

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-58-67

УДК 616.31; 3.1.7

РАМАН-ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ ЛЕЧЕБНО-ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ДИАПАЗОН ЕЕ КЛИНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Баштовой А. А.¹, Александров М. Т.²

¹ Центральная государственная медицинская академия, г. Москва, Россия

² Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимира, г. Москва, Россия

Аннотация

В статье представлены результаты разработки и клинического применения отечественной рамановской флуоресцентной лечебно-диагностической технологии (РФД), реализованной на базе аппаратно-программного комплекса «ИнСпектр М». Показаны высокая аналитическая чувствительность и специфичность метода по сравнению с традиционными флуоресцентными и микробиологическими методами диагностики. Рассматриваются возможности применения РФД в клинической микробиологии, стоматологии, а также в диагностике доброкачественных и злокачественных новообразований органов рта и челюстно-лицевой области.

Особое внимание уделено цифровизации лечебно-диагностических процессов в стоматологических клиниках, что отвечает современным требованиям персонализированной и экспресс-медицины. Метод позволяет проводить экспресс-оценку микробной ассоциации, минерализации твердых тканей зубов, подбор антимикробных препаратов и мониторинг эффективности лечения «на месте». В работе представлены экспериментальные и клинические данные, подтверждающие эффективность и перспективность внедрения РФД в медицинскую практику.

Цель — разработать и внедрить высокочувствительную технологию рамановской флуоресцентной диагностики и лечения для экспресс-диагностики, мониторинга и оптимизации лечения стоматологических заболеваний в условиях поликлиники.

Методология. Исследование включало разработку аппаратно-программного комплекса «ИнСпектр М», реализующего RFID-технологию с использованием лазерного излучения на длинах волн 405, 532 и 637 нм и использование SERS-подложек для повышения чувствительности.

Объектами исследования являлись микробные взвеси (синегнойная палочка, морганелла моргани, золотистый стафилококк и др.), твердые ткани зубов пациентов с кариесом и флюорозом, а также ткани органов рта с новообразованиями.

Результаты. Разработанная технология (РФД) на базе комплекса «ИнСпектр М» является инновационным, высокочувствительным и специфичным методом экспресс-диагностики и лечения стоматологических заболеваний и патологий тканей рта. Ее интеграция в цифровую инфраструктуру поликлиник способствует значительному повышению качества и скорости оказания медицинской помощи, а также открывает новые возможности для диагностики онкологических заболеваний.

Ключевые слова: раман-флуоресцентная спектроскопия, экспресс-диагностика, стоматология, микробиология, цифровизация, лечебно-диагностические технологии, минерализация зуба, антимикробная терапия, опухолевые образования, аппаратно-программный комплекс «ИнСпектр М»

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Алексей Александрович БАШТОВОЙ ORCID ID 0000-0003-3642-967X
к.м.н., доцент, доцент кафедры стоматологии, Центральная государственная медицинская академия, г. Москва, Россия
bachtovoi@mail.ru

Михаил Тимофеевич АЛЕКСАНДРОВ ORCID ID 0000-0003-2777-296X
д.м.н., профессор, кафедра стоматологии, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимира, г. Москва, Россия
alex_mta@mail.ru

Адрес для переписки: Алексей Александрович БАШТОВОЙ
109316, Москва, Сосинский проезд, д. 6, стр. 1, ГАУЗ «СП №66 ДЗМ»
+7 (905) 784-87-35
bachtovoi@mail.ru

Образец цитирования:
Баштовой А. А., Александров М. Т.
РАМАН-ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ ЛЕЧЕБНО-ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ДИАПАЗОН ЕЕ КЛИНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ.
Проблемы стоматологии. 2025; 3: 58-67.
© Баштовой А. А. и др., 2025
DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-58-67

Поступила 12.09.2025. Принята к печати 08.10.2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-58-67

RAMAN FLUORESCENT THERAPEUTIC AND DIAGNOSTIC TECHNOLOGY AND THE RANGE OF ITS CLINICAL APPLICATION

Bashtovoy A.A.¹, Alexandrov M.T.²

¹ Central State Medical Academy, Moscow, Russia

² Moscow Regional Research Clinical Institute named after M.F. Vladimirsy, Moscow, Russia

Abstract

The article presents the results of the development and clinical application of the domestic Raman fluorescence therapeutic and diagnostic technology (RFD), implemented on the basis of the hardware and software complex «InSpectr M». High analytical sensitivity and specificity of the method are shown in comparison with traditional fluorescence and microbiological diagnostic methods. The possibilities of using RFD in clinical microbiology, dentistry, as well as in the diagnosis of benign and malignant neoplasms of the oral organs and maxillofacial region are considered. Particular attention is paid to the digitalization of diagnostic and treatment processes in dental clinics, which meets the modern requirements of personalized and express medicine. The technique allows for express assessment of microbial association, mineralization of hard dental tissues, selection of antimicrobial drugs and monitoring of the effectiveness of treatment “on site”. The work presents experimental and clinical data confirming the effectiveness and prospects of introducing RFD into medical practice.

Objectives. To develop and implement a highly sensitive Raman fluorescence diagnostic and treatment technology for express diagnostics, monitoring and optimization of treatment of dental diseases in a polyclinic setting.

Methodology. The study included the development of the hardware and software complex “InSpectr M”, implementing RFD-technology using laser radiation at wavelengths of 405, 532 and 637 nm and the use of SERS substrates to increase sensitivity. The objects of the study were microbial suspensions (*Pseudomonas aeruginosa*, *Morganella morganii*, *Staphylococcus aureus*, etc.), hard tissues of teeth of patients with caries and fluorosis, as well as tissues of oral organs with neoplasms.

Results. The developed RFD technology based on the InSpectr M complex is an innovative, highly sensitive and specific method of express diagnostics and treatment of dental diseases and pathologies of oral tissues. Its integration into the digital infrastructure of polyclinics contributes to a significant improvement in the quality and speed of medical care, and also opens up new opportunities for diagnosing oncological diseases.

Keywords: *Raman fluorescence spectroscopy, express diagnostics, dentistry, microbiology, digitalization, medical and diagnostic technologies, tooth mineralization, antimicrobial therapy, tumor formations, hardware and software complex “InSpectr M”*

The authors declare no conflict of interest

Aleksey A. BASHTOVY ORCID ID 0000-0003-3642-967X

*PhD in Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Dentistry, Federal State Budgetary Institution of Higher Professional Education “Central State Medical Academy” of the Presidential Executive Office of the Russian Federation. Moscow, Russia
bachtovoi@mail.ru*

Mikhail T. ALEXANDROV ORCID ID 0000-0003-2777-296X

*Grand PhD in Medical Sciences, Professor, Department of Dentistry, Moscow Regional Research Clinical Institute named after M.F. Vladimirsy, Moscow, Russia
alex_mta@mail.ru*

Correspondence address: **Aleksey A. BASHTOVY**

*Sosinsky proezd 6 building 1, Moscow, 109316, Russia (GAUZ “SP N 66 DZM”)
+7(905) 784-87-35
bachtovoi@mail.ru*

For citation:

Bashtovoy A.A., Alexandrov M.T.

RAMAN FLUORESCENT THERAPEUTIC AND DIAGNOSTIC TECHNOLOGY AND THE RANGE OF ITS CLINICAL APPLICATION.

Actual problems in dentistry. 2025; 3: 58-67. (In Russ.)

© Bashtovoy A.A. et al., 2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-58-67

Received 12.09.2025. Accepted 08.10.2025

Введение

Современная медицина и стоматология переживают этап интенсивной цифровизации, направленной на повышение точности, скорости и доступности диагностики и лечения пациентов. Цифровые технологии позволяют интегрировать методы экспресс-анализа, автоматизации обработки данных и телемедицины, что особенно актуально в условиях стоматологических поликлиник с высокой нагрузкой и необходимостью индивидуального подхода к пациенту [1, 2, 4].

В отечественной стоматологии цифровизация внедряется с целью оптимизации диагностики кариеса, заболеваний пародонта и других патологий, а также контроля эффективности лечения [6–8, 13]. В зарубежной практике активно применяются методы оптической спектроскопии, включая рамановскую и флуоресцентную спектроскопию, для неинвазивной оценки состояния зубов и тканей полости рта [5, 9–12, 14–16].

Однако существующие методы зачастую ограничены чувствительностью и специфичностью [17], что требует разработки новых высокоточных экспресс-технологий, способных работать в условиях поликлинического приема с минимальными временными затратами. Раман-флуоресцентная спектроскопия (РФС), как инновационный метод, сочетает в себе возможности молекулярного анализа и высокой чувствительности, что позволяет выявлять микробную ассоциацию, оценивать минерализацию и диагностировать патологические процессы на ранних стадиях [1–3, 4, 15, 16].

В данной работе представлен отечественный аппаратно-программный комплекс «ИнСпектр М», реализующий РФД-технологию, и рассмотрены ее возможности в клинической практике, особенно в стоматологических поликлиниках, где важна быстрая и точная диагностика, мониторинг лечения и принятие решений «по месту».

Концепция исследования

Основная концепция исследования заключается в разработке и клинической апробации отечественной раман-флуоресцентной лечебно-диагностической технологии, обеспечивающей высокочувствительную и специфичную экспресс-диагностику заболеваний на молекулярном уровне с применением цифровых методов анализа. Технология ориентирована на внедрение в стоматологическую практику, особенно в условиях поликлиник, с целью повышения качества диагностики, оптимизации лечения и мониторинга пациентов.

Ключевые принципы концепции:

- Использование лазерных РФС-методов для выявления микробиологических и биохимических маркеров заболеваний.
- Интеграция аппаратно-программных средств для автоматизации сбора и обработки данных.
- Применение цифровых технологий для объективизации и стандартизации диагностики.
- Обеспечение возможности экспресс-анализа «по месту» лечения.

- Комплексный подход к оценке состояния твердых тканей зуба, микробного фактора и эффективности терапии.

Цели и задачи исследования

Разработать и внедрить высокочувствительную раман-флуоресцентную лечебно-диагностическую технологию для экспресс-диагностики, мониторинга и оптимизации лечения стоматологических заболеваний в условиях поликлиники.

Задачи исследования:

- Разработать аппаратно-программный комплекс РФД с высокой аналитической чувствительностью и специфичностью.
- Провести экспериментальное обоснование чувствительности и специфичности РФД на моделях микроорганизмов.
- Сравнить эффективность РФД с существующими отечественными и зарубежными методами флуоресцентной диагностики.
- Разработать методику экспресс-диагностики кариеса, осложнений и флюороза твердых тканей зуба.
- Оценить возможность объективизации «лечения по месту» с помощью РФД.
- Исследовать микробную ассоциацию кариозных полостей и определить чувствительность микробов к антимикробным препаратам.
- Провести клинические испытания технологии в стоматологических поликлиниках с оценкой эффективности и безопасности.
- Разработать цифровые алгоритмы обработки и интерпретации спектральных данных для интеграции в медицинские информационные системы.
- Исследовать возможности применения РФД в диагностике доброкачественных и злокачественных новообразований органов рта и челюстно-лицевой области.

Материалы и методы исследования

Объект исследования

Объектом исследования являются биологические материалы и клинические объекты: суспензии микроорганизмов (*Pseudomonas aeruginosa*, *Morganella morganii*, *Staphylococcus aureus* и др.), твердые ткани зубов пациентов с кариесом и флюорозом, а также ткани органов рта и челюстно-лицевой области с доброкачественными и злокачественными новообразованиями.

Объем исследования

- Лабораторные исследования чувствительности и специфичности РФД на моделях микробных суспензий в диапазоне концентраций 10^2 – 10^6 КОЕ/мл.
- Клинические исследования с участием 108 пациентов (205 зубов) в возрасте от 18 до 70 лет с поверхностным и средним кариесом.
- Сравнительный анализ результатов РФД с традиционными микробиологическими методами и рентгенологической диагностикой.
- Спектроскопический анализ плазмы крови, твердых тканей зуба (интактные, кариес эмали и дентина) и биологических тканей с использованием аппаратного комплекса «ИнСпектр М».

Методы исследования

- Раман-флуоресцентная спектроскопия с использованием лазерного излучения на длинах волн 405, 532 и 637 нм.
- Применение SERS-подложек для повышения чувствительности выявления микроорганизмов.
- Микробиологические методы культивирования и идентификации микроорганизмов.
- Клиническое обследование и лечение пациентов согласно протоколам.
- Статистическая обработка данных с использованием программных средств анализа спектров и биостатистики.

Результаты исследования

1. Экспериментальные исследования: аналитическая чувствительность и специфичность РФД в микробиологических моделях

Использование SERS-подложек позволило достичь предельной чувствительности в диапазоне 10^2 КОЕ/мл для выявления *Pseudomonas aeruginosa*, *Morganella morganii* и *Staphylococcus aureus*. На рис. 1 и 2 представлены типичные раман-флуоресцентные спектры этих микроорганизмов, демонстрирующие характерные пики, соответствующие молекулярным компонентам клеточной стенки и метаболитам.

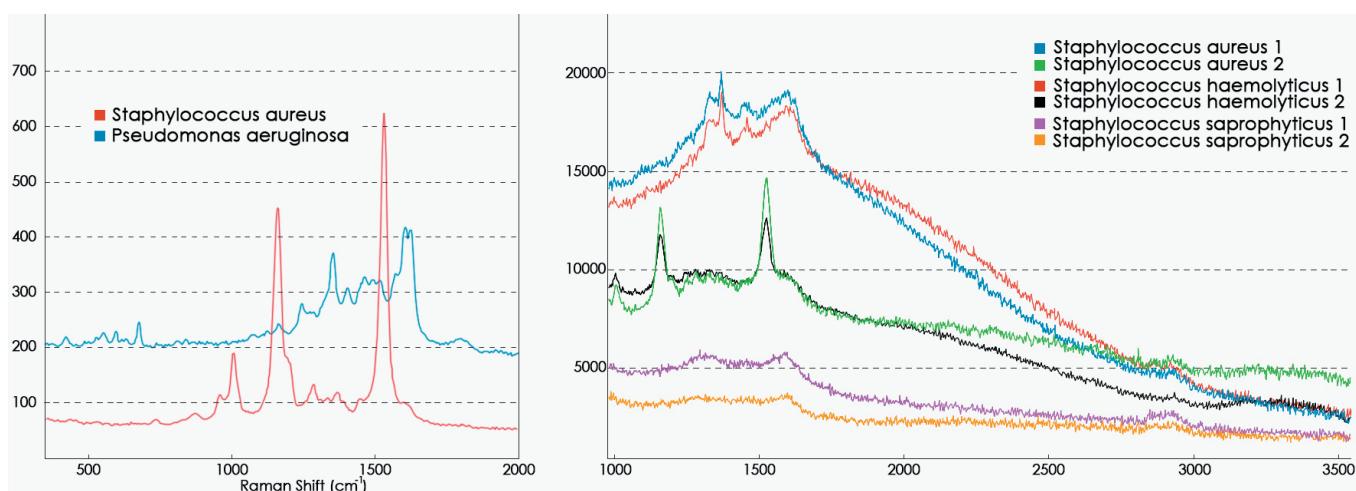


Рис. 1. Слева — сравнение РФС спектров *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus aureus*; справа — сравнение РФС спектров различных клинических штаммов стафилокока (минимальная выявляемая концентрация микробов — 10^2 КОЕ/мл, диапазон регистрируемых концентраций клинических штаммов стафилокока 10^2 – 10^6 КОЕ/мл.)

Fig.1. On the left is a comparison of the RFS spectra of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus*; on the right is a comparison of the RFS spectra of different clinical strains of staphylococcus (the minimum detectable concentration of microbes is 10^2 CFU/ml, the range of detectable concentrations of clinical strains of staphylococcus is 10^2 – 10^6 CFU/ml.)

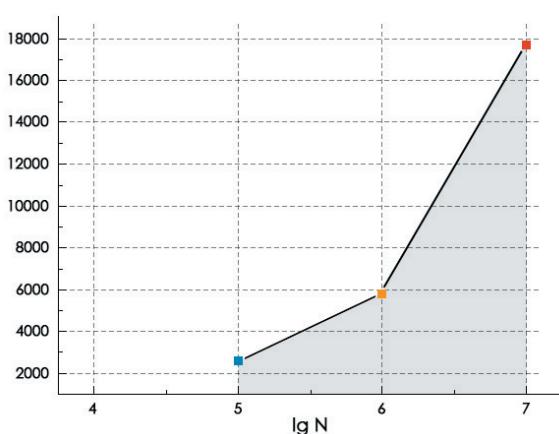


Рис. 2. Зависимость интенсивности флуоресценции бактерии *Morganella morganii* от ее концентрации в логарифмическом масштабе оси х. Чувствительность 10^5

Fig. 2. Dependence of the fluorescence intensity of the bacterium *Morganella morganii* on its concentration in a logarithmic scale of the x-axis. Sensitivity 10^5

Таблица 1

Чувствительность РФД по концентрациям микроорганизмов
Table 1. The Sensitivity of RFD with Respect to Microorganism Concentrations

Микроорганизм	Предел обнаружения (КОЕ/мл)	Специфические спектральные пики (см ⁻¹)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10^2	732, 1332, 1585
<i>Morganella morganii</i>	10^5	720, 1350, 1600
<i>Staphylococcus aureus</i>	10^2	750, 1380, 1620

Таблица демонстрирует, что РФД с SERS-подложками обеспечивает высокую чувствительность (до 10^2 КОЕ/мл) для каждого из исследованных патогенов. Специфические спектральные пики, идентифицированные в области 700 – 1650 см⁻¹, служат маркерами каждого микроорганизма, что позволяет дифференцировать их в смешанных ассоциациях.

2. Диагностика минерализации твердых тканей зуба и кариозных поражений

В клинической части исследования проведена диагностика 205 зубов у 108 пациентов с кариесом эмали и дентина. РФД позволила количественно оценить уровень микробной обсемененности и минерализации зубной эмали и дентина.

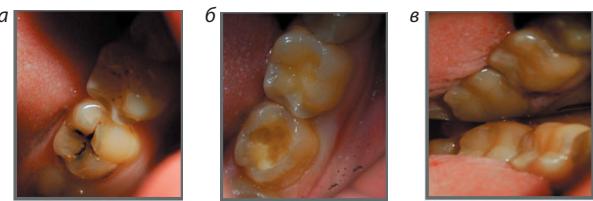


Рис. 3. Этапы лечения кариозного процесса: а — кариозная полость до раскрытия, б — кариозная полость после раскрытия и препарирования, в — кариозная полость после пломбирования

Fig. 3. Stages of treatment of the carious process: a — carious cavity before opening, b — carious cavity after opening and preparation, c — carious cavity after filling

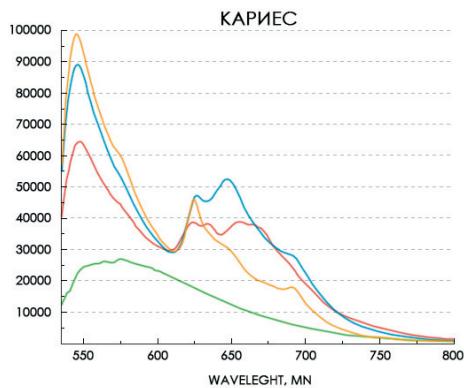


Рис. 4. Спектры кариозных зубов до (верхняя часть рисунка) и после (нижний спектр) механической и медикаментозной обработки кариозной полости. Длина волны зондирующего излучения 637 нм

Fig. 4. Spectra of carious teeth before (upper part of the figure) and after (lower spectrum) mechanical and medicinal treatment of the carious cavity. The wavelength of the probing radiation is 637 nm

Как показало наблюдение (РФС и бактериологическое исследование), кариозная полость в 100 % случаев была инфицирована. Бактериологическое исследование

выявляло присутствие в различном количестве следующих микроорганизмов: Str. mitis — 2×10^3 – 2×10^5 , Str. sangius — 4×10^4 – 6×10^4 , Str. viridans — 1×10^2 – 1×10^5 , Eubacterium lenthum — 2×10^3 – 2×10^4 , Propionibacterium granulosum — 2×10^3 – 4×10^4 , Bifidobacterium spp. — 6×10^3 – 6×10^4 , Lactobacillus spp. — 2×10^4 – 2×10^5 , Candida spp. 2×10^2 – 2×10^3 , Str. epidermidis — 2×10^2 – 2×10^3 , Neisseria spp. — 2×10^2 – 2×10^4 , а также представителей Corinebacteria. Данные были подтверждены показателями ФРД, полученнымными в виде «сдвига вправо», отличным от показателя интактной эмали и характеризующим наличие микроорганизмов в кариозной полости. После проведенной традиционной механической обработки кариозной полости (препарирования кариозной полости) бактериологическое исследование выявляло небольшое количество микроорганизмов в 50 % случаев. В основном это были представители Neisseria spp., Candida spp., Eubacterium lenthum и Str. mitis, в количестве 20–40 КОЕ/мл. После антисептической обработки кариозной полости препаратами раствора хлоргесидина 2 % и перекиси водорода 3 %, барботированной азотом, рост бактерий не был выявлен. Данные представлены в таблицах 2.

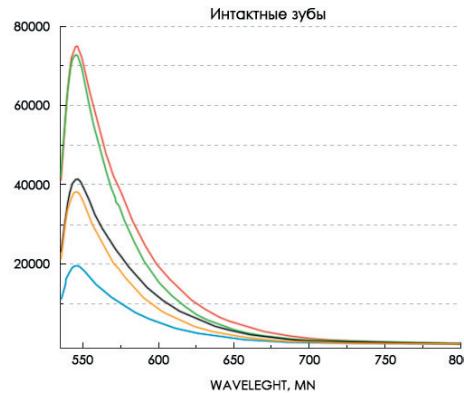


Рис. 5. Спектры интактных (нормальных) зубов. Длина волны зондирующего излучения 637 нм

Fig. 5. Spectra of intact (normal) teeth. Probing radiation wavelength 637 nm

Таблица 2

Анализ данных, полученных в ходе изучения в основной группе
Table 2. Analysis of data from the main study group

Микроорганизмы субстрата кариозной полости до препарирования, бактериологический метод	ЛКД кариозной полости до препарирования	Микроорганизмы субстрата кариозной полости после препарирования, бактериологический метод	ЛКД кариозной полости после препарирования, бактериологический метод	После воздействия пероксинитрита, бактериологический метод и ЛКД
10^4 – 10^5	Несовпадение показателя интактной эмали с показателем кариозной полости — 100 %	10^2 – 10^3	Несовпадение показателя интактной эмали с показателем кариозной полости — 85 %	Несовпадение показателя интактной эмали с показателем кариозной полости — 0 %, рост колоний не выявлен

Разработанная нами экспресс методика раман-флуоресцентной спектроскопии позволяет выявлять не только очаг кариеса по изменению амплитудно-спектральных характеристик флуоресценции микробосодержащих твердых тканей зуба в очаге поражения, но и практически одномоментно, по изменению интенсивности рамановской компоненты — оценивать степень деминерализации твердых тканей зуба.



Рис. 6. Кариозная полость боковой поверхности зуба и его рентгенограмм

Fig. 6. Carious cavity of the lateral surface of the tooth and its radiograph

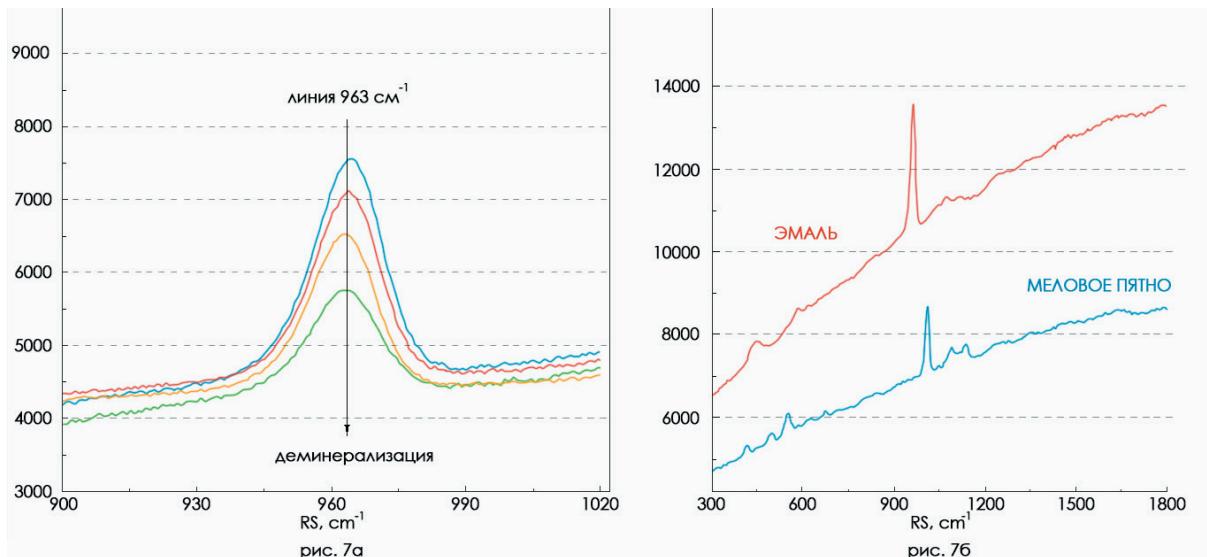


Рис. 7 (а, б). а — Снижение интенсивности рамановской линии гидроксиапатитов (963 cm^{-1}) при развитии кариеса за счет снижения степени деминерализации зуба. б — Нахождение рамановских линий гидроксиапатитов, кальцийапатитов и фторапатитов в меловом пятне (это пятно возникает при кариесе и флюорозе)

Fig. 7 (a, b). a — Decrease in the intensity of the Raman line of hydroxyapatite (963 cm^{-1}) during the development of caries due to a decrease in the degree of tooth demineralization, b — Finding the Raman lines of hydroxyapatite, calcium apatite and fluorapatite in a chalky spot (this spot occurs with caries and fluorosis)

Таблица 3
Средние значения интенсивности флуоресцентного сигнала и коэффициенты минерализации

Table 3. Average values of fluorescent signal intensity and mineralization coefficients

Категория зубов	Средняя интенсивность (отн. ед.)	Коэффициент минерализации (%)	Рентгенологический диагноз
Здоровые зубы	100 ± 5	100	Отсутствие кариеса
Кариес эмали	75 ± 7	75	Поверхностный кариес
Кариес дентина	50 ± 6	50	Средний кариес

Таблица демонстрирует снижение интенсивности флуоресценции пропорционально снижению минерализации зуба, что коррелирует с рентгенологическими данными и клиническим диагнозом. РФД обеспечивает объективную количественную оценку минерализации, позволяя выявлять начальные стадии кариеса.

3. Определение микробной ассоциации и выбор антимикробной терапии

Ниже (рис. 8) представлена раман-флуоресцентная методика для определения чувствительности микробов к антимикробным препаратам. На рисунке представлены три спектра с SERS-подложек для одинаковых концентраций синегнойной палочки, хлорамина и смеси хлорамина и синегнойной палочки (раствор 1:1). После внесения хлорамина спектр синегнойной палочки исчез и спектр раствора хлорамина + синегнойной палочки (1:1) стал идентичным спектру хлорамина. Это означает, что бактерии разрушились под действием данного антисептика. Таким образом, РФД позволяет быстро и надежно определять предпочтительный антисептический препарат, который разрушает исследуемый вид бактерий.

Таким образом, можно полагать, что РФС может выступать в качестве объективного экспресс метода выбора антимикробного препарата и оценивать эффективность его лечения (по купированию спектра микробы после воздействия адекватного антимикробного препарата, поскольку только живые микробы определяют и поддерживают патологический процесс, а не элиминированные). На этом принципе исследования можно,

по-видимому, проводить экспресс-анализ микробной ассоциации и чувствительности к антимикробным препаратам (таблица 4).

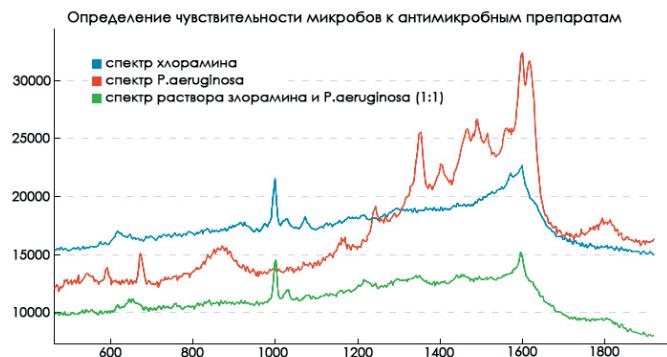


Рис. 8. Сравнительный анализ спектров антисептика 1 % хлорамина при воздействии на штамм бактерии. Время исследования 2–3 мин

Fig. 8. Comparative analysis of the spectra of the antiseptic 1 % chloramine when exposed to a bacterial strain. Study time 2–3 min

РФД позволила выявить общую концентрацию микробной ассоциации в кариозных полостях (10^5 – 10^9 КОЕ/г) и определить чувствительность к 5 антимикробным препаратам и 4 антисептикам в режиме экспресс-анализа. Таблица 4 демонстрирует сравнительные результаты РФД и стандартной микробиологии по чувствительности микроорганизмов.

Таким образом, РФД позволяет экспрессно выявлять микробные ассоциации кариозной полости и адекватно определять их чувствительность к антибиотикам и антисептикам, значительно сокращая время ожидания по сравнению с традиционными культуральными методами.

Таблица 4
Результаты экспресс-анализа микробной ассоциации кариозной полости по ее чувствительности к антимикробным препаратам (антибиотики, антисептики)

Table 4. Results of express analysis of microbial association of carious cavity according to its sensitivity to antimicrobial drugs (antibiotics, antiseptics)

Препарат	Чувствительность РФД (%)	Чувствительность микробиология (%)	Совпадение результатов (%)
Амоксициллин	55	53	88
Ципролет	90	88	92
Аугментин	80	78	85
Азитрал	75	73	80
Линкомицин	85	88	90
Хлорамин	99	88	90
Мирамистин 0,2 %	89	94	95
Раствор перекиси водорода барботированный азотом	95	96	95
Хлорофил +перекись водорода 2 % +лазерное облучение 10–30 Мвт 10–30 мин	98	99	98

4. Диагностика новообразований органов рта и челюстно-лицевой области

Исследование включало 20 пациентов с подозрительными новообразованиями. РФД выявила характерные спектральные маркеры, отличающие доброкачественные и злокачественные образования (спектры представлены после гистологической верификации).

Одним из таких перспективных методов является метод лазерной РФД (рис. 9).

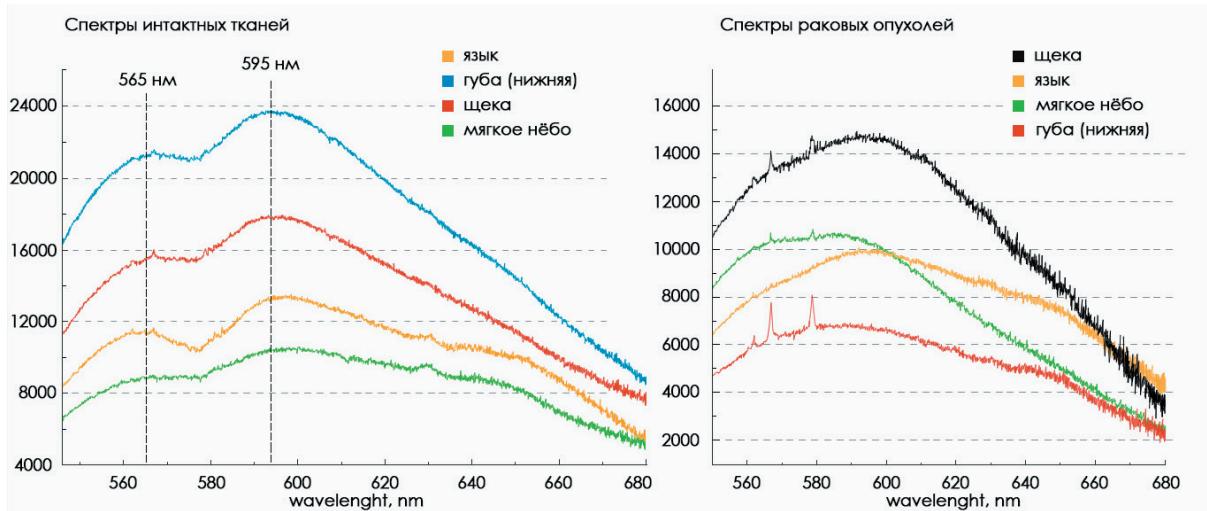


Рис. 9. Слева: Спектры интактных тканей. Справа: Спектры раковых тканей

Fig. 9. Left: Spectra of intact tissues. Right: Spectra of cancerous tissues

На рисунках приведены раман-флуоресцентные спектры разных типов раковых и интактных тканей

органов и тканей рта и челюстно-лицевой области (ЧЛО) в сравнительном аспекте.

На основании проведенных исследований выявлены особенности спектров раковой и интактной ткани:

- Форма флуоресценции исследуемой ткани говорит о ее состоянии — норма («двугорбость») или рак («одногорбость»/куполообразная форма). Степень выраженности формы может варьировать. Кроме того, у интактной ткани пики активности флуоресценции постоянны — имеется пик на 565 нм и пик на 595 нм, а полуширина «горбов» имеет определенную (практически одинаковую) величину.

- Форма флуоресценции опухолевой ткани может также быть «двугорбой», что означает, что для исследования выбрана точка, соответствующая здоровой ткани среди опухолевой. Поэтому для точного получения данных важно провести исследование в нескольких точках (5–10). Для интактных тканей, указанных закономерностей не выявлено.

- Различные рамановские пики, полуширина, форма одногорбой флуоресценции указывают на ряд факторов, повлиявших на развитие опухоли. К ним относятся возраст опухоли, характер развития, скорость распространения и т. д.

- Выявлены спектральные маркеры новообразований (объекты с морфологической верификацией).

Таблица 5
Спектральные маркеры новообразований
Table 5. Spectral markers of neoplasms

Тип образования	Спектральные пики (см^{-1})	Характеристика спектра
Добропачественные	750, 1330, 1600	Умеренное усиление флуоресценции
Злокачественные	700, 1350, 1620	Резкое изменение интенсивности и сдвиг пиков

РФД, по-видимому, позволяет дифференцировать типы новообразований (добропачественные и злокачественные) на основании специфических изменений спектров, что способствует ранней диагностике и планированию лечения в поликлинических условиях. Злокачественные образования демонстрируют характерные спектральные изменения, позволяющие отличить их от доброкачественных с высокой степенью достоверности (>90%). Это подтверждает потенциал РФД в онкологической диагностике. Однако верификация видовой специфиичности опухоли требует проведения дальнейших исследований.

5. Интеграция РФД в цифровую инфраструктуру стоматологических поликлиник

Разработанные алгоритмы цифровой обработки спектральных данных были интегрированы в медицинские информационные системы поликлиник, что позволило автоматизировать процесс диагностики и формирование отчетов.

Представленные преимущества РФД и цифровых алгоритмов ее применения значительно повысят ско-

рость и качество диагностики, снизит количество ошибочных диагнозов, что позволит оптимизировать протоколы диагностики и лечения пациентов стоматологического профиля применительно к работе в условиях поликлинического приема.

Таблица 6
Показатели эффективности внедрения цифровой РФД-системы
Table 6. Performance indicators for the implementation of a digital RFD system

Показатель	До внедрения РФД	После внедрения РФД	Улучшение (%)
Время получения результата	48–72 часа	2–5 мин	95
Точность диагностики (%)	75	92	22,7
Доля ошибочных диагнозов (%)	15	5	-66,7

6. Предлагаемый алгоритм интеграции РФД-данных для работы в условиях стоматологической поликлиники

1. Сбор спектральных данных

- Проведение раман-флуоресцентного обследования пациента с использованием РФД-устройства.
- Получение спектральных сигналов с SERS-подложек и/или без них.

Калибровка спектрометра.

2. Предварительная обработка данных

- Выделение ключевых спектральных маркеров микробов и их ассоциаций (интегральная концентрация) и характеристика состояния тканей рта (норма, патология, гигиеническое состояние, эффективность лечения).

3. Автоматизированный анализ

- Сопоставление спектров с эталонной базой данных.
- Диагностическое заключение (например, концентрация микробов, их реакция на медикаментозное лечение, выявление карисса и некариозных поражений твердых тканей зуба, очагов флюороза, тип новообразования).

Оценка эффективности и качества лечения

4. Передача данных в медицинских информационных системах (МИС)

- Автоматическая загрузка результатов и заключений в электронную медицинскую карту пациента.
- Сохранение спектральных данных для последующего мониторинга.

5. Отображение и доступ к результатам

- Врач получает доступ и/или уведомление о готовности анализа и его результатах.
- Возможность просмотра графиков спектров и диагностических отчетов в интерфейсе.

6. Поддержка телемедицины

- Возможность удаленного доступа к данным для консультаций с профильными специалистами.

- Обмен данными между поликлиниками и центрами экспертизы.

Обсуждение результатов исследования

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность и точность раман-флуоресцентной лечебно-диагностической технологии в сравнении с традиционными методами. Высокая чувствительность РФД, особенно при использовании SERS-подложек, позволяет выявлять микроорганизмы на уровне 10^2 КОЕ/мл, что значительно превосходит возможности классической микробиологии и флуоресцентной диагностики без усиления [9–16].

В стоматологической практике цифровизация процессов диагностики и лечения является ключевым трендом, направленным на персонализацию и повышение эффективности медицинской помощи [1–5]. РФД, интегрированная в цифровые рабочие станции, позволяет проводить экспресс-анализ «по месту», что сокращает время диагностики и улучшает качество принятия решений.

Сравнение с современными зарубежными методами показывает, что РФД обладает конкурентными преимуществами по скорости, точности и функциональности, позволяя одновременно оценивать минерализацию, микробную ассоциацию и чувствительность к терапии [1–3, 4]. Кроме того, возможность диагностики опухолевых процессов открывает новые направления для применения РФД в челюстно-лицевой хирургии и онкологии [8].

Литература/References

- Александров М. Т., Утюж А. С., Олесова В. Н., Юмашев А. В., Пашков Е. П., Михайлова М. В. и др. Лазерные Раман-флуоресцентные медицинские технологии в стоматологии от эксперимента к клинике. Москва: КнигИздат; 2020. 160 с. [Alexandrov M. T., Utjuz A. S., Olesova V. N., Yumashev A. V., Pashkov E. P., Mikhailova M. V. et al. Laser Raman-fluorescent medical technologies in dentistry from experiment to clinic. Moscow: KnigIzdat; 2020. 160 p. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43983634>
- Александров М. Т., Дмитриева Е. Ф., Ахмедов А. Н., Артемова О. А., Потривайл А., Прикул Д. В. Раман-флуоресцентные характеристики различных анатомо-топографических зон зубов различных функциональных групп. Российский стоматологический журнал. 2019;23(5):188–191. [Aleksandrov M. T., Dmitrieva E. F., Akhmedov A. N., Artemova O. A., Potrivalo A., Prikul D. V. Raman-fluorescent characteristics of different anatomical and topographic zones of teeth of different functional groups. Russian Journal of Dentistry. 2019;23(5):188–191. (In Russ.).] <https://doi.org/10.18821/1728-2802-2019-23-5-188-191>
- Александров М. Т., Еганян Д. Г., Мамедова Л. А., Подойникова М. Н. Обоснование применения раман-флуоресцентной диагностики для оценки стоматологического статуса полости рта. Лазерная медицина. 2023;27(2):32–41. [Alexandrov M. T., Eganian D. G., Mamedova L. A., Podoinikova M. N. Justification of the application of Raman-fluorescence diagnostics to assess dental status of the oral cavity. Laser Medicine. 2023;27(2):32–41. (In Russ.).] <https://doi.org/10.37895/2071-8004-2023-27-2-32-41>
- Улитовский С. Б., Калинина О. В. Распространенность некариозных поражений зубов у беременных женщин и их взаимосвязь с экологией полости рта. Экология человека (Human Ecology). 2019;26(8):58–64. [Ul'itovskiy S. B., Kalinina O. V. The prevalence of noncarious teeth injury in pregnant and their interaction with ecology of oral cavity. Ekologiya cheloveka (Human Ecology). 2019;26(8):58–64. (In Russ.).] <https://doi.org/10.33396/1728-0862-8-58-64>
- Mashima I., Theodore C.F., Thaweeboon B., Thaweeboon S., Scannapieco F.A., Nakazawa F. Exploring the salivary microbiome of children stratified by the oral hygiene index. PLoS one. 2017;12(9): e0185274. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185274>
- Магсумова О. А., Полканова В. А., Тимченко Е. В., Волова Л. Т. Рамановская спектроскопия и ее применение в стоматологии. Стоматология. 2021;100(4):137–142. [Magsumova O. A., Polkanova V. A., Timchenko E. V., Volova L. T. Raman spectroscopy and its application in different areas of medicine. Stomatology. 2021;100(4):137–142. (In Russ.).] <https://doi.org/10.17116/stomat2021100041137>
- Бажутова И. В., Магсумова О. А., Фролов О. О., Тимченко Е. В., Тимченко П. Е., Трунин Д. А. и др. Оценка органического и минерального состава эмали зубов методом рамановской спектроскопии: экспериментальное нерандомизированное исследование. Кубанский научный медицинский вестник. 2021;28(4):118–132. [Bazhutova I. V., Magsumova O. A., Frolov O. O., Timchenko E. V., Timchenko P. E., Trunin D. A. et al. Raman spectroscopy analysis of dental enamel organic and mineral composition: an experimental non-randomised study. Kuban Scientific Medical Bulletin. 2021;28(4):118–132. (In Russ.).] <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2021-28-4-118-132>
- Александров М. Т., Кукушкин В. И., Маргарян Э. Г., Пашков Е. П., Баграмова Г. Э. Возможности и перспективы применения раман-флуоресцентной диагностики в стоматологии. Российский стоматологический журнал 2018;22(1):4–11. [Alexandrov M. T., Pashkov E. P., Bagramova G. E., Kukushkin V. I., Margaryan E. G. Possibilities and perspectives of raman fluorescence diagnostic application in dentistry. Russian Journal of Dentistry. 2018;22(1):4–11. (In Russ.).] <https://doi.org/10.18821/0206-4952-2018-39-1-4-11>
- Yang Y., Zeng C., Huang J., Wang M., Qi W., Wang H. et al. Specific and quantitative detection of bacteria based on surface cell imprinted SERS mapping platform. Biosensors and Bioelectronics. 2022;215:114524. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114524>
- Xia J., Li W., Sun M., Wang H. Application of SERS in the Detection of Fungi, Bacteria and Viruses. Nanomaterials (Basel). 2022;12(20):3572. <https://doi.org/10.3390/nano12203572>
- Zhang Y., Xue C., Xu Y., Cui S., Ganeev A. A., Kistenev Y. V. et al. Metal-organic frameworks based surface-enhanced Raman spectroscopy technique for ultra-sensitive biomedical trace detection. Nano research. 2023;16(2):2968–2979. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4914-1>
- Jones R. R., Hooper D. C., Zhang L., Wolverson D., Valev V. K. Raman Techniques: Fundamentals and Frontiers. Nanoscale research letters. 2019;14(1):231. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3039-2>
- Александров М. Т., Кукушкин В. И., Полякова М. А., Новожилова Н. Е., Бабина К. С., Аракелян М. Г. и др. Раман-флуоресцентные характеристики твердых тканей зубов и их клиническое значение. Российский стоматологический журнал. 2018;22(6):276–280. [Aleksandrov M. T., Kukushkin V. I., Polyakova M. A., Novozhilova N. E., Babina K. S., Arakelyan M. G. et al. Raman fluorescent characteristics of hard dental tissues and their clinical significance. Russian Journal of Dentistry. 2018;22(6):276–280. (In Russ.).] <https://doi.org/10.18821/1728-2802-2018-22-6-276-280>
- Zhang J., Zhou C., Zheng L., Wang J., Xia B., Zhao W. et al. Expert consensus on the treatment of oral diseases in pregnant women and infants. International journal of oral science. 2025;17(1):62. <https://doi.org/10.1038/s41368-025-00395-3>

Недостатком технологии может быть необходимость в специализированном обучении персонала и первоначальных инвестициях в аппаратно-программный комплекс, однако преимущества в долгосрочной перспективе значительно перевешивают эти затраты.

Выводы

- Раман-флуоресцентная лечебно-диагностическая технология на базе комплекса «Инспектр М» демонстрирует высокую чувствительность и специфичность для экспресс-диагностики стоматологических заболеваний и микробиологических процессов.
- Использование SERS-подложек значительно повышает аналитическую чувствительность метода, позволяя выявлять микроорганизмы на уровне 10^2 КОЕ/мл.
- РФД эффективно применяется для оценки минерализации твердых тканей зуба, диагностики кариеса, определения микробной ассоциации и выбора анти-mикробной терапии.
- Технология соответствует современным тенденциям цифровизации медицины, обеспечивая интеграцию с информационными системами и возможность «лечения по месту».
- Перспективным направлением является применение РФД для диагностики и мониторинга опухолевых образований в полости рта и челюстно-лицевой области.
- Внедрение РФД в стоматологическую практику способствует повышению качества медицинской помощи и оптимизации лечебных протоколов.

15. Barzan G., Sacco A., Mandrile L., Giovannozzi A. M., Brown J., Portesi C. et al. New frontiers against antibiotic resistance: A Raman-based approach for rapid detection of bacterial susceptibility and biocide-induced antibiotic cross-tolerance. Sensors and Actuators B Chemical. 2020;309:127774. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127774>
16. Tahir M. A., Dina N. E., Cheng H., Valev V. K., Zhang L. Surface-enhanced Raman spectroscopy for bioanalysis and diagnosis. Nanoscale. 2021;13(27):11593–11634. <https://doi.org/10.1039/d1nr00708d>
17. Леонтьев С. В., Леонтьева Е. Ю., Леонтьев Г. С. авторы; Леонтьев С. В. патентообладатель. Способ оценки состояния полости рта по фото и/или видеофиксации для выбора средств гигиены. Российская Федерация патент RU 2728259. Опубл. 28.07.2020. [Leontev S. V., Leonteva E. Yu., Leontev G. S. inventors; Leontev S. V. assignee. Method for assessment of oral health by photo and/or video fixation for selection of hygiene means. Russian Federation patent RU 2728259. Date of publication: 07/28/2020. (In Russ.).] <https://patents.google.com/patent/RU2728259C1/ru>