

Влияние локализации кариозной полости на напряженно-деформированное состояние зуба

Э.А. Олесова, Е.А. Некрасова, Е.Е. Олесов

Медико-биологический университет инноваций и непрерывного образования ФГБУ «ГНЦ РФ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, г. Москва, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Актуальность: формирование дефекта в виде полости в результате развития кариеса может изменять напряженно-деформированное состояние в зубе и приводить к возникновению трещин. На основании клинических наблюдений, на вероятность появления трещин и сколов твердых тканей зуба влияет не только величина полости, но и ее локализация, что требует проведения сравнительного анализа функциональных напряжений в тканях зуба в зависимости от локализации кариозного процесса. **Цель исследования:** сравнительная оценка влияния вертикальной и наклонной нагрузки на напряженно-деформированное состояние однокорневого зуба с полостью на окклюзионной или пришеечной поверхности и при замещении дефекта композитным материалом. **Материалы и методы:** проведено трехмерное математическое моделирование витального одноканального премоляра нижней челюсти в альвеолярной лунке в соответствии с анатомическими размерами и физико-механическими характеристиками тканей по данным литературных источников. Методом конечных элементов получены данные о величинах и характере распределения функциональных напряжений в зубе при воздействии 150 Н вертикально и под углом 45° в моделях с полостью на окклюзионной поверхности или в пришеечной области, а также при их восстановлении композитным материалом. **Результаты:** пришеечная локализация полости значительно увеличивает максимальные напряжения в эмали, приближая их к пороговым значениям при вертикальной и наклонной нагрузках. В полостях различной локализации наиболее уязвимым местом является край полости. Наблюдаются более высокие напряжения в кортикальной костной ткани при наличии с пришеечной полости в сравнении с моделью окклюзионной полости. Замещение дефекта тканей зуба композитным материалом способствует перераспределению нагрузки, снижению максимальных значений в эмали во всех случаях и достижению подпороговых значений при вертикальной нагрузке при пломбировании пришеечных полостей композитным материалом. **Выводы:** локализация полости в зубе влияет на картину и величины напряжений. В пришеечной полости, в сравнении с окклюзионной, значительно увеличены напряжения в эмали, они превышают предел ее прочности как при вертикальной, так и при наклонной нагрузке. Пломбирование дефекта композитным материалом способствует перераспределению напряжений и смещению точек их концентраций со стенок полости на окклюзионную поверхность и шейку зуба. Наклонная нагрузка является фактором риска сколов стенок эмали при любой локализации полости, а при наклонной нагрузке – даже после замещения дефекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: зуб, пришеечная полость, функциональные напряжения, математическое моделирование.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The influence of the cervical cavity on the stress-strain state of the tooth

E.A. Olesova, E.A. Nekrasova, E.E. Olesov

Biomedical University of Innovation and Continuing Education of State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Biological Agency, Moscow, Russian Federation

SUMMARY

Relevance: a cavity in a tooth due to caries can change the stress-strain state in the tooth and lead to its splitting. According to the clinic, the probability of cracks and splits in the hard tissues of the tooth is affected not only by the size of the cavity, but also by its localization, which requires a comparative analysis of functional stresses in the tooth depending on the area affected by the carious process. The purpose of the study: to analyze the effect of vertical and inclined loading on the stress-strain state of a single-root tooth with a cavity on the occlusal or neck surface and when replacing the defect with a composite material. **Materials and methods:** three-dimensional mathematical modeling of the vital single-channel premolar of the mandible in the alveolar socket was carried out in accordance with the anatomical dimensions and physico-mechanical characteristics of tissues according to literary sources. The finite element method obtained data on the magnitude and nature of the distribution of functional stresses in the tooth when exposed to 150 N vertically and at an angle of 45° in models with a cavity on the occlusal surface or in the neck area, as well as during their restoration with composite material. **Results:** the cervical localization of the cavity significantly increases the maximum stresses in the enamel, bringing them closer to the threshold values under vertical and inclined loads. In cavities of various localization, the most vulnerable point is the edge of the cavity. There are higher stresses in the cortical bone tissue in the presence of a cervical cavity in comparison with the occlusal cavity model. The replacement of a tooth tissue defect with a composite material helps to redistribute the load, reduce the maximum values in the enamel in all cases, and achieve sub-maximum values under vertical load when replacing the neck cavities with composite material. **Conclusions:** localization of the cavity in the tooth affects the pattern and magnitude of stresses. In the cervical cavity, compared with the occlusal cavity, the stresses in the enamel are significantly increased, they exceed its strength limit under both vertical and inclined loads. The restoration of a defect with a composite material contributes to the redistribution of stresses and the displacement of their concentration points from the walls of the cavity to the occlusal surface and neck of the tooth. An inclined load is a risk factor for chipping the enamel walls with any localization of the cavity, and with an inclined load even after the defect has been replaced.

KEYWORDS: tooth, cervical cavity, functional stresses, mathematical modeling.

CONFLICT OF INTEREST. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Актуальность

Несмотря на растущее внимание к профилактике стоматологических заболеваний, кариес зубов остается широко распространенным среди населения [1, 2]. Он сопровождается возникновением дефекта в виде полости в зубе, что приводит к изменению биомеханических свойств зуба [3]. Локализация полости может оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние зуба. Полости на окклюзионной поверхности зуба подвержены значительным нагрузкам со стороны зубов-антагонистов в процессе пережевывания пищи; в свою очередь пришеечные полости характеризуются близостью расположения к шейке зуба, где эмаль имеет минимальную толщину. Наличие незамещенных дефектов изменяет биомеханическое состояние тканей зуба при функционировании, повышая риск таких осложнений, как трещины, переломы и сколы [4]. Своевременное восстановление анатомии зуба реставрационными материалами способствует снижению данных рисков и приближению напряженно-деформированного состояния зуба к норме.

Понимание механизмов распределения нагрузок в зубах с окклюзионными и пришеечными незамещенными дефектами важно для качественного и своевременного их восстановления. Актуально исследование напряженно-деформированного состояния зуба при сравнении полостей окклюзионной и пришеечной локализации, с учетом вертикальной и наклонной нагрузки, а также при замещении полостей композитными реставрациями.

Цель исследования: анализ влияния вертикальной и наклонной нагрузки на напряженно-деформированное состояние однокорневого зуба с полостью на окклюзионной или пришеечной поверхности и при замещении дефекта композитным материалом.

Материалы и методы

Проведено трехмерное математическое моделирование витального одноканального премоляра нижней челюсти в альвеолярной лунке. Геометрические параметры модели были заданы на основе анатомических данных. Физико-механические характеристики тканей модели взяты из литературных источников: в частности, модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел прочности на растяжение эмали составляли 81 700 МПа; 0,28; 42,1 МПа, дентина – соответственно 23 300 МПа; 0,31; 104 МПа [5, 6].

Методом конечных элементов получены данные о величинах и характере распределения функциональных напряжений в модели при воздействии 150 Н вертикально и под углом 45° с использованием программы SolidWorks (Dassault Systemes) с возможностью цветного картирования распределения напряжений в моделях с полостью на окклюзионной поверхности, с полостью в пришеечной области, а также при их восстановлении композитным материалом (рис. 1, 2) [7–9].

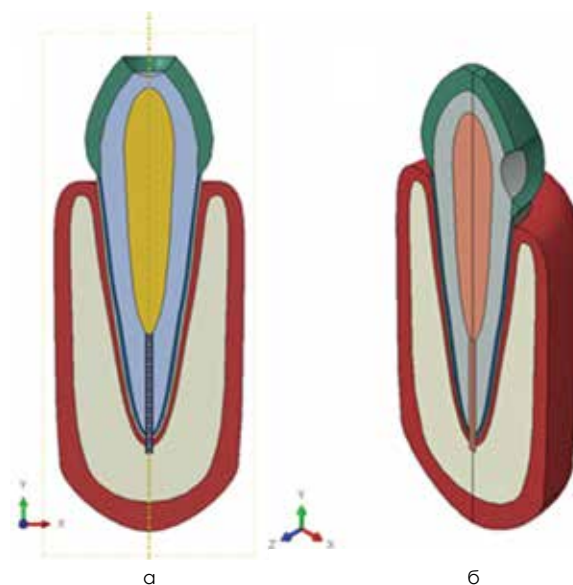


Рисунок 1. Трехмерная математическая модель зуба с окклюзионной (а) и пришеечной (б) полостью

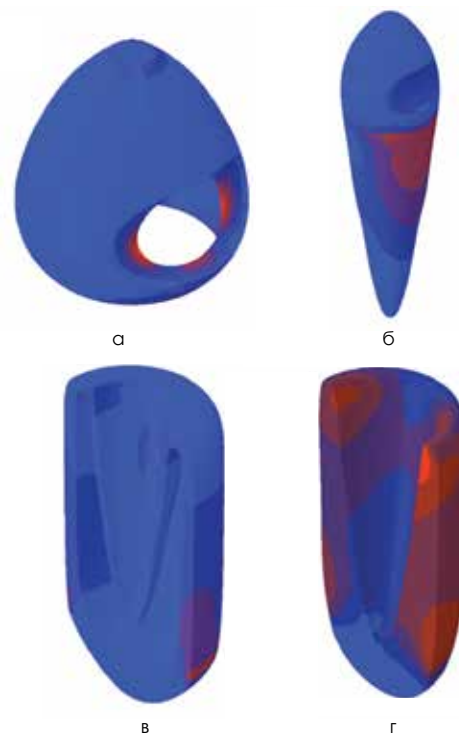


Рисунок 2. Распределение напряжений при наклонной нагрузке зуба с пришеечной полостью: а – эмаль, б – дентин, в – кортикальная кость, д – губчатая кость

Результаты исследования

В результате математического моделирования напряженно-деформированного состояния однокорневого одноканального премоляра нижней челюсти выявлены различия в значениях и распределении напряжений в зависимости от локализации полостей в коронковой части зуба (см. таблицу).

Наличие полости на окклюзионной поверхности при вертикальной нагрузке модели концентрирует напряжения в пришеечной области как в эмали, так и дентине (соответственно 35,531 МПа и 12,299 МПа). В эмали также

Таблица

Максимальные величины напряжений при функциональной нагрузке зуба с незамещенной и замещенной композитом полостью на окклюзионной поверхности или в пришеечной области (МПа)

Объект анализа	Полость, окклюзионная поверхность	Композит, окклюзионная поверхность	Пришеечная полость	Композит, пришеечная полость
Эмаль (в)	34,531	22,196	55,175	29,506
Эмаль (н)	87,520	70,193	151,286	113,201
Дентин (в)	12,299	10,888	8,313	10,337
Дентин (н)	56,278	45,269	51,447	43,927
Кортикальная кость (в)	6,659	6,220	5,674	6,769
Кортикальная кость (н)	27,260	30,026	62,164	62,151
Губчатая кость (в)	1,985	1,399	1,151	1,151
Губчатая кость (н)	4,877	5,003	5,092	5,068

Примечание: (в) – вертикальная нагрузка, (н) – наклонная нагрузка

отмечается зона значительных напряжений по краю полости (23,367 МПа). В кортикальной и губчатой костных тканях максимальные напряжения составляют 6,659 МПа и 1,985 МПа соответственно и концентрируются в области проекции верхушки корня на костную межзубную перегородку. Наклонная нагрузка изменяет как картину распределения напряжений, так и величины максимальных регистрируемых напряжений. Так, эмаль испытывает нагрузку в 87,520 МПа в области шейки зуба (что является превышением предела прочности), а дентин там же – 56,278 МПа. Возрастают величины и в кортикальной кости, концентрируясь в областях шейки и верхушки корня зуба – 27,260 МПа. Губчатая кость испытывает напряжения до 4,877 МПа с максимальными значениями в областях шейки и проекции верхушки корня.

В модели с пришеечной полостью предельные напряжения в эмали регистрируются уже при вертикальной нагрузке и составляют 55,175 МПа, что на 37,4% выше в сравнении с данными, полученными для модели с окклюзионной полостью (напряжение локализуется по нижнему краю дефекта в его нижней половине). При наклонной нагрузке сохраняется та же локализация концентрации напряжений, но величины значительно возрастают, превышая предел прочности эмали и составляя 151,286 МПа (выше на 42,1% в сравнении с окклюзионной полостью). При сравнительном анализе напряжений в дентине наблюдается картина снижения значений в модели с пришеечной полостью, в сравнении с окклюзионной: при вертикальной нагрузке на 32,4% (8,313 МПа) и на 8,6% (51,447 МПа) при наклонной. В кортикальной костной ткани изменение напряжений смешанного характера: снижение на 14,8% при вертикальной нагрузке (5,674 МПа) и значительное увеличение до 62,164 МПа (на 56,1%) при наклонной нагрузке в условиях пришеечной полости. Смешанной является картина и в губчатой костной ткани: снижение напряжений на 42,0% при вертикальной нагрузке (1,151 МПа) и увеличение напряжений на 4,2% при наклонной (5,092 МПа). Зоны концентрации максимальных напряжений в тканях зуба схожи, при сравнении моделей с локализацией полостей на окклюзионной и вестибулярной поверхностях зуба за исключением эмали.

Реставрация полостей изменяла величину максимальных регистрируемых напряжений. Так, при моделировании восстановления окклюзионной полости композитным материалом снижаются напряжения в сравнении с неза-

пломбированной полостью в эмали как при вертикальной (на 35,7%, 22,195 МПа), так и при наклонной (на 19,8%, 70,193 МПа) нагрузках. Тем не менее, при наклонной нагрузке даже наличие реставрации не приводит напряжения в эмали к значениям ниже ее предела прочности. В дентине напряжения снижаются при вертикальной нагрузке на 11,5% и составляют 10,888 МПа, при наклонной – на 19,6% и составляют 45,269 МПа. В кортикальной костной ткани при вертикальной нагрузке регистрируется небольшое снижение напряжений (на 6,6%, 6,220 МПа), а при наклонной – увеличение на 9,2% (30,026 МПа). В губчатой костной ткани при вертикальной нагрузке регистрируется снижение напряжений на 29,5%, (61,399 МПа), а при наклонной – небольшое увеличение на 2,5% (5,003 МПа). Картины напряжений в зубе с окклюзионной полостью и при ее замещении – без явных отличий.

Восстановление композитным материалом пришеечной полости снизило максимальные напряжения в эмали при вертикальной на 46,5% (29,506 МПа) и на 25,2% (113,201 МПа) при наклонной нагрузке, таким образом, при вертикальной нагрузке приведя величины к значениям ниже предела прочности эмали, но сохранив превышение при наклонной нагрузке. При этом в дентине выявлено увеличение значений на 19,6% (10,337 МПа) при вертикальной нагрузке, но снижение при наклонной (на 14,6%, 43,927 МПа). В костной ткани максимальные напряжения остались практически неизменны, за исключением увеличения на 16,2% в кортикальной кости при вертикальной нагрузке, что составило 6,769 МПа. Картина напряжений при реставрации пришеечной полости изменилась только в эмали, нормализовавшись (относительно распределения напряжений в интактном зубе), при этом произошло смещение точек концентрации напряжений на окклюзионную поверхность при вертикальной нагрузке и на шейку зуба при нагрузке под углом.

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии локализации полости на распределение и максимальные величины нагрузок в тканях зуба и окружающей костной ткани альвеолярного отростка. Пришеечная локализация полости значительно увеличивает максимальные напряжения в эмали, приближая их к пороговым значениям даже при вертикальной нагрузке, что говорит о необходимости повышенного внимания к полостям такой локализации в клинической практике и профилактики развития пришеечного кариеса.

Моделирование зуба с незамещенной полостью различной локализации выявило наиболее уязвимые места – края полости – в случаях вертикальной нагрузки зуба с окклюзионным дефектом и обеих видов нагрузок зубов с пришеечной. Предельные концентрации напряжений в эмали в перечисленных условиях дают возможность сделать вывод о повышенной вероятности возникновения сколов стенок незапломбированных полостей.

Интересен факт наблюдения более высоких напряжений в кортикальной костной ткани в моделях с пришеечной полостью в сравнении с моделью с окклюзионной полостью. Тем не менее, несмотря на увеличение напряжений в модели с пришеечной полостью на 56,1%, их величина не превышает предел прочности кортикальной костной ткани и не является риском развития деструктивных процессов.

Замещение дефекта тканей зуба композитным материалом способствует перераспределению нагрузки, снижению максимальных значений в эмали во всех случаях и достижению подпредельных значений при вертикальной нагрузке при замещении пришеечных полостей композитным материалом.

Выводы

1. Локализация полости в зубе влияет на картину распределения напряжений и их величины.
2. В модели с пришеечной полостью, в сравнении с моделью с окклюзионной, значительно увеличены напряжения в эмали, они превышают предел ее прочности как при вертикальной, так и при наклонной нагрузке.
3. Пломбирование дефекта композитным материалом способствует перераспределению напряжений и смещению точек их концентраций со стенок полости на окклюзионную поверхность и шейку зуба.
4. Наклонная нагрузка является фактором риска сколов стенок эмали при любой локализации полости, а при наклонной нагрузке даже после замещения дефекта.

Список литературы / References

1. Терапевтическая стоматология: национальное руководство / О.О. Янушевич, Л.А. Дмитриева, З.Э. Ревазова [и др.]. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2024. – 1024 с. – (Национальные руководства). – ISBN 978-5-9704-8385-5. – DOI 10.33029/9704-8385-5-TD-2024-1-1024. – EDN CLWGFH.

2. Терапевтическая стоматология: национальное руководство в 2 т. / А.Б. Акчулов, Е.Н. Анисимова, Н.Ю. Анисимова [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2022. – 416 с. – (Национальные руководства ; 2). – ISBN 978-5-9704-6367-3. – DOI 10.33029/9704-6367-3-OD2-2022-1-416. – EDN ULMYYK.
3. Orthopedic dentistry : A national guide in 2 volumes / A.V. Akulovich, E.N. Anisimova, N.Y. Anisimova [et al.]. – 2nd ed., revised, and add.. – Moscow : Limited Liability Company Publishing Group GEOTAR-Media, 2022. – 416 p. – (National Guidelines ; 2). – ISBN 978-5-9704-6367-3. – DOI 10.33029/9704-6367-3-OD2-2022-1-416. – EDN ULMYYK.
4. Факторы риска появления трещин и переломов зубов (по данным анкетирования врачей-стоматологов) / Э.А. Олесова, А.А. Ильин, С.Д. Арутюнов [и др.] // Российский стоматологический журнал. – 2024. – Т. 28, № 5. – С. 462–468. – DOI 10.17816/dent634253. – EDN HVIETH.
5. The influence of biomechanical stress factors on the stress-strain state of the tooth and underlying bone tissue / E.A. Olesova, A.A. Ilyin, A.V.Em [et al.] // Russian Dental Journal. – 2024. – Vol. 28, No. 5. – pp. 462–468. – DOI 10.17816/dent634253. – EDN HVIETH.
6. Факторы риска появления трещин и переломов зубов (по данным анкетирования врачей-стоматологов) / Э.А. Олесова, А.А. Ильин, С.Д. Арутюнов [и др.] // Российский стоматологический журнал. – 2024. – Т. 28, № 6. – С. 562–568. – DOI 10.17816/dent634360. – EDN HFEFPX.
7. Risk factors for cracks and fractures of teeth (according to a survey of dentists) / E.A. Olesova, A.A. Ilyin, S.D. Arutyunov [et al.] // Russian Dental Journal. – 2024. – vol. 28, No. 6. – pp. 562–568. – DOI 10.17816/dent634360. – EDN HFEFPX.
8. O'Brien W.J. Physical properties in dental materials and their selection // Illinois: Quintessence Publishing Co. – 1997.
9. Муслов С.А. Механические свойства зуба и околозубных тканей / С.А. Муслов, С.Д. Арутюнов. – Москва : издательский дом «Практическая медицина», 2020. – 256 с. – ISBN 978-5-98811-617-2. – EDN ITZXLG.
10. Muslov S.A. Mechanical properties of tooth and dental tissues / S.A. Muslov, S.D. Arutyunov. Moscow : Practical medicine publishing house, 2020. 256 p. ISBN 978-5-98811-617-2. EDN ITZXLG.
11. Экспериментальное моделирование функциональной нагрузки нижней челюсти при протезировании с опорой на имплантаты в неблагоприятных клинических условиях / Р.А. Розов, В.Н. Трезубов, Р.Ш. Гветадзе [и др.] // Стоматология. – 2022. – Т. 101, № 6. – С. 28–34. – DOI 10.17116/stomat202210106128. – EDN KKPPHB.
12. Experimental modeling of the functional load of the lower jaw during implant-supported prosthetics in adverse clinical conditions / R.A. Rozov, V.N. Trezubov, R.Sh. Gvetadze [et al.] // Dentistry. – 2022. – Vol. 101, No. 6. – pp. 28–34. – DOI 10.17116/stomat202210106128. – EDN KKPPHB.
13. Трехмерное математическое моделирование функциональных напряжений вокруг дентального имплантата в сравнении с однокорневым зубом / Р.С. Заславский, В.Н. Олесова, Ю.А. Повстанко [и др.] // Российский вестник дентальной имплантологии. – 2022. – № 3–4(57–58). – С. 4–10. – EDN JHRTIG.
14. Three-dimensional mathematical modeling of functional stresses around a dental implant in comparison with a single-root tooth / R.S. Zaslavsky, V.N. Olesova, Yu.A. Povstyanko [et al.] // Russian Bulletin of Dental Implantology. – 2022. – № 3–4(57–58). – Pp. 4–10. – EDN JHRTIG.
15. Напряженно-деформированное состояние несъемного протеза на имплантатах при жевательной нагрузке в зависимости от угла наклона стенок абатмента / С.И. Абакаров, Д.В. Сорокин, В.Ю. Лапушко, С.С. Абакарова // Клиническая стоматология. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 147–157. – DOI 10.37988/1811-153X_2023_1_147. – EDN KBFJYD.
16. The stress-strain state of a non-removable prosthesis on implants during chewing load, depending on the angle of inclination of the walls of the abutment / S.I. Abakarov, D.V. Sorokin, V.Yu. Lapushko, S.S. Abakarova // Clinical dentistry. – 2023. – Vol. 26, No. 1. – pp. 147–157. – DOI 10.37988/1811-153X_2023_1_147. – EDN KBFJYD.

Статья поступила / Received 13.03.2025

Получена после рецензирования / Revised 20.03.2025

Принята в печать / Accepted 20.03.2025

Информация об авторах

Олесова Эмилия Артемовна – соискатель кафедры стоматологии
E-mail: emma.olesova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4511-6317>.
eLibrary SPIN: 5767-9158

Некрасова Екатерина Андреевна – ассистент кафедры стоматологии
E-mail: ekaterina233@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-0575>.
SPIN-код: 4291-2151

Олесов Егор Евгеньевич – д.м.н., профессор, заведующий кафедрой клинической стоматологии и имплантологии
E-mail: olesov_georgiy@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9165-2554>

Медико-биологический университет инноваций и непрерывного образования
ФГБУ «ГНЦ РФ – Федеральный медицинский биофизический центр
им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, г. Москва, Российская Федерация

Контактная информация:

Олесова Эмилия Артемовна, E-mail: emma.olesova@mail.ru

Author information

Olesova Emilia Artemovna – Candidate for the Department of Dentistry
E-mail: emma.olesova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4511-6317>.
eLibrary SPIN: 5767-9158

Ekaterina Andreevna Nekrasova – Assistant Professor at the Department of Dentistry
E-mail: ekaterina233@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-0575>.
SPIN-код: 4291-2151

Olesov Egor Evgenievich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Clinical Dentistry and Implantology
E-mail: olesov_georgiy@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9165-2554>

Biomedical University of Innovation and Continuing Education of State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Biological Agency, Moscow, Russian Federation

Contact information

E-mail: emma.olesova@mail.ru

Для цитирования: Олесова Э.А., Некрасова Е.А., Олесов Е.Е. Влияние локализации кариозной полости на напряженно-деформированное состояние зуба // Медицинский алфавит. 2025;(10):70–73. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-10-70-73>

For citation: Olesova E.A., Nekrasova E.A., Olesov E.E. The influence of the cervical cavity on the stress-strain state of the tooth // Medical alphabet. 2025;(10):70–73. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-10-70-73>

