированных ПЗС и КМОП устройств для обработки изображений, обработку и анализ последовательностей спекл-модулированных изображений можно осуществлять в режиме реального времени. Дополнительные возможности в части анализа статических и динамических спекл-структур, формируемых при зондировании случайно-неоднородных сред частично когерентным излучением, предоставляет возможность управления когерентными свойствами зондирующего излучения (например, путем управления током накачки полупроводникового лазерного излучателя, работающего в подпороговом режиме). Рассматривая формируемые в результате многократного рассеяния частично когерентного излучения спекл-структуры как интерференционные поля, порождаемые суперпозицией парциальных составляющих рассеянного поля в зондируемой среде, подобный подход можно классифицировать как «безопорную многолучевую низкокогерентную интерферометрию случайно-неоднородных сред». Простота инструментальной и программной реализации методов, основанных на данном подходе, делают их весьма перспективными с точки зрения экспресс-анализа многофазных систем различного типа в материаловедении и экспресс-диагностики

морфофункционального состояния биологических тканей в биологии и медицине.

Несмотря на значительный успех, достигнутый к настоящему времени в части развития фундаментальных и прикладных аспектов спекл-корреляционного зондирования, ряд вопросов, имеющих принципиальное значение с точки зрения расширения области применимости данных методов, изучен в недостаточной степени. К подобным вопросам относятся прежде всего особенности стохастической фазовой модуляции распространяющегося лазерного излучения в средах со сложной структурой и динамикой рассеивающих центров (например, в многофазных пористых системах в процессе нестационарного массопереноса или в композитных материалах, формирующихся в процессе разделения фаз). Также представляет значительный интерес развитие новых подходов к зондированию случайно-неоднородных сред излучением с контролируемой длиной когерентности и исследование влияния многокаскадной стохастической фазовой модуляции на стадиях доставки лазерного излучения от источника к объекту и от объекта к детектору на статистические и корреляционные свойства анализируемых динамических спеклов. Последнее является весьма актуальным с точки зрения применения многоканальных волоконно-оптических трактов в оптических схемах спекл-коррелометрических систем.

Исходя из существующих проблем в области оптической коррелометрии случайно-неоднородных сред с использованием когерентного и частично когерентного излучения, была сформулирована основная цель и задачи исследований.

Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы явилось развитие новых подходов и методов зондирования многократно рассеивающих случайно-неоднородных сред на основе анализа изображений статических и динамических спекл-структур, формируемых при зондировании среды когерентным либо частично когерентным излучением.

Для достижения цели диссертационной работы были решены следующие задачи:

- 1) развитие теоретических основ и экспериментальная апробация метода зондирования случайно-неоднородных сред с использованием частотно-модулированного лазерного излучения;
- 2) развитие спекл-коррелометрического метода анализа процессов нестационарного массопереноса в многофазных пористых системах;
- 3) развитие методов анализа динамических спекл-модулированных изображений применительно к спекл-коррелометрическому зондированию нестационарных случайно-неоднородных сред;
- 4) разработка инструментальной базы и экспериментальная апробация эндоскопического спекл-корреляционного метода применительно к

мониторингу функционального состояния органов брюшной полости человека в послеоперационный период;

- 5) исследование особенностей переноса излучения применительно к спекл-корреляционному зондированию композитных материалов «диспергирующий полимер – жидкий кристалл» в процессе их синтеза.

Научная новизна работы:

С использованием модели дискретных рассеивающих центров и в результате экспериментов с модельными рассеивающими средами установлены фундаментальные закономерности, определяющие процесс подавления стохастической модуляции усредняемых по времени динамических спекл-структур в условиях многократного рассеяния частотно-модулированного лазерного излучения случайно-неоднородными средами.

Установлены фундаментальные закономерности, контролируемые взаимосвязь критических значений макроскопических и микроскопических характеристик подвижности границы раздела жидкой и газовой фаз в пористых слоях со скейлинговым поведением усредненного по ансамблю динамических спеклов первого кумулянта корреляционной функции флуктуаций интенсивности рассеянного слоем излучения.

В экспериментах с модельными средами и in-vivo биотканями подтверждена возможность спекл-корреляционного зондирования нестационарных случайно-неоднородных сред с использованием дополнительной стохастической фазовой модуляции зондирующего и объектного пучков; это дает возможность создания спекл-коррелометрических систем полного поля с многоканальными волоконно-оптическими трактами для доставки лазерного излучения от источника к объекту и от объекта к детектору.

Установлена фундаментальная особенность обратного рассеяния зондирующего лазерного излучения слоями случайно-неоднородных сред с крупногранулярной структурой, заключающаяся в естественной селекции парциальных составляющих рассеянного поля по значениям длины оптического пути в слое при использовании детекторов с высокой степенью коллимации регистрируемого излучения.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработке и апробации в экспериментах с модельными рассеивателями нового спекл-корреляционного метода зондирования случайно-неоднородных сред с использованием частотно-модулированного лазерного излучения на основе анализа зависимости индекса мерцаний рассеянного света от глубины модуляции частоты зондирующего пучка;
- разработке методики и программно-инструментальной основы спекл-корреляционного эндоскопического мониторинга микрогемодинамики внутренних органов человека и животных во время полостных операций и в послеоперационный период;

- разработке и экспериментальной апробации новых спекл-коррелометрических методов и подходов, применимых для исследований в лабораторных условиях динамических характеристик различных нестационарных процессов в случайно-неоднородных средах, в том числе нестационарного переноса жидкой фазы в пористых слоях и разделения фаз в двухкомпонентных системах в процессе полимеризации одной из составляющих.

Достоверность представленных научных результатов следует из адекватности используемых физических и математических моделей, а также из согласия полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования и с данными, полученными другими исследователями.

Полученные в диссертационной работе результаты использовались при выполнении следующих грантов:

Грант РФФИ № 07-02-01467-а, 2007 - 2008

Грант РФФИ № 09-02-01048-а, 2009 - 2011

Грант РФФИ № 09-02-90487-Укр_ф_а, 2009 - 2010

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Индекс мерцаний усредненных по времени спекл-структур, формируемых при зондировании случайно-неоднородных сред частотно-модулированным лазерным излучением определяется косинус-преобразованием Фурье от функции плотности вероятности оптических путей парциальных составляющих зондирующего излучения в среде. При этом эффективное значение длины когерентности зондирующего излучения определяется выражением: $\frac{\lambda_0 n}{\eta}$, в котором λ_0 – длина волны зондирующего излучения в вакууме, n – показатель преломления зондируемой среды, а η – параметр, определяющий глубину модуляции длины волны лазерного излучения.
2. Первый куммулянт автокорреляционной функции флуктуаций интенсивности лазерного излучения, рассеянного движущейся границей раздела жидкой и газовой фаз в пористом слое, на стадии закрепления убывает по степенному закону в зависимости от критического параметра со значением критического индекса, равным 0.65 ± 0.17 ; его значение, усредненное по спекл-модулированному изображению зоны активного развития границы, пропорционально среднему значению подвижности локальных границ раздела фаз в отдельных порах в данной зоне.
3. При использовании спекл-коррелометрии полного поля в режиме детектирования обратно рассеянного излучения для анализа кинетики роста жидкокристаллических доменов в слоях синтезируемых композитов «диспергирующий полимер – жидкий кристалл» может быть осуществлена дискриминация парциальных составляющих рассеянного поля по числу актов рассеяния путем задания

апертурного угла приемника. При этом детектируемый оптический сигнал формируется в основном за счет составляющих, многократно рассеянных в малых углах по отношению к оси зондирующего пучка и отраженных от задней границы слоя.

Макетный образец спекл-корреляционной эндоскопической системы полного поля для мониторинга микрогемодинамики внутренних органов человека и животных.

Метод зондирования стационарных случайно-неоднородных сред с использованием частотно-модулированного лазерного излучения на основе статистического анализа усредняемых по времени спекл-модулированных изображений поверхности зондируемой среды

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных научных конференциях:

-Saratov Fall Meeting – International School for Young Scientist and Students on Optics, Laser Physics & Medicine, Saratov 2006;

-International Autumn Summer School “Modern Biophysical Techniques for Human Health”, Poiana Brasov, Romania, 2005;

-3rd Russian-Finnish Meeting "Photonics and Laser Symposiym", Finland, 2007;

-International Conference on Correlation Optics, Chernivci, Ukraine, 2007, 2009.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК и 9 статей в сборниках трудов научных конференций.

Личный вклад автора состоит в участии в постановке задач, разработке методик расчета и проведения экспериментальных исследований, а также обработке и обсуждении полученных результатов. Представленные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии, совместно с д.ф.м.-н. Зимняковым Д.А. и к.ф.м.-н. Садовым А.В.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей 5 глав, заключение, списка цитируемой литературы из 134 наименований. Текст диссертации изложен на 175 страницах, содержит 39 рисунков и 4 таблицы.

Основное содержание работы

Во введение обоснована актуальность темы, изложена цель и задачи исследований, дана общая характеристика работы, отмечены научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной и посвящена описанию современных оптических методов анализа многократно рассеивающих случайно неоднородных структур.

Приводится краткое описание процесса формирования спекл-структур при рассеянии когерентного излучения на диффузном объекте, с введением основных понятий и характеристик спеклов.

Далее приводится обзор основных методов диагностики и визуализации биотканей (оптическая когерентная томография, частотно-модуляционная и импульсно-модуляционная томография, лазерная доплеровская диагностика биопотоков и др.). Представлена используемая в данной работе физическая модель многократного рассеяния света. Представлены основные соотношения корреляционного анализа флуктуаций интенсивности рассеянного излучения.

Рассмотрен простой случай однократного рассеяния зондирующего излучения монодисперсной системой сферических частиц с броуновской динамикой. Большое внимание уделено перспективным направлениям в современной биомедицинской оптике, связанным с использованием различных видов корреляционного анализа многократно рассеянных световых полей, формируемых при взаимодействии когерентного или частично когерентного зондирующего излучения с биотканями. В частности были рассмотрены методы динамического рассеяния света и их применение в биомедицинских исследованиях.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований эффекта многократного рассеяния излучения на тонких слоях фторопласта и частиц TiO_2 на стеклянной подложке, при зондировании образцов частотно-модулированным лазерным излучением и регистрации формируемых при этом динамических спеклов со временем экспозиции, существенно превышающим период модуляции частоты зондирующего лазерного излучения. Проведен анализ зависимости индекса мерцаний усредняемых по времени спеклов, формируемых при рассеянии зондирующего излучения в среде, от глубины модуляции частоты зондирующего излучения.

Для исследованных образцов были определены значения оптических характеристик (транспортной длины l^* , коэффициента поглощения μ_a и параметра анизотропии рассеяния g [Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2. М.: Мир, 1981. 317 с]) для длин волн 638 нм и 830 нм с использованием результатов измерений диффузного отражения, диффузного и коллимированного пропускания, а также угловых

распределений интенсивности в пиках когерентного обратного рассеяния (для слоя частиц рутила на стеклянной подложке). Определение l^* , μ_a и g производилось по полученным экспериментальным данным в соответствии с методиками, описанными в [Zimnyakov D.A., Oh Y.-T., Sinichkin Yu.P., Trifonov V.A., Gurianov E.V. Polarization-sensitive speckle spectroscopy of scattering media beyond the diffusion limit // JOSA A. 2004. V.21. P.59.]. Следует отметить, что как для образца фторопласта, так и для слоя частиц TiO₂ при λ_0 , равной 638 нм или 830 нм выполняется следующее соотношение: $\mu_a L^2 / l^* \ll 1$, т.е. влиянием поглощения среды на распространение зондирующего излучения в образце можно пренебречь. В результате были получены значения l^* и g , приведенные в таблице 1.

Таблица 1.

образец	l^* , мм	g	λ , нм
TiO ₂	0,82	0,3	640
TiO ₂	2,2	0,25	830
Фторопласт	200	0,8	640
Фторопласт	290	0,73	830

По измеренным в эксперименте значениям амплитуды модулирующего сигнала, соответствующим убыванию индекса мерцаний $\tilde{\beta}$ до 0.5, с учетом калибровочного соотношения между V и $\Delta\lambda$, определялись значения параметра, определяющего глубину модуляции длины волны лазерного излучения $\eta_{0.5}$, для образцов (I) и (II), зондируемых на длинах волн 638 нм и 830 нм; данные значения приведены на рис. 1 в зависимости от параметра L^2/l^* , характеризующего оптическую толщину образца в режиме диффузии зондирующего излучения.

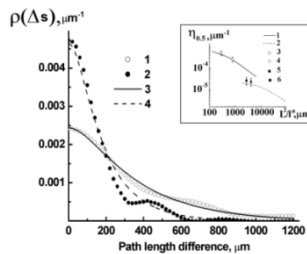


Рис.1. – слой частиц диоксида титана на стеклянной подложке; $\lambda_0 = 830$ нм; 4 – слой частиц диоксида титана на стеклянной подложке; $\lambda_0 = 638$ нм; 5 – слой фторопласта; $\lambda_0 = 830$ нм; 6 – слой фторопласта; $\lambda_0 = 638$ нм. 1, 2 – теоретические зависимости $\eta_{0.5}(L^2/l^*)$

Для анализа полученных экспериментальных данных было выполнено Монте-Карло моделирование переноса излучения в многократно рассеивающих слоях, характеризуемых значениями \mathcal{G} , приведенными в таблице 1, но с различными величинами L и l^* ; в качестве фазовой функции рассеивающей среды применялась функция Хеньи-Гринштейна [Henyey L.G., Greenstein J.L. Diffuse radiation in the Galaxy // Astrophys. J. 1941. V.93. P. 70.]. В результате моделирования для различных комбинаций значений толщины и транспортной длины рассеивающего слоя были получены функции плотности вероятности $\rho(s)$ значений оптического пути в слое рассеянных составляющих, выходящих из слоя под малыми углами по отношению к оси освещающего пучка. С использованием найденных $\rho(\Delta s)$ строились теоретические зависимости индекса мерцаний усредняемых по времени спеклов от параметра η , по которым затем строились зависимости $\eta_{0,5}(L^2/l^*)$, представленные на врезке рис. 1.

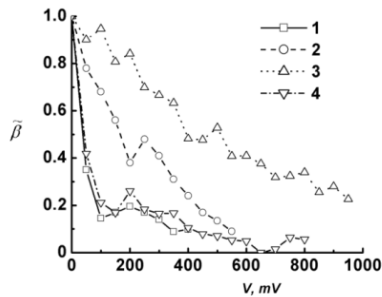


Рис. 2. – слой фторопласта; $\lambda_0 = 638$ нм; 2 – слой частиц диоксида титана на стеклянной подложке; $\lambda_0 = 638$ нм; 3 – слой частиц диоксида титана на стеклянной подложке; $\lambda_0 = 830$ нм; 4 – слой фторопласта; $\lambda_0 = 830$ нм.

Несмотря на погрешности калибровки экспериментальной установки (определение отношения $\Delta\lambda/V$ и, соответственно, η/V) и определения оптических характеристик зондируемых сред (таблица 1), экспериментальные данные по $\eta_{0,5}$ для зондируемых образцов удовлетворительно согласуются с соответствующими величинами, полученными на основе результатов статистического моделирования переноса зондирующего излучения в многократно рассеивающих слоях с плоскими границами.

В третьей главе исследовалась динамика развития границы раздела жидкой и газообразной фаз в слабо упорядоченных пористых слоях в процессе капиллярного подъема жидкости. Были установлены закономерности, контролирующие критическое поведение границы раздела жидкой и газовой фаз в слое в процессе ее закрепления. С использованием кумулянтного анализа

спекл-модулированных изображений поверхности, а также статистического анализа разностных бинаризованных изображений поверхности при некогерентном освещении было показано, что макроскопическая динамика границы на стадии закрепления контролируется, главным образом, степенной зависимостью частоты зарождения локальных нестабильностей границы (лавин) от критического параметра, в то время как динамика развития локальных нестабильностей контролируется процессом диффузии жидкости в слое и слабо зависит от критического параметра.

На рисунке 4 в полулогарифмических координатах приведена полученная в эксперименте зависимость средней скорости \tilde{V} подъема границы насыщенного жидкостью объема слоя от времени для одного из исследованных образцов (фильтровальная бумага ФС), демонстрирующая существование двух характерных режимов нестационарного движения жидкости в пористом слое под действием капиллярных сил.

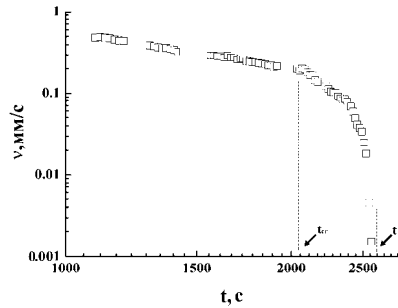


Рис. 4. Зависимость средней скорости движения границы \tilde{V} от времени для образца ФС.

Локальное значение первого кумулянта $\Gamma_1(x, y, t)$ корреляционной функции флуктуаций интенсивности спеклов в определенной степени ассоциируется для анализируемой зоны спекл-поля с полушириной спектра флуктуаций интенсивности $S(\omega, x, y, t)$, определяемой подвижностью динамических рассеивающих центров в локальном объеме зондируемой среды.

Исследование значений $\langle \Gamma_1 \rangle$, усредненных по зоне развития границы раздела фаз, в зависимости от средней высоты насыщенной жидкостью области \tilde{h} позволяет проанализировать характер изменений микроскопической подвижности локальных нестабильностей границы на различных стадиях. На рисунке 5 представлена соответствующая зависимость для одного из исследованных образцов (фильтровальная бумага ФС).

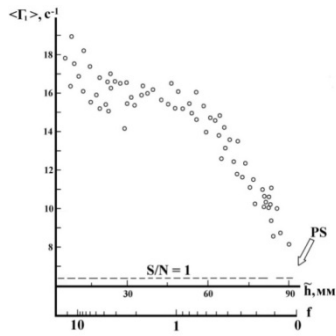


Рис. 5. Значения $\langle \Gamma_1 \rangle$ в зависимости от средней высоты подъема границы раздела фаз \tilde{h} и критического параметра

Для исследованных неупорядоченных пористых образцов характерно значение критического индекса средней скорости, меньшее 1, что соответствует конечному времени протекания процесса закрепления границы (в отличие от пористых сред на основе плотноупакованных монодисперсных сферических частиц, характеризующихся более высокой степенью структурной упорядоченности). Полученные результаты представляют интерес с точки зрения описания транспортных свойств пористых систем различной природы в случае критического режима переноса жидкой фазы в подобных объектах. Рисунок 6, а иллюстрирует существенные различия в динамике спеклов, регистрируемых в зоне развития границы раздела фаз в пористом слое (1, 2) и за пределами зоны (3, 4).

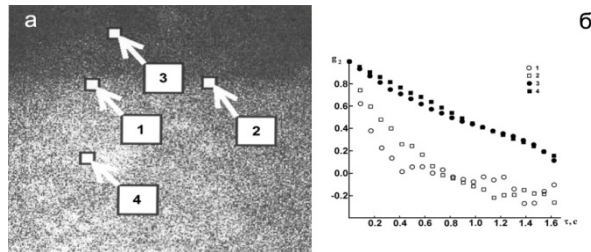


Рис. 6. а – Спекл-модулированное изображение поверхности пористого слоя в области развития границы жидкой и газовой фаз; б – нормированные временные корреляционные функции флуктуаций интенсивности спеклов на различных участках изображения рис. 6 а

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований возможности мониторинга микроциркуляции крови в поверхностных слоях внутренних органов лабораторных животных в процессе лапаротомии с использованием спекл-коррелометрии полного поля, на основе оценок контраста усредненных по времени динамических спеклов в условиях

стохастической пространственной фазовой модуляции лазерного излучения при его распространении через эндоскопическую систему.

В главе приводится анализ микрогемодинамики кишечника, печени, селезенки, почек, поджелудочной железы крыс в нормальном состоянии, при искусственно вызванных ишемии и перитоните, а также при воздействии лекарственных препаратов с выраженным вазодилаторным действием (лидокаина, папаверина) (таблица 2), а также анализ микрогемодинамики ногтевого ложа пальца человека полученных при нормальном кровообращении и в результате принудительного подавления кровообращения в руке при помощи эластичной манжеты.

Результаты мониторинга нестационарной микрогемодинамики внутренних органов при кратковременном пережатии магистральных кровеносных сосудов с последующей релаксацией микроциркуляции до нормального уровня (при исходном нормальном физиологическом состоянии), а также при инъекции папаверина в брюшину в случае искусственно вызванного перитонита приведены на рис.3.

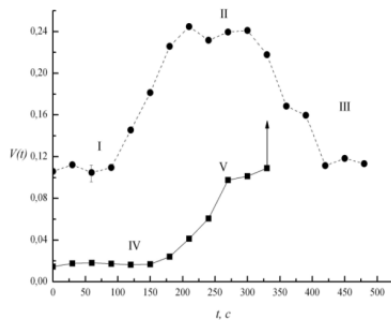


Рис.3. Изменения микрогемодинамики стенки тонкого кишечника. I – норма; II – ишемия; III – релаксация параметров микроциркуляции до нормального состояния после устранения пережатия магистральных сосудов; IV – реактивная стадия перитонита; V – инъекция лидокаина в брюшину. Стрелка соответствует скачкообразному увеличению $V(T)$ до ≈ 0.49 в результате гибели подопытного животного.

В таблице 2 представлены значения контраста в зависимости от функционального состояния диагностируемого органа. На основании полученных экспериментальных результатов и результатов других научных групп было установлено, что контраст усредненных по времени динамических спектров, используемый в качестве диагностического параметра, характеризуется достаточно высокой чувствительностью к изменениям микроциркуляции крови в поверхностных слоях внутренних органов, обусловленных патологическими изменениями или воздействием внешних факторов.

Таблица 2. Изменения контраста при различных патологиях органов

Орган	Функциональное состояние		
	Норма	Перитонит	Ишемия
Тонкая кишка	0.108±0.017	1.67·10 ⁻² ±3.0·10 ⁻³	0.232±0.026
Поджелудочная железа	0.152±0.006	1.17·10 ⁻² ±2.5·10 ⁻³	0.329±0.009
Селезенка	0.162±0.007	2.05·10 ⁻² ±8.1·10 ⁻⁴	0.362±0.028
Печень	0.262±0.011	2.50·10 ⁻² ±1.32·10 ⁻³	0.340±0.020
Почка (правая)	0.195±0.006	1.28·10 ⁻² ±2.45·10 ⁻³	0.494±0.089
Почка (левая)	0.219±0.012	-----	0.455±0.039

В заключительной **пятой главе** представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований корреляционных свойств флуктуаций интенсивности лазерного излучения, рассеянного слоями ДПЖК композитов на различных стадиях формирования их структуры в процессе разделения фаз в исходной смеси в зависимости от соотношения между объемными долями полимеризируемой субстанции и жидкого кристалла.

Для теоретического анализа корреляционных свойств флуктуаций интенсивности рассеянного слоями ДПЖК композитов лазерного излучения в данной главе была использована модель дискретных рассеивателей.

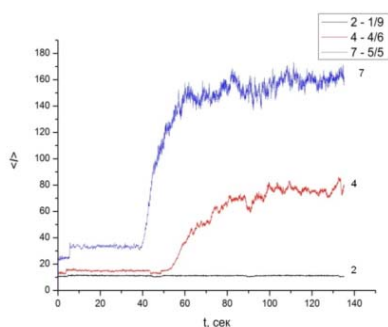


Рис.7. Зависимость интенсивности спекл-поля $\langle I \rangle$ случайно выбранного пикселя при $\theta \approx 180^\circ$ от времени облучения УФ.

Экспериментальная часть данной главы была посвящена применению метода спекл-коррелометрии полного поля, применительно к исследованиям зависимости интенсивности рассеянного лазерного излучения, слоем синтезируемого ДПЖК композита под большими углами по отношению к направлению распространения зондирующего пучка, от времени. Эксперимент проводился для двух значений угла рассеяния θ : $\theta \approx 180^\circ$ (детектирование обратно рассеянного излучения) и $\theta \approx 150^\circ$. Были получены зависимости интенсивности при $\theta \approx 180^\circ$ для произвольно выбранной малой зоны (размером в один пиксель) детектируемой камерой спекл-модулированного изображения от времени при различных соотношениях ЖК-807 и NOA65 в исходной смеси. Для данных зависимостей характерно наличие достаточно протяженной латентной стадии (I) с нулевым значением интенсивности обратно рассеянного оптического сигнала с последующим резким возрастанием (II) и переходом к стадии насыщения (III). На рис. 8 приведена типичная функция плотности вероятности значений путей S (и, соответственно, количества актов рассеяния) для парциальных составляющих рассеянного света в слое модельной случайно-неоднородной среды толщиной 40 мкм (что соответствует используемым в работе экспериментальным условиям). Характеристики модельной среды (коэффициент рассеяния, равный 150 мм^{-1} , параметр анизотропии рассеяния, равный 0.95, и показатель преломления среды, равный 1.4) по значениям выбраны близкими к ожидаемым характеристикам синтезируемых слоев ДПЖК композитов.

В ходе моделирования анализировались два предельных случая рассеяния зондирующего лазерного излучения неупорядоченными ансамблями сферических ЖК доменов в слое диспергирующего полимера: однократное рассеяние релеевскими частицами, что соответствует начальной стадии процесса разделения фаз в исходной смеси, и существенно многократное рассеяние на стадии окончательного формирования структуры ДПЖК композита.

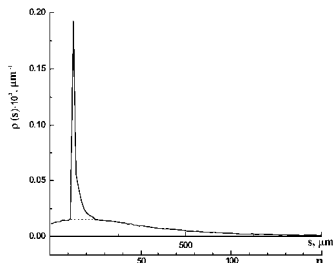


Рис. 8 Распределение функции плотности вероятности значений путей S (и, соответственно, количества актов рассеяния) для парциальных составляющих рассеянного света в слое модельной случайно-неоднородной среды.

Была получена зависимость нормированной автокорреляционной функции амплитуды рассеянного поля для следующих условий моделирования: длина волны зондирующего излучения 633 нм; начальное значение среднего размера сферических рассеивателей $\langle R_m(t) \rangle = 5 \mu\text{мкм}$, относительный показатель преломления рассеивателей 1.25.

С целью анализа распределений регистрируемых в спекл-корреляционном эксперименте парциальных составляющих рассеянного поля по числу актов рассеяния в зависимости от структурных характеристик зондируемой среды было проведено статистическое (Монте-Карло) моделирование переноса излучения в слое ДПЖК композита для условий регистрации рассеянного назад света.

Данные особенности распространения зондирующего излучения в слое модельной среды обусловлены существенно анизотропным характером рассеяния света на рассеивающих центрах с $R_{\text{mod}} \gg \lambda$. Также был проведен численный эксперимент для анализа распределений парциальных составляющих рассеянного поля в зависимости от апертуры детектора (рис.9.). В результате моделирования была получена следующая зависимость:

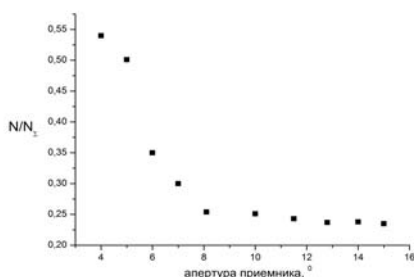


Рис. 9 Зависимость количества прошедших фотонов от апертуры детектора.

Полученные результаты являются основой для развития методов спекл-коррелометрии (в том числе и методов полного поля, базирующихся на статистическом и корреляционном анализе усредняемых по времени изображений динамических спекл-структур) применительно к мониторингу процессов эволюции структуры многофазных систем в результате воздействия различных внешних и внутренних факторов. В качестве диагностических параметров могут быть рекомендованы кумулянты первого и более высоких порядков временных автокорреляционных функций флуктуаций интенсивности. При использовании методов полного поля данные параметры могут быть получены в результате статистического анализа усредненных по времени разностных изображений регистрируемых динамических спекл-структур.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Экспериментально и теоретически исследована возможность получения транспортных характеристик случайно неоднородных сред с использованием частотно-модулированного излучения. Предлагаемый подход позволяет в значительной степени упростить анализ зависимостей индекса мерцаний β_I от длины когерентности при определении параметров зондируемой среды из результатов спекл-спектроскопического эксперимента.
2. Убывание эффективного значения длины когерентности зондирующего излучения зависит от индекса мерцаний в спекл-корреляционном эксперименте. Эффект убывания индекса мерцаний β_I при увеличении значения длины когерентности зондирующего излучения обусловлен формированием детектируемых спеклов в результате наложения двух частично коррелированных спекл-структур равной интенсивности, степень корреляции которых уменьшается с ростом параметра η .
3. Предложена модификация спекл-коррелометрического метода применительно к анализу процесса нестационарного массопереноса в гетерогенных нестационарных системах.
4. Установлена фундаментальная взаимосвязь между критическими индексами, определяющими динамику границ раздела фаз в пористых слоях и проведен количественный анализ зависимостей эффективного коэффициента диффузии жидкой фазы в пористой среде от критического параметра.
5. Продемонстрирована возможность мониторинга микрогемодинамики внутренних органов с помощью предложенного эндоскопического спекл-коррелометрического метода.
6. Разработана спекл-корреляционная методика анализа кинетики процесса разделения фаз в системе «нематический жидкий кристалл – фотополимер» в ходе полимеризации при воздействии ультрафиолетового излучения.
7. Предложена феноменологическая модель динамического рассеяния лазерного излучения увеличивающимися в размерах рассеивателями, позволяющая осуществлять анализ динамики разделения фаз при синтезе ДПЖК композитных материалов на основе расчета корреляционных характеристик флуктуаций интенсивности рассеянного излучения.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Zimnyakov D. A., Vilensky M. A. Blink speckle spectroscopy of scattering media // *Optics Letters*. 2005. Vol. 31. Issue 4. P. 429-431.
2. Зимняков Д.А., Виленский М.А., Тучин В.В. Когерентно-оптические методы диагностики в биологии и медицине // *Вопросы прикладной физики*. Саратов. 2005. Т.12. С. 30-49 .
3. Vilensky, M.A., Zimnyakov D.A., Wang R.K., Cheung S.C. Analysis of transport properties of densely packed media by low-coherence reflectometry // *Modern Biophysical Techniques for Human Health: From Physics to Medicine. / Proc. International Autumn School in Poiana Brashov. Romania*. 2005. P. 57.
4. Виленский М.А., Зимняков Д.А. Спекл-корреляционное зондирование многократно рассеивающих сред с использованием частотно-модулированного лазерного излучения // *Проблемы оптической физики*. Саратов. 2006. С.107-111.
5. Vilensky M. A., Zimnyakov D. A., Wang R. K., and Cheung S. C. The study of transport properties of multiple scattering media by low-coherence reflectometry // *Proc. SPIE*. 2006. V. 6164. P.61640I.
6. Zimnyakov D.A., Sinichkin Y.P., Kuznetsova L.V., Vilensky M.A., Sadovoy A.V. Coherence-domain and polarization diagnostics of spatially oriented and random fibrous media such as paper and collagenous biotissues // *3rd Russian-Finnish Meeting Photonics and Laser Symposium. / Book of Abstract*. 2007. P.24-25.
7. Sadovoy A.V., Zimnyakov D.A., Vilensky M.A. White-light and speckle-correlation analysis of imbibition in porous media: critical properties of near-pinned interfaces // *Proc. SPIE*. 2008. V.7008. P.70080T.
8. Vilensky M.A., Zimnyakov D.A. Speckle-based probes of scattering media with the use of frequency modulated laser light // *Proc. SPIE*. 2008. V.7008. P.70080U.
9. Зимняков Д. А., Виленский М. А. Спекл-диагностика многократно рассеивающих сред с использованием частотно-модулированного лазерного излучения // *Оптика и Спектроскопия*. 2008. Т.104. № 4. С. 662-669.
10. Зимняков Д.А., Садовой А.В., Виленский М.А., Кудряшова А.А. Об особенностях рассеяния лазерного излучения слоями композитов «жидкий кристалл – диспергирующий полимер» // *Проблемы оптической физики*. Саратов. 2009. С.92-98.
11. Зимняков Д.А., Садовой А.В., Виленский М.А., Захаров П.В., Мюллюля Р. Критическое поведение границ раздела фаз в пористых средах: анализ масштабных свойств с использованием

- некогерентного и когерентного света // ЖЭТФ. 2009. Т.135. №2. С.351-369.
12. Зимняков Д.А., Хмара М.Б., Виленский М.А., Козлов В.В., Горфинкель И.В., Садовой А.В., Здражевский Р.А., Исаева А.А. Спекл-корреляционный мониторинг микрогемодинамики внутренних органов // Оптика и Спектроскопия. 2009. Т.107 - №6. С. 941-947.
 13. Zimnyakov D.A, Khmara M.B., Vilensky M.A., Kozlov V.V., Gorfinkel I.V., Zdrajevsky R.A. Speckle-correlation monitoring of the internal micro-vascular flow // Proc. of SPIE. 2009. V. 7388. P.73881B.