

# МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год

№ 1 (277) 2013

ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

Издается с 1967 г., г. Москва

## ТЕОРИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

В представляемом вниманию читателей номере опубликованы статьи преподавателей, аспирантов и студентов факультета «Биомедицинская техника» Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н.Э. Баумана.

Национальный исследовательский университет МГТУ им. Н.Э. Баумана в течение ряда лет ведет исследования по программе «Технологии живых систем и биомедицинская техника». В данном выпуске представлены новые научные результаты, полученные коллективами научных школ МГТУ в 2012 году.

Вместе с тематическими номерами журнала «Биомедицинская радиоэлектроника», ежегодно издаваемыми с 1999 года, и материалами ежегодно проводимых с 1998 года научно-технических конференций «Медико-технические технологии на страже здоровья» читательская аудитория может получить полное представление о направлениях научно-исследовательской деятельности факультета и их эволюции.

В настоящее время тематика медико-технических и биоинженерных исследований в МГТУ расширяется; в них участвуют сотрудники различных кафедр и научно-исследовательских лабораторий, а также сторонних организаций, использующие результаты исследований и разработок по основной тематике при создании оригинальных приборов, аппаратов, систем и изделий медицинского назначения. Этот процесс нашел отражение в содержании статей и составе авторского коллектива данного выпуска.

Выражаю уверенность, что представленные работы окажутся полезными отечественному сообществу биомедицинских инженеров, врачей-клиницистов и исследователей, а также зарубежным ученым.

*Сергей Игоревич Шукин,  
профессор, декан,  
факультет «Биомедицинская техника»,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва*

*Л.П. Сафонова, А.Б. Селиверстов*

## Изготовление и исследование оптических характеристик фантомов биологических тканей на основе водных гелей

### Аннотация

Целями представляемой в статье работы являлись: разработка методики изготовления твердых фантомов биологических тканей из простых подручных материалов, а именно воды, желатина, молока и туши; изготовление однородных и горизонтально-слоистых фантомов для непродолжительного использования в учебных и научно-исследовательских целях; экспериментальное исследование изготовленных в соответствии с предлагаемой методикой фантомов биотканей с помощью спектрофотометрического прибора «OxiplexTS» («ISS, Inc.», США), позволяющего получать абсолютные значения оптических параметров образца – коэффициента поглощения и транспортного коэффициента рассеяния.

Необходимость создания адекватных физических моделей – фантомов биологических тканей, воспроизводящих физические параметры и структурные свойства биотканей, актуальна для разных направлений биомедицинской инженерии и медико-биологических исследований. Активное развитие в последние два десятилетия спектрофотометрических методов, оксиметрии биотканей, оптической диффузионной томографии и других приложений определяет большой объем работ по созданию и

исследованию соответствующих фантомов, воспроизводящих оптические параметры биологических тканей, структурные и даже физиологические [1], [2]. Фантомы разрабатывают для неинвазивного мониторинга уровня глюкозы [3], [4], исследования тканей молочной железы в маммографии [5], оксиметрии биотканей и определения оптических параметров тканей [1], [6], разрабатывают тест-объекты для калибровки спектрофотометрических приборов, пульсовых и тканевых оксиметров.

Используемые в спектрофотометрии жидкие и твердые фантомы имеют свои достоинства и ограничения по изготовлению и применению [1]-[7].

В исследовательских целях часто необходимо разрабатывать малозатратные по времени и ресурсам твердые фантомы биотканей различной конфигурации и различных оптических свойств. Важное требование состоит в том, что операции по приготовлению фантома должны быть, по возможности, простыми, быстрыми и безопасными.

В работе исследовались твердые фантомы, изготовленные из воды, желатина, сухого молока и туши, близкие по оптическим свойствам к биотканям и позволяющие имитировать слоистое строение тела человека. Результаты экспериментальных исследований изготовленных образцов подтверждают выполнение основных, известных в спектрофотометрии закономерностей, определяющих распространение излучения в сильно рассеивающих средах с поглощением. Измерения проводились с помощью спектрофотометрического прибора «OxiplexTS» («ISS, Inc.», США), принцип действия которого основан на высокочастотной модуляции интенсивности зондирующего излучения и многодистантном подходе, что обеспечивает разделение эффектов поглощения и рассеяния излучений красного и ближнего инфракрасного спектрального диапазонов и позволяет получать количественные оценки коэффициента поглощения, транспортного коэффициента рассеяния и концентраций поглотителей.

В процессе работы выявлены ограничения применимости предлагаемых фантомов, показаны возможные направления использования их в спектрофотометрии биотканей в учебных и научно-исследовательских целях.

### Твердые фантомы биотканей в спектрофотометрии

Твердые фантомы на основе водных гелей (агар-агара, желатина, полиакриламидного геля) просты в изготовлении и допускают использование как органических, так и неорганических рассеивателей, но имеют короткий срок службы – около недели, менее удобны для изготовления сложных фантомов по сравнению с фантомами на основе резины и силикона [1].

В качестве рассеивающей среды в твердых фантомах на основе водных гелей часто используют коровье молоко, в состав которого входят два типа рассеивающих частиц – жировые шарики и коллоидные белковые частицы. Диаметры шариков находятся в интервале 0,5...20 мкм; большинство частиц имеют диаметр 2...4 мкм. Для белковой фракции 90 % частиц имеют размеры от 0,02 до 0,15 мкм, размеры оставшихся 10 % частиц находятся в диапазоне 0,15...1,0 мкм [1, с. 284].

В качестве поглощающих компонентов фантомов на основе водных гелей используют красители, например чернила либо пигменты: тушь, угольный порошок и порошок графита. Тушь – суспензию частичек сажи с размерами от 0,1 до 1,0 мкм в водной среде – используют в фантомах для моделирования поглощения такими биологическими хромофорами, как гемоглобин и меланин. Однако тушь, как и другие пигменты, не является независимым поглощающим компонентом, вызывая рассеяние света. При высоких объемных концентрациях в фантоме (более 0,2...0,3 %) тушь сильно ослабляет излучение и ее частицы проявляют тенденцию к объединению.

Распространение света в искусственно созданной среде считают подобным таковому в реальной биологичес-

кой ткани, если значения таких физических величин, как показатель преломления  $n$ , коэффициент поглощения  $\mu_a$ , фактор анизотропии  $g$  и коэффициент рассеяния  $\mu_s$  для разных слоев в фантоме совпадают со значениями этих величин в реальном объекте. Для мягких тканей в видимой и в ближней инфракрасной спектральных областях типичные значения  $\mu_a$  составляют от 0,5 до 5,0  $\text{см}^{-1}$ ;  $\mu_s$  – от 0,2 до 400  $\text{см}^{-1}$ ;  $g$  – от 0,8 до 0,99;  $n$  – от 1,33 до 1,50 [1]. При использовании уравнения Больцмана в решаемых в оптике биотканей задачах диффузионного приближения, подобие распространения излучения обеспечивается соответствием значений  $\mu_a$  и транспортного коэффициента рассеяния  $\mu_s'$  ( $\mu_s' = \mu_s \cdot [1 - g]$ ) [1].

Многослойные горизонтально-слоистые фантомы разрабатывают для имитации строения кожи, головы человека, при исследовании мышечной ткани. Правильное согласование показателей преломления на границах разделов обеспечивается для слоев и включений, изготовленных из одного и того же базового вещества на основе резины, силикона или водных гелей.

### Экспериментальные исследования

#### Исследуемые фантомы

На основании анализа литературных данных была предложена методика изготовления исследуемых фантомов на основе желатинового водного геля (примерно 7 %) с сухим молоком в качестве рассеивающего компонента (в количестве примерно 6 %) и с тушью в качестве поглощающего компонента (от 0 до 0,25 об. %) для имитации оптических параметров биотканей, таких как  $\mu_a$  и  $\mu_s'$ , в красной и ближней инфракрасной областях спектра и сложной структуры биотканей.

Исследуемые однородные фантомы отличались концентрацией поглотителя – туши. Двухслойные твердые фантомы имели одинаково поглощающий и рассеивающий, в пределах погрешности изготовления, нижний слой и отличались толщиной слабо поглощающего верхнего слоя.

#### Используемое оборудование

Исследование фантомов проводилось с помощью спектрофотометрического прибора «Oxiplex TS» («ISS, Inc.», США), имеющего следующие рабочие характеристики:

- частота модуляции интенсивности излучения, МГц: 110;
- длины волн источников зондирующего излучения, нм: 692 и 834;
- два измерительных канала: по 8 источников (лазерных диодов), по 4 – на каждую из двух длин волн, и по одному приемнику – фотоэлектронному умножителю (ФЭУ);
- кросскорреляционная частота приема излучения, кГц: 3...5;
- мультиплексирование источников по времени: от долей герц до 100 Гц;
- диаметр оптоволоконного источника – 400 мкм, диаметр оптоволоконного кабеля приемника – 3 мм.

Используемый в работе гибкий многодистантный оптоволоконный датчик (рис. 1) позволяет регистрировать рассеянное в обратном направлении излучение для расстояний между источником и приемником ( $r$ ) 20, 25, 30 и 35 мм, что соответствует глубине зондирования фантомов примерно от 7 до 17 мм.

На рис. 1 представлены фотографии гибкого оптоволоконного многодистантного датчика (слева), двух калибровочных блоков фирмы «ISS, Inc.» (в центре между двумя фантомами) и контейнеров с исследуемыми фантомами без поглотителя (справа) и с добавлением поглотителя (контейнер с датчиком).



Рис. 1. Оптоволоконный многодистантный датчик, стандартные калибровочные блоки («ISS, Inc.», США) и изготовленные фантомы

### Методика измерений

Методика измерений при экспериментальном исследовании фантомов, изготовленных по разработанной методике, включала в себя следующие этапы: 1) калибровку прибора «Oxiplex TS» в соответствии с инструкцией по эксплуатации на блоке с известными оптическими параметрами ( $\mu_a$  и  $\mu_s'$ ); 2) установку оптического датчика на верхней плоской поверхности исследуемого образца, плотное прижатие гибкого датчика к поверхности фантома с помощью деревянного бруска и закрепление с помощью эластичного жгута, обертывание фантома с закрепленным датчиком плотной черной материей; 3) регистрацию и запись в файл параметров рассеянного в исследуемом образце в обратном направлении излучения и расчетных оптических параметров образца.

Для калибровки использовали стандартные силиконовые блоки («ISS, Inc.», США) с добавлением в определенных концентрациях порошка оксида титана в качестве рассеивателя и порошка графита в качестве поглотителя (рис. 1). Оптические параметры калибровочных блоков приведены в табл. 1.

Проводились три типа исследований: исследования однородных фантомов с разными концентрациями поглотителя, исследования двухслойных фантомов с менее поглощающим верхним слоем толщиной до 15 мм и трехслойных образцов.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### Однородные образцы с тушью

Исследовались изготовленные в соответствии с разработанной методикой фантомы на водно-желатиновой основе с добавлением сухого молока (3,4 % жирности) в качестве рассеивателя и с разными концентрациями туши как поглотителя (рис. 2а). Значения оптических параметров

однородных образцов  $\mu_a$  и  $\mu_s'$ , измеренные с учетом всех расстояний  $r$  оптического датчика, представлены на рис. 2б, в.

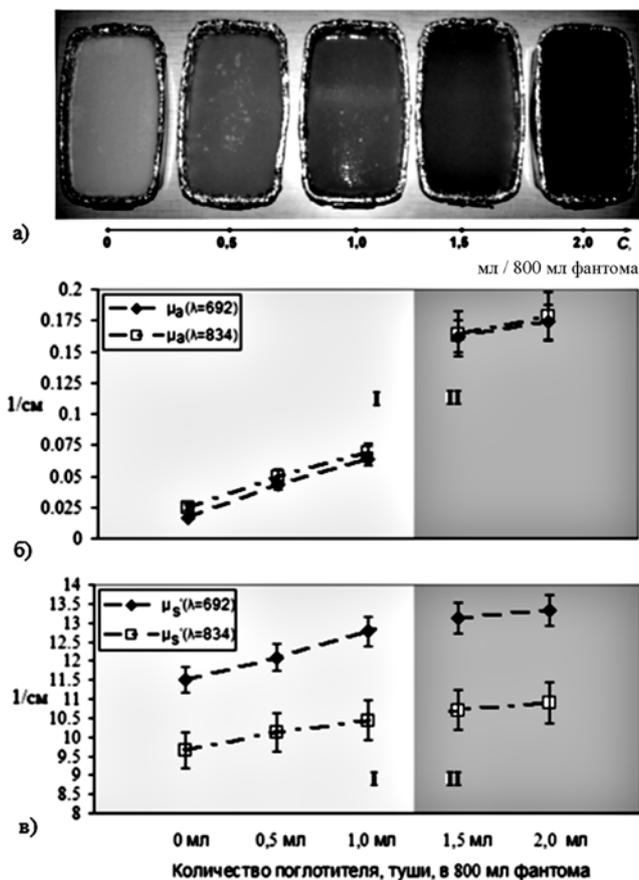


Рис. 2. Исследование однородных фантомов: а) изготовленные однородные фантомы с различным поглощением, определяемым концентрацией туши; б) измеренные коэффициенты поглощения фантомов; в) измеренные транспортные коэффициенты рассеяния фантомов

В области I небольших концентраций туши от 0 до 1,0 мл на 800 мл фантома сохраняется линейность зависимости  $\mu_a$  от концентрации поглотителя (рис. 2б), что следует из модифицированного закона Бугера-Ламберта-Бера для сред с многократным рассеянием [1]. Область II на графиках рис. 2б, в соответствует объемным концентрациям туши, близким к 0,2 % (при 1,5 мл туши на 800 мл фантома) и более (при 2,0 мл туши на 800 мл фантома). При высоких концентрациях туши восстановление оптических параметров по используемой методике измерений и заложенным вычислительным алгоритмам невозможно из-за слабого регистрируемого излучения. Таким образом, для проведения дальнейших исследований необходимо использование туши в объемных концентрациях менее 0,2 %.

Основной вклад в рассеяние излучения в обратном направлении вносит основа образца с рассеивающими включениями; при этом поглотители, обеспечивая допол-

Таблица 1

#### Оптические параметры калибровочных блоков

Рассеивающий блок 1				Рассеивающий блок 2			
692 нм		834 нм		692 нм		834 нм	
$\mu_a$ , $\text{CM}^{-1}$	$\mu_s'$ , $\text{CM}^{-1}$						
0,135	5,0	0,131	4,3	0,104	9,6	0,099	8,6

нительное необходимое ослабление излучения, также вносят вклад в рассеяние излучения [1], [2]. При увеличении концентрации туши в фантомах наблюдается увеличение регистрируемых с помощью «OxiplexTS» значений  $\mu_s'$  для обеих длин волн зондирующего излучения на 3...6% при изменении концентрации туши на 0,5 мл в интервале 0...1,0 мл (рис. 2в).

Рассеяние света на мелких частицах с размерами, сравнимыми с длиной волны или меньшими, характеризуется выраженной спектральной зависимостью [1, с. 278]; величина  $\mu_s'$  уменьшается при увеличении длины волны зондирующего излучения, что наблюдается и для биологических тканей, и в полученных экспериментальных данных (рис. 2в). Крупные частицы с размерами, большими длины волны, дают более высокое значение  $g$  и слабую зависимость от длины волны [1]. Для исследуемых фантомов, содержащих мелкие рассеивающие частицы молока и туши, наблюдаем существенно меньшие (на 17%) значения  $\mu_s'$  для  $\lambda = 834$  нм по сравнению со значениями  $\mu_s'$  для  $\lambda = 692$  нм (рис. 2в).

### Воспроизводимость оптических параметров фантомов

Экспериментальные результаты показали, что практически невозможно обеспечить воспроизводимость оптических параметров основы фантомов, изготавливаемых в разное время из материалов (желатина и сухого молока) разных производителей. Наибольшие различия наблюдаются для  $\mu_s'$ , что может определяться качеством желирующего агента, концентрацией и размерами рассеивающих частиц сухого молока, отклонением жирности последнего от заявленной производителем (3,4%).

Вариабельность значений оптических параметров исследуемых фантомов при калибровке прибора на разных калибровочных блоках (1 или 2, см. табл. 1) составляет не более 11, 8, 4 и 4% соответственно для  $\mu_a$  ( $\lambda = 692$  нм),  $\mu_a$  ( $\lambda = 834$  нм),  $\mu_s'$  ( $\lambda = 692$  нм) и  $\mu_s'$  ( $\lambda = 834$  нм).

При работе с разными расстояниями оптического датчика в процессе экспериментов обнаружены расхождения в значениях измеряемых параметров однородных образцов. Расхождения значений  $\mu_a$  и  $\mu_s'$  при разных комбинациях из четырех возможных расстояний между источником и приемником ( $r = 20, 25, 30, 35$  мм) составили порядка 5...11% для калибровочных блоков. На фантомах отклонения достигают нескольких десятков процентов, что указывает на необходимость корректировки методики и алгоритма калибровки «OxiplexTS» для уменьшения составляющей методической погрешности.

Для дальнейших исследований необходимо соблюдать условие, что все исследуемые образцы относятся к одной партии, т. е. готовятся одновременно из одних и тех же исходных составных компонентов. При этом на каждом этапе приготовления необходимо до этапа отвердевания тщательно перемешивать содержимое контейнеров с фантомами для обеспечения большей однородности распределения поглотителя и рассеивателя в желатиновом геле.

### Двухслойные фантомы

Исследовались изготовленные двухслойные фантомы, представленные в разрезе на рис. 3а. Для всех фантомов одинаковым являлся нижний слой с концентрацией туши 0,5 мл на 800 мл фантома; толщина верхнего слоя без добавления туши была разной (0, 5, 10 и 15 мм). Концентрация рассеивателя – сухого молока – была одинако-

вой для всех фантомов и слоев. Выбранное соотношение коэффициентов поглощения слоев, верхнего и нижнего, может имитировать влияние кожи и подкожной жировой клетчатки на исследование оптических параметров мышечной ткани, а также влияние экстракраниальных тканей на исследование оптических параметров интракраниальных тканей.

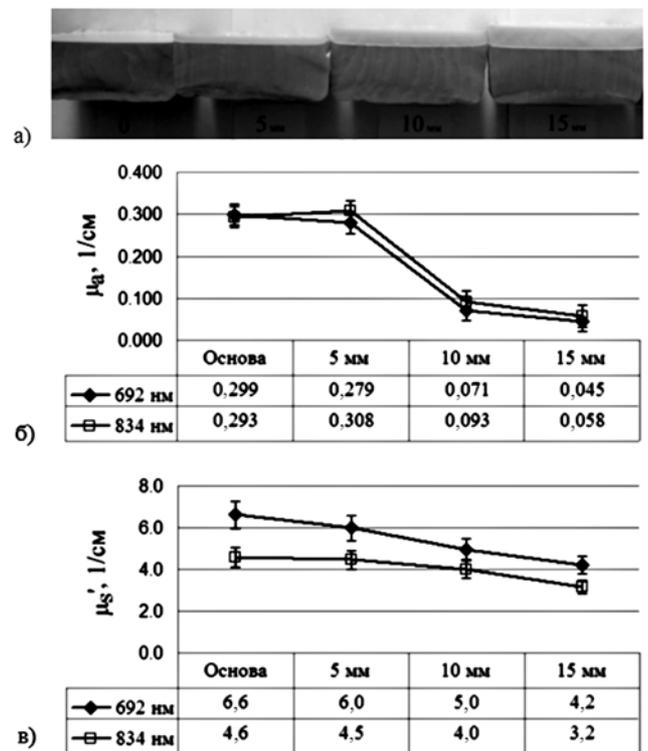


Рис. 3. Исследование двухслойных фантомов: а) изготовленные двухслойные фантомы с различной толщиной верхнего слабо поглощающего слоя; б) измеренные коэффициенты поглощения фантомов; в) измеренные транспортные коэффициенты рассеяния фантомов

По изготовленным двухслойным фантомам исследовалось влияние наружного слоя на результаты спектрофотометрических измерений оптических параметров нижележащего слоя. Результаты измерений оптических параметров двухслойных моделей (рис. 3а) с помощью «OxiplexTS» приведены на графиках рис. 3б, в.

Для используемого оптического датчика получили, что верхний слой без поглотителя толщиной 5 мм практически не влияет на измерение параметров нижнего слоя – основы фантома с концентрацией туши 0,5 мл на 800 мл вещества фантома; значения оптических коэффициентов минимально различаются для длины волны 834 нм (рис. 3). Верхние слои фантомов толщиной 10 и 15 мм не позволяют определять оптические параметры нижележащего слоя, особенно коэффициента поглощения. Увеличение толщины верхнего слабо рассеивающего слоя соответствует уменьшению концентрации поглотителя (либо отсутствию последнего) в зондируемом объеме фантома, что приводит к уменьшению значений  $\mu_s'$  (рис. 3в) и резкому изменению регистрируемых значений  $\mu_a$  (рис. 3б).

При работе с многослойными фантомами оптические характеристики различных слоев определяют предварительно, путем измерений на однородных объемных образцах того же состава, что и у слоев, составляющих горизонтально-слоистый фантом.

## Трехслойные горизонтально-слоистые фантомы

В табл. 2 представлены схематичные изображения многослойных образцов с разной концентрацией туши в слоях, а также измеренные значения  $\mu_a$  для разных длин волн и разных расстояний от источника до приемника.

Трехслойные фантомы изготавливались из однородных блоков путем нарезания слоев разной толщины и укладывания друг на друга в определенной последовательности. Нижний слой имел наибольшую толщину для имитации его полубесконечности. Основной целью измерений на трехслойных фантомах являлась экспериментальная демонстрация зависимости регистрируемых оптических параметров от толщины и коэффициентов поглощения слоев, расстояний между источником и приемником, которые определяют глубину зондирования образца. Толщина слоев не выдерживалась с высокой точностью, погрешность составляла около 20 %.

Из полученных экспериментальных данных (табл. 2) можно сделать следующий вывод, не противоречащий известным данным [6]: глубина зондирования и возможность измерения оптических параметров отдельных слоев определяются расстояниями между источниками и приемниками излучения, а также соотношениями оптических параметров слоев и их взаимным расположением.

### Заключение

Для однородных фантомов с разной концентрацией поглотителя возможна оценка молярного коэффициента экстинкции и концентраций водорастворимых хромофоров по соотношениям оптических плотностей однородных фантомов с разными концентрациями поглотителя и без добавления поглотителя.

Разработанная в процессе исследований методика изготовления фантомов на основе водных гелей позволяет создавать малозатратные однородные и горизонтально-слоистые образцы. Возможно изготовление многослойных фантомов с различными комбинациями слоев по поглощению и рассеянию, если менять концентрацию и туши, и молока. Методика применима также для получения однородных фантомов с включениями для имитации и выявления опухолевых новообразований, что находит место при решении задач в оптической диф-

фузионной маммографии. Моделирование сложных структур и целых органов нецелесообразно из-за короткого срока службы фантомов на основе водных гелей.

Анализ измерений, получаемых для разных расстояний многодистантного оптического датчика, выявил необходимость изменения алгоритма калибровки, заложенного в программном обеспечении «OxiplexTS», с учетом различных комбинаций используемых расстояний «источник-приемник».

Подобные твердые фантомы (с включениями и горизонтально-слоистые) могут быть полезны при разработке статистических алгоритмов, например на основе методов Монте-Карло, и соответствующих программных средств анализа процесса распространения фотонов в сильно рассеивающих средах. Экспериментальные данные, полученные на фантомах с известным строением и оптическими свойствами, используют на этапе верификации алгоритмов и тестирования программ с последующим решением обратных диагностических задач.

Работа с фантомами биологических тканей позволяет сформулировать либо уточнить отдельные медико-технические требования при разработке аппаратно-программных средств для спектрофотометрии биологических тканей, а также оптической диффузионной томографии.

### Список литературы:

1. Оптическая биомедицинская диагностика / Пер. с англ. Под ред. В.В. Тучина. В 2 т. Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 560 с.
2. Lamouche G., Kennedy B.F., Kennedy K.M., Bisailon Ch.-E., Curatolo A., Campbell G., Pazos V., Sampson D.D. Review of tissue simulating phantoms with controllable optical, mechanical and structural properties for use in optical coherence tomography // Biomedical Optics Express. 2012. Vol. 3. № 6. PP. 1381-1398.
3. Kinnunen M., Myllyla R., Jokela T., Vainio S. In vitro studies toward noninvasive glucose monitoring with optical coherence tomography // Journal of Applied Optics. 2006. Vol. 45. № 10. PP. 2251-2260.
4. Bykov V., Kirillin M. Yu., Priezzhev A. V., Myllyla R. Time gating in glucose sensing with ultrashort pulses // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 7022. P. 70220X1-7. DOI: 10.1117/12.804085.
5. Zhang W., Gao F., Wu L., Ma W., Lu Y., Zhou Z. A combined time-domain diffuse fluorescence and optical tomography system for breast tumor detection // Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8214. PP. 82141B-1 – 82141B-11. DOI: 10.1117/12.907066.

Таблица 2

Примеры экспериментальных данных для трехслойных фантомов

Концентрация туши в слое (на 800 мл)	Толщина слоя	Коэффициент поглощения слоя, $\mu_a$ , см <sup>-1</sup>		Экспериментальные данные для трехслойных образцов				
		692 нм	834 нм	Длина волны	Расстояние "источник-приемник", см			
0,5 мл	8-10 мм	0,043	0,050		692 нм	2,0-3,5	2,0-2,5	2,5-3,0
1,0 мл	10-12 мм	0,017	0,025	834 нм		0,058	0,057	0,056
0 мл		0,043	0,050			0,063	0,061	0,062
0,5 мл	8-11 мм	0,043	0,050	692 нм	2,0-3,5	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5
0 мл	12-15 мм	0,017	0,025					
0,5 мл		0,043	0,050		0,046	0,040	0,044	0,044

6. Franceschini M.A., Fantini S., Paunescu L.A., Maier J.S., Gratton E. Influence of a superficial layer in the quantitative spectroscopic study of strongly scattering media // Journal of Applied Optics. 1998. Vol. 37. № 31. PP. 7447-7458.
7. Dehaes M., Grant P.E., Sliva D.D., Roche-Labarbe N., Pienaar R., Boas D.A., Franceschini M.A., Selb J. Assessment of the frequency-domain multi-distance method to evaluate the brain optical properties: Monte Carlo simulations from neonate to adult // Biomedical Optics Express. 2011. Vol. 2. № 3. PP. 552-567.

Лариса Петровна Сафонова,  
канд. техн. наук, доцент,  
Андрей Борисович Селиверстов,  
студент 4-го курса,  
кафедра «Медико-технические информационные технологии»,  
факультет «Биомедицинская техника»,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва,  
e-mail: larisa.safonova@gmail.com

Л.Н. Анищенко, А.А. Демендеев, С.И. Ивашов

## Использование радиолокации для бесконтактной оценки паттернов дыхания и двигательной активности человека во сне

### Аннотация

Доказана возможность использования метода биорадиолокации с целью обнаружения нарушений дыхания во сне. Приведены технические характеристики биорадиолокатора, который может быть использован для бесконтактного мониторинга физиологических параметров человека в течение сна в условиях длительной изоляции. Предложен алгоритм выделения эпизодов двигательной активности из регистрируемого биорадиолокатором сигнала. Приведены результаты обработки биорадиолокационных данных, зарегистрированных в ходе международного научного проекта «МАРС-500» по имитации пилотируемого полета на Марс.

Сон, составляя треть жизни человека, представляет собой периодический процесс изоляции от внешних стимулов, прежде всего зрительных, и является сложным динамическим состоянием. Среди группы факторов, влияющих на сон, важнейшее место занимает стресс. Сложная внутренняя организация сна под влиянием стрессов изменяется и имеет разнообразные физиологические и патофизиологические проявления [1]. Одним из проявлений стресса является возникновение и учащение эпизодов апноэ и гипопноэ во сне.

Для того чтобы обеспечить эффективную профилактику нарушений сна и дыхания, вызванных стрессом, необходимо вовремя обнаружить проявление данных нарушений и предпринять профилактические меры.

В настоящее время в специализированных сомнологических лабораториях для выявления нарушений сна и дыхания во сне применяется дорогостоящий и трудоемкий метод полисомнографии. Он требует наложения значительного количества контактных датчиков и электродов на поверхность тела человека, что сказывается на качестве сна испытуемого. Таким образом, создание бесконтактного метода, позволяющего обеспечивать профилактику нарушений дыхания во сне, является актуальной задачей биомедицинской инженерии. Данная задача может быть решена при помощи метода биорадиолокации [2]. К его достоинствам, кроме отсутствия контакта с телом пациента, следует отнести также простоту и безопасность проведения обследования, что позволяет использовать метод биорадиолокации испытуемым на дому самостоятельно.

### Аппаратура и методика проведения эксперимента

В 2006 году в лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках национального проекта «Образование» был разработан уникальный многочастотный биорадиолокатор, имеющий следующие технические характеристики:

- частотный диапазон, ГГц: 3,6...4,0;
- количество частот: 16;
- частота дискретизации, Гц: 62,5;

- частоты регистрируемых сигналов, Гц: 0,03...10;
- динамический диапазон регистрируемых сигналов, дБ: 60;
- размеры антенного блока, мм: 120 x 50 x 50.

Безопасность использования данного биорадиолокатора подтверждена протоколом испытаний, проведенных в Испытательном центре медицинских изделий АНО «ВНИИИМТ» в 2009 году.

С целью подтверждения возможности использования биорадиолокатора, разработанного в лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана, для регистрации сигнала дыхания и двигательной активности человека в течение сна и выработки соответствующей методики проведения обследования, в 2009 году были выполнены эксперименты на базе студенческого санатория-профилактория МГТУ им. Н.Э. Баумана [3]. Результатом проделанной работы стало включение биорадиолокационного эксперимента по оценке параметров дыхания и двигательной активности в течение сна в международный научный проект «МАРС-500» по имитации пилотируемого полета на Марс, который проводился на базе ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем (ИМБП) РАН с июня 2010 года по ноябрь 2011 года [4]. До начала экспериментов было получено одобрение этического комитета ИМБП и информированное согласие всех членов экипажа. Команда «МАРС-500» была обучена методике проведения экспериментов по регистрации параметров дыхания и движения при помощи биорадиолокатора.

В ходе эксперимента прибор располагался около кровати, антенный блок направлялся на область, где в течение сна должна была находиться грудная клетка испытуемого. Биорадиолокационный сигнал регистрировался в течение всего времени сна. На *рис. 1* представлена фотография проведения биорадиолокационного эксперимента членом экипажа «МАРС-500».

По окончании эксперимента диск с записанными на него биорадиолокационными данными посредством шлюза передавался членом экипажа координаторам эксперимента. Всего в течение проекта «МАРС-500» было проведено 7 серий биорадиолокационных экспериментов для каждого из членов экипажа.