Оригинальное исследование
DOI: https://doi.org/10.17816/dent653465

Оценка девитализации зуба как фактора риска функциональной перегрузки эмали и дентина с помощью математического моделирования

Э.А. Олесова[1], С.Д. Арутюнов[2], Е.А. Некрасова[1], М.Р. Берсанова[1], Е.Е. Олесов[1]

[1] Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия;
[2] Российский университет медицины, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В клинической практике нередки случаи трещин и переломов девитализированных зубов при их функциональной нагрузке, что делает актуальным анализ напряжённо-деформированного состояния тканей интактного и девитализированного зуба в идентичных условиях нагрузки.

Цель. Экспериментальное сравнение напряжённо-деформированного состояния твёрдых тканей интактного и девитализированного зуба и окружающей костной ткани с помощью математического моделирования.

Методы. Проведено трёхмерное математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния тканей сегмента нижней челюсти с интактным и девитализированным зубом. Применяли нагрузку 150 Н в вертикальном и наклонном (45°) направлениях, анализировали максимальные напряжения и их локализацию в эмали, дентине, кортикальной и губчатой костных тканях в сопоставлении с их пределами прочности.

Результаты. Ткани девитализированного зуба испытывают бóльшие напряжения по сравнению с интактным зубом, особенно при наклонной нагрузке: эмаль, кортикальная и губчатая костные ткани соответственно на 49,3; 11,0; 13,1% (86,186; 31,371; 5,037 МПа). При вертикальной нагрузке девитализация зуба увеличивает напряжения в эмали и губчатой кости лунки соответственно на 33,1 и 29,2% (51,147 и 1,953 МПа). В девитализированном дентине ввиду ухудшения его физических свойств (и, следовательно, снижения предела прочности) напряжение при вертикальной нагрузке практически не меняется, а при наклонной — снижается на 28,1%. Функциональная нагрузка девитализированного зуба приближает к пределу прочности напряжения в эмали (при вертикальной и наклонной нагрузках), а также в дентине (при наклонной нагрузке). Периапикальная резорбция и резекция верхушки корня усугубляет повышение напряжений.

Заключение. Девитализация зубов повышает напряжения в эмали и костных тканях, особенно при наклонной нагрузке. Несмотря на уменьшение напряжений в дентине девитализированного зуба из-за снижения его механической прочности, напряжения при наклонной нагрузке приближаются к пределу прочности дентина в области шейки зуба. Вследствие девитализации зуба напряжения в эмали превышают пределы её прочности как при наклонной, так и при вертикальной нагрузках (соответственно в области шейки и по окклюзионной поверхности). Периапикальная резорбция и резекция верхушки корня в близкой степени увеличивают напряжения в эмали в сравнении с девитализированным зубом при обоих видах нагрузки, а также в кортикальной костной ткани при наклонной нагрузке.

Ключевые слова: функциональные напряжения; математическая модель; зуб; костная ткань.

Как цитировать:
Олесова Э.А., Арутюнов С.Д., Некрасова Е.А., Берсанова М.Р., Олесов Е.Е. Оценка девитализации зуба как фактора риска функциональной перегрузки эмали и дентина с помощью математического моделирования // Российский стоматологический журнал. 2025. Т. 29, № 2. С. 120–126. DOI: https://doi.org/10.17816/dent653465

Рукопись получена: 04.02.2025 **Рукопись одобрена:** 20.02.2025 **Опубликована online:** 24.03.2025

ЭКО • ВЕКТОР
Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.17816/dent653465

Assessment of tooth devitalization as a risk factor for enamel and dentin functional overload using mathematical modeling

Emilia A. Olesova[1], Sergey D. Arutyunov[2], Ekaterina A. Nekrasova[1], Makka R. Bersanova[1], Egor E. Olesov[1]

[1] State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia;
[2] Russian University of Medicine, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Cracks and fractures of devitalized teeth caused by functional overload are common in dental practice, necessitating an assessment of the stress-strain state of intact and devitalized tooth tissues under similar loading conditions.

AIM: An experimental comparison of the stress-strain state of intact and devitalized hard tooth tissues and the surrounding bone tissue using mathematical modeling.

METHODS: A 3D mathematical modeling of the stress-strain state of a mandibular segment with an intact and devitalized tooth was performed. A vertical and oblique (45°) load of 150 N was applied; the maximum stress and its location in the enamel, dentin, cortical bone, and cancellous bone were analyzed by comparing them to the respective strength limits.

RESULTS: Devitalized hard tissues are subjected to a higher stress than intact teeth, especially when an oblique load is applied, by 49.3, 11.0, and 13.1% (86.186, 31.371, and 5.037 MPa) for the enamel, cortical bone, and cancellous bone, respectively. When a vertical load is applied, tooth devitalization increases the stress in the enamel and cancellous bone of the socket by 33.1 and 29.2% (51.147 and 1.953 MPa), respectively. Devitalized dentin shows almost no changes in stress under a vertical load due to the deterioration of physical properties (and, thus, a decrease in the strength limit), whereas an oblique load results in a decrease of 28.1%. Functional load in a devitalized tooth results in stress values close to the strength limit in the enamel (under a vertical and oblique load) and dentin (under an oblique load). Periapical resorption and root apex resection further increase the stress.

CONCLUSION: Tooth devitalization increases the stress in the enamel and bone tissues, especially under an oblique load. Despite the reduced stress in devitalized dentin caused by a decrease in its mechanical strength, stress values under an oblique load are close to the dentin strength limit in the tooth neck area. Due to tooth devitalization, the stress in the enamel exceeds its strength limit under both oblique and vertical loads (in the tooth neck area and along the occlusal surface, respectively). Periapical resorption and root apex resection cause a similar increase in the stress in the enamel compared to a devitalized tooth under both loads, as well as in the cortical bone under an oblique load.

Keywords: functional stress; mathematical model; tooth; bone tissue.

To cite this article:
Olesova EA, Arutyunov SD, Nekrasova EA, Bersanova MR, Olesov EE. Assessment of tooth devitalization as a risk factor for enamel and dentin functional overload using mathematical modeling. *Russian Journal of Dentistry.* 2025;29(2):120–126. DOI: https://doi.org/10.17816/dent653465

Received: 04.02.2025 **Accepted:** 20.02.2025 **Published online:** 24.03.2025

ECO•VECTOR

Article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

В отдалённые сроки после девитализации зубов вследствие эндодонтического лечения нередко встречаются трещины и переломы корня зуба при обычной функциональной нагрузке, что свидетельствует о снижении пределов прочности дентина из-за изменений его физико-механических свойств [1–3]. В ряде случаев указанное осложнение можно устранить с помощью протетических конструкций на штифтовой опоре. Однако восстановление целостности коронковой части зуба не исключает повторного раскола его корня.

В связи с этим вызывают научный интерес величина, распределение и соотношение с пределами прочности функциональных напряжений, развивающихся в тканях девитализированного зуба при его нагрузке, в сравнении с интактным зубом.

Высокоинформативным методом изучения напряжённо-деформированного состояния твёрдых тканей зуба является трёхмерное математическое моделирование [4–7]. При этом важен учёт в математической модели реальных пределов прочности дентина и конструктивных материалов. Сведения о физико-механических свойствах тканей зуба разноречивы и малочисленны, однако имеются данные о существенном снижении пределов прочности дентина депульпированных зубов в сравнении с интактным зубом, что имеет значение для формулирования выводов математического моделирования [8, 9].

ЦЕЛЬ

Экспериментальное сравнение напряжённо-деформированного состояния твёрдых тканей интактного и девитализированного зуба и окружающей костной ткани с помощью математического моделирования.

МЕТОДЫ

Базовая трёхмерная математическая модель (премоляр нижней челюсти) содержала в естественном размерном соотношении эмаль и дентин, а также кортикальную и губчатую костную ткань окружающего сегмента челюсти. Рассматривали в сравнении с интактным зубом варианты модели: девитализированный зуб, зуб с периапикальной резорбцией костной ткани, зуб с резекцией верхушки корня (рис. 1).

Необходимые механические свойства анализируемых тканей и конструкционных материалов соответствовали данным литературных источников относительно модуля упругости и коэффициента Пуассона, а также пределов прочности на растяжение, имеющих меньшие значения в сравнении с прочностью на сжатие (табл. 1). Для целей моделирования учитывали предел прочности дентина интактного и девитализированного зуба (соответственно 104 и 30 МПа).

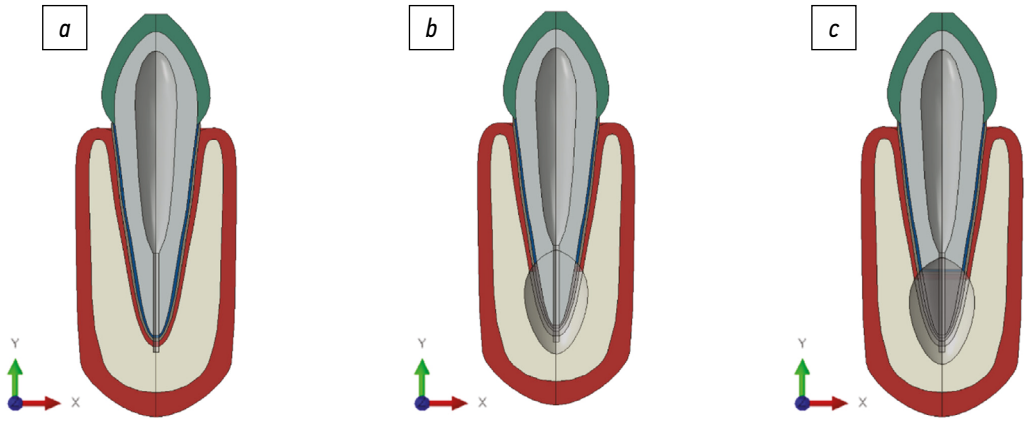

Рис. 1. Трёхмерная математическая модель однокорневого зуба нижней челюсти (премоляр) в неадекватных биомеханических условиях: *a* — интактный зуб, *b* — зуб с периапикальной резорбцией, *c* — зуб с резекцией верхушки корня.
Fig. 1. Three-dimensional mathematical model of a single-root mandibular tooth (premolar) under inadequate biomechanical conditions: *a* — intact tooth, *b* — tooth with periapical resorption, *c* — tooth with root tip resection.

Таблица 1. Механические свойства тканей зуба
Table 1. Mechanical properties of tooth tissues

Ткань/материал	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности (растяжение, МПа)
Эмаль	81 700	0,28	42,1
Дентин	23 300	0,31	104
Дентин девитализированный	2600	0,31	30
Кость кортикальная	20 500	0,32	150
Кость губчатая	3500	0,34	15

Характер распределения интегральных напряжений и их величину в тканях и конструкционных материалах в перечисленных вариантах моделирования анализировали при вертикальной и наклонной нагрузках 150 Н по данным цветного картирования распределения и шкалы величин напряжений в программе SolidWorks (Dassault Systemes, Франция) (рис. 2, 3).

Сравнение величин напряжений в разных вариантах моделирования проводили в программе Excel 2019 (Microsoft, США) с учётом критерия Стьюдента; различия считались статистически значимыми при $p < 0{,}05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В интактном зубе и окружающей костной лунке при вертикальной нагрузке наибольшие напряжения отмечаются в эмали зуба: по окклюзионной поверхности они составляют 34,204 МПа (табл. 2). В дентине напряжения до 9,174 МПа регистрируются над пульповой камерой, под слоем эмали окклюзионной поверхности зуба. В кортикальной костной ткани максимальные напряжения идут вдоль нижней трети лунки зуба и в проекции указанной зоны на кортикальной стенке нижней челюсти (5,066 МПа), в губчатой костной ткани — у апекса зуба (1,382 МПа).

Наклонная нагрузка существенно увеличивает напряжения в твёрдых тканях зуба: в эмали до 43,705 МПа, дентине — 56,469 МПа, кортикальной кости — 27,909 МПа, губчатой кости — 4,375 МПа. Изменяются области максимальных напряжений: в эмали — вдоль шейки зуба, дентине — в средней части корня зуба, кортикальной кости — в зоне перехода вертикальной и базальной поверхностей челюсти, губчатой кости — в пришеечной части межзубных перегородок.

Ткани девитализированного зуба испытывают напряжения большей величины по сравнению с интактным

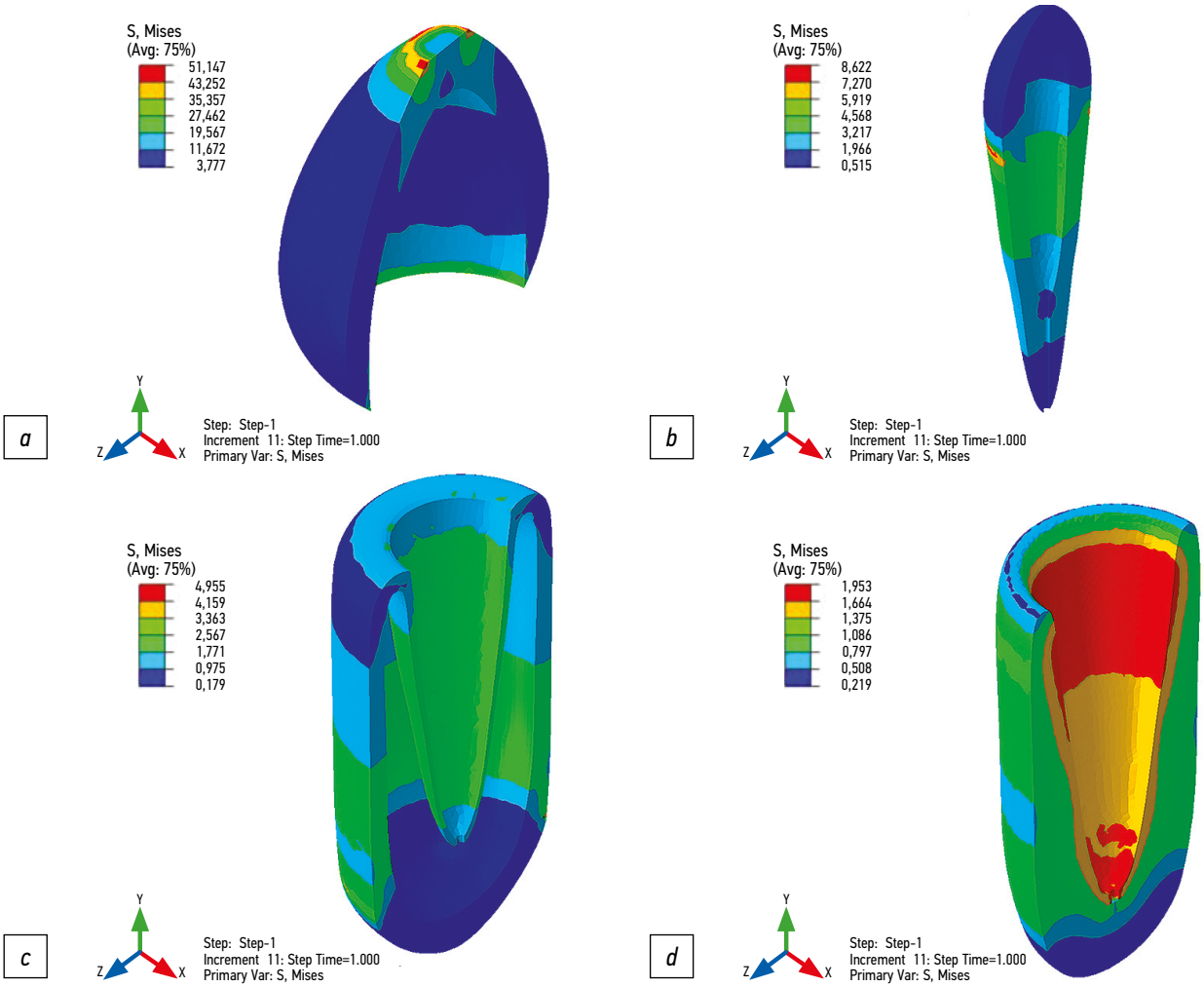

Рис. 2. Распределение значений функциональных напряжений в зубе и костной ткани при вертикальной нагрузке зуба в неблагоприятных биомеханических условиях (девитализированный зуб): *a* — эмаль, *b* — дентин, *c* — кортикальная костная ткань, *d* — губчатая костная ткань.

Fig. 2. Distribution of functional stresses in the tooth and bone tissue under vertical load of the tooth in adverse biomechanical conditions (devitalized tooth): *a* — enamel, *b* — dentin, *c* — cortical bone tissue, *d* — spongy bone tissue.

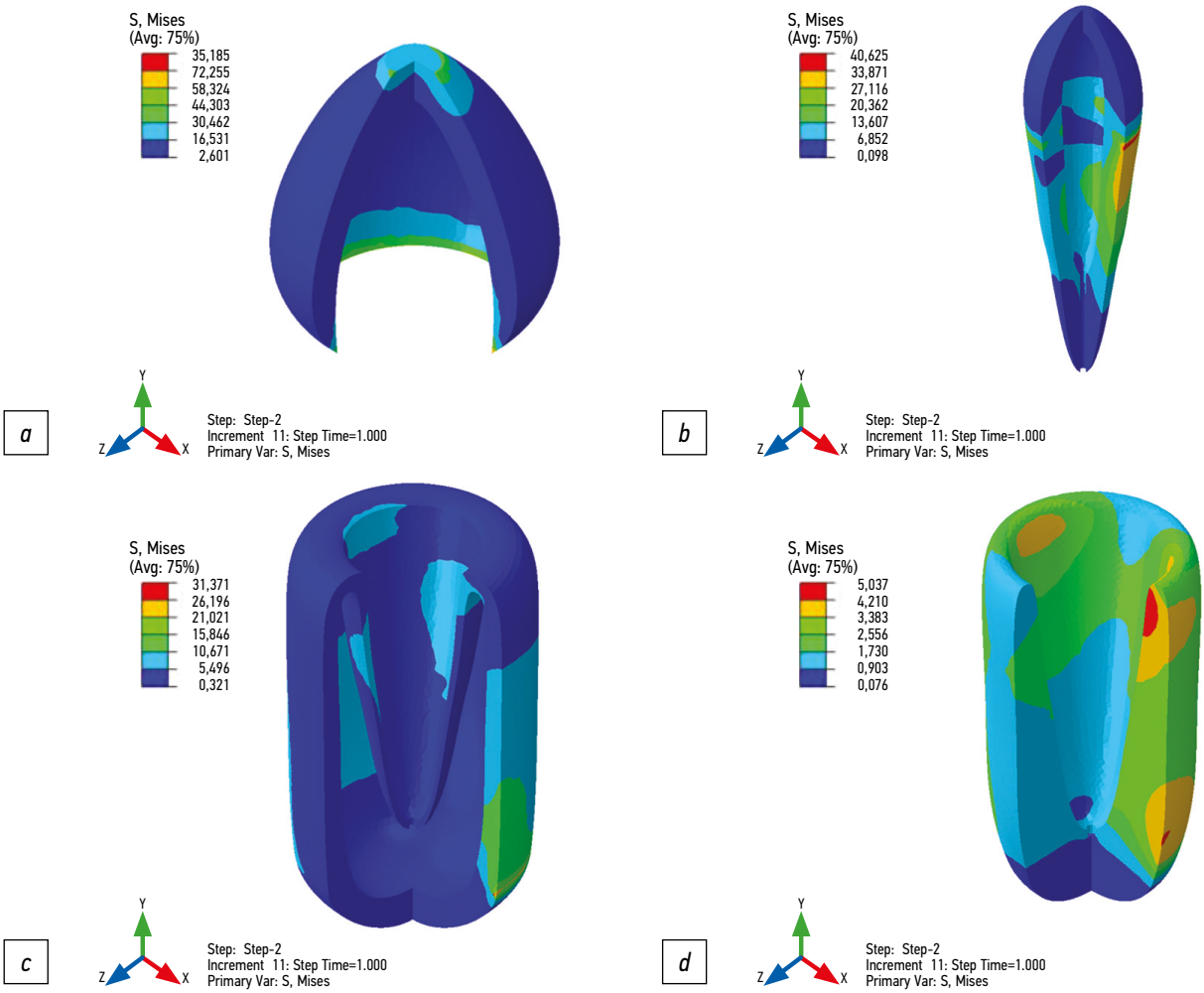

Рис. 3. Распределение значений функциональных напряжений в зубе и костной ткани при наклонной нагрузке зуба в неблагоприятных биомеханических условиях (девитализированный зуб): *a* — эмаль, *b* — дентин, *c* — кортикальная костная ткань, *d* — губчатая костная ткань.

Fig. 3. Distribution of functional stresses in the tooth and bone tissue under inclined load of the tooth in unfavorable biomechanical conditions (devitalized tooth): *a* — enamel, *b* — dentin, *c* — cortical bone tissue, *d* — spongy bone tissue.

Таблица 2. Максимальные величины напряжений при функциональной нагрузке девитализированного зуба, МПа

Table 2. Maximum stress values under functional load of a devitalized tooth (MPa)

Объект анализа	Интактный зуб	Девитализированный зуб	Периапикальная резорбция	Резекция верхушки
Эмаль (в)	34,204	51,147	57,360	57,360
Эмаль (н)	43,705	86,186	110,489	110,505
Дентин (в)	9,174	8,622	7,971	7,971
Дентин (н)	56,469	40,625	36,792	36,790
Кортикальная кость (в)	5,066	4,955	5,418	5,419
Кортикальная кость (н)	27,909	31,371	47,968	47,969
Губчатая кость (в)	1,382	1,953	1,871	1,872
Губчатая кость (н)	4,375	5,037	5,107	5,111

Примечание: в — вертикальная нагрузка; н — наклонная нагрузка.
Note: в — vertical load; н — inclined load.

зубом, особенно при наклонной нагрузке: эмаль, кортикальная и губчатая костные ткани соответственно на 49,3; 11,0; 13,1% (86,186; 31,371; 5,037 МПа). При вертикальной нагрузке девитализация зуба увеличивает напряжения в эмали и губчатой кости лунки — соответственно на 33,1 и 29,2% (51,147 и 1,953 МПа). В девитализированном дентине ввиду ухудшения его физических свойств (и, следовательно, снижения предела прочности) напряжения при вертикальной нагрузке практически не меняются, а при наклонной — снижаются на 28,1%.

Нередкая в клинических условиях периапикальная резорбция костной ткани в сравнении с девитализированным зубом без резорбции увеличивает напряжения в эмали на 10,8% при вертикальной и на 22,0% — при наклонной нагрузке (57,360 и 110,489 МПа соответственно), а также в кортикальной костной ткани при наклонной нагрузке — на 34,6% (47,968 МПа). Напряжения при вертикальной нагрузке при наличии периапикальной резорбции составляют в эмали, дентине, кортикальной и губчатой костной ткани 57,360; 7,971; 5,418; 1,871 МПа соответственно. При наклонной нагрузке в указанных тканях на фоне периапикальной резорбции напряжения увеличиваются соответственно до 110,489; 36,792; 47,968 и 5,107 МПа.

В свою очередь математическая модель девитализированного зуба после резекции верхушки корня не показывает значимых различий величины напряжений в тканях зуба и кости в сравнении с моделью с периапикальной резорбцией. Так, при вертикальной нагрузке максимальные напряжения в эмали, дентине, кортикальной и губчатой кости составляют 57,360; 7,971; 5,419; 1,872 МПа; при наклонной нагрузке соответственно 110,505; 36,790; 47,969; 5,111 МПа.

Распределение напряжений в девитализированном зубе отличается от интактного зуба только в дентине при вертикальной нагрузке: сохраняются напряжения в области шейки, но исчезают под эмалью по окклюзионной поверхности.

По сравнению с девитализированным зубом наличие периапикальной резорбции костной ткани меняет картину распределения напряжений только в губчатой костной ткани при вертикальной нагрузке: они концентрируются по верхней границе периапикальной полости в костной ткани.

Картина распределения напряжений во всех анализируемых тканях идентична при периапикальной резорбции костной ткани и при резекции верхушки корня.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение зарегистрированных напряжений в представленных вариантах модели зуба показывает, что функциональная нагрузка девитализированного зуба приближает к пределу прочности напряжения в эмали (при вертикальной и наклонной нагрузках), а также в дентине (при наклонной нагрузке). Периапикальная резорбция усугубляет повышение напряжений. Наклонная нагрузка особенно неблагоприятна для напряжённо-деформированного состояния зуба и окружающих тканей.

Полученные закономерности при математическом моделировании хорошо согласуются с клинической практикой, что подтверждает возможность метода при индивидуальном прогнозировании биомеханических последствий стоматологических вмешательств на твёрдых тканях зуба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С позиций биомеханики установлено негативное влияние девитализации зубов на прочность твёрдых тканей. Выявлено, что девитализация зубов повышает напряжения в эмали и костных тканях, особенно при наклонной нагрузке. Несмотря на уменьшение напряжений в дентине девитализированного зуба из-за снижения его механической прочности, напряжения при наклонной нагрузке приближаются к пределу прочности дентина в области шейки зуба. Вследствие девитализации зуба напряжения в эмали превышают пределы её прочности как при наклонной, так и при вертикальной нагрузках (соответственно в области шейки и по окклюзионной поверхности). Периапикальная резорбция и резекция верхушки корня в близкой степени увеличивают напряжения в эмали в сравнении с девитализированным зубом при обоих видах нагрузки, а также в кортикальной костной ткани — при наклонной нагрузке.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Э.А. Олесова — разработка экспериментальной модели и анализ результатов исследования; С.Д. Арутюнов — разработка концепции исследования и редактирование статьи; Е.А. Некрасова — написание текста статьи; М.Р. Берсанова — сравнение результатов моделирования с другими авторами; Е.Е. Олесов — обоснование актуальности исследования по данным литературы. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

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 внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. E.A. Olesova — development of an experimental model and analysis of research results; S.D. Arutyunov — development of the research concept and editing of the article; E.A. Nekrasova — writing the text of the article; M.R. Bersanova — comparison of modeling results with other authors; E.E. Olesov — substantiation of the relevance of the study according to the literature. All authors have approved the manuscript (version for publication) and have also agreed to be responsible for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy and integrity of any part of it are properly addressed and resolved.

Ethics approval. Not applicable.

Funding sources. No funding.

Disclosure of interests. The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

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

Data availability statement. All data obtained in the present study are available in the article.

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

Provenance and peer-review. This paper was submitted to the journal on an initiative basis and reviewed according to the usual procedure. One external reviewer, two members of the editorial board and the scientific editor of the publication participated in the reviewing process.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. *Therapeutic stomatology: national manual*. Dmitrieva LA, Maksimovsky YM, editors. 2nd edition, revision and supplement. Moscow: GEOTAR-Media; 2021. (In Russ.) ISBN: 978-5-9704-6097-9

2. Akulovich AV, Anisimova EN, Anisimova NU, et al. *Orthopedic dentistry. National Guide*. Lebedenko IY, Arutyunov SD, Ryakhovsky AN, editors. Moscow: GEOTAR-Media; 2022. (In Russ.) doi: 10.33029/9704-6367-3-OD2-2022-1-416 EDN: ULMYYK

3. Makeeva IM, Byakova SF, Adzhiev EK. Vertical root fracture. Etiology. Clinical symptoms. Diagnostics. *International Research Journal*. 2016;(12-5):104–107. doi: 10.18454/IRJ.2016.54.055 EDN: XQUTYR

4. Rozov RA, Trezubov VN, Gvetadze RS, et al. Experimental design of the lower jaw functional loading for implant-supported restoration in unfavorable clinical conditions. *Stomatology*. 2022;101(6):28–34. doi: 10.17116/stomat202210106128 EDN: KKPPHB

5. Zaslavsky RS, Olesova VN, Povstyanko YuA, et al. Three-dimensional mathematical modeling of functional stresses around a dental implant in comparison with a single-root tooth. *Russian Bulletin of Dental Implantology*. 2022;(3-4):4–10. EDN: JHRTIG

6. Abakarov S, Sorokin D, Lapushko V, Abakarova S. Stress-deformed state of a non-removable prosthesis on implants under mustering load depending on the angle of abutment wall tilt. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2025;26(1):147–157. doi: 10.37988/1811-153X_2023_1_147

7. Zaslavsky RS, Olesova EA, Kobzev IV, Kashchenko PV. Registration of bone tissue overload in conditions of mathematical 3-D modeling of the dentoalveolar segment. In: *Proceedings of the V Scientific and Practical Conference "Scientific Vanguard" and Interuniversity Olympiad of Residents and Postgraduates*. Moscow: State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency; 2023. P. 54–57. (In Russ.) EDN: DBOTHP

8. O'Brien WJ. *Dental materials and their selection*. 3th edition. Chicago: Quintessence Pub. Co.; 2002.

9. Muslov SA, Arutyunov SD. Baldano IR, editor. *Mechanical properties of teeth and peri-dental tissues*. Prakticheskaya medicina; 2020. (In Russ.) ISBN: 978-5-98811-617-2

ОБ АВТОРАХ

*** Олесова Эмилия Артёмовна;**
адрес: Россия, 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46;
ORCID: 0000-0003-4511-6317;
eLibrary SPIN: 5767-9158;
e-mail: emma.olesova@mail.ru

Арутюнов Сергей Дарчоевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-6512-8724;
eLibrary SPIN: 1052-4131;
e-mail: sd.arutyunov@mail.ru

Некрасова Екатерина Андреевна;
ORCID: 0000-0003-0380-0575;
eLibrary SPIN: 4291-2151; e-mail: ekaterina233@mail.ru

Берсанова Макка Руслановна;
ORCID: 0009-0004-6150-148X;
e-mail: bersanova99@bk.ru

Олесов Егор Евгеньевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-9165-2554;
eLibrary SPIN: 8924-3520; e-mail: olesov_georgiy@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Emilia A. Olesova;**
address: 46 Zhivopisnaya st, Moscow, Russia, 123098;
ORCID: 0000-0003-4511-6317;
eLibrary SPIN: 5767-9158;
e-mail: emma.olesova@mail.ru

Sergey D. Arutyunov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0001-6512-8724;
eLibrary SPIN: 1052-4131;
e-mail: sd.arutyunov@mail.ru

Ekaterina A. Nekrasova;
ORCID: 0000-0003-0380-0575;
eLibrary SPIN: 4291-2151; e-mail: ekaterina233@mail.ru

Makka R. Bersanova;
ORCID: 0009-0004-6150-148X;
e-mail: bersanova99@bk.ru

Egor E. Olesov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0001-9165-2554;
eLibrary SPIN: 8924-3520; e-mail: olesov_georgiy@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author