

<https://doi.org/10.25207/1608-6228-2025-32-5-64-73>

УДК: 616.314.17-002.4:543.4



Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки состояния костной ткани при пародонтите: нерандомизированное клинико-лабораторное исследование

И.В. Бажутова¹✉, П.Е. Тимченко², Е.В. Тимченко², Д.А. Трунин¹, Д.Г. Глубоков³, А.М. Хамадеева¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара, 443099, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», ш. Московское, д. 34, г. Самара, 443086, Россия

³ Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Самарской области «Самарская городская клиническая больница № 8», ул. Мирная, д. 169, г. Самара, 443035, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Оценка состояния костной ткани челюстей при определении стоматологического статуса пациента, определение объема костных структур является, несомненно, актуальным направлением и связана с необходимостью принятия решения о возможности дентальной имплантации, проведении зубосохраняющих регенеративных вмешательств, при пародонтитах, периодонтитах, выборе послеоперационной тактики и определении прогнозов. Статья посвящена изучению спектральных изменений костной ткани при пародонтите, выявленных с помощью метода Рамановской спектроскопии как метода диагностики, успешно применяемого в последние годы для решения различных биомедицинских задач. **Цель исследования:** оценка спектральных изменений костной ткани альвеолярной части нижней челюсти при пародонтите. **Методы.** Проведено нерандомизированное клинико-лабораторное исследование у 45 пациентов в возрасте от 45 до 60 лет на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации и стоматологической клиники «Центр восстановительной стоматологии» общества с ограниченной ответственностью «Академия стоматологии». В группу сравнения (1-ю группу) включали 17 образцов костной ткани, полученных у пациентов во время хирургических вмешательств по поводу патологии периапикальных тканей с диагнозом по МКБ-10 — K04.5, K04.8 в области зубов с нормальным пародонтом. Для исследуемой основной группы 28 образцов костной ткани альвеолярной части нижней челюсти были получены у пациентов во время манипуляций по поводу хронического локализованного пародонтита с диагнозом по МКБ-10 — K05.30 в области зубов с патологией пародонта (2-я группа). Для оценки костных биоптатов использовали метод рамановской спектроскопии. Для статистического анализа использовались спектры после разделения (деконволюции) линии, проводимой в программной среде MagicPlotPro (Magicplot Systems, LLC, Россия). Анализ полученных данных произведен в программной среде IBMSPSS Statistics (IBM, США) методом линейного дискриминантного анализа (LDA) и в сравнительном LDA-анализе групп. **Результаты.** При пародонтите наблюдаются спектральные изменения костной ткани, связанные с изменением относительной интенсивности линий комбинационного рассеяния. При линейном дискриминантном анализе (LDA) основные спектральные изменения наблюдаются как и для спектров комбинационного рассеяния костной ткани на линиях 850 см⁻¹ (бензольное кольцо пролина), 956 см⁻¹ (ν₁ P–O симметричное валентное (PO₄³⁻), 1069 см⁻¹ (C–O плоскостное валентное (CO₃²⁻ν₁)), 1172 см⁻¹ (тирозин, фенилаланин, C–H связь (белок)), 1315 см⁻¹ (амид III (α спираль)), 1385–1441 см⁻¹ (ножничные колебания CH₂ и изгибные колебания CH₃ в липидах и белках), 1555 см⁻¹ (амид II N–H), 1665 см⁻¹ (амид I), 1745 см⁻¹ (фосфолипиды), которые соответствуют минеральной и органической составляющей. **Заключение.** Проведенные клинико-лабораторные исследования по оценке костной ткани при пародонтите показали спектральные различия со здоровой костной тканью, которые проявляются на линиях комбинационного рассеяния, соответствующих минерало-органической структуре костной ткани. Следовательно, рамановская спектроскопия представляется перспективным методом для анализа состояния костной ткани при пародонтите. В дальнейшем полученные данные могут послужить основой для оптимизации подходов к лечению пародонтита.

Ключевые слова: костная ткань, пародонтит, ткани зубов, спектроскопия комбинационного рассеяния, хемометрический анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бажутова И.В., Тимченко П.Е., Тимченко Е.В., Трунин Д.А., Глубоков Д.Г., Хамадеева А.М. Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки состояния костной ткани при пародонтите: нерандомизированное клинико-лабораторное исследование. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2025;32(5):64–73. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2025-32-5-64-73>

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ: авторы заявляют об отсутствии спонсорской поддержки при проведении исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

ДЕКЛАРАЦИЯ О НАЛИЧИИ ДАННЫХ: данные, подтверждающие выводы этого исследования, можно получить у контактного автора по обоснованному запросу. Данные и статистические методы, представленные в статье, прошли статистическое рецензирование редактором журнала — сертифицированным специалистом по биостатистике.

СООТВЕТСТВИЕ ПРИНЦИПАМ ЭТИКИ: проведенное исследование соответствует стандартам Хельсинкской декларации, одобрено Независимым этическим комитетом по биоэтике при федеральном государственном бюджетном образовательном учре-

ждении высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара, 443099, Россия) протокол № 281 от 25.03.2024.

ВКЛАД АВТОРОВ: И.В. Бажутова, П.Е. Тимченко, Е.В. Тимченко, Д.А. Трунин, Д.Г. Глубоков, А.М. Хамадеева — разработка концепции и дизайна исследования; И.В. Бажутова, Е.В. Тимченко, Д.Г. Глубоков, А.М. Хамадеева — сбор данных; И.В. Бажутова, П.Е. Тимченко — анализ и интерпретация результатов; И.В. Бажутова, Е.В. Тимченко, А.М. Хамадеева — обзор литературы, проведение статистического анализа; И.В. Бажутова, П.Е. Тимченко, Е.В. Тимченко — составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта; Д.А. Трунин, Д.Г. Глубоков, А.М. Хамадеева — критический пересмотр черновика рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией), выразили согласие нести ответственность за все аспекты работы, подразумевающую надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой части работы.

✉ **КОРРЕСПОНДИРУЮЩИЙ АВТОР:** Бажутова Ирина Владимировна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры стоматологии института последипломного образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации. Адрес: ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара, 443099, Россия. E-mail: docba@mail.ru

Получена: 18.01.2025 / Получена после доработки: 06.08.2025 / Принята к публикации: 11.09.2025

Raman spectroscopy for assessing bone tissue in periodontitis: A nonrandomized clinical and laboratory study

Irina V. Bazhutova¹✉, Pavel E. Timchenko², Elena V. Timchenko², Dmitry A. Trunin¹,
Dmitrii G. Glubokov³, Alfiya M. Khamadeeva¹

¹ Samara State Medical University, Chapaevskaya str., 89, Samara, 443099, Russia

² Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University), Moskovskoye shosse, 34, Samara, 443086, Russia

³ Samara Municipal Clinical Hospital No. 8, Mirnaya str., 169, Samara, 443035, Russia

ABSTRACT

Background. In determining the dental status of a patient, the assessment of the jawbone tissue and the volume of bone structures are undoubtedly relevant focus areas. This process is instrumental in deciding on dental implantation, performing tooth-preserving regenerative procedures, treating periodontitis, selecting postoperative tactics, and making prognoses. In this article, spectral changes in bone tissue in periodontitis are studied using Raman spectroscopy as a diagnostic method that has been successfully applied in recent years to solve various biomedical problems. **Objectives.** To evaluate spectral changes in bone tissue of the mandible alveolar region in patients with periodontitis. **Methods.** A nonrandomized clinical and laboratory study was conducted in 45 patients aged 45 to 60 years at Samara State Medical University and the Center for Restorative Dentistry dental clinic of the Academy of Dentistry LLC. The control group (Group 1) included 17 bone tissue samples obtained from patients during surgical procedures on periapical tissues with an ICD-10 diagnosis of K04.5 and K04.8, in teeth with normal periodontium. The study group consisted of 28 samples of alveolar bone tissue from the lower jaw obtained from patients during procedures for chronic localized periodontitis diagnosed according to ICD-10 as K05.30, in teeth with periodontal pathology (Group 2). Raman spectroscopy was used to evaluate bone biopsies. Spectra were separated (deconvoluted) using the MagicPlotPro software (Magicplot Systems, LLC, Russia) for statistical analysis. The data obtained were analyzed using the IBMSPSS Statistics software environment (IBM, USA) by linear discriminant analysis (LDA) and comparative LDA analysis of groups. **Results.** In patients with periodontitis, spectral changes in bone tissue are observed, which are related to changes in the relative intensity of Raman scattering lines. In linear discriminant analysis (LDA), the main spectral changes are also observed for the combination scattering spectra of bone tissue at 850 cm⁻¹ (proline benzene ring), 956 cm⁻¹ (ν₁ P–O symmetric valence (PO₄³⁻)), 1069 cm⁻¹ (C–O planar valence (CO₃²⁻ ν₁)), 1172 cm⁻¹ (tyrosine, phenylalanine, C–H bond (protein)), 1315 cm⁻¹ (amide III (α helix)), 1385–1441 cm⁻¹ (scissor vibrations of CH₂ and bending vibrations of CH₃ in lipids and proteins), 1555 cm⁻¹ (amide II N–H), 1665 cm⁻¹ (amide I), 1745 cm⁻¹ (phospholipids), which correspond to the mineral and organic components. **Conclusion.** Clinical and laboratory studies conducted to evaluate bone tissue in patients with periodontitis have revealed spectral differences from healthy bone tissue, which are manifested in the Raman scattering lines corresponding to the mineral-organic structure of bone tissue. Therefore, Raman spectroscopy appears to be a promising method for analyzing bone tissue condition in periodontitis. In the future, the data obtained may serve as a basis for optimizing approaches to periodontitis treatment.

Keywords: bone tissue, periodontitis, dental tissue, Raman spectroscopy, chemometric analysis

FOR CITATION: Bazhutova I.V., Timchenko P.E., Timchenko E.V., Trunin D.A., Glubokov D.G., Khamadeeva A.M. Raman spectroscopy for assessing bone tissue in periodontitis: A nonrandomized clinical and laboratory study. *Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2025;32(5):64–73. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2025-32-5-64-73>

FUNDING: The authors declare that no funding was received for this study.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

DATA AVAILABILITY STATEMENT: Data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request. The data and statistical methods presented in the paper have been statistically reviewed by the journal editor, a certified biostatistician.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS: The study complies with the standards of the Helsinki Declaration, approved by the Committee on Bioethics at the Samara State Medical University (Chapaevskaya str., 89, Samara, 443099, Russia), Minutes No. 281 of March 25, 2024.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: I.V. Bazhutova, P.E. Timchenko, E.V. Timchenko, D.A. Trunin, D.G. Glubokov, A.M. Khamadeeva — concept statement and study design; I.V. Bazhutova, E.V. Timchenko, D.G. Glubokov, A.M. Khamadeeva — data collection; I.V. Bazhutova, P.E. Timchenko — analysis and interpretation of the results; I.V. Bazhutova, E.V. Timchenko, A.M. Khamadeeva — literature review and statistical analysis; I.V. Bazhutova, P.E. Timchenko, E.V. Timchenko — drafting of the manuscript and preparation of its final version; D.A. Trunin, D.G. Glubokov, A.M. Khamadeeva — critical review of the manuscript with introduction of valuable intellectual content. All authors confirm that their authorship meets the ICMJE international criteria (all authors have made substantial contributions to the conception, research and preparation of the paper, and have read and approved the final version before publication), have agreed to be responsible for all aspects of the work, which implies proper study and resolution of issues related to the accuracy and integrity of any part of the work.

✉ **CORRESPONDING AUTHOR:** Irina V. Bazhutova, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Dentistry, Institute of Postgraduate Education, Samara State Medical University. Address: Chapaevskaya str., 89, Samara, 443099, Russia. E-mail: docba@mail.ru

Received: 18.01.2025/ **Revised:** 06.08.2025 / **Accepted:** 11.09.2025

ВВЕДЕНИЕ

Состояние костной ткани челюстей является ключевым моментом при определении стоматологического статуса пациента, принятии решения о возможности дентальной имплантации, проведении зубосохраняющих регенеративных вмешательств при пародонтитах [1, 2] и периодонтитах, выборе послеоперационной тактики и определении прогнозов. Кроме как из-за локализованных проблем челюстно-лицевой области цитоархитектоника и характер ремоделирования костной ткани меняются при постменопаузальном остеопорозе, болезни Педжета, опухолевых метастазах, ревматоидном артрите [3–8] и пародонтите (распространенность которого составляет более 90% взрослого населения Российской Федерации) [9, 10]. Системные нарушения перестройки костной ткани являются противопоказанием для восстановления жевательной функции с использованием дентальных имплантатов [11, 12]. Стоит отметить, что восстановление и ремоделирование костей челюстей могут протекать более активно, чем в осевых костях скелета [13].

Диагностика состояния костной ткани челюстей является важнейшей проблемой современной стоматологии, причем широко распространенные существующие рентгенологические методы [14, 15] не всегда позволяют оценить состояние и относительный состав костной ткани челюстей [16, 17]. При хроническом генерализованном пародонтите одной из основных проблем является поздняя обращаемость пациентов за специализированной помощью, так как ранние стадии часто протекают бессимптомно, хотя при своевременном выявлении сохраняется возможность перевести заболевание в состояние стойкой ремиссии и практически остановить развитие патологического процесса на той стадии, на которой было начато лечение [18].

Наряду с общепринятыми методами диагностики (рентгеновская, компьютерная томография и прочие) в последние годы все активнее применяются в области изучения тканей челюстно-лицевой области и оптические методы исследования [10, 19–22].

В настоящей работе проведено изучение спектральных изменений костной ткани при пародонтите, проведенное с помощью Рамановской спектроскопии, успешно применяемой в последние годы для решения различных биомедицинских задач [20, 21]. Все более широкое применение

в стоматологии метод получает в том числе из-за возможности его использования и при неинвазивных подходах, для исследования одного и того же участка тканей многократно, в динамике для объективной оценки влияния различных терапевтических методик [22–25].

Цель исследования — оценка спектральных изменений костной ткани альвеолярной части нижней челюсти при пародонтите.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Дизайн работы построен в виде нерандомизированного клинико-лабораторного исследования, проведенного на 45 образцах костной ткани альвеолярной части нижней челюсти пациентов, обратившихся в стоматологическую клинику для удаления зуба по ортодонтическим показаниям.

Критерии соответствия

В исследование включались образцы костной ткани, полученные у пациентов перед основным хирургическим вмешательством.

Критерии включения для пациентов

Возраст от 45 до 60 лет с признаками состояния, удовлетворяющего критериям диагноза «хронический локализованный пародонтит» (код по МКБ-10 — K05.30), и патологией периапикальных тканей (коды по МКБ-10 — K04.5, K04.8), при наличии добровольного информированного согласия на участие в исследовании. Обязательным условием являлось наличие соседних зубов в зоне получения образцов, участки адентии не использовали.

Критерии исключения для пациентов

Критериями исключения являлись генерализованный пародонтит, наличие соматических заболеваний в стадии декомпенсации, онкологические заболевания, отягощенный аллергологический анамнез, аутоиммунные заболевания, остеопороз, беременность, лактация.

Критерии исключения для пациентов

Отказ от дальнейшего участия в исследовании, отказ от выполнения врачебных рекомендаций.

Условия проведения

Клиническая часть исследования проводилась на базе кафедры стоматологии института последипломного образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Са-

марский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России) и стоматологической клиники «Центр восстановительной стоматологии» общества с ограниченной ответственностью «Академия стоматологии» (г. Самара).

Экспериментальные исследования с использованием Рамановской спектроскопии были проведены на базе межвузовской научно-исследовательской лаборатории «Тканевая инженерия» и на кафедре лазерных и биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева».

Продолжительность исследования

Период проведения исследования: с ноября 2021 по сентябрь 2022 года.

Описание медицинского вмешательства

Образцы костной ткани получали с помощью физиодиспенсера Traus (TRAUS, Южная Корея) при скорости 200 об/мин трепаном с внутренним диаметром 3 мм под охлаждением 0,9% раствором NaCl до основного хирургического вмешательства. Затем образцы тщательно промывали в физиологическом растворе, присваивали номер, упаковывали в индивидуальные пакеты и передавали в лабораторию на спектральный анализ. У каждого пациента забор материала осуществлялся однократно.

Исходы исследования

Основной исход исследования

Конечной точкой исследования считали получение и исследование спектров комбинационного рассеяния (КР), а также LD-анализ итоговых данных для оценки состояния костной ткани при пародонтите для диагностики при решении различных биомедицинских задач.

Дополнительные исходы исследования

Дополнительные исходы не предусмотрены.

Анализ в подгруппах

В группу сравнения (1-ю группу) включили 17 образцов костной ткани, полученных у пациентов во время хирургических вмешательств по поводу патологии периапикальных тканей (коды по МКБ-10 — K04.5, K04.8) в области зубов с нормальным пародонтом. Для исследуемой группы 28 образцов костной ткани альвеолярной части нижней челюсти было получено у пациентов во время манипуляций по поводу хронического локализованного пародонтита (код по МКБ-10 — K05.30) в области зубов с патологией пародонта (2-я группа).

Методы регистрации исходов

В качестве основного метода оценки костной ткани в норме и при пародонтите был использован метод рамановской спектроскопии. Для реализации метода применялся стенд (рис. 1), состоящий из пробника RPB-785 ($f = 7,5$ мм), лазера LuxxMaster LML-785.0RB-04 (LuxxMaster, Великобритания), мощность до 500 мВт, длина волны $784,7 \pm 0,05$ нм, и высокоразрешающего цифрового спектрометра ANDOR Shamrock sr-303i (Andor

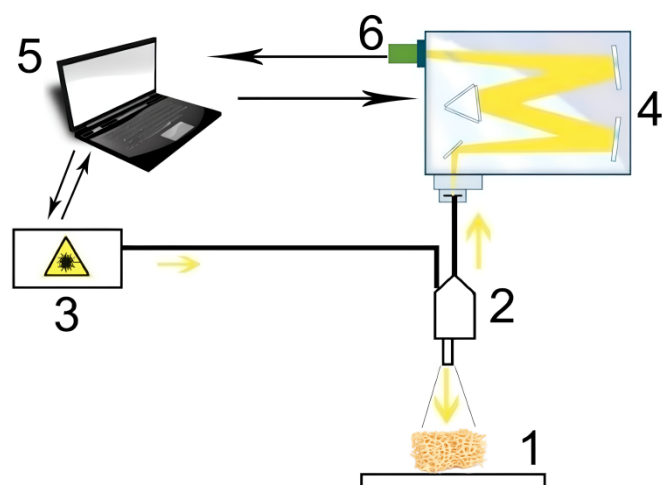


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 — исследуемый объект; 2 — рамановский пробник RPB 785; 3 — лазерный модуль LuxxMaster LML-785.0RB-04; 4 — спектрометр Shamrock sr-303i; 5 — компьютер; 6 — охлаждаемая камера DV420A-OE

Примечание: рисунок выполнен авторами.

Fig. 1. Experimental setup: 1 — test object; 2 — RPB 785 Raman probe; 3 — LuxxMaster LML-785.0RB-04 laser module; 4 — Shamrock sr-303i spectrometer; 5 — computer; 6 — DV420A-OE cooled chamber

Note: The figure was created by the authors.

Technology, Великобритания), спектральное разрешение 0,15 нм, с охлаждаемой камерой «DV420A-OE» (диапазон 200–1200 нм) [19]. Были сняты 3 спектра в различных точках костной ткани для каждого образца, всего 135 спектров. Спектры сохранялись в виде таблицы (в нм длина волны излучения и его интенсивность в относительных цифровых единицах).

Обработка полученных спектров КР была выполнена в программе Wolfram Mathematica 12.2 (Wolfram Research, США). При обработке результатов, у исследуемых спектров осуществлялся перевод единиц измерения из нм в рамановский сдвиг в см^{-1} (по отношению к длине волны лазера), далее очищали от шумов фильтром Maximum Likelihood Estimation Savitzky-Golay filter (MLE-SG), определяли на выбранном интервале $380\text{--}1780 \text{ см}^{-1}$ при помощи итерационного алгоритма аппроксимирующую линию (полином пятой степени) автофлуоресцентной составляющей, а затем вычитали эту составляющую, в результате получали выделенный рамановский спектр [19]. Интерпретация полос в рамановском спектре на i -м диапазоне для костной ткани осуществлялась по данным Tarnowski et al. (2002); Ager et al. (2006) [26, 27].

Статистический анализ

Принципы расчета размера выборки

Размер выборки предварительно не рассчитывался.

Методы статистического анализа данных

Для статистического анализа использовались спектры после разделения (деконволюции) линии, проводимой в программной среде MagicPlotPro (Magicplot Systems, LLC, Россия). Анализ полученных данных произведен

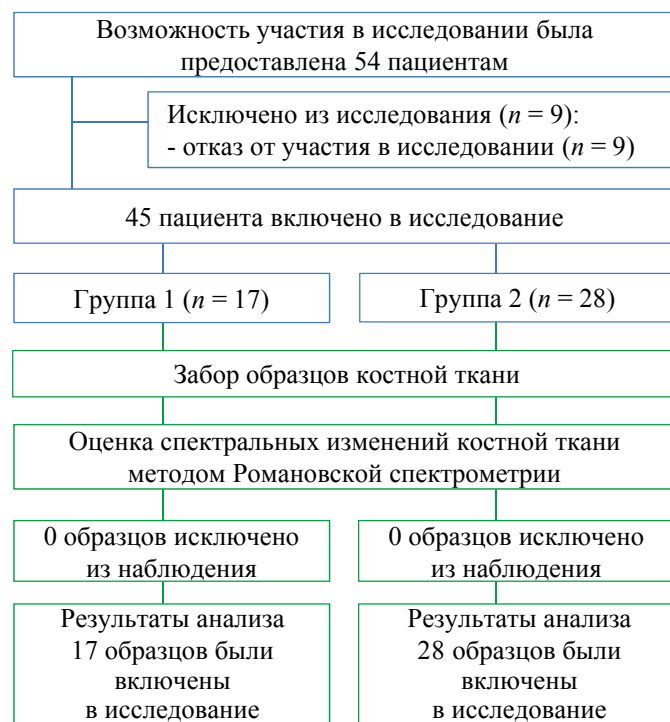


Рис. 2. Блок-схема дизайна исследования

Примечание: блок-схема выполнена авторами (согласно рекомендациям CONSORT).

Fig. 2. The block diagram of the study design

Note: Performed by the authors (according to CONSORT recommendations).

в программной среде IBMSPSS Statistics (IBM, США) методом линейного дискриминантного анализа (LDA). Анализ взаимосвязи групп исследуемых объектов проводился в сравнительном LDA-анализе групп материалов здорового участка костной ткани и с пародонтитом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

Формирование выборки проведено в соответствии с критериями включения и невключения. Для проведения исследования были сформированы 2 группы. В группу сравнения (1-ю группу) включили 17 пациентов, у которых были отобраны образцы костной ткани во время хирургических вмешательств по поводу патологии периапикальных тканей (код по МКБ-10 — K04.5, K04.8) в области зубов с нормальным пародонтом. Для исследуемой группы у 28 пациентов отобраны образцы костной ткани альвеолярной части нижней челюсти во время манипуляций по поводу хронического локализованного пародонтита

(код по МКБ-10 — K05.30) в области зубов с патологией пародонта (2-я группа).

Группы формировались из пациентов обоего пола в возрасте до 45 и старше 60 лет. Средние значения половозрастного состава групп различаются несущественно (52,4 и 52,9 года для групп 1 и 2) (табл. 1). Выборки с учетом количества образцов являются репрезентативными.

Основные результаты исследования

Усредненные спектры комбинационного рассеяния костной ткани челюсти человека в норме и при пародонтите представлены на рисунке 3 (с каждого исследуемого образца костной ткани было снято по 3 спектра в различных его зонах, после чего строился усредненный спектр по каждому исследуемому образцу, а затем общий усредненный спектр комбинационного рассеяния строился по всем усредненным образцам в пределах каждой исследуемой группы, всего было изучено 135 спектров). Первичные спектры проходили фильтрацию шумов и вычитание автофлуоресцентной составляющей (итерационным алгоритмом подбирались линия в виде полинома 5–10-й степени, аппроксимирующая автофлуоресцентную составляющую), а также преобразование в систему координат рамановского сдвига (по отношению к исходной длине волны лазера 785 нм).

Из рисунка хорошо видно, что при пародонтите наблюдаются спектральные изменения костной ткани, связанные с изменением относительной интенсивности линий комбинационного рассеяния, соответствующих минеральной составляющей, 956 см^{-1} (ν_1 Р–О симметричное валентное (PO_4^{3-}), 1069 см^{-1} (С–О плоскостное валентное ($\text{CO}_3^{2-}\nu_1$)), а также органической составляющей костной ткани 850 см^{-1} (бензольное кольцо пролина), 1172 см^{-1} (тирозин, фенилаланин, С–Н связь (белок)), 1242–1270 см^{-1} (амид III), 1315 см^{-1} (амид III (α спираль)), 1385–1441 см^{-1} (ножничные колебания CH_2 и изгибные колебания CH_3 в липидах и белках), 1555 см^{-1} (амид II N–H), 1665 см^{-1} (амид I), 1745 см^{-1} (фосфолипиды).

Данные спектральные изменения связаны с резорбцией костной ткани при пародонтите (линии гидроксиапатита 956 см^{-1} (ν_1 Р–О симметричное валентное (PO_4^{3-}) и его замещение 1069 см^{-1} (С–О плоскостное валентное ($\text{CO}_3^{2-}\nu_1$)), что свидетельствует о замещении водно-минерального обмена в костной ткани (интенсивное замещение гидроксид-иона OH^- в структуре апатита ионами CO_3^{2-}), а также разрушении органической матрицы (амидные линии 1242–1270 см^{-1} (Amide III), 1315 см^{-1} (амид III (α -спираль)), 1555 см^{-1} (амид II N–H), 1665 см^{-1} (амид I), линии пролина 850 см^{-1} (бензольное кольцо пролина)).

Таблица 1. Половая и возрастная характеристика пациентов в сравниваемых группах

Table 1. Sex and age characteristics of patients in the compared groups

Показатель	Группа 1 (n = 17)	Группа 2 (n = 28)	Уровень значимости, p
Пол (женский/мужской), %	52,9/47,1	50/50	0,85
Возраст ($M \pm SD$), лет	52,4 $\pm$ 4,5	52,9 $\pm$ 5,1	0,56

Примечание: таблица составлена авторами.

Note: The table was compiled by the authors.

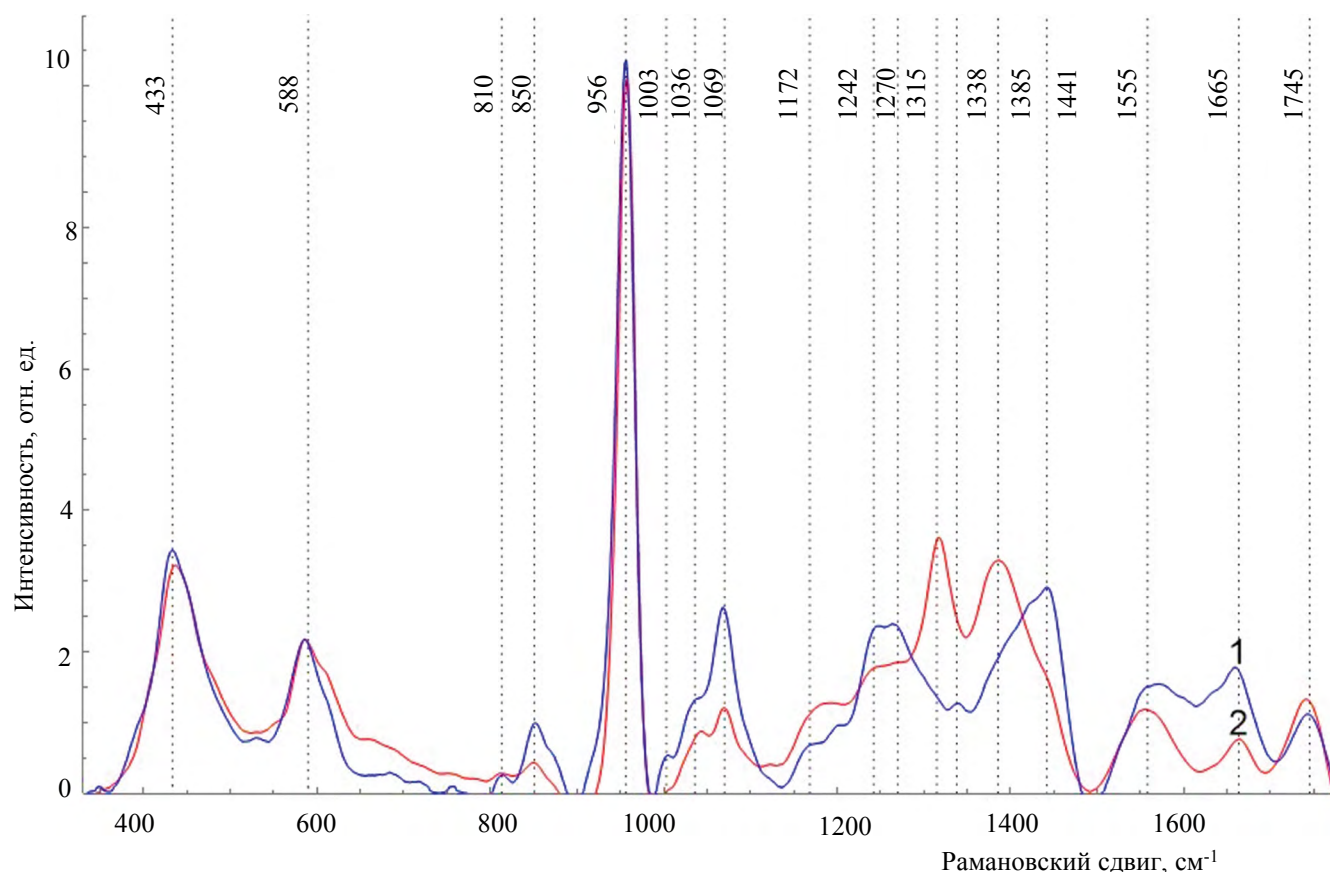


Рис. 3. Усредненные спектры комбинационного рассеяния костной ткани в норме (1) и при пародонтите (2)

Примечание: рисунок выполнен авторами.

Fig. 3. Average Raman scattering spectra of bone tissue in normal conditions (1) and in periodontitis (2)

Note: The figure was created by the authors.

Заметный сдвиг комбинационного рассеяния органической составляющей при пародонтите на линиях 1315 и 1385 cm^{-1} обусловлен разрушением органической матрицы при пародонтите [28–30]. Разрушение органической матрицы (каркаса) ведет к невозможности удержания и утрате минеральной составляющей.

Спектральный контур на рисунке 3 имеет ряд линий комбинационного рассеяния с высоким коэффициентом взаимного перекрытия, так что определить количество, положения и ширину этих линий в перекрытом состоянии затруднительно.

Поэтому для повышения информативности и точности полученных спектров КР был произведен нелинейный регрессионный анализ спектров, состоящий в их разложении на отдельные спектральные линии. Данное разложение проводилось с ограничением ряда параметров (амплитуда линии не отрицательная, ширина ограничена минимальной шириной, обусловленной шириной линии лазера, и максимальной, дабы не получать физически невозможные линии при математическом подборе) и использования шаблона с положением заранее известных сильных линий. При моделировании спектрального контура у линий, используемых как шаблон, фиксировались положение x_0 и полуширина линии (HWHM) dx . При моделировании подбиралась лишь интенсивность ли-

нии в диапазоне от 0 до значения локального максимума спектра в области x_0 . HWHM ограничивалось в диапазоне от 1 до 16 cm^{-1} . Это позволяло добиться высокой стабильности результатов при моделировании контура и учитывать все сдвиги линий КР. Критерияльной переменной являлась амплитуда линий a , которая зависит от значений независимых регрессоров dx и x_0 , определяющих начальные условия анализа.

Среднее значение скорректированного коэффициента детерминации спектра от исходного в области 380–1780 cm^{-1} для всех 135 спектров составило $\text{adj}R^2 = 0,9989$. Подобранная линия комбинационного рассеяния не выходит за границы спектрального контура.

На рисунке 4 представлен результат разложения спектрального контура в диапазоне 380–1780 cm^{-1} на сумму распределений линий Гаусса (для используемого спектрометра с разрешением $\sim 1,2 \text{ cm}^{-1}$ и биообъектов является оптимальной формой линии).

В программной среде Wolfram Mathematica 12.2 с применением методов машинного обучения на основе автоматического многоитерационного моделирования установлен окончательный состав спектральных линий КР, использовались данные первичных неусредненных спектров (135 спектров). Апробация метода проведена с учетом анализа литературных данных [28, 31–33].

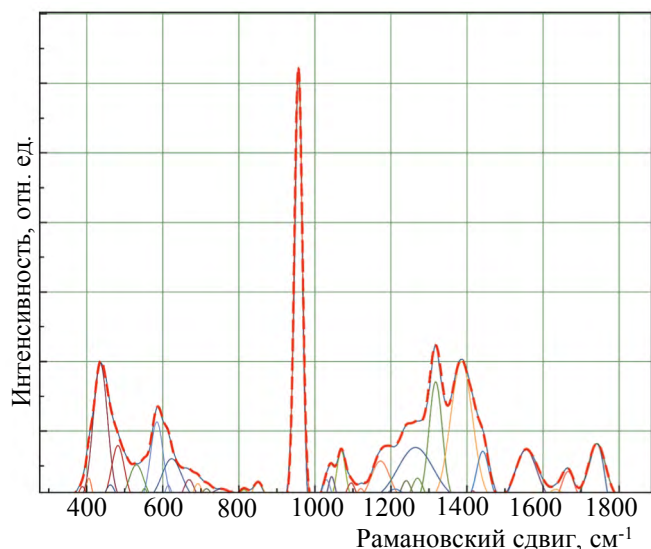


Рис. 4. Разложение спектрального контура образцов костной ткани челюсти человека

Примечание: рисунок выполнен авторами. Сокращение: КР — комбинационное рассеяние.

Fig. 4. Decomposition of the spectral contour of jawbone samples

Note: The figure was created by the authors. Abbreviation: КР — Raman scattering.

Относительная количественная оценка компонентного состава образцов костной ткани из обеих исследуемых групп проведена с использованием нормированных амплитуд разделенных линий комбинационного рассеяния.

Для дальнейшего анализа полученных после разделения спектральных линий исследуемых образцов был применен метод линейного дискриминантного анализа (ЛДА — linear discriminant analysis, LDA) в программной среде IBM SPSS Statistics. Сопоставлялись группы образцов костной ткани челюсти человека в норме и ткани челюсти человека при пародонтите. В качестве основной переменной задействована дискриминантная функция LD-1 (описывает 100% дисперсию), другие LD переменные оказались не задействованы.

На рисунке 5 показаны результаты сравнения LDA двух групп образцов. Группа 1 принадлежит образцам костной ткани челюсти человека в норме, группа 2 — костной ткани челюсти человека при пародонтите.

В основном положительные значения LD-1 характеризуют спектры комбинационного рассеяния костной ткани челюсти человека в норме, отрицательные значения характеризуют спектры комбинационного рассеяния костной ткани челюсти человека при пародонтите. Области групп имеют значительное пересечение в диапазоне LD-1 = {-1,75; 0,75}. Площади групп имеют также пересечения.

Чем выше по модулю значение LD-1 переменной, тем в большей степени она определяет разницу в дискриминационной модели между костной тканью челюсти человека в норме и при пародонтите.

Для относительной количественной оценки компонентного состава костной ткани челюсти человека в норме

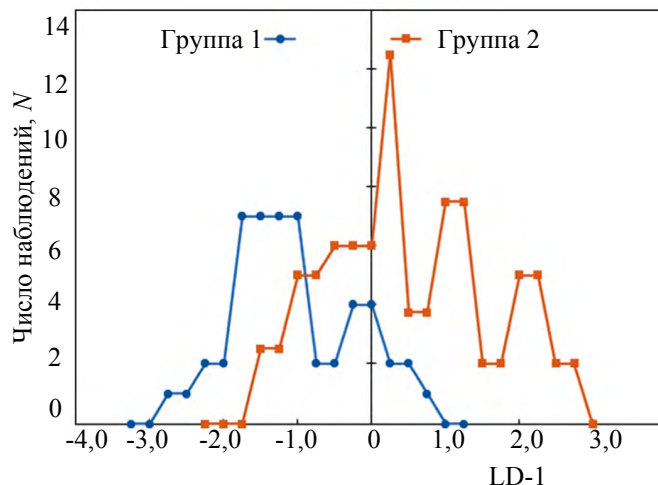


Рис. 5. График значений линейной дискриминантной функции исследуемых групп

Примечание: рисунок выполнен авторами. Сокращение: LD — линейная дискриминантная функция.

Fig. 5. Value graph of the linear discriminant function for the groups under study

Note: The figure was created by the authors. Abbreviation: LD — linear discriminant function.

и при пародонтите использовались отношения интенсивности линий комбинационного рассеяния к интенсивности линии фосфолипидов.

Из рисунка 5 видно, что наибольшие значения LD-1 наблюдаются на линиях комбинационного рассеяния, соответствующих органической составляющей костной ткани. Данные спектральные изменения также свидетельствуют об изменении синтеза коллагена в структуре костной ткани при пародонтите.

Далее были проанализированы различные комбинации параметров и выделено 10 линий комбинационного рассеяния.

На рисунке 6 показаны значения релевантных коэффициентов матрицы факторной структуры, имеющие физический смысл корреляции между переменными в модели и дискриминирующей функцией.

По данному графику видно, что основные спектральные изменения наблюдаются как и для спектров комбинационного рассеяния костной ткани на линиях 850 см⁻¹ (бензольное кольцо пролина), 956 см⁻¹ (ν₁ P-O симметричное валентное (PO₄³⁻)), 1069 см⁻¹ (C-O плоскостное валентное (CO₃²⁻ν₁)), 1172 см⁻¹ (тирозин, фенилаланин, C-H-связь (белок)), 1315 см⁻¹ (амид III (α-спираль)), 1385–1441 см⁻¹ (ножничные колебания CH₂ и изгибные колебания CH₃ в липидах и белках), 1555 см⁻¹ (амид II N-H), 1665 см⁻¹ (амид I), 1745 см⁻¹ (фосфолипиды), которые соответствуют минеральной и органической составляющей. Чем выше по модулю значение LD-1 для переменной, тем в большей степени она определяет разницу в дискриминационной модели между группами образцов.

Дополнительные результаты исследования

В процессе планирования исследования получение дополнительных результатов не ожидалось, и они не были достигнуты в ходе его реализации.

Нежелательные явления

Не зарегистрированы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Спектральный анализ костной ткани зубов при пародонтите позволил установить характерные критерии. Обнаружено, что заболевание пародонтитом вызывает отличительные спектральные отклонения в структуре органического матрикса, а также перемены в спектрах комбинационного рассеяния (КР) минеральной фазы. Эти изменения прямо связаны с резорбцией костной ткани при пародонтите.

Выявленные спектральные сдвиги обусловлены процессом резорбции костной ткани и разрушением органического матрикса. Заметное смещение линий КР органической составляющей на линиях 1315 и 1385 см^{-1} у пациентов с пародонтитом указывает на разрушение органической матрицы. Спектральные аномалии, возникающие из-за повреждения поперечных связей в органическом матриксе, приводят к изменениям в минеральном составе.

Применение дискриминантного анализа позволило определить критерии для выявления изменений в костной ткани при пародонтите. Это особенно ценно при сложной дифференциальной диагностике очагов деструкции альвеолярных отростков челюстей, позволяя дифференцировать от других патологических состояний.

Обсуждение основного результата исследования

Установлены изменения спектров комбинационного рассеяния костной ткани при пародонтите. Данные спектральные изменения обусловлены резорбцией костной ткани и разрушением органической матрицы. Разрушение органической матрицы (каркаса) при пародонтите ведет к невозможности удержания и утрате минеральной составляющей [34, 35].

При этом выявленные в настоящей работе спектральные изменения не проявляются при других распространенных стоматологических заболеваниях, например при кариесе зубов. Так, в работе О. А. Магсумовой и соавт. [36] показано, что при кариесе снижается только концентрация ионов $(\text{PO}_4)^{3-}$.

В работах других авторов диагностика пародонтита осуществляется по изменению цемента зубов. Показано [37–39], что основным структурным изменением при пародонтите является цемент зубов. Неправильное формирование цемента приводит к развитию пародонтальных карманов. Это связано с тем, что структура цемента является основным элементом восприимчивости к микробной инвазии и образованию пародонтальных карманов [37].

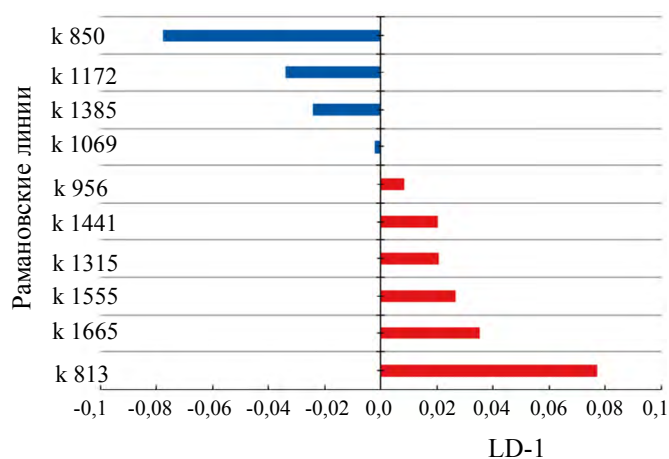


Рис. 6. Значения коэффициентов факторной структуры
Примечание: рисунок выполнен авторами. Сокращение: LD — линейная дискриминантная функция.

Fig. 6. Values of factor structure coefficients

Note: The figure was created by the authors. Abbreviation: LD — linear discriminant function.

Ранее авторами установлено, что спектральные изменения зубов при пародонтите имеют схожий характер со спектральными изменениями, возникающими при остеопорозе [19]. При пародонтите нарушается водно-минеральный обмен в тканях зубов (интенсивное замещение гидроксид-иона OH^- в структуре апатита ионами CO_3^{2-}) и синтез коллагена. Подобные спектральные изменения наблюдаются и при пародонтите в костной ткани.

Таким образом, при пародонтите происходят спектральные сдвиги комбинационного рассеяния, схожие с изменениями в органическом матриксе, возникающие при механической нагрузке, а также при остеопорозе, которые обусловлены разрывом поперечных связей в органическом матриксе.

Ограничения исследования

Не выявлены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные клинико-лабораторные исследования по оценке костной ткани при пародонтите показали спектральные различия со здоровой костной тканью, которые проявляются на линиях комбинационного рассеяния, соответствующих минерало-органической структуре костной ткани. Установлено, что данные спектральные изменения в костной ткани при пародонтите связаны с резорбцией костной ткани и вызваны замещением гидроксид-иона OH^- в структуре апатита ионами CO_3^{2-} , а также нарушением структуры органического матрикса кости, о чем свидетельствует изменение линий КР амидных структур, а также пролина. Таким образом, метод спектроскопии КР может быть использован для оценки костной ткани при пародонтите. Полученные результаты можно будет использовать для коррекции лечения данного заболевания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шукпаров А.Б., Шомуродов К.Э., Мирхусанова Р.С. Принципы направленной костной регенерации: критические предоперационные факторы и критерии успеха. *Интегративная стоматология и челюстно-лицевая хирургия*. 2022;1(1):10–13. Shukparov AB, Shomurodov KE, Mirkhusanova RS. Principles of directed bone regeneration: critical preoperative factors and success criteria. *Integrative dentistry and maxillofacial surgery*. 2022;1(1):10–13 (In Russ.).
- Putra RH, Yoda N, Iikubo M, Kataoka Y, Yamauchi K, Koyama S, Cooray U, Astuti ER, Takahashi T, Sasaki K. Influence of bone condition on implant placement accuracy with computer-guided surgery. *Int J Implant Dent*. 2020;6(1):62. <https://doi.org/10.1186/s40729-020-00249-z>
- Rak D, Kulloli AM, Shetty SK, Tripathy S, Mathur A, Mehta V, Cicciù M, Minervini G. Correlation between rheumatoid arthritis and chronic periodontitis: a systematic review and meta-analysis. *Minerva Dent Oral Sci*. 2024;73(5):294–302. <https://doi.org/10.23736/S2724-6329.23.04891-X>
- Yu B, Wang CY. Osteoporosis and periodontal diseases — An update on their association and mechanistic links. *Periodontol 2000*. 2022;89(1):99–113. <https://doi.org/10.1111/prd.12422>
- Lu EM. The role of vitamin D in periodontal health and disease. *J Periodontol Res*. 2023;58(2):213–224. <https://doi.org/10.1111/jre.13083>
- Herrera D, Sanz M, Shapira L, Brotons C, Chapple I, Frese T, Graziani F, Hobbs FDR, Huck O, Hummers E, Jepsen S, Kravtchenko O, Madianos P, Molina A, Ungan M, Vilaseca J, Windak A, Vinker S. Periodontal diseases and cardiovascular diseases, diabetes, and respiratory diseases: Summary of the consensus report by the European Federation of Periodontology and WONCA Europe. *Eur J Gen Pract*. 2024;30(1):2320120. <https://doi.org/10.1080/13814788.2024.2320120>
- Jawed STM, Tul Kubra Jawed K. Understanding the Link Between Hormonal Changes and Gingival Health in Women: A Review. *Cureus*. 2025;17(6):e85270. <https://doi.org/10.7759/cureus.85270>
- Villoria GEM, Fischer RG, Tinoco EMB, Meyle J, Loos BG. Periodontal disease: A systemic condition. *Periodontol 2000*. 2024;96(1):7–19. <https://doi.org/10.1111/prd.12616>
- Слазнев Е.С., Атрushkevich В.Г., Орехова Л.Ю., Лобода Е.С. Распространенность заболеваний пародонта у пациентов с различным индексом массы тела. *Пародонтология*. 2022;27(3):202–208. <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2022-27-3-202-208>
- Slazhneva ES, Atrushkevitch VG., Orekhova LYu, Loboda ES. Prevalence of periodontal diseases in patients with various body mass index. *Parodontologiya*. 2022;27(3):202–208 (In Russ.). <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2022-27-3-202-208>
- Гимранова И.А., Хакимова Л.Р., Акмалова Г.М., Газизуллина Г.Р. Современные методы диагностики заболеваний пародонта: возможности и перспективы (обзор литературы). *Клиническая лабораторная диагностика*. 2023;68(9):570–577. <https://doi.org/10.51620/0869-2084-2023-68-9-570-577>
- Gimranova IA, Khakimova LR, Akmalova GM, Gazizullina GR. Modern methods of diagnosis of periodontal diseases: opportunities and prospects (review of literature). *Russian Clinical Laboratory Diagnostics*. 2023;68(9):570–577 (In Russ.). <https://doi.org/10.51620/0869-2084-2023-68-9-570-577>
- Тунева Н.А., Богачева Н.В., Тунева Ю.О. Проблемы дентальной имплантации. Вятский медицинский вестник. 2019;2(62):86–93. Tunesva NA, Bogacheva NV, Tunesva IO. Problems of dental implantation. Medical newsletter of Vyatka. 2019;2(62):86–93 (In Russ.).
- Lemos CAA, de Oliveira AS, Faé DS, Oliveira HFFE, Del Rei Dal-tro Rosa CD, Bento VAA, Verri FR, Pellizzer EP. Do dental implants placed in patients with osteoporosis have higher risks of failure and marginal bone loss compared to those in healthy patients? A systematic review with meta-analysis. *Clin Oral Invest*. 2023;27(6):2483–2493. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05005-2>
- Музыкин М.И., Иорданишвили А.К., Лосев Ф.Ф., Григорьев С.Г. Репаративный потенциал костной ткани и влияющие на него факторы. *Стоматология*. 2024;103(2):41–49. <https://doi.org/10.17116/stomat202410302141>
- Muzikin MI, Iordanishvili AK, Losev FF, Grigoriev SG. Reparative potential of bone tissue and associated influencing factors. *Stomatology*. 2024;103(2):41–49 (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/stomat202410302141>
- Oliveira MR, Gonçalves A, Gabrielli MAC, de Andrade CR, Scardueli CR, Pereira Filho VA. The correlation of different methods for the assessment of bone quality in vivo: an observational study. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2022;51(3):388–397. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2021.05.019>
- Hasiuk P, Korobeinikova Y, Vorobets A, Korobeinikov L, Dzetsiukh T, Rosolovska S, Gurando V. Comparative assessment of the state of bone resorption in patients with chronic generalized periodontitis according to orthopantomogram and cone-beam computed tomography. *Pol Merkuri Lekarski*. 2021;49(292):286–289
- Baimuratova M, Shertayeva A, Madraimov N, Erkebay R, Diusebayev E. Diseases of periodontal tissues: modern challenges of the time. *Georgian Med News*. 2023;(336):126–131.
- Янушевич О.О., Гасанова З.Т., Вавилова Т.П., Рунова Г.С. Состояние альвеолярной костной ткани в зависимости от витальности пульпы зуба по показателям слюны пациентов с пародонтитом средней степени. *Эндодонтия Today*. 2021;19(4):278–284. <https://doi.org/10.36377/1683-2981-2021-19-4-278-284>
- Yanushevich OO, Gasanova ZT, Vavilova TP, Runova GS. The state of the alveolar bone tissue depending on the vitality of the tooth pulp according to the saliva indicators of patients with moderate periodontitis. *Endodontics Today*. 2021;19(4):278–284 (In Russ.). <https://doi.org/10.36377/1683-2981-2021-19-4-278-284>
- Сабирова А.И. Модифицируемые факторы риска развития и прогрессирования заболеваний тканей пародонта. *Acta Biomedica Scientifica*. 2022;7(5-2):182–192. <https://doi.org/10.29413/ABS.2022-7-5-2.19>
- Sabirova A.I. Modifiable risk factors for the development and progression of periodontal tissue diseases. *Acta Biomedica Scientifica*. 2022;7(5-2):182–192 (In Russ.). <https://doi.org/10.29413/ABS.2022-7-5-2.19>
- Timchenko EV, Timchenko PE, Pisareva EV, Vlasov MY, Volova LT, Frolov OO, Fedorova YV, Tikhomirova GP, Romanova DA, Daniel MA. Spectral analysis of rat bone tissue during long antithrostostatic hanging and at introduction of allogeneic hydroxyapatite. *Optics and Spectroscopy*. 2020;128(7):989–997. <https://doi.org/10.1134/S0030400X20070243>
- Тихонова В.В., Саушкина А.С. Обзор возможностей применения рамановской спектроскопии в процессно-аналитической технологии (РАТ). *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2020;23(10):35–39. <https://doi.org/10.29296/25877313-2020-10-05>
- Tihonova VV, Saushkina AS. Application of raman spectroscopy to process analytical technology (PAT). *Voprosy Biologicheskoi, Meditsinskoi i Farmatsevticheskoi Khimii*. 2020;23(10):35–39 (In Russ.). <https://doi.org/10.29296/25877313-2020-10-05>
- Chauhan S, Sharma S. Applications of Raman spectroscopy in the analysis of biological evidence. *Forensic Sci Med Pathol*. 2024;20(3):1066–1090. <https://doi.org/10.1007/s12024-023-00660-z>
- Легких А.В., Мандра Ю.В., Киселева Д.В. Метод рамановской спектроскопии как средство оценки морфологии микрорельефа поверхности зуба, а также степени минерализации твердых тканей зубов. *Вестник уральского государственного медицинского университета*. 2015;2-3(29-30):214–215.
- Legkih AV, Mandra YV, Kiseleva DV. Comparative assessment of hard dental tissues mineralization degree by raman spectroscopy technique. *Vestnik Ural'skogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta*. 2015;2-3(29-30):214–215 (In Russ.).
- Otel I. Overall Review on Recent Applications of Raman Spectroscopy Technique in Dentistry. *Quantum Beam Science*. 2023;7(1):5. <http://dx.doi.org/10.3390/qbs7010005>
- Prikule DV, Kukushkin VI, Mitronin AV, Priksul VF. Studying the Degree of Tooth Enamel Mineralization through Raman Spectroscopy in Various Spectral Ranges. *Biophysica*. 2021;1(3):269–278. <http://dx.doi.org/10.3390/biophysica1030020>
- Shrivastava PK, Kumar A, Aggarwal Y, Kumar A, Agrawal A, Rai A. Diagnostic accuracy of Vibrational spectroscopy in the diagnosis of oral potentially malignant and malignant disorders: A systematic review and meta-analysis. *J Cancer Res Ther*. 2023;19(2):151–158. http://dx.doi.org/10.4103/jcrt.jcrt_2275_21
- Tarnowski CP, Ignelzi MA Jr, Morris MD. Mineralization of developing mouse calvaria as revealed by Raman microspectroscopy. *J Bone Miner Res*. 2002;17(6):1118–1126. <http://dx.doi.org/10.1359/jbmr.2002.17.6.1118>
- Ager JW 3rd, Nalla RK, Balooch G, Kim G, Pugach M, Habelitz S, Marshall GW, Kinney JH, Ritchie RO. On the increasing fragility of human teeth with age: a deep-UV resonance Raman study. *J Bone Miner Res*. 2006;21(12):1879–1887. <http://dx.doi.org/10.1359/jbmr.060816>

28. Carden A, Rajachar RM, Morris MD, Kohn DH. Ultrastructural changes accompanying the mechanical deformation of bone tissue: a Raman imaging study. *Calcif Tissue Int.* 2003;72(2):166–175. <http://dx.doi.org/10.1007/s00223-002-1039-0>
29. Голощапов Д.Л., Кашкаров В.М., Ипполитов Ю.А., Ипполитов И.Ю., Vongsvivut J., Середин П.В. Визуализация молекулярно-химического взаимодействия материала, биокompозита и ткани зуба на основе синхротронной ИК-микроспектроскопии. *Вестник Российского государственного медицинского университета.* 2019;(4):75–82. <http://dx.doi.org/10.24075/vrgmu.2019.047>
30. Timchenko EV, Timchenko PE, Volova LT, Ponomareva YV, Taskina LA. Raman spectroscopy of the organic and mineral structure of bone grafts. *Quantum Electronics.* 2014;44(7):696–699. <http://dx.doi.org/10.1070/qe2014v044n07abeh015546>
31. Movasaghi Z, Rehman S, Rehman IU. Raman Spectroscopy of Biological Tissues. *Applied Spectroscopy Reviews.* 2007;42(5):493–541. <http://dx.doi.org/10.1080/05704920701551530>
32. Bi X, Lin L, Chen Z, Ye J. Artificial Intelligence for Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Small Methods.* 2024;8(1):e2301243. <http://dx.doi.org/10.1002/smt.202301243>
33. Li L, Yu M, Li X, Ma X, Zhu L, Zhang T. A deep learning method for multi-task intelligent detection of oral cancer based on optical fiber Raman spectroscopy. *Anal Methods.* 2024;16(11):1659–1673. <http://dx.doi.org/10.1039/d3ay02250a>
34. Huang X, Xie M, Xie Y, Mei F, Lu X, Li X, Chen L. The roles of osteocytes in alveolar bone destruction in periodontitis. *J Transl Med.* 2020;18(1):479. <http://dx.doi.org/10.1186/s12967-020-02664-7>
35. Ушаков Р.В., Герасимова Т.П. Механизмы тканевой деструкции при пародонтите. *Стоматология.* 2017;96(4):63–66. <https://doi.org/10.17116/stomat201796463-66>
36. 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. <https://doi.org/10.17116/stomat202110004>
37. Paknejad M, Khorsand A, Yaghobee S, Motahhari P, Etebarian A, Bayani M, Mehrfard A. Cementogenesis in Patients with Localized Aggressive Periodontitis. *J Dent (Tehran).* 2015;12(5):347–351.
38. Armitage GC, Cullinan MP. Comparison of the clinical features of chronic and aggressive periodontitis. *Periodontol 2000.* 2010;53:12–27. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0757.2010.00353.x>
39. Mahajan AC, Kolte AP, Kolte RA, Agrawal AA. Dimensional Evaluation of Root Resorption Areas in Differing Severity of Chronic Periodontitis: A Scanning Electron Microscopic Study. *Contemp Clin Dent.* 2017;8(3):433–438. https://doi.org/10.4103/ccd.ccd_512_17

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажутова Ирина Владимировна — кандидат медицинских наук, доцент кафедры стоматологии института последипломного образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

<https://orcid.org/0000-0003-3200-5538>

Тимченко Павел Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерных и биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

<https://orcid.org/0000-0003-3089-7966>

Тимченко Елена Владимировна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры лазерных и биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

<https://orcid.org/0000-0002-0539-7989>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina V. Bazhutova — Cand. Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Dentistry, Institute of Postgraduate Education, Samara State Medical University.

<https://orcid.org/0000-0003-3200-5538>

Pavel E. Timchenko — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Laser and Biotechnical Systems, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University).

<https://orcid.org/0000-0003-3089-7966>

Elena V. Timchenko — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Associate Professor of the Department of Laser and Biotechnical Systems, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University).

Трунин Дмитрий Александрович — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой стоматологии института последипломного образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

<https://orcid.org/0000-0002-7221-7976>

Глубоков Дмитрий Геннадьевич — заведующий отделением патологической анатомии государственного бюджетного учреждения здравоохранения Самарской области «Самарская городская клиническая больница № 8».

<https://orcid.org/0009-0000-7232-554X>

Хамадеева Альфия Минвалиевна — доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры стоматологии института последипломного образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

<https://orcid.org/0000-0002-8160-6965>

<https://orcid.org/0000-0002-0539-7989>

Dmitry A. Trunin — Dr. Sci. (Med.), Prof., Head of the Department of Dentistry, Institute of Postgraduate Education, Samara State Medical University.

<https://orcid.org/0000-0002-7221-7976>

Dmitrii G. Glubokov — Head of the Department of Pathological Anatomy at Samara Municipal Clinical Hospital No. 8.

<https://orcid.org/0009-0000-7232-554X>

Alfiya M. Khamadeeva — Dr. Sci. (Med.), Prof., Professor of the Department of Dentistry, Institute of Postgraduate Education, Samara State Medical University.

<https://orcid.org/0000-0002-8160-6965>

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author