

На правах рукописи



Колпаков Александр Владимирович

БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ИНФРАКРАСНОЙ ДИАФАНОСКОПИИ
МЯГКИХ ТКАНЕЙ ПАРОДОНТА

Специальность 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Спиридовон Игорь Николаевич,

доктор технических наук, профессор

Научный консультант:

Самородов Андрей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Обухов Юрий Владимирович,

доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, главный научный сотрудник;

Минаев Владимир Леонидович,

кандидат технических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», начальник лаборатории.

Ведущая организация:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «12» сентября 2018 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.14 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана в зале Ученого Совета по адресу 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.14.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

Самородов Андрей
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. По статистике Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) частота поражения пародонта воспалительными заболеваниями составляет от 80 до 100 % в 53 странах. На лечение зубов и десен, согласно статистике ВОЗ, тратится 10 % всех средств, выделяемых на здравоохранение в развитых странах [Мюллер Х-П., 2004, Цепов Л.М., 2008, Рубникович С.П., 2011].

Своевременная диагностика воспалительных заболеваний повышает эффективность терапии, снижает риск развития необратимых нарушений в тканях пародонта. Однако существующие методы диагностики воспалительных заболеваний мягких тканей пародонта (МТП), предполагают инвазивное определение глубины пародонтальных карманов в стадии развивающегося повреждения [Мюллер Х-П., 2004]. При отсутствии своевременного лечения воспалительный процесс распространяется в твердые ткани пародонта, и происходят необратимые повреждения: разрушение альвеолярной кости и потеря зубов [Цепов Л.М., 2008, Аверьянов П.Ф., 2008].

Инвазивный характер существующих методов диагностики воспалительных заболеваний МТП, невозможность визуализации повреждений мягких тканей рентгеновскими методами создают трудности при обнаружении воспалительного процесса в МТП на ранней стадии.

И.Н. Спиридоновым (1996), R.S. Jones (2003), показана возможность визуализации в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн мягких и твердых тканей ротовой полости методом диафаноскопии. Однако широкого применения в стоматологической практике метод ИК диафаноскопии МТП не нашел. В значительной мере это обусловлено отсутствием сведений о причинах изменения оптических свойств МТП при возникновении и развитии воспалительных заболеваний, необходимостью оценки качества ИК изображений МТП, обоснованном выборе диапазона длин волн и других характеристик зондирующего излучения, а также отсутствием созданной и апробированной биотехнической системы инфракрасной диафаноскопии мягких тканей пародонта (БТС ИКД МТП).

Таким образом, исследование свойств ИК изображений МТП, влияния на них состояния тканей пародонта и условий освещения и создание БТС ИКД МТП для обнаружения воспалительных заболеваний МТП является безусловно актуальной задачей.

Цель диссертационной работы – создание БТС ИКД МТП для обнаружения воспалительных заболеваний МТП.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие **теоретические и практические** задачи:

- установлена взаимосвязь оптических свойств и структурно-функциональных изменений МТП в процессе развития воспалительных заболеваний;

- обосновано применение метода инфракрасной диафаноскопии (ИКД) в стоматологической практике для диагностики воспалительных заболеваний МТП;
- исследована зависимость качества ИК изображений воспаленных участков МТП от характеристик зондирующего излучения;
- исследованы алгоритмы автоматического обнаружения очагов воспаления МТП;
- разработаны требования к техническим средствам БТС ИКД МТП;
- создан и апробирован аппаратно-программный комплекс (АПК) ИКД МТП.

Методы исследования и достоверность результатов. Для решения поставленных задач при выполнении работы применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. Достоверность результатов диссертационной работы основывается на использовании в работе основных положений теории биотехнических систем, физической оптики, теории оптических систем, теории цифровой обработки изображений, методов математической статистики и подтверждена в ходе апробации АПК ИКД МТП.

Научная новизна полученных результатов:

1. Установлено, что применение метода ИКД обеспечивает возможность обнаружения очагов воспаления МТП на доклинической стадии.
2. Установлены требования к диапазону длин волн и пространственной конфигурации зондирующего излучения для визуализации на доклинической стадии очагов воспаления МТП методом ИКД.
3. Установлены пороговые значения коэффициента контраста, модуля и направления градиента интенсивности очагов воспаления МТП на ИК изображениях для обнаружения различных стадий воспаления.

Практическая значимость работы заключается в создании стенда для исследований влияния конфигурации излучения на свойства ИК изображений очагов воспаления МТП, алгоритма автоматического обнаружения очагов воспаления на ИК изображениях МТП, зарегистрированных методом ИКД, в разработке технических требований к АПК ИКД МТП, результатах разработки и апробации БТС ИКД МТП.

Положения, выносимые на защиту

1. На группе 10 добровольцев в результате моделирования воспаления МТП установлено, что доля изображений, на которых обнаруживаются очаги воспаления при визуализации методом ИКД в диапазоне длин волн от 800 до 1200 нм, статистически значимо коррелирует со значениями гигиенического индекса и индекса воспаления МТП (уровни значимости 3 % и 0,3 % соответственно).

2. Автоматическое обнаружение очагов воспаления МТП на ИК изображениях, полученных методом ИКД в диапазоне длин волн от 800 до 1200 нм, обеспечивается применением метода пороговой сегментации по

значениям коэффициента контраста Са и модуля градиента интенсивности G к изображениям МТП, зарегистрированным в диапазоне углов между оптическими осями осветителя и регистратора от минус 25° до плюс 25°.

3. Изображения очагов воспаления МТП на доклинической и клинической стадиях, полученные методом ИКД в диапазоне длин волн от 800 до 1200 нм, статистически значимо различаются по направлению градиента интенсивности α.

4. На группе из 33 пациентов с доклинической стадией воспаления МТП и 13 пациентов с клинической стадией воспаления МТП показано повышение относительной частоты обнаружения очагов воспаления МТП на доклинической стадии с применением АПК ИКД МТП на 30 % по сравнению с клиническим осмотром.

Публикации. По материалам диссертации соискателем опубликованы 12 научных работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы использованы в выполненных под руководством автора в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» НИР «Инфракрасная диафаноскопия тканей ротовой полости» в 2011-2012 гг. (Государственный контракт №14.740.11.1224 от 15.06.2011) и «Биотехническая система морфометрии инфракрасных диафаноскопических изображений биологических тканей», в 2012-2013 гг. (Соглашение № 14.B37.21.0579 от 10.08.2012), а также в НИР «Разработка и апробация алгоритма автоматического обнаружения очагов воспаления мягких тканей пародонта на изображениях, зарегистрированных в проходящем неионизирующем излучении ближнего инфракрасного диапазона», выполненной в 2016-2017 гг. по заказу Фонда содействия инновациям (Договор №1683ГС1/24320 от 14.11.2016).

Результаты работы внедрены на кафедре ортопедической стоматологии Первого МГМУ им. И.М. Сеченова, а также в учебный процесс кафедры «Биомедицинские технические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и используются для подготовки бакалавров по направлению «Биотехнические системы и технологии», магистров по программам: «Методы обработки и анализа медицинских изображений» и «Биометрические технологии идентификации личности» направления «Биотехнические системы и технологии», использованы для формирования научно-технического задела кафедры «Биомедицинские технические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст диссертации изложен на 119 страницах. Список литературы включает 142 библиографических источника. Диссертация проиллюстрирована рисунками, таблицами, графиками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и практическая значимость, сформулированы цель и решаемые задачи, положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

В первой главе представлены результаты анализа взаимосвязи структурно-функциональных изменений МТП (Таблица 1) и оптических свойств тканей пародонта при воспалительном процессе.

Таблица 1.

Соответствие стадий воспаления и воспалительных заболеваний МТП [Мюллер Х-П, 2004, Цепов Л.М., 2008]

Причина возникновения	Экзогенные факторы		Эндогенные факторы		
	Бактериальный налет	Травма	Генетическая предрасположенность	Злокачественные новообразования	Системные заболевания
Формирование повреждения					
Стадия повреждения	Первичное повреждение	Раннее повреждение	Развившееся повреждение		Тяжелое повреждение
Иммунный ответ					
Симптомы	1 Гиперемия в эпителиальной ткани 2. Отек эпителиальной ткани зубодесневого соединения	1. Гиперемия в эпителиальной ткани 2. Отек эпителиальной ткани зубодесневого соединения	1. Гиперемия в эпителиальной ткани 2. Отек эпителиальной ткани зубодесневого соединения 3. Кровоточивость 4. Разрушение эпителиальной ткани зубодесневого соединения	1. Гиперемия в эпителиальной ткани 2. Отек эпителиальной ткани зубодесневого соединения 3. Кровоточивость 4. Разрушение эпителиальной ткани зубодесневого соединения 5. Разрушение альвеолярной кости	
Заболевание	Доклиническая стадия	Доклиническая стадия	Гингивит		Пародонтит

В результате систематизации литературных данных [Тучин В.В., 2007, Башкатов А.Н., 2010, Jacques S.L., 2013] установлено, что увеличение показателя поглощения МТП в ближнем ИК диапазоне длин волн от 800 до 1200 нм при воспалении в 10...100 раз превышает изменения показателя поглощения на других длинах волн оптического диапазона (Рис. 1).

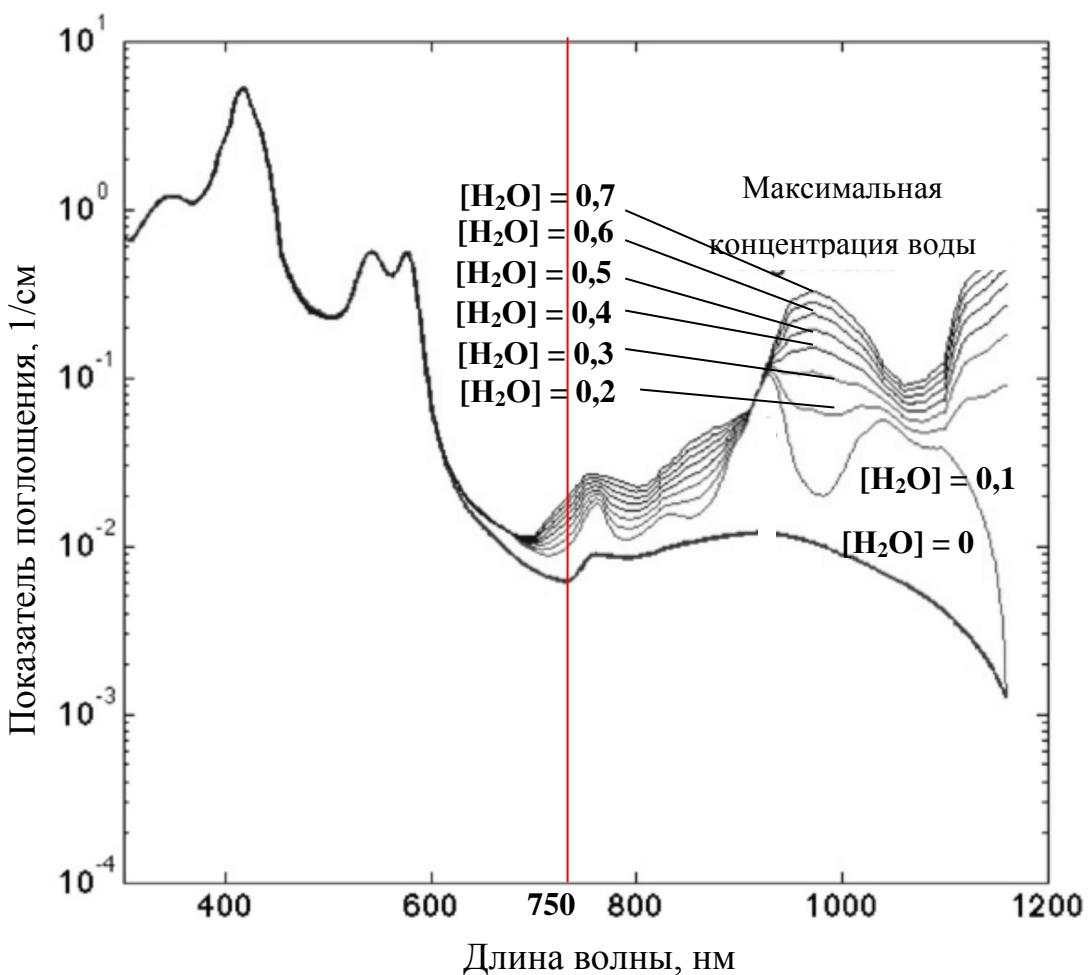


Рис.1. Зависимости показателя поглощения эпителиальных тканей (см^{-1}) от длины волны (нм) при объемной концентрации воды $[H_2O] = 0...0,7$ [Jacques S.L., 2013]

Таким образом, увеличение показателя поглощения и рассеяния МТП при воспалении обуславливают целесообразность исследования возможности применения метода ИК диафанскопии в диапазоне длин волн от 800 до 1200 нм для визуализации очагов воспаления МТП.

Возможность обнаружения очагов воспаления МТП на различных стадиях воспалительного процесса в ближнем ИК диапазоне длин волн была проверена в эксперименте на группе добровольцев. В ходе эксперимента была проверена гипотеза о том, что очаги воспаления в МТП визуально обнаруживаются на ИК изображениях, зарегистрированных на доклинической стадии воспалительного процесса.

В ходе эксперимента были зарегистрированы серии из 50 видимых и 150 ИК изображений участков МТП в областях межзубных сосочеков и альвеолярной десны, в которых проявляются первые признаки воспалительного процесса в МТП [Л.Ю. Орехова, 2004, Nield-Gehrig. J.S., Willmann D.E., 2011]. Примеры зарегистрированных изображений представлены на Рис. 2.

Для оценки уровня гигиены полости рта и стадии воспаления МТП в ходе проведения эксперимента определяли индексы PLI, GI, Н по стандартной методике.

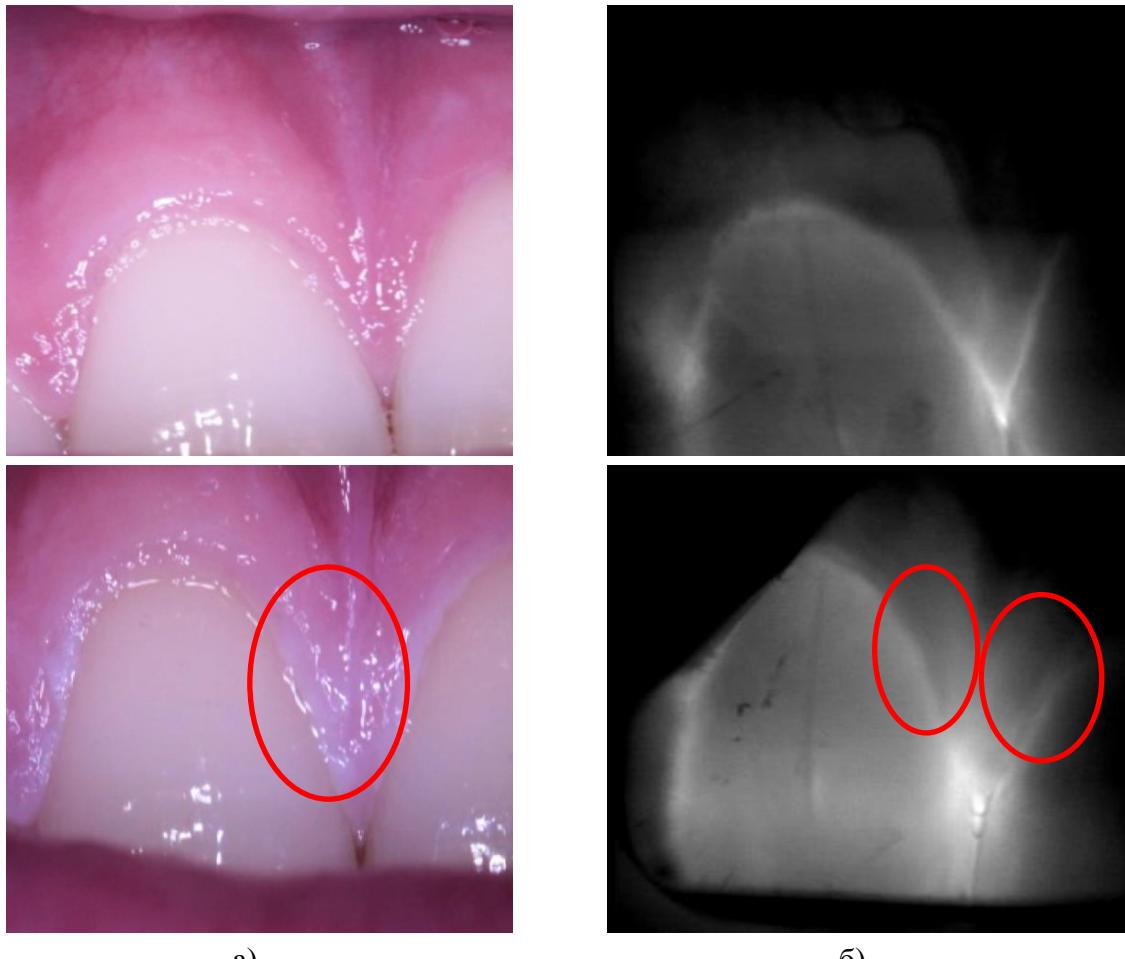


Рис. 2. Примеры изображений интактного межзубного сосочка (верхний ряд) и воспаленного межзубного сосочка (нижний ряд), зарегистрированные: а) в отраженном излучении видимого диапазона б) в проходящем монохроматическом излучении ИК диапазона. 1 – мягкий зубной налет; 2 – области повышенного кровенаполнения

Для установления взаимосвязи между долей зарегистрированных изображений МТП $F_{обн\ i}$, на которых обнаружены очаги воспаления в i -ый день от начала эксперимента и пародонтологическим статусом испытуемых, был проведен корреляционный анализ данных. В ходе корреляционного анализа были рассчитаны значения выборочного коэффициента корреляции Пирсона между значениями PLI, GI и $F_{обн\ i}$.

На четвертые сутки после прекращения гигиенических процедур в ротовой полости на изображениях, зарегистрированных в ИК диапазоне, обнаружены области повышенного кровенаполнения, соответствующие очагам воспаления МТП (Рис. 2б, нижний ряд).

В результате проведенного эксперимента установлено, что доля изображений, на которых обнаруживаются очаги воспаления при визуализации методом ИКД в диапазоне длин волн от 800 до 1200 нм статистически значимо коррелирует со значениями гигиенического индекса и индекса воспаления МТП (уровни значимости 3 % и 0,3 % соответственно).

Вторая глава посвящена исследованиям влияния взаимного расположения осветителя и регистратора АПК ИКД МТП на вероятность обнаружения очагов воспаления МТП на ИК изображениях, а также разработке алгоритма обнаружения очагов воспаления МТП с учетом известных законов визуального восприятия.

В целях определения требований к взаимному расположению осветителя и регистратора АПК ИКД МТП, обеспечивающих обнаружение очагов воспаления МТП были проведены исследования зависимости вероятности обнаружения очага воспаления МТП на ИК изображении от угла между оптическими осями осветителя и регистратора. Для обеспечения максимальной воспроизводимости и повторяемости результатов, исследования были проведены на стенде с применением тест-объектов, имитирующих оптические свойства МТП (Рис. 3).

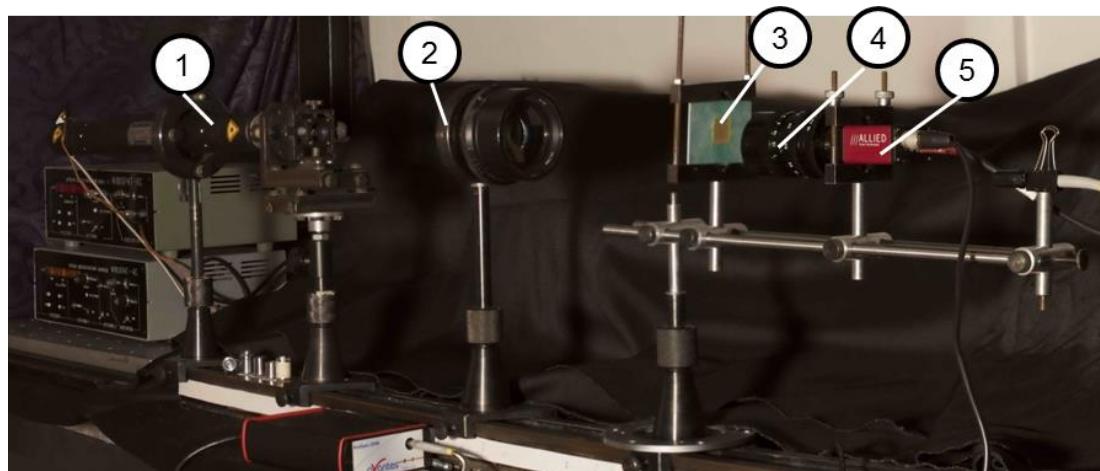


Рис. 3. Стенд для исследования влияния характеристик излучения на качество изображений МТП: 1) осветитель, 2) формирующая оптическая система, 3) тест-объект, 4) проецирующая оптическая система, 5) видеокамера

В целях минимизации влияния разброса морфологических и биохимических показателей МТП *in vivo* [Тучин В.В., 2007] для исследований зависимости контраста изображений очагов воспаления МТП от характеристик излучения, целесообразно использовать тест-объекты, моделирующие оптические свойства МТП. В примененном для моделирования оптических свойств МТП тест-объекте слой эпителиальной ткани МТП представлен оптически однородной средой с постоянным значением показателя рассеяния излучения, а очаги воспаления представлены стержнями, диаметром 80 мкм, соответствующим диаметру

кровеносных сосудов в МТП, гиперемия которых обуславливает увеличение показателя поглощения в МТП на доклинической стадии воспаления (Таблица 2).

Указанные ограничения модели биотканей ранее применялись при исследовании оптических свойств мягких эпителиальных тканей кожи и склеры глаза [Меглинский И.В., 2001, Тучин В.В., 2007, Генина Э.А., 2008, Башкатов А.Н., 2010].

Таблица 2.
Характеристики тест-объекта, имитирующего МТП [Козлов В.А., 2003, Nield-Gehrig. J.S., Willmann D.E., 2011]

Характеристика МТП	Значение	Характеристика тест-объекта	Значение
Толщина слоя эпителиальной ткани	0,96 мм	Толщина тест-объекта	1,0 мм
Размеры поврежденного участка	от 5 до 100 мкм	Толщина поглощающих элементов	80 мкм

В результате исследований на стенде показано, что максимальное значение вероятности обнаружения очага воспаления МТП на глубине от поверхности до 600 мкм достигается применением источника излучения с максимумом светимости в диапазоне от 800 до 1200 нм при расположении оптических осей формирующей и регистрирующей оптических систем по горизонтали и вертикали не более $\pm 25^\circ$.

В целях определения параметров, характеризующих очаги воспаления МТП на ИК изображениях, проанализирована выборка изображений интактных и воспаленных МТП, зарегистрированных в ходе проведения эксперимента на добровольцах (Рис. 4.).

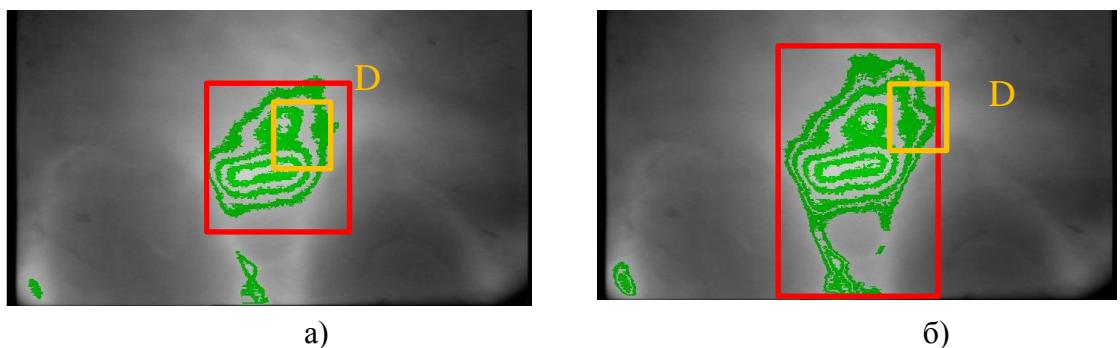


Рис. 4. Изолинии изображений МТП: а) для значений интенсивности $I = 250, 240, 230$ на ИК изображениях; б) для значений интенсивности $I = 250, 240, 230, 200, 190$; «D» – окрестность участка изолинии

Закономерности визуального восприятия очагов воспаления МТП на ИК изображениях обуславливают целесообразность анализа параметров распределения интенсивности в областях изображений, соответствующих очагам воспаления МТП и контраста указанных областей по сравнению с окружающими областями [Прэтт У., 1982, Сойфер В.А., 2003, Гонсалес Р., Вудс Р., 2005] (Таблица 3).

Таблица 3.

Параметры изолиний ИК изображения МТП

№	Параметр (p_i)	Формула для расчета	Обозначения
1	Средняя интенсивность	$I_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i$	I_i – интенсивность i -го элемента изображения
2	Выборочное СКО	$S_I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{cp})^2$	
3	Третий момент	$m_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{cp})^3$	
4	Обобщенный контраст	$C_a = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$	I_{max}, I_{min} – максимальная и минимальная моды гистограммы интенсивности в окрестности изолинии
5	Модуль градиента	$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$ $G_x = \left\langle \frac{dI}{dx} \right\rangle, G_y = \left\langle \frac{dI}{dy} \right\rangle$	G_x и G_y – средние значения градиента интенсивности в окрестности элемента изолинии (x, y)
6	Направление градиента	$\alpha_i = \begin{cases} -1, & I_{bi} > I_{outi} \\ 1, & I_{bi} \leq I_{outi} \end{cases}$ $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^M \alpha_i}{M}$	I_{bi} – интенсивность изолинии на границе i -го очага воспаления I_{outi} – интенсивность изолинии за пределами i -го очага воспаления M – объем выборки изображений очагов воспаления
7	Отношение средних интенсивностей	$r = \frac{I_{cp}}{I_o}$	I_o – средняя интенсивность изображения

Результаты определения параметров I_{cp} , S_I , m_3 , C_a , G , α , r изолиний ИК изображений МТП представлены в Таблице 4.

Таблица 4.

Результаты определения параметров изолиний ИК изображений МТП
 $I_{cp}, S_I, m_3, C_a, G, \alpha, r$ ($n=150$)

№ п/п	Класс изображений	I_{cp}	S_I	m_3	C_a	G	α	r
		$p \pm \Delta p$						
1	Интактные МТП	60±10	7±2	3±5	0,15±0,05	10±5	0,3±0,7	1,7±0,7
2	МТП на доклинической стадии воспаления	30±20	5±2	10±3	0,30±0,05	25±8	0,8±0,3	0,7±0,7
3	МТП на клинической стадии воспаления	100±50	6±2	2±10	0,45±0,08	30±10	-0,9±0,2	2,5±1,5

Таким образом, из результатов определения параметров изолиний ИК изображений, следует, что изолинии очагов воспаления МТП отличаются от других изолиний коэффициентом контраста C_a , значениями модуля G и направления градиента интенсивности α на границе изолиний очагов воспаления МТП с соседними областями. При этом изображения очагов воспаления МТП отличаются от изображений интактных МТП по значениям C_a и G , а изображения очагов воспаления МТП на доклинической и клинической стадиях воспаления различаются по значениям α .

Для автоматического выделения очагов воспаления МТП на изображениях по указанным параметрам C_a, G, α могут быть применены следующие методы [Прэтт У., 1982, Сойфер В.А., 2003, Гонсалес Р., Вудс Р., 2005]:

- пороговая обработка на основе анализа гистограммных статистик в пределах окна заданной апертуры,
- метод линий водораздела,
- метод наращивания областей.

Для оценки эффективности обнаружения очагов воспаления МТП рассчитаны относительные частоты ошибок ложного обнаружения (α_{Sj}) и пропуска (β_{Sj}) очагов воспаления j -ым методом сегментации по формулам:

$$\alpha_{Sj} = \frac{N_{FDj}}{N_{FDj} + N_{TDj}}, \quad \beta_{Sj} = \frac{N_{FRj}}{N_{FRj} + N_{TRj}}, \quad (1)$$

где S_j – метод сегментации ($j=1$ – пороговая сегментация, $j=2$ – сегментация методом линий водораздела, $j=3$ – сегментация методом наращивания областей), N_{FDj} – количество ложно обнаруженных очагов воспаления, N_{TDj} – количество верно обнаруженных очагов воспаления, N_{FRj} – количество пропущенных очагов воспаления, N_{TRj} – количество верно пропущенных очагов воспаления.

Значения α_{Sj} и β_{Sj} при сегментации очагов воспаления МТП на ИК изображениях представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Значения относительных частот ошибок ложного обнаружения (α_{Si}) и пропуска (β_{Si}) при сегментации очагов воспаления МТП на ИК изображениях

№ п/п	Класс изображений	α_{S1}/β_{S1}	α_{S2}/β_{S2}	α_{S3}/β_{S3}
1	МТП на доклинической стадии воспаления	0,10 / 0,25	0,20 / 0,35	0,17 / 0,40
2	МТП на клинической стадии воспаления	0,05 / 0,20	0,10 / 0,25	0,14 / 0,30

Как следует из результатов сравнения методов сегментации (Таблица 5), наименьшие значения α_{Sj} и β_{Sj} , на доклинической и клинической стадиях воспаления обеспечивает метод пороговой сегментации по значениям коэффициента контраста C_a , модуля G , поэтому его следует применять для построения алгоритма автоматического обнаружения очагов воспаления МТП.

В третьей главе представлены результаты исследования БТС ИКД МТП и разработки АПК ИКД МТП.

БТС ИКД МТП предназначена для обнаружения воспалительных заболеваний по результатам наблюдения первичного и раннего повреждений МТП для последующего лечения.

Для выполнения своего назначения БТС ИКД МТП обеспечивает выполнение следующих функций:

- формирование и регистрацию изображений очага воспаления МТП;
- отображение зарегистрированных изображений;
- оценка состояния тканей пародонта по зарегистрированным ИК изображениям;
- маркирование очагов воспаления на изображениях;
- постановка диагноза;
- хранение зарегистрированных изображений;
- сравнение текущих и зарегистрированных изображений.

Структурно-функциональная схема БТС ИКД МТП, представлена на Рис. 5.

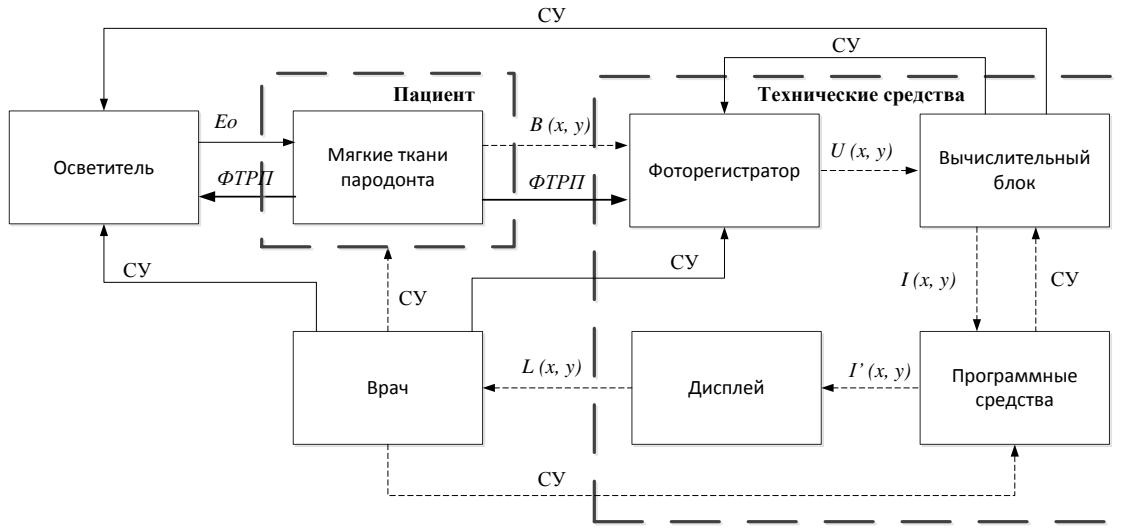


Рис. 5. Структурно-функциональная схема БТС ИКД МТП

Соответствие БТС ИКД МТП требованиям биоадекватности обеспечивается выполнением следующих положений:

- длина волны и конфигурация излучения, а также диапазон углов между оптическими осями осветителя и регистратора обеспечивают максимальный контраст очага воспаления МТП на изображении;
- материалы осветителя и регистратора пригодны для стерилизации после обследования каждого пациента и минимизируют риск переноса инфекции;
- размеры визуализируемой области обеспечивают возможность наблюдения очага воспаления в МТП.

В соответствии с результатами исследований (глава 2) для количественной оценки состояния МТП, заключающейся в определении стадии воспаления МТП по ИК изображениям, следует применять коэффициент контраста C_α , модуль G и направление α градиента интенсивности очагов воспаления МТП по отношению к окружающим интактным тканям.

Разработаны требования к АПК ИКД МТП.

Для численного сравнения эффективности процесса диагностики МТП врачом-стоматологом и БТС ИКД МТП целесообразно оценить относительные частоты обнаружения стадий раннего (P_{I-CT} , P_{I-BTC}) и развивающегося (P_{II-CT} , P_{II-BTC}) воспаления МТП врачом-стоматологом (СТ) и БТС ИКД МТП соответственно.

Относительные частоты обнаружения i -ой стадии воспаления МТП ($i = I$ – доклиническая стадия, $i = II$ – клиническая стадия) рассчитываются по формулам:

$$P_{i-CT} = N_{i-CT} / N_{i-0}, \quad P_{i-BTC} = N_{i-BTC} / N_{i-0}, \quad (2)$$

где P_{i-CT} , P_{i-BTC} – относительные частоты обнаружения i -ой стадии воспаления МТП врачом-стоматологом и с применением БТС ИКД МТП

соответственно, $N_{i\text{-CT}}$, $N_{i\text{-БТС}}$ – количество обследованных зубов, в окрестности которых обнаружены очаги воспаления МТП i -ой стадии повреждения врачом-стоматологом (СТ) и БТС ИКД МТП (БТС) соответственно, $N_{i\text{-0}}$ – общее количество обследованных зубов на i -ой стадии воспаления.

По значениям $P_{i\text{-СТ}}$, $P_{i\text{-БТС}}$ могут быть также рассчитаны относительные частоты α_i и β_i ошибок ложного обнаружения и ложного пропуска i -ой стадии воспаления МТП врачом-стоматологом и с применением БТС ИКД МТП соответственно:

$$\begin{aligned}\alpha_{i\text{-СТ}} &= N_{i\text{-СТ-ЛО}} / N_i, \quad \beta_{i\text{-СТ}} = N_{i\text{-СТ-ЛН}} / N_i, \\ \alpha_{i\text{-БТС}} &= N_{i\text{-БТС-ЛО}} / N_i, \quad \beta_{i\text{-БТС}} = N_{i\text{-БТС-ЛН}} / N_i,\end{aligned}\quad (3)$$

где $N_{i\text{-СТ-ЛО}}$, $N_{i\text{-БТС-ЛО}}$ – количество ложнообнаруженных очагов воспаления МТП на i -ой стадии воспаления врачом-стоматологом и с применением БТС ИКД МТП соответственно, $N_{i\text{-СТ-ЛН}}$, $N_{i\text{-БТС-ЛН}}$ – количество пропущенных очагов воспаления МТП на i -ой стадии воспаления врачом-стоматологом и с применением АПК ИКД МТП соответственно.

В четвертой главе представлены результаты создания макета АПК ИКД МТП и его апробации в клинике.

Макет АПК ИКД МТП (Рис. 6.) создан с учетом установленных в третьей главе требований к техническим средствам БТС ИКД МТП.

Для решения указанных задач в состав АПК ИКД МТП входят: осветитель, фоторегистратор, блок управления и питания, а также персональный компьютер (ПК) со стандартным и специальным программным обеспечением.

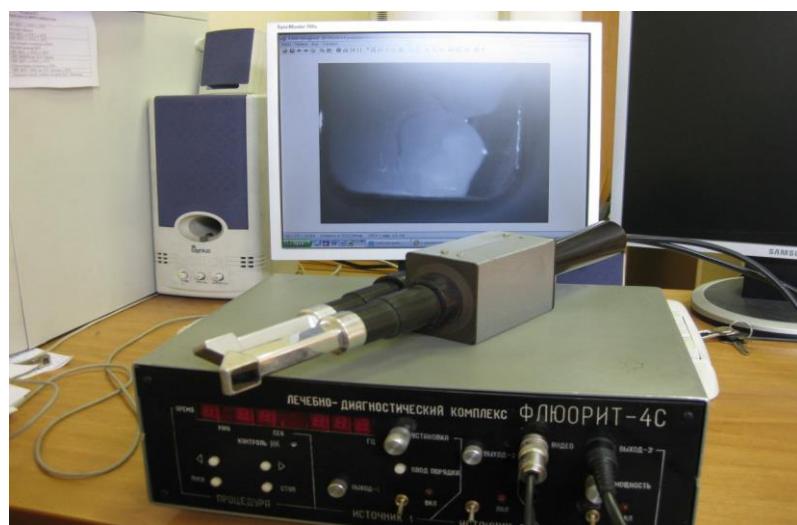


Рис. 6. Макет АПК ИКД МТП

Исследования АПК ИКД МТП проводились на пациентах, пришедших на прием к врачу-стоматологу и проходивших клинический осмотр. В ходе обследования врачом по результатам визуального осмотра, пальпации и, при необходимости, пародонтологического зондирования, определялась стадия

воспаления МТП и диагноз пациентов. Далее производился осмотр и регистрация ИКИ УМТП с применением АПК ИКД МТП.

Определение стадии воспаления МТП осуществлялось врачом с помощью индексной оценки.

В ходе аprobации обследовано 23 пациента с гингивитом, 13 пациентов с пародонтитом, 16 пациентов с интактными МТП. С использованием АПК ИКД МТП для каждого обследованного пациента зарегистрированы серии из 15 изображений повреждений МТП и с применением АПК ИКД МТП определены значения C_a , G , α очага воспаления МТП, позволяющие оценить состояние МТП.

Соответствие стадий воспаления и выборочных значений C_a , G , α представлены в Таблице 7.

Таблица 7.
Обнаружение очагов воспаления МТП

№ п/п	Состояние МТП	Количество пациентов	Площадь очагов, мм	C_a	G_a	α
1	Интактные МТП	16	-	0,18±0,03	4±2	0,3±0,7
2	Доклиническая стадия	23	2	0,28±0,02	23±2	0,7±0,2
3	Клиническая стадия	13	5	0,42±0,02	43±4	-0,9±0,1

Таким образом, в результате исследований подтверждена возможность обнаружения очагов воспаления МТП на всех стадиях воспаления с применением АПК ИКД МТП.

В результате исследований БТС ИКД МТП определены выборочные частоты обнаружения симптомов воспаленных участков МТП при клиническом осмотре МТП и с применением АПК ИКД МТП. Оценка эффективности БТС ИКД МТП представлена в Таблице 8.

Таблица 8.
Сравнение эффективности клинического осмотра и БТС ИКД МТП

Стадия воспаления	N	Клинический осмотр			БТС ИКД МТП		
		P_{i-CT}	α_{i-CT}	β_{i-CT}	P_{i-BTC}	α_{i-BTC}	β_{i-BTC}
Доклиничес кая стадия	23	0,6	0,1	0,4	0,8	0,2	0,1
клиническая стадия	13	1	0,1	0,2	1	0,1	0,2

Таким образом, в результате клинической аprobации установлено, что БТС ИКД МТП характеризуется на 20 % большей относительной частотой обнаружения и на 30 % меньшей относительной частотой ложного пропуска очагов воспаления МТП на доклинической стадии по сравнению с клиническим осмотром.

Основные результаты и выводы

1. В результате анализа ИК изображений МТП установлено, что:
 - особенности очагов воспаления МТП на ИК изображениях характеризуются изолиниями, которые отличаются от других изолиний ИК изображений МТП коэффициентом контраста C_a , значениями модуля G и направления градиента интенсивности α на границе изолиний очагов воспаления МТП с соседними областями;
 - изображения очагов воспаления МТП на доклинической и клинической стадиях воспаления различаются по значению направления градиента α .
2. В результате исследования условий формирования ИК изображений очагов воспаления МТП установлено, что регистрация ИК изображений МТП с применением АПК ИКД МТП в диапазоне углов между оптическими осями осветителя и регистратора от минус 25° до плюс 25° обеспечивает максимальные значения контраста очагов воспаления МТП при глубине их расположения до 600 мкм.
3. В результате исследования эффективности алгоритмов сегментации очагов воспаления МТП на стадиях доклинического и клинического воспаления установлено, что для автоматического обнаружения очагов воспаления МТП на ИК изображениях следует применять метод пороговой сегментации по значениям коэффициента контраста C_a , и модуля градиента интенсивности G .
4. Обоснована компонентная база технических средств БТС ИКД МТП, применение которой обеспечивает выполнение функций автоматического обнаружения и оценки состояния очагов воспаления МТП. Создан макет АПК ИКД МТП, выполняющий функции технических средств БТС ИКД МТП, с применением которого проведена апробация БТС ИКД МТП. В результате апробации установлена возможность обнаружения очагов воспаления МТП на всех стадиях воспаления с применением БТС ИКД МТП.
5. В результате апробации установлено, что БТС ИКД МТП характеризуется на 20 % большей относительной частотой обнаружения и на 30 % меньшей относительной частотой ошибок ложного пропуска очагов воспаления МТП на доклинической стадии по сравнению с клиническим осмотром, что подтверждает эффективность созданной БТС ИКД МТП.

Основные публикации по теме диссертации

1. Таранов А.А., Колпаков А.В., Спиридовон И.Н. Визуализация подкожного кровеносного русла в ближней инфракрасной области спектра // Медицинская техника. 2011. №4. С.1-5.
2. Колпаков А.В., Макаров А.Л., Спиридовон И.Н. Использование метода инфракрасной диафаноскопии для оценки состояния мягких тканей ротовой полости в стоматологии // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. №12. С.297-306.
3. Колпаков А.В., Макаров А.Л., Спиридовон И.Н. Исследование процесса поглощения оптического излучения мягкими тканями пародонта

// Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. №11. С.444-457.

4. Колпаков А.В., Юдин И.Н., Зорина О.А., Спиридовон И.Н. Раннее обнаружение очагов воспаления в мягких тканях пародонта с помощью инфракрасной диафаноскопии // Медицинская техника. 2016. № 2. С.10-13.

5. Колпаков А.В., Спиридовон И.Н. Разработка биотехнической системы для инфракрасной интроскопии тканей ротовой полости // Научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья». Сборник докладов 25 сентября - 02 октября 2010 г., Кипр, г. Ларнака. М.: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С.94-95.

6. Kolpakov. A.V. Development of Biotechnical System for Infrared Introscopy of Periodontal Tissues // Proceedings of the 6-th Russian-Bavarian Conference on Bio-Medical Engineering: Bauman Moscow State Technical University, November 8/12, Moscow, 2010. P.19-20.

7. Колпаков А.В., Таранов А.А., Спиридовон И.Н. Инфракрасная диафаноскопия тканей ротовой полости // Научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья». Сборник докладов 25 сентября - 02 октября 2011 г., Испания, о. Майорка. М.: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С.75-77.

8. Расчет морфологических параметров сосудистого русла / А.В. Колпаков [и др.] // VIII Российско-баварская конференция по биомедицинской инженерии. Санкт-Петербург, 2012. С.86-88.

9. Бесконтактная морфометрия подкожного сосудистого русла в инфракрасной области спектра / А.В. Колпаков [и др.] // VIII Российско-баварская конференция по биомедицинской инженерии. Санкт-Петербург, 2012. С.73-78.

10. Колпаков А.В., Таранов А.А., Спиридовон И.Н. Инфракрасная диафаноскопия тканей ротовой полости // Сб. трудов X Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии ФРЭМЭ 2012». Владимир, 2012. Книга 1. С.136-137.

11. Kolpakov. A. Infrared diaphanoscopy of soft tissues in the mouth cavity // Proceedings of the 2-nd Russian-German Conference on Biomedical Engineering: LETI, St. Petersburg, 2014. P.144-147.

12. Исследование инфракрасных изображений очагов воспаления в мягких тканях пародонта / А.В. Колпаков [и др.] // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии-ФРЭМЭ 2016: Доклады XII МНК с элементами научной молодежной сессии, Владимир-Сузdalь, 4-7 июля 2016 г. – Владимир, 2016. Книга 2. С.54-56.

Средства интеллектуальной собственности

1. Колпаков А.В., Акуленко Л.О. Ноу-хау «Алгоритм автоматического обнаружения очагов воспаления мягких тканей пародонта на инфракрасных изображениях, зарегистрированных в проходящем лазерном излучении ближнего инфракрасного диапазона», регистрационный номер РИД ААА-Г17-617102050020-8 от 20.10.2017.