

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2018

Александров М.Т., Кукушкин В.И., Полякова М.А., Новожилова Н.Е., Бабина К.С., Аракелян М.Г., Баграмова Г.Э., Пашков Е.П., Дмитриева Е.Ф.

РАМАН-ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ И ИХ КЛИНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Кафедра терапевтической стоматологии Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия;

Кафедра ортопедической стоматологии Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 454092, Челябинск, Россия

Цель исследования – изучить спектральные характеристики твердых тканей зуба, их раман-флуоресцентные составляющие и определить возможность применения метода для оценки степени минерализации твердых тканей зуба. В доклиническом исследовании на модельных тест-объектах различных функциональных групп зубов (резцы, премоляры, моляры), удаленных по клиническим показаниям, проводили раман-флуоресцентную спектроскопию, используя лазерный аппаратно-программный комплекс «ИнСпектр М» с длиной волны зондирующего излучения 514 нм. В процессе исследования выполнен качественный и количественный анализ содержания и распределения гидроксиапатита в структурах твердых тканей зубов (эмаль, дентин, цемент) в норме и при патологии. Выявлены высокая чувствительность и экспрессность метода, возможность количественной обработки результатов исследования, что позволяет рекомендовать его для оценки степени минерализации/деминерализации зуба, эффективности реминерализующих препаратов и методов их применения в клинике терапевтической стоматологии.

Ключевые слова: раман-флуоресцентная спектроскопия; деминерализация; реминерализация; гидроксиапатит; эмаль, дентин; цемент; кариес.

Для цитирования: Александров М.Т., Кукушкин В.И., Полякова М.А., Новожилова Н.Е., Бабина К.С., Аракелян М.Г., Баграмова Г.Э., Пашков Е.П., Дмитриева Е.Ф. Раман-флуоресцентные характеристики твердых тканей зубов и их клиническое значение. *Российский стоматологический журнал*. 2018; 22 (6): 276-280. <http://dx.doi.org/10.18821/1728-2802-2018-22-6-276-280>

Aleksandrov M.T., Kukushkin V.I., Polyakova M.A., Novozhilova N.E., Babina K.S., Arakelyan M.G., Bagramova G.E., Pashkov E.P., Dmitrieva E.F.

RAMAN FLUORESCENCE CHARACTERISTICS OF HARD DENTAL TISSUES AND THEIR CLINICAL SIGNIFICANCE

Department of therapeutic dentistry Federal state Autonomous educational institution of higher education «I.M. Sechenov First Moscow state medical University» Ministry of health of the Russian Federation (Sechenov University), 119991, Moscow, Russia;

Department of prosthetic dentistry Federal state budgetary educational institution of higher education «South Ural state medical University» of the Ministry of health of the Russian Federation, 454092, Chelyabinsk, Russia

The aim of the study is to study the spectral characteristics of the hard tissues of the tooth, their Raman-fluorescent components (RFS) and to determine the possibility of using the method to assess the degree of mineralization of hard tissues of the tooth. In a preclinical study on model test objects of different functional groups of teeth (incisors, premolars, molars), remote by clinical indications, Raman-fluorescence spectroscopy was performed using the laser hardware-software complex “Inspector M” with a wavelength of probing radiation 514 nm. In the course of the study, a qualitative and quantitative analysis of the content and distribution of hydroxyapatite in the structures of hard dental tissues (enamel, dentin, cement) in normal and pathological conditions was performed. The high sensitivity and expressiveness of the method, the possibility of quantitative processing of the results of the study, which allows us to recommend it for assessing the degree of mineralization/demineralization of the tooth, the effectiveness of remineralizing drugs and methods of their use in the clinic of therapeutic dentistry.

Key words: Raman-fluorescence spectroscopy; demineralization; remineralization; hydroxyapatite; enamel, dentin; cement; caries.

For citation: Aleksandrov M.T., Kukushkin V.I., Polyakova M.A., Novozhilova N.E., Babina K.S., Arakelyan M.G., Bagramova G.E., Pashkov E.P., Dmitrieva E.F. Raman fluorescence characteristics of hard dental tissues and their clinical significance. *Rossiyskii stomatologicheskii zhurnal*. 2018; 22(6): 276-280. <http://dx.doi.org/10.18821/1728-2802-2018-22-6-276-280>

For correspondence: Aleksandrov Mikhail Timofeevich, Dr.med. Sci., Professor, E-mail: alex_mta@mail.ru.

Information about authors:

Polyakova M.A., <http://orcid.org/0000-0002-4494-2644>; Babina K.S., <http://orcid.org/0000-0003-4445-0858>.

Acknowledgments. *The study had no sponsorship.*

Conflict of interest. *The authors declare no conflict of interest.*

Received 03.08.18

Accepted 16.09.18

Для корреспонденции: Александров Михаил Тимофеевич, д-р мед. наук, профессор, E-mail: alex_mta@mail.ru.

В настоящее время методы лазерной раман-флюоресцентной спектроскопии, их технологическая и аппаратная реализация играют все большую роль в медицине [1–4]. В стоматологии проводят как экспериментальные исследования, так и клиническое изучение возможностей использования средств квантовой электроники как источников лазерного излучения для диагностики, профилактики и лечения заболеваний твердых тканей зубов [5, 6]. При этом на первый план выходят задачи идентификации и характеристики органических и неорганических молекул, включая мониторинг их структурных изменений, измерение концентраций веществ, входящих в состав пробы. Рамановская спектроскопия, которая позволяет однозначно распознавать молекулы вещества по спектрам неупругого рассеяния света благодаря возбуждению большого количества разных специфических колебательных и вращательных мод, как нельзя лучше подходит для этих целей. При этом считается, что спектроскопия комбинационного рассеяния – один из наиболее точных методов анализа органических веществ [4–6]. В другом приложении, непосредственно в клинических условиях «по месту» в реальном масштабе времени (секунды, минуты), флюоресцентное и рамановское излучение используется для диагностики состояния тканей и органов (метаболических, морфометрических и функциональных) биологических объектов в норме и при патологии [1, 2, 7].

Цель нашего исследования - изучить раман-флюоресцентные характеристики твердых тканей зуба и определить их клиническое значение, а также оценить степень минерализации/деминерализации твердых тканей зубов и твердых зубных отложений на основе их спектральных раман-флюоресцентных характеристик.

Материал и методы

В настоящем доклиническом исследовании *in vitro* на модельных тест-объектах зубов, удаленных по клиническим показаниям (резцы, премоляры, моляры) проводили раман-флюоресцентную спектроскопию, используя лазерный аппаратно-программный комплекс «ИнСпектр М» с длиной волны зондирующего излучения 514 нм.

АПК «ИнСпектр М» предназначен для измерения спектров рамановского рассеяния и/или спектров фотолюминесценции жидкостей, твердых тел, порошков и гелей. Прибор состоит из лазерного источника излучения, системы сбора, фильтрации и анализа рассеянного излучения, оснащенной малошумящим многоканальным детектором – анализатором (ПЗС-линейкой) для измерения амплитудных и спектральных характеристик рассеянного излучения. Спектральный диапазон комплекса покрывает область молекулярных колебаний органических и неорганических веществ, что позволяет в течение нескольких секунд производить измерение рамановского и/или флуоресцентного спектра исследуемого объекта, определять спектральное положение и относительные интенсивности рамановских и флуоресцентных спектральных линий (рис. 1).

Виды и установка образца

Насадка (см. рис. 1) предназначена для измерений жидкостей и порошков в закрытых ампулах через стеклянную стенку. При использовании данной насадки измерения проводят контактно стабильно.

Без насадки спектрометр используется для измерений твердых образцов небольших размеров (таблеток, кристаллов, зубов или их шлифов). При этом измерения также выполняют контактно, стабильно в фокусе встроенной линзы.

Программное обеспечение данного прибора позволяет проводить качественный и количественный анализ получаемых спектров и идентифицировать вещества, сравнивая получаемый спектр с эталонными (методика предложена проф. Александровым М.Т. и канд. физ.-мат. наук Кукушкиным В.И.) (рис. 2).

Представленные результаты свидетельствуют о том, что рамановские спектры зубов (эмаль зуба) адекватны показателям эталонного образца гидроксипатита – линия ГАП. Данный результат определил выбор методики для решения поставленной цели исследования.

С помощью АПК «ИнСпектр М» тест-объекты (эмаль, дентин, цемент исследуемых зубов) подвергали воздействию лазерного излучения видимого диапазона. Одновременно производили сбор и обработку полученной информации. Измерения выполняли в контактно-стабильном положении объекта (зуба) к источнику излучения.

Всего в доклиническом исследовании использовали 30 тест-объектов зубов, по 10 из каждой функциональной группы (резцы – 10, премоляры – 10, моляры – 10), удаленных по клиническим показаниям. Предварительные измерения осуществляли как на высушенных, так и на влажных зубах и пришли к выводу, что необходимо использовать влажные зубы, поскольку показатели были на 30–50 % выше и хорошо воспроизводимы.

Для количественной оценки интенсивности рамановского излучения (в относительных единицах) измеряли показатели в максимуме и минимуме его мощ-



Рис. 1. АПК ИнСпектрМ со световодной насадкой.

Таблица 1. Спектральные характеристики сухого и влажного гидроксипатита

Объект сравнения (нормированный показатель)	Верхний пик (интенсивность сигнала в максимуме/длина волны в максимуме)	Нижний уровень (интенсивность сигнала в минимуме/длина волны в максимуме)	Интенсивность рамана (отн. ед.)
ГАП сухой	$y = 3326 \pm 0,05, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 2625 \pm 0,05, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 702 \pm 0,05, x = 963 \text{ см}^{-1}$
ГАП влажный	$y = 3560 \pm 0,034, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 2040 \pm 0,04, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 1520 \pm 0,039, x = 963 \text{ см}^{-1}$

Таблица 2. Спектральные характеристики твердых тканей зуба (резец)

Объект исследования, n = 10	Верхний пик (интенсивность сигнала в максимуме/длина волны в максимуме)	Нижний уровень (интенсивность сигнала в минимуме/длина волны в максимуме)	Рамановская интенсивность сигнала/длина волны в максимуме
Эмаль	$y = 11134 \pm 0,04, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 8079 \pm 0,043, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 3058 \pm 0,04, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Кариес эмали	$y = 23819 \pm 0,06, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 22949 \pm 0,05, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 870 \pm 0,056, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Дентин	$y = 15276 \pm 0,065, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 14282 \pm 0,046, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 994 \pm 0,05, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Цемент	$y = 4662 \pm 0,071, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 3967 \pm 0,062, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 695 \pm 0,067, x = 963 \text{ см}^{-1}$

Таблица 3. Спектральные характеристики твердых тканей зуба (премоляр)

Объект исследования, n = 10	Верхний пик (интенсивность сигнала в максимуме/длина волны в максимуме)	Нижний уровень (интенсивность сигнала в минимуме/длина волны в максимуме)	Интенсивность Рамана (отн. ед.)
Эмаль	$y = 12690 \pm 0,042, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 11647 \pm 0,067, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 1043 \pm 0,06, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Кариес эмали	$y = 14906 \pm 0,086, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 14001 \pm 0,056, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 905 \pm 0,048, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Дентин	$y = 12033 \pm 0,038, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 10305 \pm 0,073, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 670 \pm 0,064, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Цемент	$y = 16270 \pm 0,072, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 15964 \pm 0,029, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 306 \pm 0,04, x = 963 \text{ см}^{-1}$

Таблица 4. Спектральные характеристики твердых тканей зуба (моляр)

Объект исследования, n = 10	Верхний пик (интенсивность сигнала в максимуме/длина волны в максимуме)	Нижний уровень (интенсивность сигнала в минимуме/длина волны в максимуме)	Интенсивность Рамана (отн. ед.)
Эмаль	$y = 17637 \pm 0,048, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 16480 \pm 0,07, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 1157 \pm 0,071, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Кариес эмали	$y = 7839 \pm 0,049, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7742 \pm 0,053, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 97 \pm 0,04, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Дентин	$y = 18081 \pm 0,072, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 17603 \pm 0,07, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 479 \pm 0,07, x = 963 \text{ см}^{-1}$
Цемент	$y = 11813 \pm 0,04, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 11686 \pm 0,043, x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 127 \pm 0,04, x = 963 \text{ см}^{-1}$

Таблица 5. Спектральные характеристики эмали – резца до и после аппликации гидроксипатита

Объект сравнения (нормированный показатель)	Верхний пик (интенсивность сигнала в максимуме/длина волны в максимуме)	Нижний уровень (интенсивность сигнала в минимуме/длина волны в максимуме)	Интенсивность Рамана, отн. ед.
Резец эмаль	$y=43330\pm 0,06, x=963 \text{ см}^{-1}$	$y=42481\pm 0,05, x=963 \text{ см}^{-1}$	$y=849\pm 0,05, x=963 \text{ см}^{-1}$
Резец эмаль после ГАП	$y=62306\pm 0,076, x=963 \text{ см}^{-1}$	$y=60627\pm 0,081, x=963 \text{ см}^{-1}$	$y=1679\pm 0,071, x=963 \text{ см}^{-1}$

ности и показатели интенсивности флюоресценции (М ср.). Полученную разницу (отн. ед.) принимали за интенсивность Рамана для эмали, дентина и цемента исследуемых зубов (М ср.).

В отдельном исследовании на 10 резцах изучали рамановские характеристики эмали резца до и после аппликации гидроксипатита (линия ГАП) в течение 48 ч.

Регистрация и программная обработка результатов исследования занимала 2 мин. Результаты (М ср.) исследования представлены в виде рисунков (рис. 3–6 см. на вклейке) и таблиц.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования представлены в соответствии с очередностью их выполнения.

Данные, представленные в табл. 1, убедительно показывают преимущество исследования тест-объекта во влажном состоянии. В частности, показатели ГАП

во влажном (до насыщения) состоянии составили 1520 отн. ед. в то время как до этого (сухой порошок ГАП) – 702 отн. ед. Это подтверждает правильность выбора методики исследования – все зубы в представленной работе выдерживали в деионизированной воде 30 мин (отработано в предварительном эксперименте).

Полученные результаты раман-флюоресцентной диагностики твердых тканей зубов различных функциональных групп (резцы, премоляры, моляры) в норме и при кариесе представлены в табл. 1–5.

Из полученных результатов следует, что содержание ГАП в эмали, как более минерализованной структуры, значительно выше, чем в дентине, цементе и в кариозном очаге эмали резца и составляет соответственно 3058–994–695–870 отн. ед. Показатели интенсивности флюоресценции выше в дентине, цементе и кариозном очаге эмали резца и располагались по убывающей следующим образом: кариес—дентин—эмаль, что составляет соответственно 22949–14282–8079 со-

гласно классической общепринятой трактовке. Преимущество предложенной медицинской технологии в количественном представлении результатов (объективность), их экспрессности, возможности документирования и хранения информации, ее метрологической обоснованности.

Для премоляров получены аналогичные результаты по ГАП: интенсивность рамановского пика была выше в эмали и снижалась в дентине, цементе и при кариесе эмали, что составило 1043–670–306 и 905 отн. ед. соответственно. Флюоресценция органических компонент зуба была выше у дентина (хотя различия с кариесом были незначительны) и снижалась по убывающей в ряду кариес—эмаль—дентин, что составило соответственно 15964–14001–11647–10305 отн. ед.

Показана достоверно высокая разница в интенсивности рамановского пика для эмали и меньшая его величина соответственно у дентина, цемента и при кариесе, что составило 1157–479–127–97. Показатели интенсивности флюоресценции при этом требуют дополнительного исследования вследствие недостаточного объема выборки.

Наиболее интересные результаты применения рамановской технологии получены при оценке эффекта реминерализации твердых тканей зуба (эмаль). Показано, что после аппликации реминерализующего раствора содержание ГАП в эмали зуба увеличилось практически в 2 раза (до – 849 отн. ед., после – 1679 отн. ед.). Этот факт имеет важное клиническое значение как в научном, так и, главное, в прикладном приложении.

Резюмируя, следует отметить, что развитием технологий лазерной флюоресценции является раман-флюоресцентная диагностика [7–17]. Преимуществами представленной технологии, перспективной для многих отраслей медицины, в частности стоматологии, являются: объективность, экспрессность, работа онлайн, в режиме обратной связи. Не менее важной составляющей является компактность и портативность используемой аппаратуры, высокая разрешающая способность порядка 1 Å, чувствительность и воспроизводимость методов измерения, малая погрешность, допустимость использования микрообъемов исследуемого материала, отсутствие искажений снимаемого сигнала и влияния фоновой засветки на результаты измерений, возможность нормирования сигнала в режиме реального времени.

Как показали наши исследования, раман-флюоресцентная спектроскопия позволяет однозначно распознавать органические молекулы по спектрам неупругого рассеяния света благодаря возбуждению большого количества разных специфических колебательных и вращательных мод, что как нельзя лучше подходит для цели нашего исследования и является одним из наиболее точных методов анализа органических и неорганических веществ [4, 5, 6]. И как свидетельствуют данные литературы и полученные нами результаты, рамановское излучение может быть использовано для объективной диагностики (степень минерализации/деминерализации) состояния твердых тканей зуба в норме и при патологии [2].

Таким образом, следует признать, что представлен-

ная цифровая объективная медицинская технология может найти широкое клиническое применение при диагностике степени минерализации твердых тканей зубов, персонифицированной оценке эффективности реминерализующей терапии и, следовательно, способствовать повышению эффективности профилактического пособия на стоматологическом приеме.

На основании полученных результатов сделаны следующие **выводы**.

1. Рамановские медицинские технологии являются экспрессными и высокочувствительными и позволяют в реальном масштабе времени объективно оценивать уровень минерализации твердых тканей различных функциональных групп зубов в норме и при патологии.

2. Перспективным направлением применения разработанной медицинской технологии является обоснованная в эксперименте возможность ее применения для оценки степени минерализации (деминерализации) и эффективности реминерализующей терапии твердых тканей зубов и препаратов для ее реализации.

3. Сочетанное одномоментное применение рамановского и флюоресцентного излучений для оценки как органической, так и неорганической составляющей твердых тканей зуба и его отложений могут служить основой для разработки методов гигиенической обработки твердых тканей, оценки их эффективности, а также разработки новых объективных методов оценки гигиенического состояния полости рта.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров М.Т., Афанасьев Р.А., Гапоненко О.Г., Козьма С.Ю., Кузьмин Г.П., Лизунова И.А. и др. Лазерная флюоресцентная диагностика в медицине и биологии (теория и возможности применения). НПЦ Спектролюкс; 2007.
2. Александров М.Т. Лазерная клиническая биофотометрия (теория, эксперимент, практика). М.: Техносфера; 2008.
3. Huser T. Nanosensors using Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS). Center for Biophotonics Science and Technology, EAD289, 2007.
4. Kneipp K., Kneipp H., Itzkan I., Dasari R., Feld M. Surface enhanced Raman scattering and biophysics. *J. Phys: Condensed Matter*. 2002; 14: R597–R624.
5. Sheng R., Nii F., Cotton T. *Anal. Chem.* 1991; 63: 437.
6. Thornton J., Force R. *Appl. Spectrosc.* 1991; 45: 1522.
7. Александров М.Т., Маргарян Э.Г. Применение лазерных технологий в клинике терапевтической стоматологии (обоснование, возможности, перспективы). *Российская стоматология*. 2017; 3: 31 – 6.
8. Александров М.Т., Кукушкин В.И., Маргарян Э.Г. Раман-флюоресцентная диагностика состояния тканей человека в норме и при патологии и ее аппаратно-программное решение. *Российский стоматологический журнал*. 2018; 1: 4 – 11.
9. Александров М.Т., Пашков Е.П., Баграмова Г.Э., Кукушкин В.И., Маргарян Э.Г. Возможности и перспективы применения раман-флюоресцентной диагностики в стоматологии. *Российский стоматологический журнал*. 2018; 22(1): 4–11.
10. Кукушкин И.В. Композитные фермионы и дробный квантовый эффект Холла. Тезисы школы по физике XVIII уральской международной зимней полупроводников. 15 – 20 февраля 2010 г. Екатеринбург – Новоуральск, материалы конференции. 2010; 19.

11. Кукушкин И.В. Методы рамановской спектроскопии для исследования дисперсии коллективных возбуждений, тезисы конференции «Наноструктуры», 20 – 25 июня 2010, Санкт Петербург, Россия материалы конференции; 2010.
12. Кукушкин И.В. Свойства коллективных возбуждений, измеренные методом неупругого рассеяния света», 11-я Российская конференция по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 16–20 сентября 2013 г., материалы конференции, 2013; 128.
13. Kukushkin I.V. Raman spectroscopy of collective excitations, International Conference on Application of High Magnetic Field in Semiconductor Physics, HMFSP-18, 31 July – 5 August 2010, Fukuoka, Japan, Proceedings. 2010; 49.
14. Kukushkin I.V. Rotons in the dispersion of collective excitations studied by Raman technique, International Conference “The Quantum Hall Effect”, 2-4 May 2010, Minneapolis, USA, Proceedings. 2010; 39.
15. Kulik L.V., Zhuravlev A.S. “Resonant Raman scattering as a probe of electron spin polarization”, 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics July 22-27 2012, Chamonix, France, Proceedings. 2012; 131.
16. Александров М.Т., Пауков В.С., Попов С.Н., Прохорова А.А., Кукушкин В.И. «Диагностика опухолей брюшной полости и органов малого таза методом лазерной спектроскопии» International scientific conference Scientific Review, Czech Republic, Karlovy Vary-Russia, Moscow, 29-30 May 2015, Proceedingsp. 2015; 475—84.
17. Полетаева Д.А., Рыбкин А.Ю., Горячев Н.С., Белик А.Ю., Котельникова Р.А., Корнев А.Б. и др. Детектирование водорастворимых производных фуллеренов в биологических системах методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния» Сборник трудов VI Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» (ТКМФ-6), г. Троицк, 2–6 июня 2014 г., Москва; 2014: 345—7.
7. Aleksandrov M.T., Margaryan E.G. Application of laser technologies in the clinic of therapeutic dentistry (justification, opportunities, prospects). *Rossiyskaya stomatologiya*. 2017; 3: 31 – 6.
8. Александров М.Т., Кукушкин В.И., Margaryan E.G. Raman-fluorescent diagnostics of human tissues in normal and pathological conditions and its hardware-software solution. *Rossiyskiy stomatologicheskiy zhurnal*. 2018; 1: 4 – 11.
9. Александров М.Т., Pashkov E.P., Bagramova G.E., Kukushkin V.I., Margaryan E.G. Possibilities and prospects of application of Raman-fluorescent diagnostics in dentistry. *Rossiyskii stomatologicheskii zhurnal*. 2018; 22(1): 4—11.
10. Kukushkin I.V. Composite Fermion and Drobny Kvantovyi Eeffekt Chhalla”, Theses of the school of physics XVIII Ural international winter semiconductors. 15 – 20 February 2010 Ekaterinburg – Novouralsk, conference proceedings., 2010
11. Kukushkin I.V. Methods of Raman spectroscopy for the study of dispersion of collective excitations, abstracts of the conference “Nanostructures”, June 20 – 25, 2010, St. Petersburg, Russia conference proceedings; 2010.
12. Kukushkin I.V. Properties of collective excitations measured by inelastic light scattering”, 11th Russian conference on semiconductor physics, St. Petersburg, September 16–20, 2013, proceedings of the conference; 2013.
13. Kukushkin I.V. Raman spectroscopy of collective excitations, International Conference on Application of High Magnetic Field in Semiconductor Physics, HMFSP-18, 31 July – 5 August 2010, Fukuoka, Japan, Proceedings. 2010; 49.
14. Kukushkin I.V. Rotons in the dispersion of collective excitations studied by Raman technique, International Conference “The Quantum Hall Effect”, 2-4 May 2010, Minneapolis, USA, Proceedings. 2010; 39.
15. Kulik L.V., Zhuravlev A.S. “Resonant Raman scattering as a probe of electron spin polarization”, 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics July 22-27 2012, Chamonix, France, Proceedings. 2012.
16. Александров М.Т., Spiders V.S., Popov S.N., Prokhorova A.A., Kukushkin V.I. Diagnosis of tumors of the abdominal cavity and pelvic organs by laser spectroscopy. International scientific conference Scientific Review, Czech Republic, Karlovy vary-Russia, Moscow, 29-30 May 2015, Processingsp. 2015; 475–84.
17. Poletaeva D.A., Rybkin A.Yu., Goryachev N.S., Belik A.Yu., Kotelnikova R.A., Kornev A. B., et al. Detection of water-soluble derivatives of fullerenes in biological systems by spectroscopy of giant Raman scattering. Proceedings of the VI Trinity conference “Medical physics and innovations in medicine” (TKMF-6), Troitsk - Moscow 2–6 June 2014, Moscow; 345–7.

REFERENCES

1. Aleksandrov M.T., Afanasiev R.A., Gaponenko O.G., Kozma S.Yu., Kuzmin G.P., Lizunova I.A., et al. Laser fluorescent diagnostics in medicine and biology (theory and application). – «NPTs Spektroluks»; 2007.
2. Aleksandrov M.T. Laser clinical biophotometry (theory, experiment, practice). Moscow: Technosfera; 2008.
3. Huser T. Nanosensors using Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS). Center for Biophotonics Science and Technology, EAD289, 2007; 6.
4. Kneipp K., Kneipp H., Itzkan I., Dasari R., Feld M. Surface enhanced Raman scattering and biophysics. *J. Phys: Condensed Matter*. 2002; 14: R597–R624.
5. Sheng R., Nii F., Cotton T. *Anal. Chem.* 1991; 63: 437.
6. Thornton J., Force R. *Appl. Spectrosc.* 1991; 45: 1522.

Поступила 03.08.18

Принята к печати 16.09.18

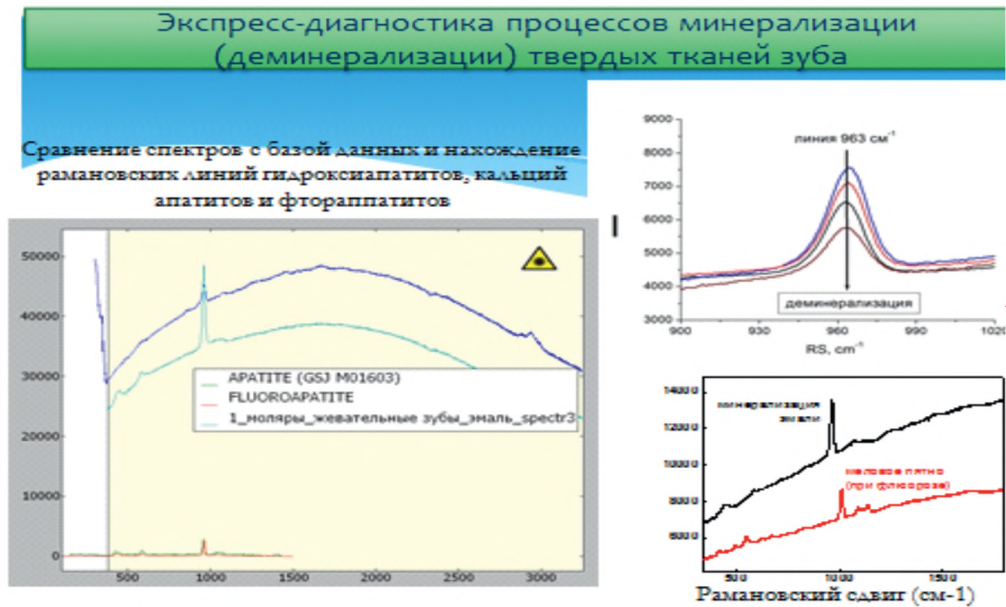


Рис. 2. Сравнение спектров рамановских линий гидроксиапатита, кальцийапатита и фторапатита эталонного образца — линия ГАП (данные эталонных образцов РАН — нижний спектр слева) с рамановским спектром эмали зуба (слева верхние графики). Справа — аналогично для эмали зуба при различной степени ее минерализации (исследования проводили на аппаратно-программном комплексе ИнСпектр М).

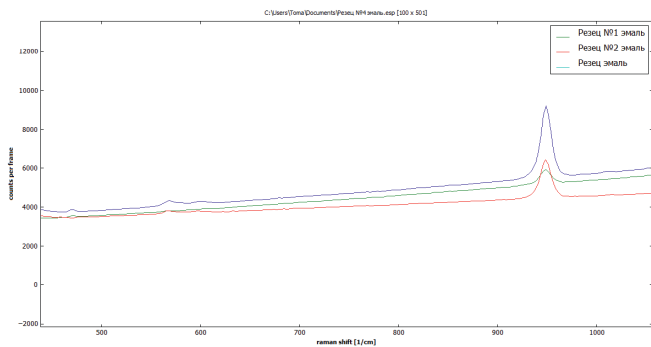


Рис. 3. Нахождение рамановских линий гидроксиапатитов (ГАП-963 cm^{-1}) для центральных резцов у различных пациентов.

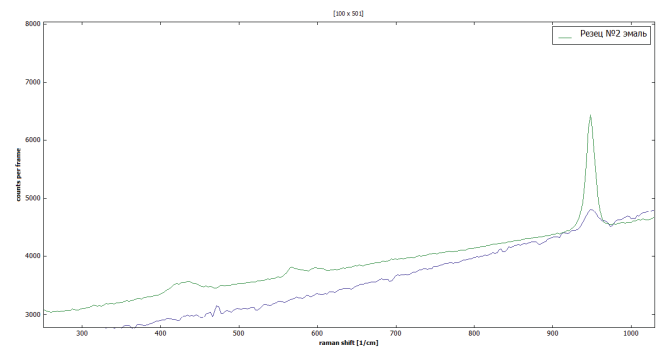


Рис. 4. Снижение интенсивности рамановской линии гидроксиапатитов (963 cm^{-1}) при развитии кариеса за счет падения степени деминерализации зуба (типичная закономерность — нижняя кривая).

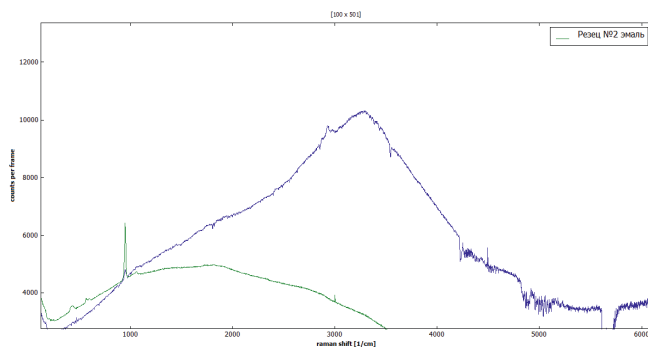


Рис. 5. Выраженные различия в интенсивности флуоресценции и рамановских составляющих эмали и дентина (синяя кривая — дентин; зеленая — эмаль и дентин центрального резца), обратная зависимость, подтверждающая высокую минерализацию эмали по сравнению с дентином (по рамановской составляющей) и обратную зависимость их органических составляющих (по флуоресцентной составляющей), что соответствует общепринятым данным.

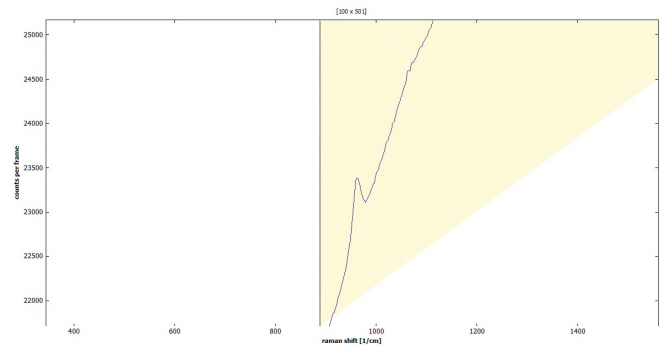


Рис. 6. Калькус (нижний центральный резец слева) характеризуется низкой рамановской составляющей ГАП-320 отн. ед. и высокой органической составляющей (интенсивность флуоресценции — 35 000 отн. ед.).