

Научная статья

УДК 616.314-002-02

DOI: 10.17816/pmj414111-121

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАМАН-ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ, ФИЗИЧЕСКИХ И ЛУЧЕВЫХ ФАКТОРОВ НА МИНЕРАЛИЗАЦИЮ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ

Г.И. Беляков*, Н.С. Нуриева, Д.А. Тезиков

*Южно-Уральский государственный медицинский университет, г. Челябинск,
Российская Федерация*

APPLICATION OF THE RAMAN FLUORESCENCE METHOD TO STUDY THE EFFECTS OF CHEMICAL, PHYSICAL AND RADIATION FACTORS ON THE MINERALIZATION OF HARD DENTAL TISSUES

G.I. Belyakov*, N.S. Nurieva, D.A. Tezikov

South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russian Federation

Цель. Изучить воздействие физических, химических и лучевых факторов на степень минерализации поверхности твердых тканей зуба с помощью спектроскопии.

Материалы и методы. Для решения поставленной цели была изучена степень минерализации поверхности твердых тканей зуба с помощью Раман-флюоресцентной спектроскопии с применением аппаратно-программного комплекса «ИнСпектр М» на удаленных по клиническим показаниям зубах (*in vitro*): в разной степени увлажненности (сухие и влажные); до, после воздействия кислоты и реминерализующего препарата; до и после воздействия лучевого фактора

Результаты. Полученные данные позволяют увидеть разницу показателей в сухом (1801 [1800; 1802] отн. ед.) и увлажненном виде (591,5 [591; 592]). В результате изучения зубов до воздействия лимонной кислоты минерализация по интенсивности Рамана составляет 602 [601; 602] отн. ед., после воздействия лимонной кислоты – 152 [152; 153] отн. ед., после аппликация пластины ЦМ-2 – 423 [422; 423] отн. ед.

© Беляков Г.И., Нуриева Н.С., Тезиков Д.А., 2024

тел. +7 963 474 97 59

e-mail: belyakov-95@mail.ru

[Беляков Г.И. (*контактное лицо) – аспирант кафедры ортопедической стоматологии и ортодонтии, ORCID: 0000-0002-1927-0751; Нуриева Н.С. – доктор медицинских наук, профессор кафедры ортопедической стоматологии и ортодонтии, ORCID: 0000-0002-5656-2286; Тезиков Д.А. – кандидат медицинских наук, ассистент кафедры ортопедической стоматологии и ортодонтии, ORCID: 0009-0007-2056-155X].

© Belyakov G.I., Nurieva N.S., Tezikov D.A., 2024

tel. +7 963 474 97 59

e-mail: belyakov-95@mail.ru

[Belyakov G.I. (*contact person) – Postgraduate Student of the Department of Orthopedic Dentistry and Orthodontics, ORCID: 0000-0002-1927-0751; Nurieva N.S. – DSc (Medicine), Professor of the Department of Orthopedic Dentistry and Orthodontics, ORCID: 0000-0002-5656-2286; Tezikov D.A. – PhD (Medicine), Assistant of the Department of Orthopedic Dentistry and Orthodontics, ORCID: 0009-0007-2056-155X].

Выявленные различия достоверны ($p < 0,001$). Таким образом подтверждается, что органические кислоты (лимонная кислота) способствуют деминерализации эмали более чем в два раза, а применение кальцийсодержащих пластин способствует реминерализации практически до исходного состояния. В то же время не выявлено достоверных различий уровня минерализации (по методу Раман-флюоресцентной спектроскопии) зубов до и после прямого лучевого воздействия вне зависимости от дозы (2; 70; 110 Гр) ни в одной из функциональных групп (резцы, клыки, премоляры, моляры).

Выводы. Раман-флюоресцентная спектроскопия обладает высокой чувствительностью и способна регистрировать минерализацию, де- и реминерализацию твердых тканей зуба. Определение минерализации твердых тканей зуба методом Раман-флюоресцентной спектроскопии рекомендуется проводить в увлажненном, а не в сухом виде. Органические кислоты способствуют деминерализации эмали, а применение кальцийсодержащих пластин способствует реминерализации. Прямое лучевое воздействие не оказывает прямого влияния на минерализацию поверхности твердых тканей зуба вне зависимости от применяемой дозы во всех функциональных группах (резцы, клыки, премоляры, моляры), во всех участках зубов (экватор, режущий край, пришеечная область).

Ключевые слова. Раман-флюоресценция, твердые ткани, минерализация, лучевой кариес, эмаль.

Objective. To study the effect of physical, chemical and radiation factors on the degree of mineralization of the hard dental tissues surface using spectroscopy.

Materials and methods. The degree of mineralization of hard dental tissues was studied by the Raman spectroscopy using hardware-software complex InSpectrum M on the teeth removed according to clinical indications (*in vitro*): in varying degrees of moisture (dry and wet); before and after exposure to acid and remineralizing drug; before and after exposure to radiation

Results. The data obtained demonstrated the difference in the indicators in dry (1801 [1800; 1802]) relative units, and moistened (591.5 [591; 592]) teeth. The mineralization of teeth according to Raman Intensity before exposure to citric acid, was (602 [601; 602]) rel. units, and after the exposure it was (152 [152; 153]) rel. units, after application of the cm-2 plate it was (423 [422; 423]) rel. units. The identified differences are reliable ($p < 0.001$). Thus, it is confirmed that organic acids (citric acid) contribute to the enamel demineralization by more than two times, and the use of calcium-containing plates contributes to remineralization almost to the initial state. At the same time, there were no significant differences in the level of mineralization (according to the Raman method of fluorescence spectroscopy) in teeth before and after direct radiation exposure, regardless of dose (2 Gy, 70 Gy, 110 Gy) in any of the functional groups (incisors, canines, premolars, molars).

Conclusions. 1. Raman-fluorescence spectroscopy has a high sensitivity and is capable of detecting mineralization, de- and re-mineralization of hard dental tissues. 2. It is recommended to determine the hard tooth tissues mineralization by Raman-fluorescence spectroscopy in a moistened rather than a dry form. 3. Organic acids contribute to the demineralization of enamel, and the use of calcium-containing plates promotes its remineralization. 4. Direct radiation exposure does not have a direct effect on the mineralization of the surface of the hard dental tissues. regardless of the dose applied in all functional groups (incisors, canines, premolars, molars), in all areas of the teeth (equator, cutting edge, gum border).

Keywords. Raman fluorescence, hard tissues, mineralization, radiation caries, enamel.

ВВЕДЕНИЕ

Факторы и процессы, приводящие к деминерализации твердых тканей зуба, многообразны. Одним из таких факторов является лучевая терапия. Применение методов лучевой терапии играет большую роль в клинической практике лечения онкологических заболеваний. Стоит отметить, что данный

вид терапии может вызывать тяжелые осложнения, которые уменьшают возможности его использования. Актуальным направлением улучшения лучевой терапии считается снижение негативных последствий: поражений, реакций. В то же время ионизирующее облучение влияет на ткани полости рта, вызывая осложнения. Чаще всего врачи-стоматологи в своей клинической практике встре-

чаются с такими осложнениями, как телеангиоэктазии, ксеростомия, синдром хронической боли, атрофия и изменение чувствительности слизистой оболочки, изменения зубов [1–3]. Учитывая растущие успехи работы онкологов по лечению злокачественных новообразований (ЗНО), ожидаемо увеличивается продолжительность жизни таких пациентов [4] и возрастает их общее количество на стоматологическом приеме.

После воздействия лучевого фактора снижается минерализация и резистентность твердых тканей зуба к кариесу за счет многих факторов. Одним из них является ухудшение качества индивидуальной гигиены полости рта. Благодаря этому на поверхности твердых тканей остается больше налета, создается благоприятная среда для развития микроорганизмов, в том числе кариесогенная, происходит увеличение кислотности (рН 4–5 под налетом), что в итоге запускает процесс деминерализации твердых тканей зуба. В первую очередь на могут появляться признаки повышенной чувствительности (реакция на температурные, тактильные, пищевые раздражители) и изменения цвета зубов (от светло-серого до темно-серого и потеря блеска). С дальнейшим ухудшением ситуации увеличивается количество плотного липкого налета. В результате зубы могут становиться хрупкими. Особенностью лучевых поражений зубов является быстрая скорость прогрессирования и расположения в нетипичных локализациях, таких как бугры жевательной группы зубов, режущий край резцов, пришеечная область [5; 6].

Как в России, так и за рубежом диагностика, лечение и профилактика изменений зубов после воздействия лучевых методов терапии онкологических заболеваний считаются очень востребованными направлениями в стоматологической практике. В то же время с проблемой возникновения лучевых поражений зубов сталкиваются около

50 % пациентов после лучевых методов лечения.

Учитывая высокие показатели, следует считать актуальной проблему изменений твердых тканей зубов, обусловленных облучением. Однако еще не предложено объективных, патогенетически ориентированных исследований и цифровых технологий, адекватно и экспрессно оценивающих основные проявления механизмов развития кариеса у пациентов с ЗНО челюстно-лицевой области (ЧЛО) на фоне лучевой терапии. В частности, таких его проявлений, как уровень гигиены и качественный состав микроорганизмов полости рта, процессы саливации, минерализации/деминерализации в комплексе и в их взаимосвязи [7]. Экспериментально и клинически не проработаны для указанных выше целей количественные экспрессные медицинские технологии «по месту», подтверждающие эффективность того или иного реминерализующего препарата *in situ* для каждого пациента при лучевой терапии ЧЛО при онкологической патологии.

Благодаря развитию квантовой электроники создаются предпосылки для внедрения в медицину для реализации практических и научных целей различных лазерных технологий. В стоматологию активно внедряются лазерные методы, имеющие диагностическую, профилактическую, терапевтическую направленность [8]. Перед стоматологами стоит проблема ранней мгновенной диагностики изменения твердых тканей зубов с высокой чувствительностью [9].

Одни из существующих методов оценки спектра, основанные на инфракрасном, флюоресцентном и Рамановском поле, являются в настоящее время основными экспресс-технологиями «по месту» в изучении особенностей структуры, клинического статуса, органно-минеральных компонентов ЧЛО, в частности костных и зубных тканей. Эти экспресс-методы рекомендованы к их

освоению и внедрению в клинику Президиумом РАМН РФ.

Таким образом, представляет научный интерес на принципиально новой технической и методической базе исследовать экспрессно, «по месту», объективно (цифровая методика), во взаимосвязи основные патогенетические факторы, влияющие на минерализацию твердых тканей зубов у пациентов с ЗНО ЧЛО на этапах лучевой терапии, и разработать на этой основе эффективный алгоритм саногенетической профилактики. При этом методологически и методически для получения объективных результатов и исключения иных их толкований необходимо проводить измерения и их регистрацию одномоментно для всех указанных компонентов взаимодействия. Для решения этой важной для стоматологии задачи использовали современные отечественные технологии – Раман-флюоресцентную диагностику. Исходя из представленной концепции, была сформулирована цель исследования. *Цель работы* – изучить воздействие физических, химических и лучевых факторов на степень минерализации поверхности твердых тканей зуба с помощью спектроскопии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с целью работы было проведено многофакторное многоэтапное исследование на базе кафедры ортопедической стоматологии и ортодонтии ГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России (ЮУГМУ).

Временной интервал исследования охватывает период с 2020 по 2024 г.

На экспериментальном этапе было произведено исследование на удаленных по клиническим показаниям зубах (*in vitro*):

– в разной степени увлажненности (сухие и влажные);

– до, после воздействия кислоты и реминерализующего препарата;

– до и после воздействия лучевого фактора в трех разных суммарных дозах (2; 70; 110 Гр).

В исследование включали зубы без дефектов твердых тканей, удаленные у пациентов среднего возраста (от 30 до 50 лет), не имеющих тяжелой соматической патологии.

На первом этапе исследования было необходимо выбрать пригодные для дальнейших исследований параметры изучаемых объектов. Для этого произвели изучение минерализации зубов методом Рамановской спектроскопии на АПК «ИнСпектр М» в разной степени увлажненности (сухие и влажные). Были изучены 10 сухих (высушенные зубы на воздухе в течение не менее 3 сут) и 10 влажных (зубы, находившиеся в физиологическом растворе, в течение не менее 600 с).

На втором этапе для понимания процесса изменения уровня минерализации твердых тканей зуба под воздействием химических факторов было принято решение использовать фактор деминерализации (лимонную кислоту) и комплекс реминерализующей терапии. Зубы (резцы, 20 шт.) были изучены в области экватора методом Рамановской спектроскопии на АПК «ИнСпектр М». Далее поочередно их подвергли воздействию лимонной кислоты (экспозиция – одни сутки) и комплексу реминерализации (пластины ЦМ-2), повторяя исследование на каждом этапе.

На третьем этапе для понимания влияния прямого воздействия лучевого фактора на поверхность твердых тканей зубов, в частности на уровень минерализации, необходимо было его проверить в отсутствии возможных влияющих вторично факторов (таких как саливация, уровень гигиены и т. д.). Для решения поставленной задачи было произведено исследование на удаленных

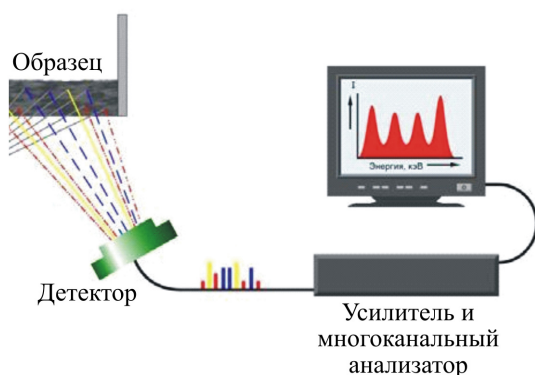


Рис. 1. Схема работы АПК «ИнСпектр М» со световодной насадкой

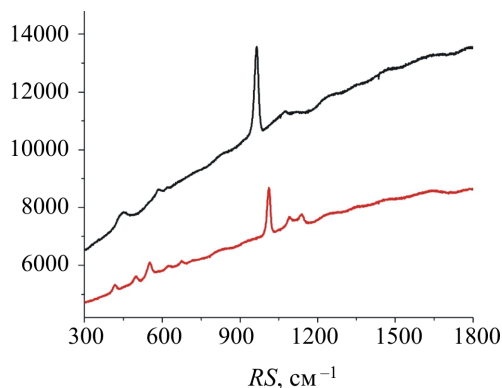


Рис. 2. Нахождение Рамановских линий

зубах (*in vitro*), подвергнутых облучению в трех разных дозах (2; 70; 110 Гр). Зубы сразу после удаления были разделены на три группы исследования: 280 зубов были подвергнуты Рамановской спектроскопии в трех участках: экватор, пришеечная область, режущий край (резцы, клыки) или окклюзионная поверхность (премоляры, моляры) на АПК «ИнСпектр М», и разделены на 3 подгруппы (по 20 шт. в зависимости от планируемой дальнейшей лучевой дозой воздействия в 2; 70; 110 Гр). В дальнейшем на базе ГАУЗ «Челябинский областной клинический центр онкологии и ядерной медицины» специалистом по лучевой терапии исследуемые зубы подверглись лучевому воздействию на рентгеновской установке ЛНК-268. После проведения облучения зубов согласно дозе в каждой группе, зубы были подвергнуты повторному исследованию Рамановской спектроскопии в тех же участках.

В ходе исследования использовали АПК «ИнСпектр М» (длина волны – 514 нм) по предложенной схеме [2] (рис. 1).

Для анализа Рамановского излучения поверхности твердых тканей была произведена фиксация данных в разной мощности (минимальной и максимальной). Интенсивность Рамана (M_{cp}) была рассчитана как разница данных с различной мощностью (рис. 2) [4].

В результате исследования были получены данные, которые отображены в виде графиков и таблиц. Расчёты произведены по правилам медицинской статистики с использованием пакета программ IBM SPSS Statistics 22 и Microsoft Excel 2020. Количественные и порядковые показатели высчитывались с использованием описательных статистических методов и отображены в виде среднего значения (M) и стандартного отклонения (m). Результаты вычисления представлены в форме $M \pm m$. В случаях, когда распределение показателей отличается от нормального (по критерию Шапиро – Уилка), представлены медианы и квартили ($Me [Q_1; Q_3]$). Для сравнения использовали критерий Манна – Уитни, так как две несвязанные группы сравнивают по количественному признаку. Весь материал, представленный в исследовании, получен и проанализирован лично авторами. Работа выполнена в соответствии с современными принципами доказательной медицины.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Информация, которую мы получили в исследовании, помогла глубже понять процесс изменения минерализации поверхности твердых тканей зубов. Полученные дан-

ные исследования зубов с различной степенью увлажненности (табл. 1) позволяют увидеть разницу показателей в сухом (1801 [1800; 1802] отн.ед.), увлажненном виде (591,5 [591; 592]). По полученным результатам выбрано в дальнейшем производить исследования в увлажненном виде, учитывая их большее соответствие клиническим измерениям минерализации.

Таким образом, на первом этапе с использованием АПК «ИнСпектр М» было проведено обоснование исследования Раман-флюоресцентного спектра в увлажненном, а не в сухом виде.

На втором этапе исследования (изучение зубов до, после воздействия кислоты и реминерализующего препарата) получены данные изменения минерализации (табл. 2).

До воздействия лимонной кислоты минерализация по интенсивности Рамана составляет 602 [601; 602] отн. ед., после воздействия лимонной кислоты – 152 [152; 153] отн. ед., после аппликация пластины ЦМ-2 – 423 [422; 423] отн. ед. Выявленные различия достоверны ($p < 0,001$). Таким образом, подтверждается, что органические кислоты (лимонная кислота) способствуют деминерализации эмали более чем в два раза, а применение кальцийсодержащих пластин способствует реминерализации практически до исходного состояния. То есть показано, что АПК «ИнСпектр М» действительно обладает высокой чувствительностью и способен регистрировать минерализацию, де- и реминерализацию твердых тканей зуба.

Таблица 1

Спектральные характеристики твердых тканей зуба в разной степени увлажненности (сухие и влажные)

Объект сравнения	Верхний уровень	Нижний уровень	Интенсивность Рамана (относительные единицы), M_{cp}
Сухой образец	$y = 4021,5$ [4020,75; 4022]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 2220$ [2220; 2221,25]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 1801$ [1800; 1802],
Влажный образец	$y = 3503$ [3501,75; 3503]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 2911,00$ [2912; 2910]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 591,5$ [591; 592],
p	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$

Таблица 2

Спектральные характеристики твердых тканей зуба: до, после воздействия кислоты и реминерализующего препарата

Объект исследования, $n = 20$	Верхний уровень	Нижний уровень	Интенсивность Рамана / абсолютные единицы
Эмаль – до воздействия	$y = 8276$ [8276; 8276]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7675$ [7674; 7675]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 602$ [601; 602]
Эмаль-экспозиция в кислоте (одни сут.)	$y = 3229,5$ [3228,25; 3230]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 3077$ [3076; 3078]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 152$ [152; 153]
Эмаль – аппликация пластины ЦМ-2	$y = 6967,5$ [6966,25; 6968]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 6545$ [6544; 6546]; $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 423$ [422; 423]
p	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$

Данные, полученные на третьем этапе, помогли глубже понять процесс изменения минерализации поверхности твердых тканей зубов под прямым воздействием лучевого воздействия в различных дозах. По результатам данного исследования не выявлено достоверных различий уровня минерализации (по методу Раман-флюоресцентной спектроскопии) у зубов до и после прямого лучевого воздействия вне зависимости от дозы (2; 70; 110 Гр) ни в одной из функциональных групп (резцы, клыки, премоляры, моляры). Все

имеющиеся отличия находятся в пределах статистической погрешности. Полученные результаты, разделённые в зависимости от дозы лучевого воздействия, представлены в таблицах (табл. 3–5). В то же время данные минерализации твердых тканей зубов в различных участках зуба во всех функциональных группах сильно отличались. Таким образом, в исследовании показано, что имеется различие минерализации поверхности твердых тканей зубов на различных участках (рис. 3).

Таблица 3

Спектральные характеристики твердых тканей зуба после лучевого воздействия (2 Гр)

Локализация измерения	Доза облучения	Верхний уровень	Нижний уровень	Интенсивность Рамана (относительные единицы (M_{cp}))	Интенсивность флюоресценции в максимуме (относительные ед.)
Окклюзионная поверхность	0 Гр	$y = 8271,6 \pm 22,9;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7898,4 \pm 29;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 373 \pm 12,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 8455 \pm 21,3$
	2 Гр	$y = 8267,85 \pm 24,6;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7892,45 \pm 23,9;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 375,4 \pm 13,4;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 8458,35 \pm 22,2$
Экватор	0 Гр	$y = 6271,2 \pm 29;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 5856,8 \pm 45,9;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 414,4 \pm 29,7;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 6780,85 \pm 65,5$
	2 Гр	$y = 6259,1 \pm 32,7;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 5852,7 \pm 45,3;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 406,4 \pm 23,6;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 6772,35 \pm 70,2$
Пришеечная область вестибулярная поверхность	0 Гр	$y = 5109,85 \pm 19,2;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 4964,75 \pm 19,3;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 145 \pm 8,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 6043 \pm 25,12$
	2 Гр	$y = 5104,25 \pm 15,4;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 4958,25 \pm 16,4;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 146 \pm 8,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 6031,4 \pm 24,2$
p		$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$

Таблица 4

Спектральные характеристики твердых тканей зуба после лучевого воздействия (70 Гр)

Локализация измерения	Доза облучения	Верхний уровень	Нижний уровень	Интенсивность Рамана (относительные единицы (M_{cp}))
Окклюзионная поверхность	0 Гр	$y = 8253,45 \pm 17,4;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7876,6 \pm 24,5;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 376,85 \pm 14,1;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$

Окончание табл. 4

Локализация измерения	Доза облучения	Верхний уровень	Нижний уровень	Интенсивность Рамана (относительные единицы (M_{cp}))
	70 Гр	$y = 8270,8 \pm 24;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7895,95 \pm 25;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 374,85 \pm 14,9;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
Экватор	0 Гр	$y = 6266,9 \pm 30,2;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 5855 \pm 44,7;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 411 \pm 25,5;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
	70 Гр	$y = 6277,1 \pm 27,2;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 5867,25 \pm 47,3;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 409,85 \pm 29,3;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
Пришеечная область вестибулярная поверхность	0 Гр	$y = 5109,4 \pm 21,12;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 4965 \pm 22,7;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 144,4 \pm 9,7;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
	70 Гр	$y = 5105,85 \pm 14,4;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 4958,8 \pm 16,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 147 \pm 8,6;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
p		$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$

Таблица 5

Спектральные характеристики твердых тканей зуба после лучевого воздействия (110 Гр)

Локализация измерения	Доза облучения	Верхний уровень	Нижний уровень	Интенсивность Рамана (относительные единицы (M_{cp}))
Окклюзионная поверхность	0 Гр	$y = 8266,95 \pm 25,4;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7894 \pm 27,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 372,95 \pm 14,1;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
	110 Гр	$y = 8264,35 \pm 16,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 7889,55 \pm 20,7;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 374,8 \pm 5,7;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
Экватор	0 Гр	$y = 6279,6 \pm 19,4;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 5865,7 \pm 34,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 413,9 \pm 27,6;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
	110 Гр	$y = 6271,75 \pm 32;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 5869,8 \pm 38,3;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 402 \pm 25,6;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
Пришеечная область вестибулярная поверхность	0 Гр	$y = 5113,8 \pm 20,5;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 4969,7 \pm 21,2;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 144,1 \pm 9,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
	110 Гр	$y = 5110,55 \pm 17,3;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 4967,8 \pm 21,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$	$y = 142,75 \pm 8,8;$ $x = 963 \text{ см}^{-1}$
p		$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$

Однако выявлено отсутствие прямого влияния облучения (вне зависимости от дозы) на минерализацию поверхности твердых тканей зубов. Эти данные позволяют предполагать, что имеет место опосредованный механизм влияния лучевой терапии на возник-

новение лучевых поражений зубов за счет снижения уровня гигиены, саливации и др.

Данное исследование показывает разный уровень минерализации в разных участках зуба как до, так и после лучевого воздействия. Как видно из результатов исследо-

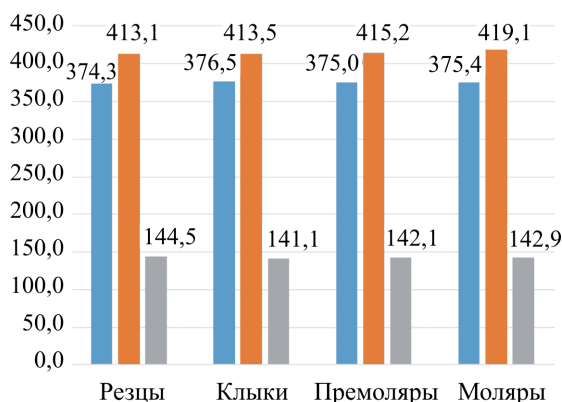


Рис. 3. Спектральные характеристики твердых тканей зуба по участкам интенсивности Рамана (M_{cp})

вания, имеются различия в разных участках поверхности твердых тканей зубов (экватор, шейка, режущий край) (см. рис. 3). Наименьшая минерализация согласно данным (интенсивность Рамана) имеется в области шейки зубов (резцы $y = 145 \pm 1,5$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; клыки $y = 141 \pm 1,1$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; премоляры $y = 142 \pm 1,8$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; моляры $y = 143 \pm 1,3$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$), средняя в области режущего края и окклюзионной поверхности (резцы $y = 374 \pm 1,7$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; клыки $y = 377 \pm 1,3$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; премоляры $y = 375 \pm 1,2$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; моляры $y = 375 \pm 1,1$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$) и максимальная в области экватора (резцы $y = 413 \pm 1,1$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; клыки $y = 414 \pm 1,9$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; премоляры $y = 415 \pm 1,7$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$; моляры $y = 419 \pm 1,6$, $x = 963 \text{ см}^{-1}$). В то же время в каждой из областей уровень минерализации не изменяется после лучевого воздействия вне зависимости от дозы.

Выводы

1. Раман-флюоресцентная спектроскопия обладает высокой чувствительностью и способна регистрировать минерализацию, де- и реминерализацию твердых тканей зуба.

2. Определение минерализации твердых тканей зуба методом Раман-флюоресцентной спектроскопии рекомендуется проводить в увлажненном, а не в сухом виде.

3. Органические кислоты способствуют деминерализации эмали, а применение кальцийсодержащих пластин способствует реминерализации.

4. Прямое лучевое воздействие не оказывает достоверного изменения уровня минерализации твердых тканей зубов вне зависимости от применяемой дозы во всех функциональных группах (резцы, клыки, премоляры, моляры), во всех участках зубов (экватор, режущий край, пришеечная область).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Александров М.Т., Кукушкин В.И., Маргарян Э.Г., Паиков Е.П., Баграмова Г.Э. Возможности и перспективы применения раман-флюоресцентной 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. *Rossiyskii stomatologicheskii zhurnal* 2018; 22 (1): 4–11. DOI: 10.18821/0206-4952-2018-39-1-4-11 (in Russian).

2. Александров М.Т., Маргарян Э.Г. Применение лазерных технологий в клинике терапевтической стоматологии (обоснование, возможности, перспективы). Российская стоматология 2017; 10 (3): 31–36. DOI: 10.17116/rosstomat201710331-36 / *Alexandrov M.T., Margaryan E.G.* Laser technique application in therapeutic dentistry in clinic (rationale, possibilities, perspectives). *Russian Stomatology* 2017; 10 (3): 31–36. DOI: 10.17116/rosstomat201710331-36 (in Russian).

3. Александров М.Т., Кукушкин В.И., Полякова М.А., Новожилова Н.Е., Бабина К.С.,

Аракелян М.Г., Баграмова Г.Э., Пашиков Е.П., Дмитриева Е.Ф. Раман-флюоресцентные характеристики твердых тканей зубов и их клиническое значение. Российский стоматологический журнал 2018; 22 (6): 276–280. DOI: 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., Bagratova 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. DOI: 10.18821/1728-2802-2018-22-6-276-280 (in Russian).

4. Нуриева Н.С., Беляков Г.И. Исследование минерализации твердых тканей зубов, пораженных лучевым кариесом, с помощью метода раман-флюоресцентной диагностики. Проблемы стоматологии 2022; 18 (4): 36–40. DOI: 10.18481/2077-7566-2022-18-4-30-34 / Nurieva N.S., Belyakov G.I. Study of the mineralization of hard tissues of the teeth affected by radiation caries using the method of raman fluorescent diagnosis. Actual problems in dentistry 2022; 18 (4): 36–40. DOI: 10.18481/2077-7566-2022-18-4-30-34 (in Russian).

5. Нуриева Н.С., Беляков Г.И. Исследование минерализации твердых тканей зубов, пораженных лучевым кариесом, с помощью метода раман-флюоресцентной диагностики. Проблемы стоматологии 2023; 4: 30–34. DOI: 10.18481/2077-7566-2022-18-4-30-34 / Nurieva N.S., Belaykov G.I. Study of the mineralization of hard tissues of the teeth affected by radiation caries using the method of raman fluorescent diagnosis. Actual problems in dentistry 2023; 4: 30–34. DOI: 10.18481/2077-7566-2022-18-4-30-34 (in Russian).

6. Нуриева Н.С., Беляков Г.И., Тезиков Д.А. Изучение влияния различных доз лучевого воздействия на уровень минерализации в разных участках твердых тканей зубов методом раман-флюоресценции. Проблемы

стоматологии 2024; 20 (1): 74–79. DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-1-74-79 / Nurieva N.S., Belaykov G.I., Tezikov D.A. To study the effect of different doses of radiation exposure on the level of mineralization in different areas of hard dental tissues by raman fluorescence. Actual problems in dentistry 2024; 20 (1): 74–79. DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-1-74-79 (in Russian).

7. 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. DOI: 10.17116/stomat2021100041137 / Magsumova O.A., Polkanova V.A., Timchenko E.V., Volova L.T. Raman spectroscopy and its application in different areas of medicine. Stomatologiya 2021; 100 (4): 137–142. DOI: 10.17116/stomat2021100041137 (in Russian).

8. Бажутова И.В., Магсумова О.А., Фролов О.О., Тимченко Е.В., Тимченко П.Е., Трунин Д.А., Комлев С.С., Полканова В.А. Оценка органического и минерального состава эмали зубов методом рамановской спектроскопии: экспериментальное нерандомизированное исследование. Кубанский научный медицинский вестник 2021; 28 (4): 118–132. DOI: 10.25207/1608-6228-2021-28-4-118-132 / Bazhutova I.V., Magsumova O.A., Frolov O.O., Timchenko E.V., Timchenko P.E., Trunin D.A., Komlev S.S., Polkanova V.A. Raman spectroscopy analysis of dental enamel organic and mineral composition: an experimental non-randomised study. Kubanskii Nauchnyi Meditsinskii Vestnik 2021; 28 (4): 118–132. DOI: 10.25207/1608-6228-2021-28-4-118-132 (in Russian).

9. Нуриева Н.С., Беляков Г.И. Применение раман-флюоресцентной технологии для оценки минерализации твердых тканей зуба при изменениях эмали зуба, обусловленных лучевой терапией. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия:

Естественные и технические науки 2023; 02: 240–243 / Nurieva N.S., Beljakov G.I. Prime-nenie raman-fljuorescentnoj tehnologii dlja ocenki mineralizacii tverdyh tkanej zuba pri izmenenijah jemali zuba, obuslovlennyh luchevoj terapij. *Sovremennaja nauka: aktual'nye prob-lemy teorii i praktiki. Serija: Estesvennye i tehnicheckie nauki* 2023; 02: 240–243. DOI: 10.37882/2223–2966.2023.02.33 (in Russian).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заяв-ляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Поступила: 14.07.2024

Одобрена: 05.08.2024

Принята к публикации: 06.08.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Беляков, Г.И. Применение метода Раман-флюоресценции для изучения воздействия химических, физических и лу-чевых факторов на минерализацию твердых тканей зубов / Г.И. Беляков, Н.С. Нуриева, Д.А. Тезиков // Пермский медицинский журнал. – 2024. – Т. 41, № 4. – С. 111–121. DOI: 10.17816/pmj414111-121

Please cite this article in English as: Belyakov G.I., Nurieva N.S., Tezikov D.A. Application of the Raman fluorescence method to study the effects of chemical, physical and radiation factors on the mineralization of hard dental tissues. *Perm Medical Journal*, 2024, vol. 41, no. 4, pp. 111-121. DOI: 10.17816/pmj414111-121