

УДК 612.15, 616.5, 57.087

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА С МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫМ РУСЛОМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Р.А. Лащётко
Магистрант кафедры ЭТТ
БГУИР



М.М. Меженная
Доцент кафедры ИПиЭ
БГУИР, кандидат
технических наук, доцент



Т.В. Калилец
Аспирантка кафедры
ИПиЭ БГУИР



С.К. Дик
Доцент кафедры ЭТТ
БГУИР, кандидат физико-
математических наук,
доцент



И.В. Кишкевич
Магистрантка кафедры
ИПиЭ БГУИР



Е.Н. Рункевич
Магистрантка кафедры
ИПиЭ БГУИР

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: ruslanlaschetko@gmail.com, mezhennaya@bsuir.by, t.kalilets@bsuir.by, sdick@bsuir.by, kishkevich.inna@gmail.com, runkevich8@gmail.com

Р.А. Лащётко

Окончил БГУИР по специальности Медицинская электроника. Обучается в магистратуре, занимается научными исследованиями в области моделирования поверхностных биотканей человека с микроциркуляторным руслом под воздействием оптического излучения.

М.М. Меженная

Окончила БГУИР по специальности Медицинская электроника. Доцент кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, руководит научными исследованиями в области цифровой обработки и анализа биомедицинских сигналов и изображений.

Калилец Т.В.

Окончила БГУИР по специальности Электронно-оптические системы и технологии. Обучается в аспирантуре, занимается научными исследованиями в области разработки оптических методов и технических средств диагностики и лечения заболеваний кожи, является научным руководителем гранта БРФФИ Министерства образования РБ «Исследование микроциркуляции поверхностных биотканей человека методом спекл-визуализации и разработка соответствующего методического и программного обеспечения».

Дик С.К.

Окончил Минский радиотехнический институт по специальности Радиотехника, руководит научными исследованиями в области лазерной медицины и биомедицинской оптики.

Кишкевич И.В.

Окончила БГУИР по специальности Медицинская электроника, является исполнителем гранта БРФФИ Министерства образования РБ «Исследование микроциркуляции поверхностных биотканей человека методом спекл-визуализации и разработка соответствующего методического и программного обеспечения».

Рункевич Е.Н.

Окончила БГУИР по специальности Медицинская электроника, является исполнителем гранта БРФФИ Министерства образования РБ «Исследование микроциркуляции поверхностных биотканей человека методом спекл-визуализации и разработка соответствующего методического и программного обеспечения».

Аннотация. В статье описаны результаты моделирования поверхностных биотканей человека с микроциркуляторным руслом под воздействием лазерного излучения средствами программного пакета COMSOL Multiphysics. Результатом моделирования являются две экспериментальные модели (статическая и динамическая), применимые в исследованиях спекл-изображений при различной скорости движения эритроцитов, что позволит установить зависимость между скоростью и контрастом спеклов и использовать данную информацию после апробации модели на практике для обратной задачи – оценки скорости на основе реальных данных о контрасте.

Ключевые слова: микроциркуляция крови, кровотока, спекл-визуализация, спекл-изображение, моделирование поверхностного кровотока.

Введение. Одним из перспективных направлений в изучении системы микроциркуляции является лазерная спекл-визуализация, основанная на использовании лазерного излучения для исследования биоспеклов кожи. В рамках данного подхода анализируются параметры динамического спекл-поля, которое образуется в результате интерференции отраженного или рассеянного биообъектом когерентного излучения. Спекл-поле в плоскости наблюдения формирует картину, состоящую из множества спеклов (пятен), интенсивность света и форма которых меняются при наличии в объекте движущихся рассеивателей. При этом быстрота смены новых реализаций спекл-картины (динамика спеклов) зависит от скорости движения рассеивателей (клетки покровной ткани – дермиса, эпидермиса – и клетки крови) [1].

Целью данной работы является компьютерное моделирование поверхностных биотканей человека с микроциркуляторным руслом под воздействием лазерного излучения. Планируемое моделирование позволит решить две основные задачи: наглядное отображение процесса формирования спекл-изображения; создание модели, применимой впоследствии в исследовании влияния скорости кровотока на формирование спекл-изображения.

Материалы и методы. Для реализации поставленных задач в качестве основного рабочего инструмента выбран пакет для мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Средствами данного пакета создана экспериментальная модель для изучения процесса формирования спекл-картины. Рабочее окно пакета COMSOL Multiphysics представлено на рисунке 1. В процессе изучения результирующие спекл-изображения обрабатывались в специально разработанном авторами программном обеспечении [2].

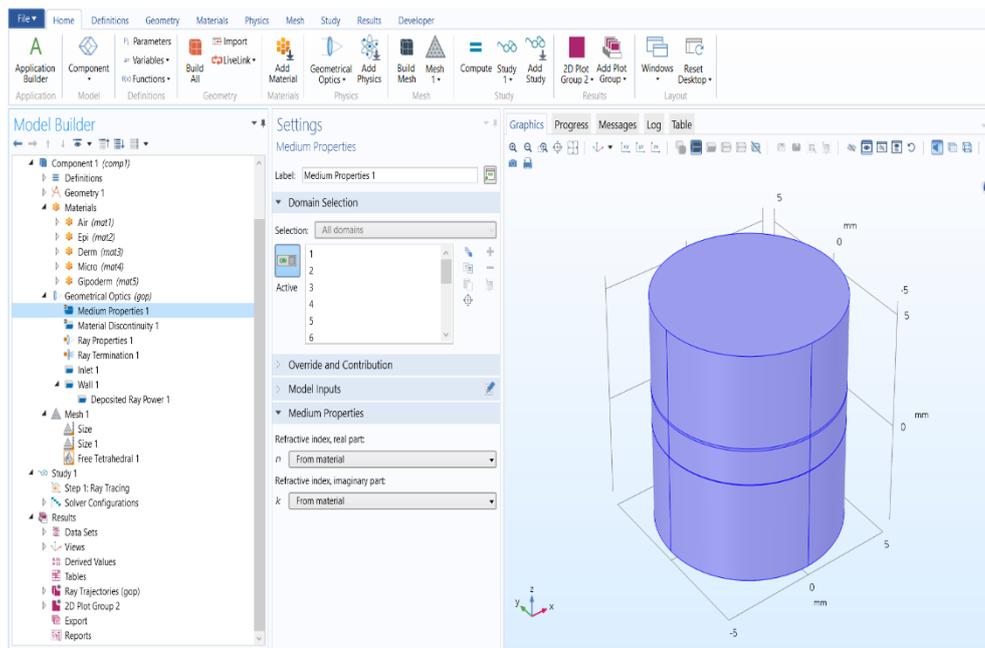


Рисунок 1. – Рабочее окно программы COMSOL Multiphysics с отображением многослойной модели воздух-эпидермис-дерма-гиподерма

В качестве теоретической основы компьютерного моделирования использована разработанная авторами ранее биофизическая модель поверхностных биотканей человека [3].

Процесс создания моделей в пакете COMSOL Multiphysics в общем случае состоит из следующих этапов:

- 1) Создать геометрию исследуемой области;
- 2) Назначить слоям геометрии материалы, которые будут отражать соответствующие физические свойства;
- 3) Подключить и настроить требуемые модули физики для эксперимента, проводимого над данной моделью;
- 4) Построить вычислительную сетку исходя из требуемой точности расчётов;
- 5) Задать параметры проведения эксперимента, такие как длительность, шаг вычисления, возможные модификации подключенных модулей физики.

Несмотря на общую схожесть модели обладают рядом значимых отличий, т.к. призваны решить разные задачи.

Для рассматриваемой задачи геометрия создавалась из примитивов цилиндрической формы. Моделируемая область имеет диаметр 10 мм, соответствующий реальному размеру освещаемой части биоткани в процессе регистрации спеклов. Размеры примитивов соответствуют размерам слоёв биотканей.

Для моделирования распространения лучей внутри модели для каждого из слоёв определены материалы со своими физическими параметрами. Для исследования распространения лазерного излучения внутри модели используется модуль физики «Геометрическая оптика», его настройка заключается в определении оптических условий среды и свойств объектов.

В настройках модуля «Геометрическая оптика» следует определить несколько ключевых параметров: показатель преломления внешней области; максимальное количество моделируемых лучей; используемую длину волны; источник излучения и его параметры; приёмник лучей, на поверхности которого будет рассчитываться накопление яркости/интерференционная картина.

В процессе построения вычислительной сетки можно воспользоваться предлагаемым шагом для используемого модуля физики либо определить его самостоятельно. Для получения более детальной картины отдельно была определена точность локального участка сетки в области приёмника отражённого излучения.

Настройка параметров проведения эксперимента заключалась в определении шагов исследования. В данном случае используется единственный шаг «Трассировка лучей», для которого был определен временной шаг для проводимых вычислений, через которые будет производиться просчёт значений ячеек вычислительной сетки.

Для модели было создано несколько примеров геометрии, с целью изучения влияния топологии на результирующую спекл-картину. Внешний вид простейшей из них представлен на рисунке 2.

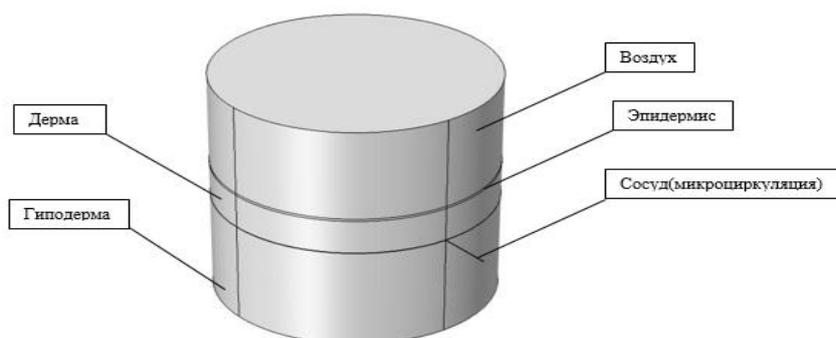


Рисунок 2. – Внешний вид геометрической модели, созданный средствами COMSOL Multiphysics

Процесс распространения лазерного излучения внутри исследуемой области изображён на рисунке 3. Красным цветом обозначены первичные лучи, а синим – вторичные, т.е. отражённые на границе слоёв с разными показателями преломления.

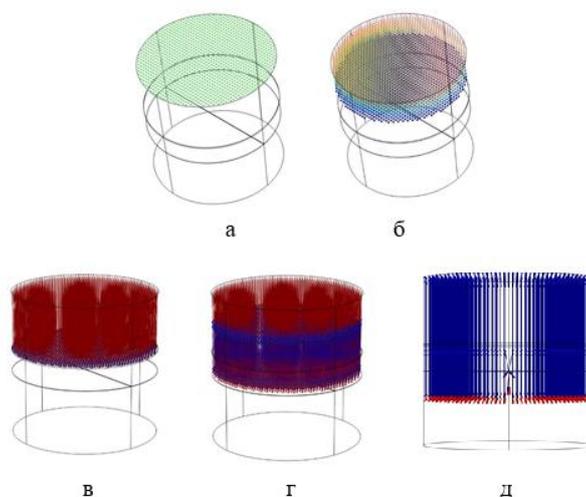


Рисунок 3. – Процесс распространения лучей плоского волнового фронта внутри исследуемого объекта (красным показаны первичные лучи, синим – вторичные/отраженные): начальный момент времени (а), процесс прохождения через воздушный слой (б), достижение биоткани (в), прохождение через биоткани (г), заключительный момент времени (д)

Результаты. С целью изучения поведения рассеиваемого света и зависимости образуемых спекл картин от объектов, попадающих в исследуемую область биоткани, было проведено моделирование ряда ситуаций:

1) Моделирование одиночного сосуда, полностью заполненного светотражающими частицами – эритроцитами, расположенного внутри исследуемой области (рисунок 4);

2) Моделирование идеализированной (равномерной) картины распределения светотражающих частиц на уровне микроциркуляции, расположенной внутри исследуемой области (рисунок 5);

3) Моделирование случайной схемы распределения светотражающих частиц на уровне микроциркуляции, расположенной внутри исследуемой области (рисунок 6);

4) Моделирование топологии сосудов произвольной формы (рисунок 7).

Для большей наглядности моделирование проводилось с увеличенными в 10 раз размерами геометрии.

На рисунке 4 видно, что наибольшая интенсивность отражённого излучения приходится на область с высокой концентрацией светотражающих элементов (или содержащих их сосудов).

При моделировании участка микроциркуляции результирующая спекл-картина способна отразить топологию сосудистой сети. Пример спекл-изображения для случайного участка микроциркуляции представлен на рисунке 7. Используя подобное моделирование можно проследить отдельные факторы, влияющие на образование спекл-картины.

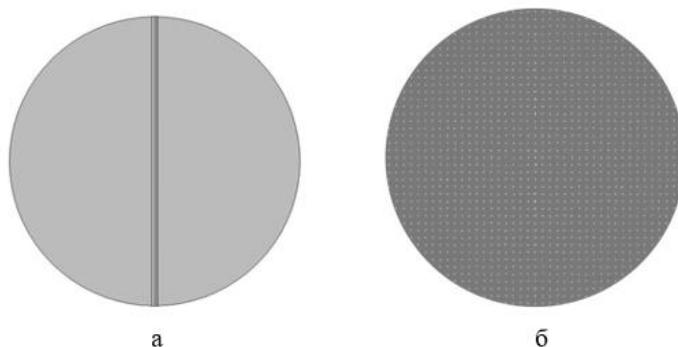


Рисунок 4. – Исследуемый участок модели, имитирующий одиночный сосуд (а), и результирующая спекл-картина (б)

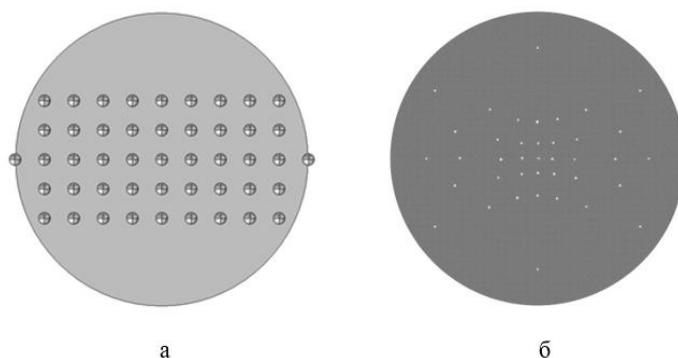


Рисунок 5. – Исследуемый участок модели, имитирующий идеализированную картину распределения эритроцитов в анализируемой области (а), и результирующая спекл-картина (б)

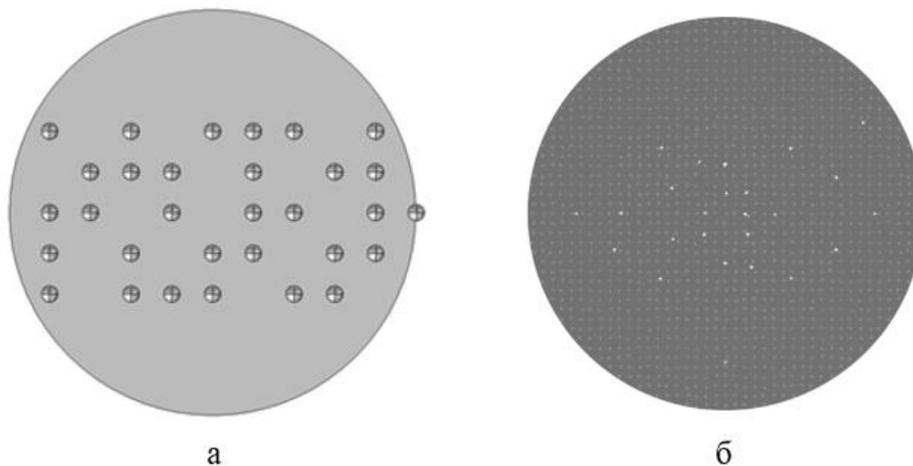


Рисунок 6. – Исследуемый участок модели, имитирующий случайную картину распределения эритроцитов в анализируемой области (а), и результирующая спекл-картина (б)

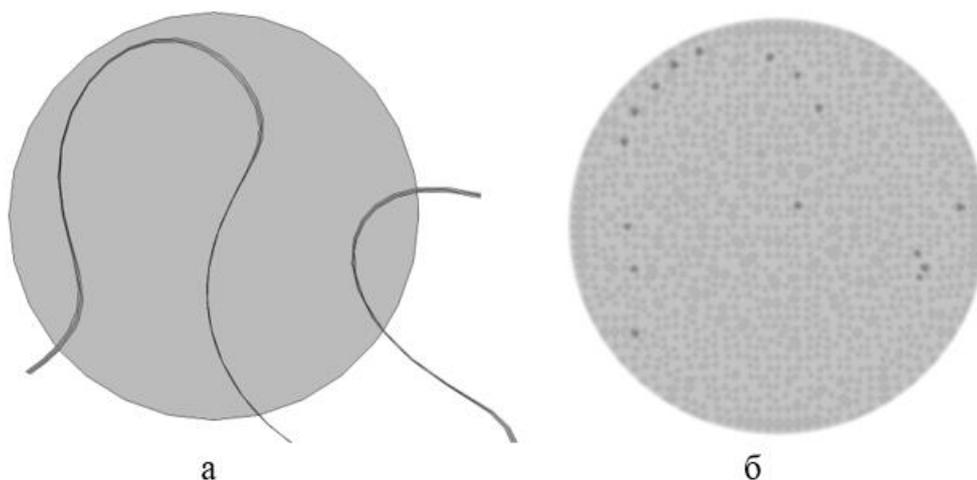


Рисунок 7. – Исследуемый участок модели, имитирующий случайный участок микроциркуляции в анализируемой области (а), и результирующая спекл-картина (б)

Для адаптации описанной модели к исследованию динамических процессов исходная (статическая) модель была модернизирована. Ключевым отличием новой модели является наличие дополнительного модуля физики, позволяющего задать скорость движения для части геометрии.

Геометрия подверглась переработке, чтобы соответствовать динамической структуре. Слой микроциркуляции, представлявший собой набор светоотражающих частиц, был отделён от основной части модели, также ему была присвоено свойство «линейной скорости». Теперь в процессе выполнения шагов исследования проводится имитация процесса протекания крови по заданному направлению.

Свойства подключённого модуля «Геометрическая оптика» подверглись изменениям. Основное отличие от предыдущего исследования заключается в моделировании непрерывного лазерного излучения, в то время как для получения одиночной спекл-картины достаточно было одной итерации испускания лазерного пучка. Свойства самого лазера остались прежними.

Настройка шагов исследования была преобразована к виду, отражающему процесс работы высокочувствительной камеры: получаемые изображения рассчитывались с частотой 120 кадров в секунду, при этом моделирование движения не прекращалось.

Так же, как и при исследовании процесса образования спекл-изображений, для большей наглядности получаемых данных было сохранено увеличение геометрических размеров в 10 раз.

Для испытания данного подхода было проведено моделирование процесса прохождения группы светотражающих частиц через центр исследуемого участка. Результирующие видеофайлы были обработаны в программном обеспечении авторов для расчёта спекл-контраста [2]. Начальная и конечная позиции группы светотражающих частиц, а также результат обработки полученных данных, представлены на рисунках 8 и 9 соответственно.

Как видно из представленного на рисунке 9 изображения на границах областей прохождения светотражающих частиц образуется неоднородность, выражающиеся в высоких значениях спекл-контраста. Данный результат подтверждает перспективность применения компьютерного моделирования в исследовании метода спекл-визуализации.

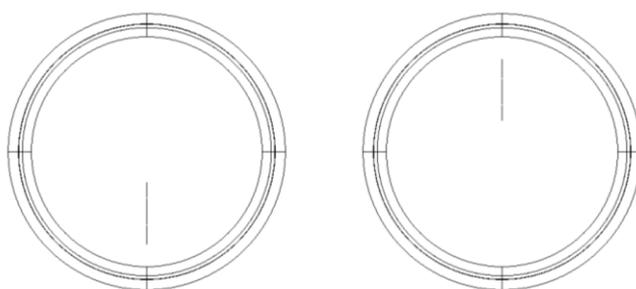


Рисунок 8. – Начальная и конечная позиции моделирования процесса прохождения группы светотражающих частиц – эритроцитов – через центр исследуемого участка

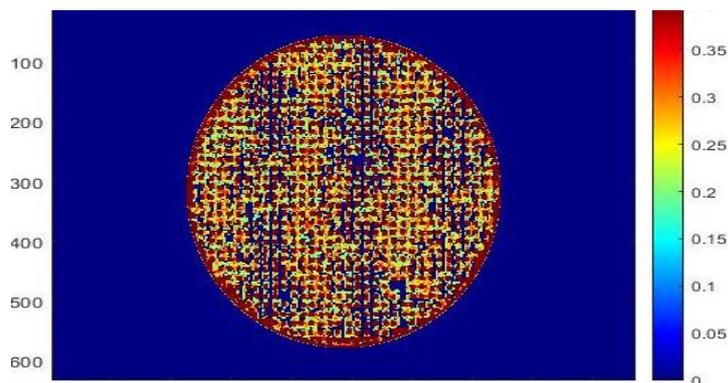


Рисунок 9. – Результаты обработки полученных в примере из рисунка 8 данных

Заключение. Полученная динамическая модель позволяет получать видеофайлы, содержащие в себе процесс накопления отражённого излучения при условии изменяющейся геометрии (движения светотражающих частиц внутри исследуемого участка). К недостаткам данной модели следует отнести высокие требования к качеству модели, а также необходимость её преобразования для каждого нового образца сосудистой топологии. Результаты данного моделирования могут быть обработаны специальным программным обеспечением для расчёта спекл-контраста.

На основе полученных результатов планируется провести моделирование образования спекл-картины при различной скорости движения эритроцитов, что позволит установить зависимость между скоростью и контрастом спеклов и использовать данную информацию после апробации модели на практике для обратной задачи – оценки скорости на основе реальных данных о контрасте.

Список литературы

[1].Виленский М.А., Агафонов Д.Н., Зимняков Д.А., Тучин В.В., Задражевский Р.А. Спекл-корреляционный анализ микрокапиллярного кровотока ногтевого ложа / Квантовая электроника, Т.41, №4 (2011) – С.324-328.

[2].Меженная, М.М. Расчет контраста спекл-изображений: методическое обеспечение и программная реализация / М.М. Меженная, Е.Н. Рункевич, И.В. Кишкевич, Т.В. Калилец, С.К.Дик Д.В. Лихачевский, Р.А. Лащётко // Научный журнал «Доклады БГУИР» / редкол.: В.А. Богущ [и др.]. Мн.: БГУИР, №7 (117), 2018. Стр. 139-143.

[3].Лащётко, Р. А. Биофизическая модель поверхностных тканей человека с микроциркуляторным руслом / Р. А. Лащётко // Электронные системы и технологии: сборник тезисов 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов / Минск : БГУИР, 2019. – С. 334.

MODELING OF HUMAN SURFACE TISSUES WITH MICROVASCULATURE UNDER THE INFLUENCE OF OPTICAL RADIATION

R.A. Lashchetko
Master student BSUIR

M.M. Mezhennaya
Ph.D., Associate Professor of BSUIR

T.V. Kalilec
Postgraduate Student of BSUIR

S.K. Dzik
Ph.D., Associate Professor of BSUIR

I.V. Kishkevich
Researcher of BSUIR

K.N. Runkevich
Researcher of BSUIR

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
E-mail: ruslanlaschetko@gmail.com*

Abstract. The article describes the results of modeling human surface tissues with a microvasculature under the influence of optical radiation using the COMSOL Multiphysics software package. The simulation result is two experimental models applicable in the study of speckle images.

Keywords: blood microcirculation, blood flow, speckle visualization, speckle image, contrast, modeling of human surface tissues with microvasculature.