

Изучение эффективности применения ультразвукового и механического способов для определения степени деминерализации дентина постоянных зубов у детей *in vitro*

А.Г. Седойкин, С.Н. Ермольев, Л.П. Кисельникова, А.А. Фокина, А.А. Гонибова

Российский университет медицины, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Актуальность. С появлением усовершенствованных способов функциональной диагностики у стоматолога возникают новые возможности выявления очагов кариозного поражения, однако диагностическая чувствительность данных способов требует изучения.

Цель исследования: изучить состояние интактного и деминерализованного дентина постоянных зубов у детей ультразвуковым и механическим способами.

Материалы и методы. Модели «разделенный шлиф» изготавливались из зубов группы премоляров, удаленных у детей по ортодонтическим показаниям. После 20-дневной экспозиции в деминерализующем буферном растворе с pH = 4,5, интактная и деминерализованная часть дентина модели подвергались испытаниям ультразвуковым и механическим способами.

Результаты. Выявлены статистически значимые различия средних значений скорости ультразвукового сигнала – «С» в двух независимых группах образцов с интактным (гр. 1) и деминерализованным дентином (гр. 2) согласно расчетам U-критерия Манна – Уитни (при $p = 0,01$). В образцах (гр. 2) выявлено снижение показателя среднего значения скорости ультразвукового сигнала «С» на 27%, чем в образцах (гр. 1). Получены статистически значимые различия средних значений предельного разрушающего напряжения – « σ » в двух независимых группах образцов с интактным (гр. 3) и деминерализованным дентином (гр. 4) согласно расчетам U-критерия Манна – Уитни (при $p = 0,01$). В образцах (гр. 4) показатель среднего значения предельного разрушающего напряжения « σ » был на 29,5% меньше, чем в образцах (гр. 3).

Заключение. В процессе деминерализации происходит изменение ультразвуковых и механических свойств дентина. Статистический анализ результатов лабораторных испытаний модели «разделенный шлиф» подтверждает эффективность и диагностическую чувствительность способов, использованных для оценки степени деминерализации дентина.

Ключевые слова: искусственная деминерализация дентина, механические свойства дентина, ультразвуковые свойства дентина.

Для цитирования: Седойкин АГ, Ермольев СН, Кисельникова ЛП, Фокина АА, Гонибова АА. Изучение эффективности применения ультразвукового и механического способов для определения степени деминерализации дентина постоянных зубов у детей *in vitro*. *Стоматология детского возраста и профилактика*. 2024;24(3):307-312. DOI: 10.33925/1683-3031-2024-815.

Evaluation of ultrasonic and mechanical methods for assessing dentin demineralization in children's permanent teeth *in vitro*

A.G. Sedoykin, S.N. Ermoljev, L.P. Kiselnikova, A.A. Fokina, A.A. Gonibova

Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. With the advent of advanced methods for functional diagnostics, dentists have gained new opportunities for detecting carious lesions. However, the diagnostic sensitivity of these methods requires further investigation Purpose. To evaluate the condition of intact and demineralized dentin in children's permanent teeth using both ultrasonic and mechanical methods.

Materials and methods. Divided cross-section" models were created from premolars extracted from children for orthodontic purposes. After a 20-day exposure to a demineralizing buffer solution with a pH of 4.5, both the intact and demineralized dentin cross-sections were tested using ultrasonic and mechanical methods.

Results. Statistically significant differences were observed in the mean ultrasonic signal speed C between two independent sample groups: intact dentin (Group 1) and demineralized dentin (Group 2), based on Mann-Whitney U-test calculations ($p = 0.01$). In Group 2, the mean value of C was 27% lower compared to Group 1. Additionally, significant differences were found in the mean ultimate strength σ between two independent groups: intact dentin (Group 3) and demineralized dentin (Group 4), with Group 4 showing a 29.5% reduction in the mean σ value, according to Mann-Whitney U-test calculations ($p = 0.01$).

Conclusion. Demineralization leads to significant changes in both the ultrasonic and mechanical properties of dentin. Statistical analysis of the laboratory test results using the "divided cross-section" model supports the effectiveness and diagnostic sensitivity of the methods applied for evaluating the extent of dentin demineralization.

Keywords: artificial dentin demineralization, mechanical properties of dentin, ultrasonic properties of dentin

For citation: Sedoykin AG, Ermoljev SN, Kiselnikova LP, Fokina AA, Gonibova AA. Evaluation of ultrasonic and mechanical methods for assessing dentin demineralization in children's permanent teeth in vitro. *Pediatric dentistry and dental prophylaxis*. 2024;24(3):307-312 (In Russ.). DOI: 10.33925/1683-3031-2024-815.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Известно, что бактериальная инвазия из очага кариозного поражения в зоне эмали приводит к обширной деминерализации в зоне дентина зуба. Морфологически деминерализованный и поврежденный бактериями дентин, представляет собой некротизированную ткань. Клинически некротизированный дентин, в отличие от интактного, при экскавации определяется мягким субстратом. Очевидно, что происходит изменение механических свойств его структуры, которые со временем прогрессируют, эти факты подтверждаются современными лабораторными исследованиями [1-4].

Однако визуальная идентификация дефекта деминерализованного дентина может быть затруднена. Основным методом стоматологического обследования при диагностике кариеса – зондирование твердых тканей, не всегда выявляет наличие кариозного дефекта, особенно в случае его «скрытой локализации» по 2, 3 классу Блэка, или в случае развития вторичного кариеса, что определяет необходимость в проведении лучевых методов диагностики.

С появлением новых способов функциональной диагностики у стоматолога появляется возможность выявлять очаги кариозного поражения без использования лучевых методов диагностики. Одним из таких перспективных направлений в функциональной диагностике может быть способ ультразвуковой теневой велосимметрии, проводимый с помощью аппаратно-программного комплекса ОНИКС 4414, LG №2020050237, разработанного группой сотрудников МГМСУ им. А. И. Евдокимова в рамках гранта КНП-02/21 от 21.05.2021 г. (Седойкин АГ, Фокина АА, Ермольев СН, Кисельникова ЛП, Янушевич ОО, Текучева СВ, авторы, ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А. И. Евдокимова», патентообладатель. Способ ультразвуковой велосимметрии для оценки состояния твердых тканей зубов. Пат. RU2790947C1. Рос. Федерация. Опубл. 28.02.2023). Физическая основа способа заключается в изменении скорости распространения ультразву-

кового широкополосного сложномодулированного «сплит» сигнала в структуре исследуемого объекта.

Изменение прочностных характеристик твердых тканей зуба проводят с использованием различных лабораторных методов разрушающего и неразрушающего контроля. В настоящем исследовании для определения механической прочности использовали показатель предельного разрушающего напряжения на сжатие, выявляемый с помощью метода статического вдавливания конуса. Метод основан на связи прочности бетона с величиной погружения в бетон конического индентора под действием статической нагрузки.

Цель исследования заключалась в изучении состояния интактного и деминерализованного дентина постоянных зубов у детей ультразвуковым и механическими способами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на интактных зубах – премолярах, удаленных у детей 12-14 лет по ортодонтическим показаниям (выписка из протокола №02 заседания Межвузовского Комитета по этике от 17.02.2022). Образцы зубов для исследования собирались в нужном количестве и замораживались. Перед исследованием зубы размораживались, очищались от мягких тканей, далее с целью дезинфекции помещались в 0,05% водном растворе хлоргексидина биглюконата. Из этих зубов для исследования готовились сагиттальные шлифы толщиной ~ 2,0 мм в количестве 14 штук.

Для воспроизведения деминерализации твердых тканей зуба в эксперименте использовалась модель «разделенный шлиф» (рис. 1). Модель «разделенный шлиф» представляет собой сагиттальный шлиф премоляра, половина которого покрывалась изолирующим кислотоустойчивым лаком. После полимеризации лака образцы помещались в пробирку с 50 мл раствора лактатного буфера, приготовленного

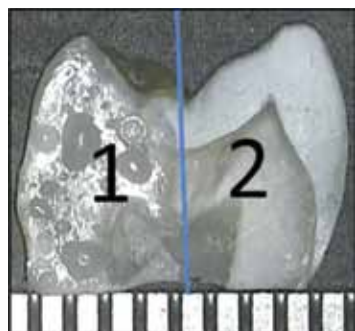


Рис. 1. Образец шлифа премоляра после 20-дневной экспозиции в деминерализующем растворе до снятия кислотоустойчивого лака.
«1» – зона интактного дентина,
«2» – зона деминерализованного дентина
Fig. 1. Premolar cross-section sample after 20-day exposure to a demineralizing solution, prior to the removal of acid-resistant varnish.
Designations: "1" – area of intact dentin, "2" – area of demineralized dentin

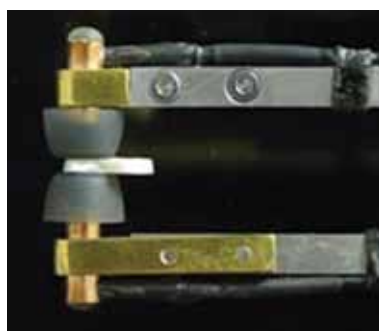


Рис. 2. Измерение акустических свойств образца в зонах интактного и деминерализованного дентина пьезоэлектрическими преобразователями стоматологического ультразвукового денситометра
Fig. 2. Measurement of the acoustic properties of intact and demineralized dentin areas using piezoelectric transducers from a dental ultrasonic densitometer



Рис. 3. Образец шлифа премоляра, сепарация алмазным диском на 2 части.
«1» – интактный дентин,
«2» – с деминерализованный дентин
Fig. 3. Premolar cross-section sample, divided into two parts by a diamond disc.
Designations: "1" – intact dentin, "2" – demineralized dentin

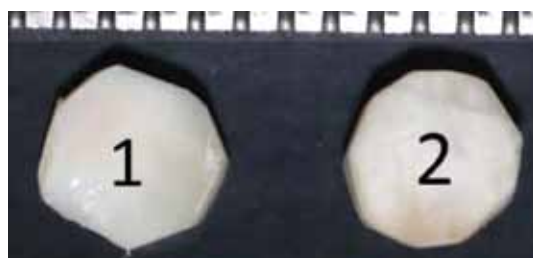


Рис. 4. Образцы дентина из шлифа премоляра.
«1» – интактный дентин (группа 3),
«2» – деминерализованный дентин (группа 4)
Fig. 4. Dentin samples from premolar cross-section.
Designations: "1" – intact dentin (Group 3), "2" – demineralized dentin (Group 4)



Рис. 5. Момент максимальной деформации образца перед разрушением – критическая сжимающая нагрузка – «Рк» фиксировался оператором по показанию динамометра (кгс)
Fig. 5. The moment of maximum deformation of the sample before failure – critical compressive load Pk was recorded by the operator using a dynamometer (in kgf)

в соответствии с рекомендациями Y-C Chien [6]. Буферный раствор доводился до pH = 4,5. Раствор для деминерализации менялся еженедельно в течение всего срока экспозиции образцов в течение 20 дней.

После завершения экспозиции образцы промывались в проточной воде, далее с их поверхности удалялся изолирующий кислотоустойчивый лак при помощи ацетонсодержащего растворителя.

Оценка ультразвуковых свойств – скорости ультразвукового сигнала – проводилась с использованием пьезоэлектрических преобразователей стоматологического ультразвукового денситометра (ВУД 01.00.22) и программы Pro-VUD (свидетельство регистрации программы для ЭВМ №2023667552) (рис. 2). Измерение скорости ультразвукового сигнала «С» проводилось на каждом образце в зоне интактного дентина (группа 1) и в зоне деминерализованного дентина (группа 2). Способ ультразвуковой теневой велосимметрии использовался согласно рекомендациям [1].

Для исследования прочностных характеристик интактного и деминерализованного дентина образцы, прошедшие исследование ультразвуковых свойств, с помощью алмазного диска разделялись на две части (рис. 3).

Из частей с интактным (группа 3) и деминерализованным дентином (группа 4) готовились образцы диаметром d = 2-3 мм и толщиной h = 2 мм (рис. 4).

Таблица 1. Основные характеристики образцов в группах
Table 1. Key characteristics of samples in groups

Группа	N образцов	Деминерализация	Единицы измерения
1	14	–	С (м/с)*
2	14	+	С (м/с)*
3	14	–	δ (кгс/см²)**
4	14	+	δ (кгс/см²)**

*Способ ультразвуковой теневой велосимметрии

**Способ статического вдавливания конуса

Образцы в группах 3 и 4 подвергались механическим испытаниям на сжатие способом статического вдавливания конуса, с использованием универсальной испытательной машины Mecmesin MultiTest 2.5-I, оснащенной коническим твердосплавным индентором (рис. 5), и электронным динамометром. Скорость вертикальной нагрузки была равной 2,0 мм/мин. Момент максимальной деформации образца перед разрушением – критическая сжимающая нагрузка – «Рк», фиксировался оператором по показанию динамометра (кгс).

Таким образом в настоящем исследовании было подготовлено четыре группы образцов для испытания (табл. 1).

Статистический анализ результатов исследования проводили на персональном компьютере с использованием программы BioStat 7. Для проверки достоверности различий значений в двух независимых группах использовали U-критерий Манна – Уитни. Аналитическую надежность настоящих исследований рассчитывали, используя коэффициент вариации «CV».

РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем эксперименте проводилось испытание модели «разделенный шлиф» ультразвуковым и механическим способами. Такая модель позволяет исследовать структурные изменения, происходящие в процессе деминерализации на идентичных тканях в одном образце зуба, а также в динамике в зависимости от сроков экспозиции. Из использованных нами способов исследования ультразвуковой способ имеет перспективу клинического применения в стоматологии.

На рисунке 6 представлены результаты изменения скорости ультразвукового сигнала в образцах интактного и деминерализованного дентина в группах 1 и 2, полученные с помощью способа ультразвуковой теневой велосимметрии.

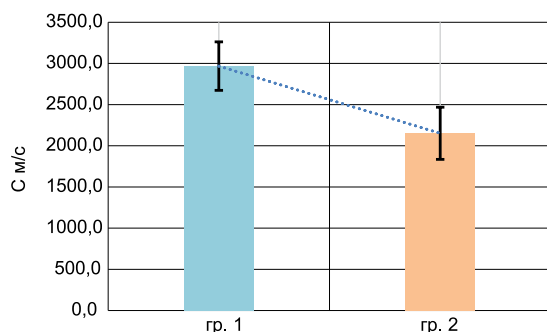


Рис. 6. Изменение скорости распространения ультразвукового широкополосного сложномодулированного сплит-сигнала в образцах интактного и деминерализованного дентина

Fig. 6. Changes in the propagation speed of the ultrasonic broadband complex-modulated split signal in samples of intact and demineralized dentin

Среднее значение скорости ультразвукового сигнала в зоне интактного дентина составила $2967,90 \pm 349,25$ м/с, в зоне деминерализованного – $2152,00 \pm 379,55$ м/с. В группе образцов с деминерализованным дентином выявлено снижение показателя среднего значения скорости ультразвукового сигнала на 27%, по сравнению с образцами группы 1 (отмечено пунктиром на рис. 6). После приведенного математического анализа выявлены статистически значимые различия средних значений скорости ультразвукового сигнала в двух независимых группах образцов – группах 1 и 2 согласно расчетам U-критерия Манна – Уитни (при $p = 0,01$, $U_{ф11} < U_{к42}$).

При определении механической прочности образцов интактного и деминерализованного дентина в группах 3 и 4 рассчитывался показатель предельного разрушающего напряжения при сжатии – « σ » (кгс/см²) из выражения: $\sigma = P_k/F_0$, где P_k – критическая сжимающая нагрузка по показанию динамометра в (кгс), F_0 – площадь поперечного сечения исследуемого образца в (см²). На рисунке 7 представлены результаты изменения предельного разрушающего напряжения в образцах интактного и деминерализованного дентина.

Среднее значение предельного разрушающего напряжения в образцах интактного и деминерализованного дентина составило – $356,0 \pm 19,6$ кгс/см² и $251,30 \pm 11,85$ кгс/см², соответственно. В группе 4 с деминерализованным дентином показатель среднего значения предельного разрушающего напряжения был на 29,5% меньше, чем в группе 3 с интактным дентином. Выявлены статистически значимые различия средних значений предельного разрушающего напряжения в двух независимых группах образцов интактного и деминерализованного дентина согласно расчетам U-критерия Манна – Уитни (при $p = 0,01$, $U_{ф11} < U_{к42}$).

В настоящем исследовании мы тестировали изменение лишь одного материаловедческого па-

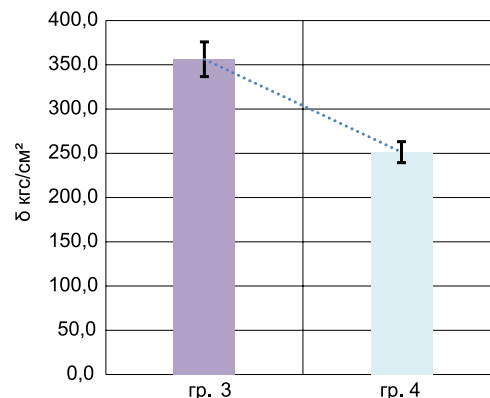


Рис. 7. Изменение предельного разрушающего напряжения в образцах интактного и деминерализованного дентина

Fig. 7. Changes in ultimate strength in samples of intact and demineralized dentin

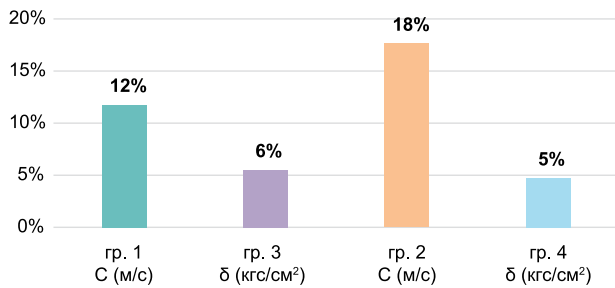


Рис. 8. Значения коэффициента вариации «CV», рассчитанного по результатам измерения для каждой исследуемой группы

Fig. 8. Coefficient of variation (CV) values calculated from the measurement results for each group

параметра – предельное разрушающее напряжение « $\sigma = P_k/F_0$ », для контроля изменения механической прочности субстрата дентина до и после деминерализации. Как показывают данные исследования [7], материаловедческие свойства дентина человека довольно вариабельны, испытания на одноосное сжатие, выполненные авторами, показали, что дентин человека способен как к упругой, так и к пластической деформации – модуль Юнга $4,04 \pm 0,12$ ГПа, коэффициент Пуассона $0,14 \pm 0,04$, упругая деформация $13,5 \pm 1,7\%$ и пластическая деформация $13,5 \pm 2,4\%$.

Аналитическую надежность результатов, полученных с использованием исследуемых способов, которая характеризует степень достоверности полученных данных испытания модели – «разделенный шлиф» рассчитывали, используя коэффициент вариации «CV». Расчеты «CV» для каждой исследуемой группы представлены на диаграмме (рис. 8).

Коэффициент вариации «CV» (относительное стандартное отклонение) является стандартной

мерой дисперсии вероятностей распределения. Чем больше его величина, тем больше разброс значений признаков вокруг средней, тем менее однородна совокупность по своему составу и тем менее представительна средняя. По результатам статистического расчета «CV», совокупность значений в группах 1 и 2 (<20%) соответствует критерию «достаточно однородной», а в группах 3 и 4 (<10%) критерию «однородной». Таким образом, согласно статистической интерпретации значений «CV», практически все единицы изучаемых совокупностей в исследуемых группах обладают существенными признаками, следовательно, имеют диагностическое значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность применения ультразвукового и механического способов для определения степени деминерализации дентина постоянных зубов у детей *in vitro* подтверждается лабораторными данными, полученными с помощью:

1. Способа ультразвуковой теневой велосимметрии – значения скорости широкополосного ультразвукового сигнала сквозь образцы интактного и деминерализованного дентина в исследуемых группах имеют статистически значимые различия по результатам расчета U-критерия Манна – Уитни при ($p = 0,01$).

2. Способа статического вдавливания конуса. Значения предельного разрушающего напряжения в образцах дентина до и после деминерализации имеют статистически значимые различия по результатам расчета U-критерия Манна – Уитни при ($p = 0,01$).

Подтверждена аналитическая надежность результатов лабораторных испытаний модели «разделенный шлиф» по результатам расчета коэффициента вариации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wang Y, Yao X. Morphological/chemical imaging of demineralized dentin layer in its natural, wet state. *Dent Mater.* 2010;26(5):433-42.
doi: 10.1016/j.dental.2010.01.002
2. Saeki K, Chien YC, Nonomura G, Chin AF, Habeltz S, Gower LB, et al. Recovery after PILP remineralization of dentin lesions created with two cariogenic acids. *Arch Oral Biol.* 2017;82:194-202.
doi: 10.1016/j.archoralbio.2017.06.006
3. Xu C, Wang Y. Cross-linked demineralized dentin maintains its mechanical stability when challenged by bacterial collagenase. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2011;96(2):242-8.
doi: 10.1002/jbm.b.31759
4. Nishitani Y, Yoshiyama M, Tay FR, Wadgaonkar B, Waller J, Agee K, et al. Tensile strength of mineralized/

demineralized human normal and carious dentin. *J Dent Res.* 2005;84(11):1075-8.

doi: 10.1177/154405910508401121

5. Y Chien YC, Burwell AK, Saeki K, Fernandez-Martinez A, Pugach MK, Nonomura G, et al. Distinct decalcification process of dentin by different cariogenic organic acids: Kinetics, ultrastructure and mechanical properties. *Arch Oral Biol.* 2016;63:93-105.

doi: 10.1016/j.archoralbio.2015.10.001.

6. Panfilov P, Zaytsev D, Antonova OV, Alpatova V, Kiselnikova LP. The Difference of Structural State and Deformation Behavior between Teenage and Mature Human Dentin. *International Journal of Biomaterials.* 2016;2016:6073051.

doi: 10.1155/2016/6073051

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за связь с редакцией:

Седойкин Алексей Геннадьевич, кандидат медицинских наук, доцент кафедры детской стоматологии член-корреспондент РАН, Москва, Российская Федерация

Для переписки: alexdokt_01@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6740-3363>

Ермольев Сергей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор кафедры терапевтической стоматологии и пародонтологии Российского университета медицины, Москва, Российская Федерация

Для переписки: ermoljev_s@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4219-3547>

Кисельникова Лариса Петровна, заслуженный врач РФ, доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой детской стоматологии Россий-

ского университета медицины, Москва, Российская Федерация

Для переписки: lpkiselnikova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2095-9473>

Фокина Александра Алексеевна, ассистент кафедры ортодонтии, врач-ортодонт отделения ортодонтии Российского университета медицины, Москва, Российская Федерация

Для переписки: fokina.aleksandra@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0522-2860>

Гонибова Алена Альбертовна, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры ортопедической стоматологии Российского университета, Москва, Российская Федерация

Для переписки: 6261854@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6073-9814>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Corresponding author:

Alexey G. Sedoykin, DMD, PhD, Associate Professor, Department of the Pediatric Dentistry, Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

For correspondence: alexdokt_01@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6740-3363>

Sergey N. Ermoljev, DMD, PhD, DSc, Professor, Department of Restorative Dentistry and Periodontology, Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

For correspondence: ermoljev_s@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4219-3547>

Larisa P. Kiselnikova, DMD, PhD, DSc, Professor, Head of the Department of Pediatric Dentistry, Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

For correspondence: lpkiselnikova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2095-9473>

Alexandra A. Fokina, DMD, Assistant Professor, Department and Clinic of Orthodontics, Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

For correspondence: fokina.aleksandra@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0522-2860>

Alena A. Gonibova, DMD, PhD, Assistant Professor, Department of Prosthodontics, Russian University of Medicine, Moscow, Russian Federation

For correspondence: 6261854@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6073-9814>

Конфликт интересов:

Авторы декларируют отсутствие

конфликта интересов/

Conflict of interests:

The authors declare no conflict of interests

Поступила / Article received 01.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.08.2024

Принята к публикации / Accepted 09.09.2024