

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/uds694236>

EDN: HOPIWE

Сравнительный анализ влияния нано- и микроостеоперфораций на костную ткань нижней челюсти методом конечных элементов

Р.А. Фадеев^{1,2,3,4}, Т.А. Щедрина^{1,2,4}, Н.В. Прозорова², М.Р. Фадеева^{2,5}¹ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия;² Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия;³ Санкт-Петербургский институт стоматологии последипломного образования, Санкт-Петербург, Россия;⁴ Медицинский центр «Романовский», Санкт-Петербург, Россия;⁵ Стоматологическая поликлиника № 9, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Несмотря на распространенность методов остеоперфораций в ортодонтии, остается открытым вопрос о влиянии размеров создаваемых отверстий на распределение напряжений в костной ткани и последующее ремоделирование. Настоящее исследование направлено на заполнение этого пробела путем сравнения эффектов нано- и микроостеоперфораций нижней челюсти с помощью метода конечных элементов.

Цель — оценить с помощью метода конечных элементов влияние нано- и микроостеоперфораций на костную ткань нижней челюсти при ортодонтическом лечении.

Методы. Построена трехмерная модель нижней челюсти с тесно расположенными резцами и установленной брекет-системой с ортодонтической дугой Bio Edge 16×16 (форма А), применяемой на этапе выравнивания зубов. Воспроизведены различные типы остеоперфораций: наноостеоперфорации малого диаметра (1,1–1,5 мм) и классические большие микроостеоперфорации (1,6–2,5 мм). На основании численных расчетов определялись механические свойства костной ткани (уровни напряжений и деформаций) в точках остеоперфораций. Полученные данные использованы для сравнения обоих типов остеоперфораций и обоснования рекомендаций по применению наиболее эффективной методики.

Результаты. Ортодонтическое лечение с использованием наноостеоперфораций вызывает умеренные напряжения в костной ткани, максимальные показатели достигают 43,845 МПа, минимальные — 0,0001349 МПа. Применение микроостеоперфораций провоцирует значительно большее напряжение в костной ткани, достигая максимального показателя 46,81 МПа и минимального — 0,00013798 МПа. Исследование методом конечных элементов показало, что применение наноостеоперфораций способствует более равномерному распределению механических напряжений в костной ткани по сравнению с традиционным методом микроостеоперфораций.

Заключение. Результаты показывают уменьшение напряжений в костной ткани при использовании наноостеоперфораций, что создает благоприятные условия для нормального ремоделирования костной ткани. Таким образом, наноостеоперфорации являются перспективным направлением в ортодонтическом лечении, поскольку снижают риск осложнений и улучшают эффективность ортодонтического перемещения зубов.

Ключевые слова: микро-остеоперфорации; наноостеоперфорации; нижняя челюсть; компактная пластинка; метод конечных элементов; ортодонтическое лечение.

Как цитировать

Фадеев Р.А., Щедрина Т.А., Прозорова Н.В., Фадеева М.Р. Сравнительный анализ влияния нано- и микроостеоперфораций на костную ткань нижней челюсти методом конечных элементов // Университетская стоматология и челюстно-лицевая хирургия. 2025. Т. 3, № 3. С. 97–102. DOI: 10.17816/uds694236 EDN: HOPIWE

Original study article

DOI: <https://doi.org/10.17816/uds694236>

EDN: HOPIWE

Comparative Finite Element Analysis of the Effects of Nano- and Micro-Osteoperforations on Mandibular Bone

Roman A. Fadeev^{1,2,3,4}, Tatyana A. Shchedrina^{1,2,4}, Natalia V. Prozorova², Maria R. Fadeeva^{2,5}¹ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia;² Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia;³ SPb INSTOM, Saint Petersburg, Russia;⁴ Romanovsky Medical Center, Saint Petersburg, Russia;⁵ Dental Clinic No. 9, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Although osteoperforation techniques are widely used in orthodontics, the effect of perforation size on stress distribution within mandibular bone and subsequent bone remodeling remains unclear. This study addresses this gap by comparing the effects of nano- and micro-osteoperforations in the mandible using finite element analysis.

AIM: This study aimed to evaluate the effects of nano- and micro-osteoperforations on mandibular bone during orthodontic treatment.

METHODS: A three-dimensional mandibular model was constructed with crowded incisors and a fixed orthodontic appliance incorporating a Bio Edge 16 × 16 archwire (A form), which is used at the alignment phase. Two types of osteoperforations were simulated: nano-osteoperforations with small diameters (1.1–1.5 mm) and conventional micro-osteoperforations with larger diameters (1.6–2.5 mm). Finite element analysis was used to determine the mechanical response of the bone, including stress and strain levels, at the osteoperforation sites. The resulting data were used to compare the two osteoperforation techniques and substantiate recommendations regarding the most effective approach.

RESULTS: Orthodontic treatment with nano-osteoperforations resulted in moderate stress levels in the bone, with maximum values of 43.845 MPa and minimum values of 0.0001349 MPa. In contrast, micro-osteoperforations produced substantially higher stress levels, with maximum and minimum values of 46.81 MPa and 0.00013798 MPa, respectively. Finite element analysis showed that nano-osteoperforations led to a more uniform distribution of mechanical stresses in the bone compared with conventional micro-osteoperforation techniques.

CONCLUSION: The results indicate reduced stress levels in the bone when nano-osteoperforations are used, creating favorable conditions for physiological bone remodeling. Thus, nano-osteoperforations represent a promising approach in orthodontic treatment, as they reduce the risk of complications and improve the efficiency of orthodontic tooth movement.

Keywords: micro-osteoperforations; nano-osteoperforations; mandible; cortical plate; finite element analysis; orthodontic treatment.

To cite this article

Fadeev RA, Shchedrina TA, Prozorova NV, Fadeeva MR. Comparative Finite Element Analysis of the Effects of Nano- and Micro-Osteoperforations on Mandibular Bone. *Acta Universitatis Dentistriae et Chirurgiae Maxillofacialis*. 2025;3(3):97–102. DOI: 10.17816/uds694236 EDN: HOPIWE

Submitted: 27.10.2025

Accepted: 31.10.2025

Published online: 15.11.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Ортодонтическое исправление тесного положения нижних резцов зачастую затруднено в связи с истонченной кортикальной пластинкой кости, дефицитом места в зубной дуге. Это приводит к снижению скорости перемещения зубов, перфорациям и фенестрациям компактной пластинки [1]. Традиционные методы ортодонтического лечения оказываются недостаточно эффективными, особенно у пациентов в зрелом возрасте, когда перемещение зубов происходит медленнее и увеличивается срок ортодонтического лечения [2].

Один из инновационных подходов к лечению тесного положения зубов — применение микроостеоперфораций, ослабляющих костную ткань челюсти, направленных на стимуляцию местных биохимических процессов, улучшающих перемещение зубов [3]. Микроостеоперфорации стимулируют перестройку костной ткани.

Предложенный нами метод микроостеоперфораций с использованием специального остеоперфоратора менее травматичен [4]. Он заключается в минимальном травмировании костной ткани с целью инициации локальных метаболических и воспалительных процессов, стимулирующих образование новой костной ткани и ускоряющих перемещение зубов.

Микроостеоперфорации осуществляются посредством нанесения небольших перфораций в костной ткани с целью ускорения процессов ортодонтического перемещения зубов [5]. Данная техника может выполняться с использованием:

1) наконечника с бором. Применяются тонкие сверла диаметром от 1,5 до 2,5 мм, позволяющие создать отверстия в компактной пластинке альвеолярной части [6];

2) ортодонтического микроимплантата. Размер микроимплантатов варьирует, наиболее популярные — от 1,6 до 2,5 мм в диаметре [7].

Наноостеоперфорации проводят с использованием остеоперфоратора диаметр которого составляет от 1,1 до 1,5 мм [8].

Такие манипуляции способствуют активации клеток-предшественников остеобластов и остеокластов, ускоряют процесс резорбции старой костной ткани и образования новой, что позволяет в значительной степени сократить сроки ортодонтического лечения.

Цель

Оценить с помощью метода конечных элементов влияние нано- и микроостеоперфораций на костную ткань нижней челюсти при ортодонтическом лечении.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Выполнено ретроспективное наблюдательное исследование. При формировании исследуемой выборки имела

место случайная выборка, сформированная по усмотрению исследования.

Условия проведения исследования

Для анализа воздействия ортодонтических сил на костную ткань применялся метод конечных элементов (МКЭ) — численная технология, используемая для решения дифференциальных уравнений и математического моделирования сложных объектов. МКЭ позволяет представить исходную область в виде совокупности простых элементов, решать для них уравнения граничных условий и получать наглядное представление распределения внутренних напряжений, деформаций и смещений. Важность анализа распределения напряжений в челюстно-лицевой области обусловлена тем, что движение зубов инициируется ортодонтическими силами, создающими напряжение в периодонтальной связке, что, в свою очередь, запускает механизмы ремоделирования костной ткани [9].

Критерии отбора

Для решения поставленных задач было решено разработать вязкоупругую модель нижней челюсти и приложить к ней усилия, которые развивает брекет-система. Моделирование нижней челюсти проводилось на основе конусно-лучевых компьютерных томограмм (КЛКТ), преобразованных в трехмерные модели. Был использован снимок женщины 35 лет с тесным положением центральных резцов 1 степени. Трехмерная модель анализировалась программой ANSYS. Граничные элементы сетки создавались путём импорта геометрии и объединения ее с помощью специализированных модулей программного пакета ANSYS. Физико-механические свойства материала определялись заданием модуля Юнга (упругость) и коэффициента Пуассона (соотношение продольной и поперечной деформации).

Исследуемый диагностический метод

Была создана трехмерная модель нижней челюсти с тесным положением резцов первой степени, брекет-системой и ортодонтической дугой (Bio Edge 16×16, форма А), которую ортодонты часто используют на стадии нивелирования для выравнивания положения зубов (рис. 1). Модель представляла собой совокупность однородных элементов с заданными физическими свойствами (модуль Юнга, предел прочности и т. д.). В рамках модели воспроизводились остеоперфорации различных видов:

- наноостеоперфорации — точечные, небольшого диаметра, от 1,1 до 1,5 мм (рис. 2);
- микроостеоперфорации — классические остеоперфорации большего диаметра, от 1,6 до 2,5 мм (рис. 3).

Построена система линейных алгебраических уравнений, что позволило определить уровни напряжения и деформаций в костной ткани при различных видах остеоперфораций [10]. Рассчитывались напряжения в пределах границ допустимых нагрузок, характерные для костной ткани.

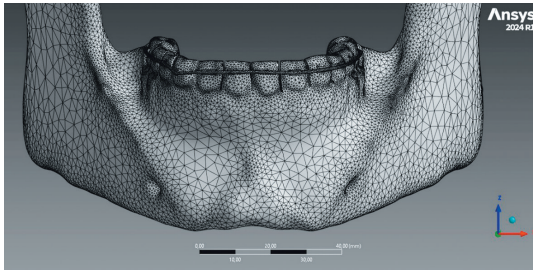


Рис. 1. Трехмерная модель нижней челюсти с тесным положением центральных резцов, брекет-системой и установленной дугой квадратного сечения с усилием 80 г.

Fig. 1. Three-dimensional mandibular model with crowded central incisors, a fixed orthodontic appliance with brackets, and a square-section archwire delivering an 80-g force.

Выполнен сравнительный анализ уровней напряжений, деформируемости и интенсивности повреждения костной ткани в местах нано- и микроостеоперфораций. Особое внимание уделялось определению максимальной нагрузки, воспринимаемой костной тканью, и устойчивости конструкции к разрушению [11, 12].

Полученные данные позволили сформулировать заключение о преимуществах и недостатках каждого метода остеоперфораций, выделить предпочтительные способы и предложить рациональные подходы к выбору техник в зависимости от клинической ситуации [13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлен результат моделирования ортодонтического лечения с использованием МКЭ.

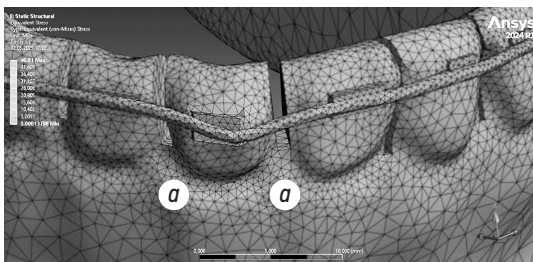


Рис. 3. Трехмерная модель нижней челюсти с микроостеоперфорациями (а) между зубами 4.1 и 4.2; 4.2 и 4.3.

Fig. 3. 3D mandibular model with micro-osteoperforations (a) placed between teeth 41 and 42 and between teeth 42 and 43 (ISO/FDI designation).

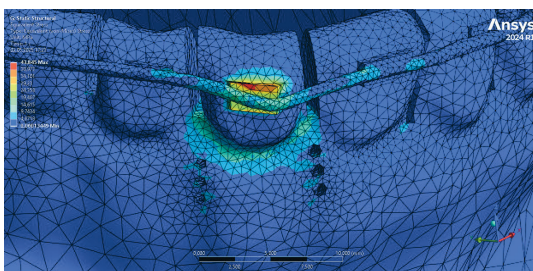


Рис. 5. Распределение напряжений в костной ткани при моделировании ортодонтического лечения с применением множественных наноостеоперфораций.

Fig. 5. Stress distribution in mandibular bone during simulated orthodontic treatment with multiple nano-osteoperforations.

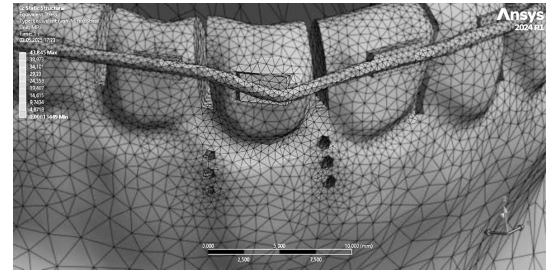


Рис. 2. Трехмерная модель нижней челюсти с 6 наноостеоперфорациями между зубами 4.1 и 4.2; 4.2 и 4.3.

Fig. 2. Three-dimensional mandibular model with six nano-osteoperforations placed between teeth 41 and 42 and between teeth 42 and 43 (ISO/FDI designation).

На модели видно, что напряжения в костной ткани распределены неравномерно. В области, где происходит ортодонтическое перемещение зуба, наблюдаются зоны с высоким уровнем напряжения, окрашенные в красный и желтый цвета. Это указывает на то, что в этих областях происходит максимальное воздействие на костную ткань. В других участках челюсти напряжения значительно ниже, что видно по синим и зеленым оттенкам. Это свидетельствует о том, что основная нагрузка сосредоточена в области перемещения зуба, а остальная часть челюсти испытывает меньшее напряжение.

Согласно шкале напряжений, максимальное значение составляет 47,178 МПа, что соответствует красным и желтым областям на модели. Это указывает на значительные механические нагрузки в этих зонах. Минимальное значение напряжения составляет 0,00012722 МПа, что

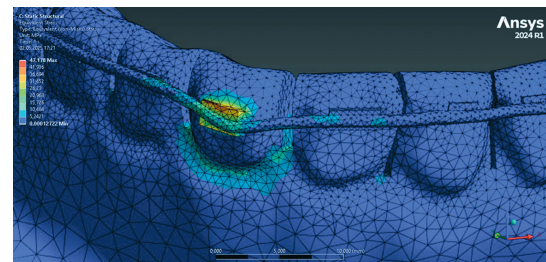


Рис. 4. Распределение напряжений в костной ткани при моделировании ортодонтического лечения.

Fig. 4. Stress distribution in mandibular bone during simulated orthodontic treatment.

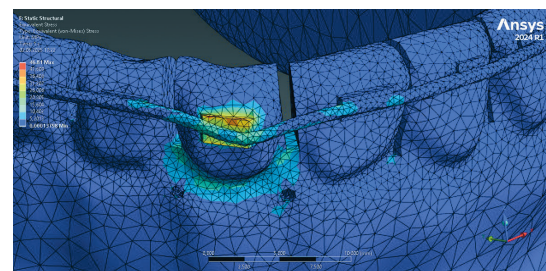


Рис. 6. Распределение напряжений в костной ткани при моделировании ортодонтического лечения с применением микроостеоперфораций.

Fig. 6. Stress distribution in mandibular bone during simulated orthodontic treatment with micro-osteoperforations.

соответствует синим областям на модели. Это показывает, что в этих участках нагрузка на костную ткань минимальна.

На рис. 5 представлен результат моделирования ортодонтического лечения с использованием МКЭ при применении множественных микроостеоперфораций.

На модели видно, что напряжения в костной ткани распределены более равномерно по сравнению с микроостеоперфорациями. В области, где происходит ортодонтическое перемещение зуба, наблюдаются зоны с умеренным уровнем напряжения, окрашенные в желтый и зеленый цвета. Это указывает на то, что в этих областях происходит умеренное воздействие на костную ткань.

В других участках челюсти напряжения значительно ниже, что видно по оттенкам синего. Это свидетельствует о том, что основная нагрузка сосредоточена в области перемещения зуба, а остальная часть челюсти испытывает меньшее напряжение. Согласно шкале напряжений, максимальное значение составляет 43,845 МПа, что соответствует желтым и зеленым областям на модели. Это указывает на умеренные механические нагрузки в этих зонах. Минимальное значение напряжения составляет 0,0001349 МПа, что соответствует синим областям на модели. Это показывает, что в этих участках нагрузка на костную ткань минимальна.

На рис. 6 трехмерная модель показывает распределение напряжений в костной ткани нижней челюсти при ортодонтическом перемещении зубов с микроостеоперфорациями.

Согласно шкале напряжений, максимальное значение составляет 46,81 МПа, что соответствует красным и желтым областям на модели. Это указывает на значительные механические нагрузки в этих зонах. Минимальное значение напряжения составляет 0,00013798 МПа, что соответствует синим областям на модели. Это показывает, что в этих участках нагрузка на костную ткань минимальна. Выявлено незначительное распределение напряжения в области микроостеоперфораций, равное 5,2013 Мпа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ортодонтическое лечение с применением множественных микроостеоперфораций вызывает умеренное напряжение в костной ткани, особенно в области перемещения зуба. Минимальное значение напряжения составляет 0,0001349 МПа, максимальное — 43,845 Мпа. Ортодонтическое лечение с применением микроостеоперфораций вызывает значительное напряжение в костной ткани, особенно в области перемещения зуба. Минимальное значение напряжения составляет 0,00013798 Мпа, максимальное — 46,81 Мпа. Полученные данные свидетельствуют об уменьшении напряжений в костной ткани с применением микроостеоперфораций, по сравнению с микроостеоперфорациями, что создает оптимальные условия для ремоделирования кости.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Р.А. Фадеев — определение концепции, работа с данными, пересмотр и редактирование рукописи; Т.А. Щедрина — определение концепции, визуализация, написание черновика рукописи; Н.В. Прозорова — валидация, пересмотр и редактирование рукописи; М.Р. Фадеева — финишное редактирование рукописи.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого (№ 91 от 28.09.2023).

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два рецензента: внутренний и внешний.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: R.A. Fadeev: conceptualization, data curation, writing—review & editing; T.A. Shchedrina: conceptualization, visualization, writing—original draft; N.V. Prozorova: validation, writing—review & editing; M.R. Fadeeva: writing—review & editing.

Ethics approve: The study was approved by the local ethics committee of Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (No. 91, dated September 28, 2023).

Funding sources: No funding.

Statement of originality: The authors did not use previously published information (text, illustrations, data) to create this paper.

Data availability statement: All the data obtained in this study is available in the article.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer review: This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. Two reviewers participated in the review: internal and external.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Sergeenkova AR, Drobysheva NS. Corticotomy as a sort of micro-osteoperforation in orthodontic patients. *Orthodontics*. 2024;(1):46–53. EDN: VRHOAL
2. Nanda R. *Biomechanics and esthetics in clinical orthodontics. Translated from English. 2nd ed.* Moscow: MEDpress-inform; 2016. P. 33–41. (In Russ.)
3. Bakushev SV. *Theory of elasticity. Brief theoretical course: textbook.* Penza: PUGAS; 2016. 256 p. EDN: ZEBCTD (In Russ.)
4. Simion G, Eckardt N, Senft C, Schwarz F. Bone density of the axis (C2) measured using Hounsfield units of computed tomography. *J Orthop Surg Res*. 2023;18:93. doi: 10.1186/s13018-023-03560-8
5. Semenyuk VM, Putalova IN, Artyukhov AV, et al. Application of the finite element method in dentistry (review of literature sources). *Mathematical structures and modeling*. 2002;(9):113–123. EDN: TDPDSV (In Russ.)
6. Profit UR. *Modern orthodontics.* Persin LS, editor. Translate from English 2nd ed. Moscow: MEDpress-inform; 2008. P. 237–243. (In Russ.)
7. Ivashchenko SV, Ulashchik VS, Naumovich SA. *Controlled restructuring of bone tissue in dentoalveolar anomalies and deformations in the formed bite.* Minsk: BSMU; 2013. P. 11–13. ISBN 978-985-528-760-6 (In Russ.)
8. Patent RU № 225784 U1/ 06.05.2024. Shchedrina TA, Fadeev RA, Prozorova NV. *Osteoperforator.* Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslav the Wise Novgorod State University”. EDN: JHDBAW (In Russ.)
9. Semenyuk VM, Putalova IN, Artyukhov AV, et al. Application of the finite element method in dentistry (review of literature sources). *Mathematical structures and modeling*. 2002;(9):113–123. EDN: TDPDSV (In Russ.)
10. Chuiko AN, Grizodub VI, Smaglyuk LV, Ali Khalil Reda On the methodology for assessing the magnitude of forces generated by an orthodontic arch. *Ukrainian dental almanac*. 2008;(1):24–30. (In Russ.)
11. Melnikov AA, Diachenko VV, Shubin IV, et al. Modern approaches and possibilities for assessing bone mineral density by quantitative computed tomography (literature review). *Consilium Medicum*. 2021;23(4):372–381. doi: 10.26442/20751753.2021.4.200643 EDN: OWTACQ
12. Vershinin VA, Kiryukhin VY, Rogozhnikov GI. Biomechanical aspects of secondary deformity of dentitions. *Russian journal of biomechanics*. 2004;8(2):16–28. EDN: JWSHFN
13. Chuiko AN. On possibilities of biomechanical support of the orthodontic teeth treatment. *Russian journal of biomechanics*. 2009;13(1):68–78. EDN: JYICTR
14. Toumassian MG, Toumassian SG, Satygo EA. Innovative laser technology in dentistry. *Acta universitatis dentistriae et chirurgiae maxillofacialis*. 2024;2(3):113–122. doi: 10.17816/uds635366 EDN: BULFQQ

ОБ АВТОРАХ

***Щедрина Татьяна Андреевна**, врач-ортодонт, аспирант; адрес: ул. Кирочная д. 41, Санкт-Петербург, 191015, Россия; ORCID: 0009-0002-3059-5087; eLibrary SPIN: 4917-9475; e-mail: tshedrina14@mail.ru

Фадеев Роман Александрович, д-р мед. наук, профессор; ORCID: 0000-0003-3467-4479; eLibrary SPIN: 4556-5177; e-mail: sobol.rf@yandex.ru

Прозорова Наталья Владимировна, канд. мед. наук; eLibrary SPIN: 6253-3084; e-mail: prozorovanv@yandex.ru

Фадеева Мария Романовна, канд. мед. наук; eLibrary SPIN: 5716-8494; e-mail: DocFad27@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

***Tatyana A. Shchedrina**, orthodontist, postgraduate student; address: 41 Kirochnaya st, St. Petersburg, 191015, Russia; ORCID: 0009-0002-3059-5087; eLibrary SPIN: 4917-9475; e-mail: tshedrina14@mail.ru

Roman A. Fadeev, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; ORCID: 0000-0003-3467-4479; eLibrary SPIN: 4556-5177; e-mail: sobol.rf@yandex.ru

Natalia V. Prozorova, MD, Cand. Sci. (Medicine); eLibrary SPIN: 6253-3084; e-mail: prozorovanv@yandex.ru

Maria R. Fadeeva, MD, Cand. Sci. (Medicine); eLibrary SPIN: 5716-8494; e-mail: DocFad27@mail.ru