

Минеральный состав эмали, дентина, цемента и физико-химические закономерности при возникновении заболеваний твердых тканей зубов на примере палеоодонтологического материала X-XX веков

Ю.А. Домбровская¹, О.Н. Кравец¹, А.В. Николаева¹, М.И. Котов¹,
В.И. Домбровская², К.А. Бенкен³, А.В. Силин¹

¹Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Состав макро- и микроэлементов твердых тканей зубов варьируется и зависит от множества экзогенных и эндогенных факторов. В исследовании приведены данные об изменении статистически значимых параметров при различных стоматологических заболеваниях. С помощью растровой электронной микроскопии проведен анализ эмали, дентина и цемента людей с X по XXI век. Целями явились анализ и сравнение морфологии и минерального состава эмали, дентина и цемента древних и современных зубов. **Материалы и методы.** С помощью растрового настольного электронного микроскопа-микроанализатора ТМ 3000 (Hitachi, Япония) был проведен анализ микроэлементного состава поверхностного, среднего и глубокого слоев эмали, дентина и цемента зубов. **Результаты.** Коллекция зубов, собранная с X по XXI века, показала постоянство Са/Р коэффициента и значительную вариабельность концентраций по микроэлементному составу. **Заключение.** Учитывая принципиальные различия характера питания, образа жизни, гигиенических привычек, полученные данные за одиннадцать веков открывают новые возможности в стратегиях профилактики заболеваний твердых тканей зубов.

Ключевые слова: эмаль, дентин, цемент, микроэлементы, зубы

Для цитирования: Домбровская ЮА, Кравец ОН, Николаева АВ, Котов МИ, Домбровская ВИ, Бенкен КА, Силин АВ. Минеральный состав эмали, дентина, цемента и физико-химические закономерности при возникновении заболеваний твердых тканей зубов на примере палеоодонтологического материала X-XX веков. *Пародонтология*. 2025;30(3):000-000. <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2025-1137>

***Автор, ответственный за связь с редакцией:** Домбровская Юлия Андреевна, кафедра стоматологии общей практики, научно-исследовательская лаборатория клеточных технологий Северо-Западного государственного медицинского университета имени И. И. Мечникова, 191015, ул. Кирочная, д. 41, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. Для переписки: Yuliya.Dombrovskay@szgmu.ru

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-25-00084.

Благодарности: Индивидуальные благодарности для декларирования отсутствуют.

Mineral composition of enamel, dentin, and cementum and physicochemical patterns in dental hard-tissue disease: evidence from paleodontological material (10th–20th centuries)

Yu.A. Dombrovskaya¹, O.N. Kravets¹, A.V. Nikolaeva¹, M.I. Kotov¹,
V.I. Dombrovskaya², K.A. Benken³, A.V. Silin¹

¹North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

³Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. The major- and trace-element composition of dental hard tissues varies with multiple exogenous and endogenous factors. This study reports statistically significant parameter shifts associated with different dental diseases. Using scanning electron microscopy, enamel, dentin, and cementum samples from individuals spanning the 10th to the 21st centuries were examined. The study aimed to analyze and compare the morphology and mineral composition of enamel, dentin, and cementum in ancient and modern teeth. **Materials and methods.** The trace-element composition of the surface, middle, and deep layers of enamel, dentin, and cementum was assessed using a tabletop scanning electron microscope equipped with an X-ray microanalyzer (TM3000, Hitachi, Japan). **Results.** Analysis of the tooth collection dating to the 10th–21st centuries showed a stable Ca/P ratio with substantial variability in trace-element concentrations. **Conclusion.** Given profound differences in diet, lifestyle, and oral-hygiene practices over the past eleven centuries, these findings can inform strategies for the prevention of dental hard-tissue disease.

Key words: enamel, dentin, cement, microelements, teeth

For citation: Dombrovskaya Yu.A., Kravets O.N., Nikolaeva A.V., Kotov M.I., Dombrovskaya V.I., Benken K.A., Silin A.V. Mineral composition of enamel, dentin, and cementum and physicochemical patterns in dental hard-tissue disease: evidence from paleodontological material (10th–20th centuries). *Parodontologiya*. 2025;30(3):000-000. (In Russ.). <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2025-1137>

***Corresponding author:** Yulia A. Dombrovskaya, Department of the General Practice Dentistry, Scientific Research Laboratory of Cellular Technologies North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, 41 Kirochnaya Str., Saint Petersburg, Russian Federation, 191015. For correspondence: Yuliya.Dombrovskay@szgmu.ru

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interests

Funding: This study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-25-00084)

Acknowledgments: There are no individual acknowledgments to declare.

ВВЕДЕНИЕ

Ткани зуба являются хранилищем информации о внешней среде. Имея хорошую сохранность, они аккумулируют микро- и макроэлементы, отражая пищевые, гигиенические и бытовые привычки людей. Одонтологический материал, обладая набором одонтоглифических параметров, является предметом археологического исследования, представляя собой пласт информации о конкретной эпохе [4].

В то же время зуб имеет достаточно постоянный химический состав, который начинает формироваться в эмбриогенезе в конце пятого месяца внутриутробного развития. Образование твердых тканей зуба происходит на конечных этапах стадии «колокольчика» с дифференцировки периферических клеток зубного сосочка, превращающихся в одонтобласты, продуцирующие дентин. Отложение первых слоев дентина индуцирует дифференцировку внутренних клеток эмалевого органа в секреторно-активные энамелобласты, начинающие продуцировать эмаль. Исходя из этого следует, что микроэлементный состав дентина формируется под воздействием генетических и других факторов, из гематогенно поступающих микроэлементов, создающих микроокружение в зачатках зубов [1].

Минерализация белковой матрицы тканей зуба неразрывно связана с ультраструктурными особенно-

стями эмали и дентина, анализ которых может быть использован для клинического прогнозирования восприимчивости к будущему развитию кариеса и некариозных поражений на основе индивидуальных биомаркеров пациента. Некоторые микроэлементы могут изоморфно входить в кристаллическую структуру апатита в поверхностных слоях эмали, для которой характерны многочисленные изовалентные и гетеровалентные замещения [1]. Также известно, что количество призм в эмали на квадратный миллиметр и среднее расстояние между ними влияют на развитие кариеса и некариозных поражений через вариации генов, участвующих в развитии эмали. Анатомическое и гистологическое строение дентина изучено достаточно, вместе с тем важность таких факторов, как этническое происхождение, окружающая среда, диета и т. д., обычно не учитывается при изучении фунгулкции зубов [2].

Концепция персонализированной профилактики стоматологических заболеваний широко освещается в работах национальных институтов здоровья и Всемирной организации здравоохранения. Она учитывает генетические, биохимические и другие факторы риска [3, 11].

Значительный вклад в состояние эмали и дентина после прорезывания вносит соотношение макро- и микроэлементов, связанное с совокупностью эндогенных и экзогенных факторов: биохимических процессов ре- и деминерализации в эмали зубов, из-

менений состава ротовой жидкости и микрофлоры полости рта, генетической предрасположенности, сопутствующих соматических заболеваний, особенностей диеты, условий окружающей среды, профессиональных вредностей, понимание роли которых может усовершенствовать имеющиеся знания об этиотропной и патогенетической профилактике основных заболеваний твердых тканей зубов [4].

Роль каждого химического элемента, входящего в состав эмали и дентина, сложна и требует дополнительного тщательного изучения. Широко известна роль кальция и фосфора в процессах реминерализации твердых тканей зуба [5]. Подавляющее большинство атомов такого макроэлемента, как сера, поступает в организм с пищей и находится в тканях в составе аминокислот. Многие соединения данного элемента имеют свою физиологическую роль, в частности, меркаптаны составляют основу антиоксидантной системы. По своей сути сера – это типичный органоген, так как любой метаболический ферментативный процесс сопровождается действием белков с серосодержащими аминокислотами [6]. Физиологическая роль данного химического элемента также заключается в сумме функций метионина, цистеина, тиамина, биотина, тиоктовой кислоты и продуктов их дальнейшего метаболизма. Фактически все эти вещества являются метаболически независимыми и не могут считаться депо серы как биоэлемента, как, например, в случае железа, которое может поступать из ферритина через трансферрин в цитохром, гемоглобин, каталазу или негемовые соединения, причем этот переход включает в себя реакции как окисления, так и восстановления железа, что невозможно для серы [6].

Натрий и молибден обладают синергическим действием с фтором и кальцием, усиливая их реминерализующие свойства. Молибден ингибирует ферментативную активность *Streptococcus mutans*, обладая противокариозными свойствами, а также, входя в состав ксантиноксидазы, участвует в метаболическом обмене коллагенового матрикса [7].

Уменьшение количества хлора на поверхностях зубов может быть благоприятным фактором в улучшении адгезии микроорганизмов и формирования биопленки [8].

Широкий спектр химических элементов эмали, дентина и цемента отражает влияние окружающей среды на организм человека. Например, в качестве внутреннего и внешнего фактора можно назвать состав употребляемой воды и соли [4]. Наиболее значимым внешним фактором, оказывающим влияние на уровень содержания таких элементов, как V, Mn, Fe, La, Ce, Nd, Dy, Yb, Th и U в зубах современного человека является загрязнение окружающей среды в индустриальную эпоху нашей цивилизации. С другой стороны, археологические образцы эмали, показывающие концентрации одного или нескольких из следующих элементов: V, Mn, Fe, редкоземельных

элементов (Sc, Y и элементы La–Lu (лантаноиды)), Th и/или U, выше расчётных, указывают на изменение их состава в течение посмертного периода.

Показательным примером влияния вышеперечисленных аспектов на минеральный состав твердых тканей являются зубы населения, проживающего в условиях арктической зоны России, характеризующейся суровыми климатическими условиями – коротким летом и продолжительной зимой. Природные факторы делают невозможным занятие земледелием и огородничеством, отмечается неравномерное пространственное и сезонное распределение пищевых ресурсов.

Несмотря на публикации по истории и этнографии коренных малых народов Севера (КМНС) сведения об их питании представлены лишь в кратком виде. Для их рациона характерно преобладание рыбной пищи, которая употреблялась в полусыром или сыром виде, особенно зимой, и в виде рыбной муки, употребление кедровых орехов и ягод, а также отсутствие в рационе продуктов из пшеничной муки. Мясо домашнего и дикого северного оленя часто употребляли в качестве ритуальной пищи при погребении [9], для питья использовалась вода из природных источников. Современные КМНС ведут полукочевой образ жизни, занимаясь рыболовством, охотой, собирательством и оленеводством. Важным моментом при разработке рекомендаций по питанию является оценка повышенного содержания солей тяжелых металлов и токсинов в морской рыбе, употребляемым данным контингентом. Также развитию заболеваний способствуют особенности природного и геохимического фона: речные воды Севера содержат низкие концентрации фтора, что способствует высокой распространенности кариеса зубов [10].

Актуальным является изучение химического состава эмали, дентина и цемента, знание которого может способствовать разработке стратегий профилактики заболеваний твердых тканей зубов.

Целью исследования явился сравнительный анализ микроструктурного и минерального состава эмали, дентина, цемента интактных древних и современных зубов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Археологический одонтологический материал в количестве 120 зубов (с X по XIX век), обнаруженных при проведении раскопок в Северо-Западном регионе Сибири, был предоставлен Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Института проблем освоения Севера Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. Зубы были условно отнесены к группе древних, характерной особенностью которой является отсутствие данных об использовании зубных паст и проведении программ профилактики заболеваний

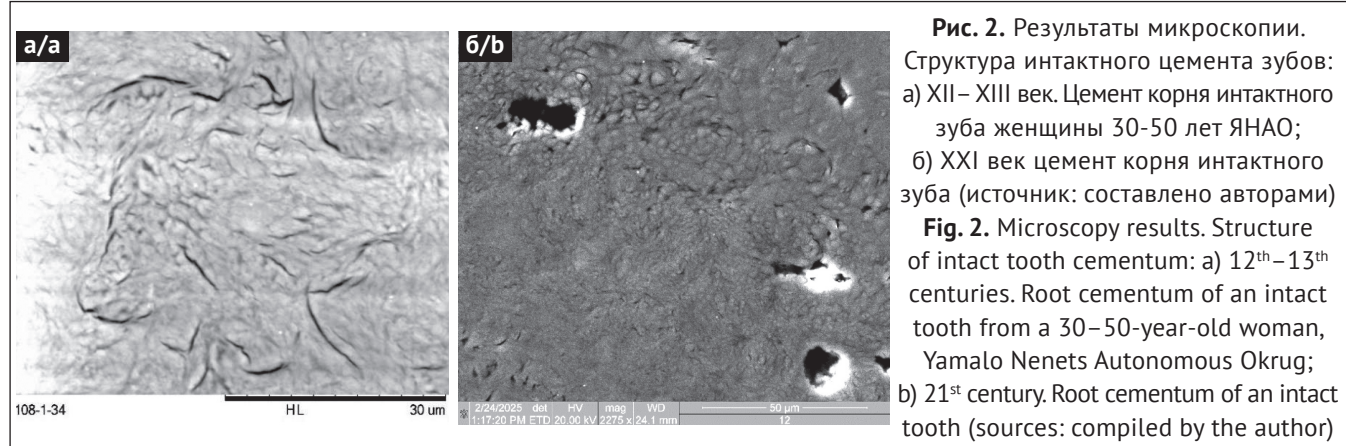
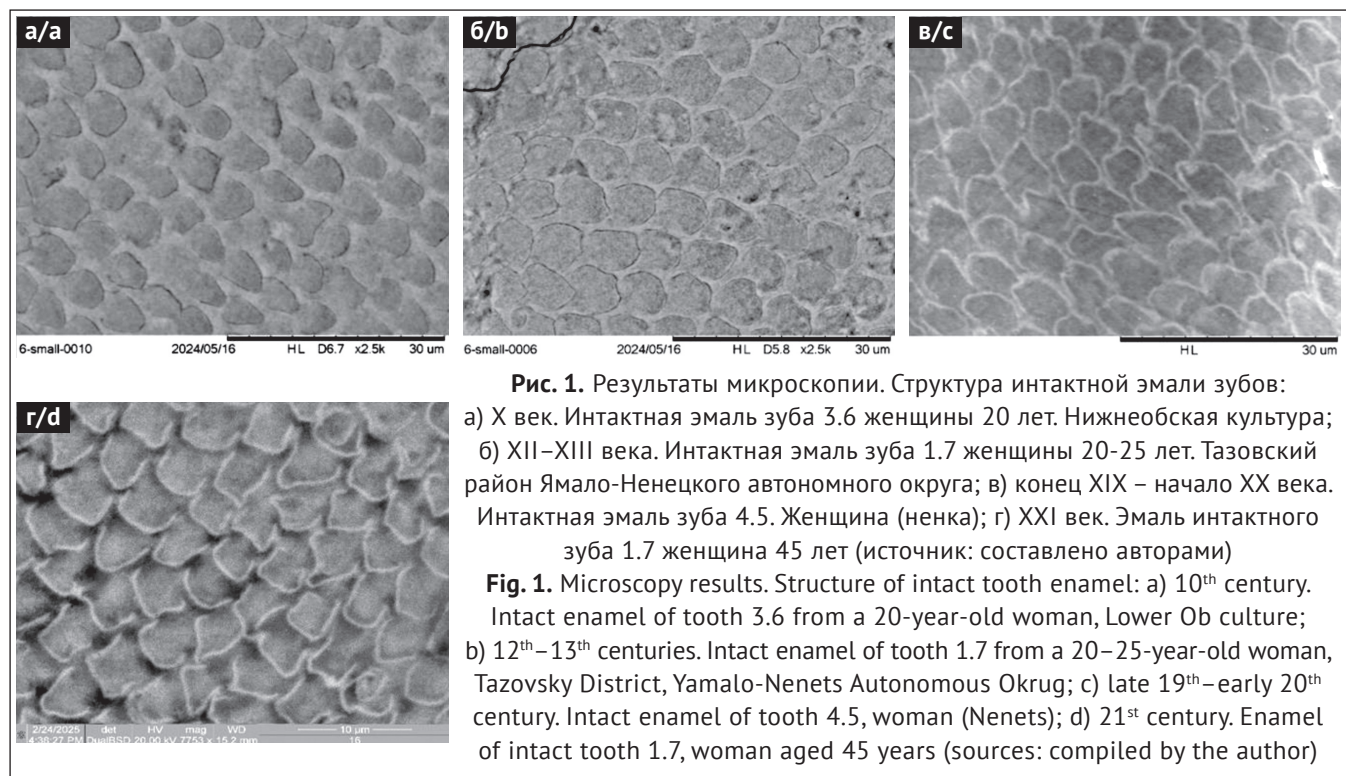
твердых тканей зубов. Данная группа сравнивалась с зубами людей X–XXI веков, удаленными по хирургическим, пародонтологическим и ортодонтическим показаниям, в количестве 120 штук.

С помощью растрового настольного электронного микроскопа-микроанализатора ТМ 3000 (Hitachi, Япония) был проведен анализ микроэлементного состава поверхностного, среднего и глубокого слоев эмали, дентина и цемента зубов.

Для оценки морфологии твердых тканей зубов и микроэлементного состава проводилась пробоподготовка образцов: механическая очистка и фотографирование использовали конфокальный лазерный микроскоп Leica TCS SPE (Leica, Германия) и систему со сфокусированными электронным и ионным зондами QUANTA 200 3D (FIA, Нидерланды), на базе которой смонтирован аналитический комплекс Pegasus 4000 (EDAX, США). Заливка образцов в эпоксидную смолу, получение полированных поверхностей в разных плоскостях образцов с помощью

шлифовально-полировального станка LaboPol-30 (Struers A/S, Дания), напыление образцов углеродом с помощью высоковакуумного напылителя для сканирующей микроскопии Q150T E – микроскоп Quanta 3D DualBeam®, представляющий собой комбинацию двух систем: растрового электронного микроскопа, дающего изображения разнообразных образцов в цифровой форме, и фокусированного ионного пучка, способного быстро и прецизионно удалить слой материала образца, обнажить структуры под поверхностным слоем, создать сечение, осадить слой материала.

Полученные данные были обработаны с помощью статистической программы GraphPad Prism 8 Statistics Guide и программы Excel. Рассчитаны средние значения, а также доверительные интервалы с общепринятыми для медицинских исследований уровнем достоверности $p < 0,05$. Сравнительный анализ среди различных образцов был проведен с использованием t-критерия Стьюдента.



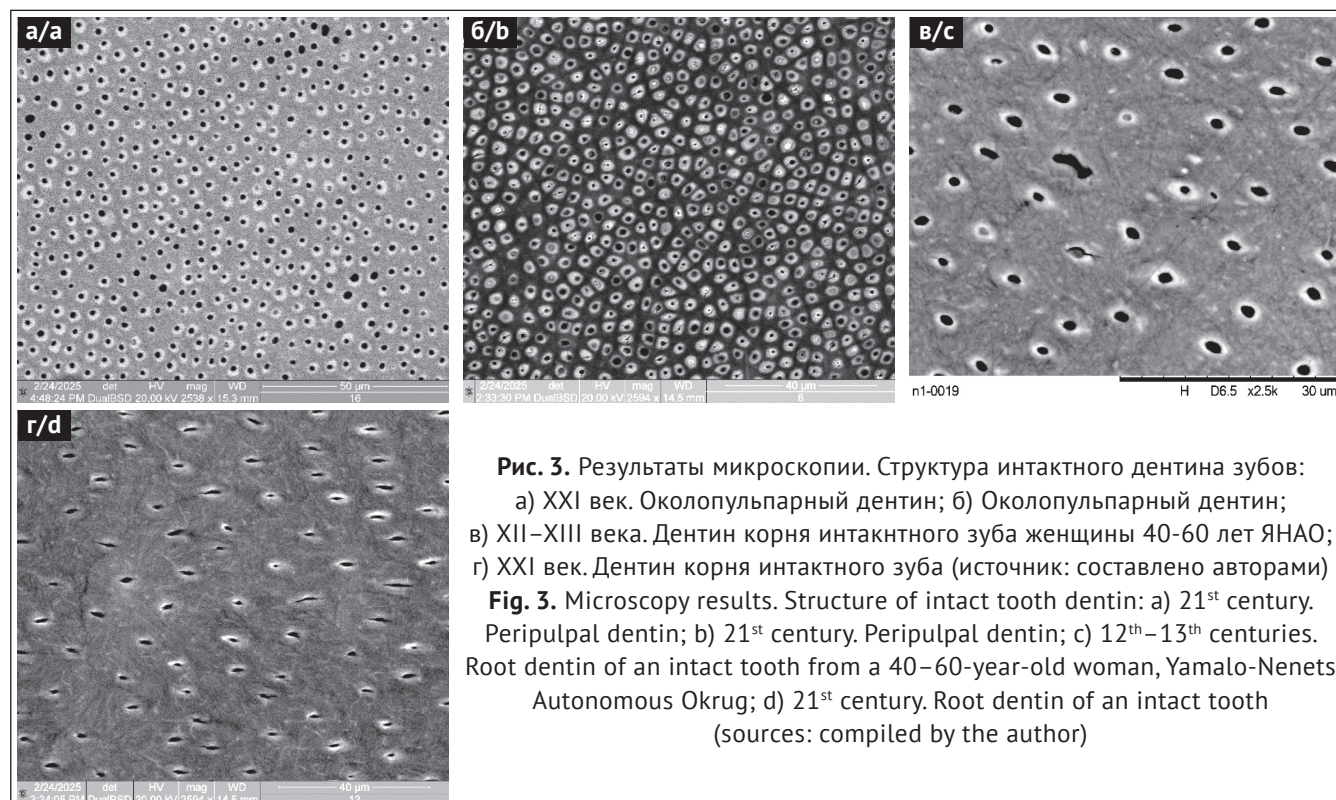


Рис. 3. Результаты микроскопии. Структура интактного дентина зубов: а) XXI век. Околопульпарный дентин; б) Околопульпарный дентин; в) XII–XIII века. Дентин корня интактного зуба женщины 40–60 лет ЯНАО; г) XXI век. Дентин корня интактного зуба (источник: составлено авторами)

Fig. 3. Microscopy results. Structure of intact tooth dentin: a) 21st century. Periapical dentin; b) 21st century. Periapical dentin; c) 12th–13th centuries. Root dentin of an intact tooth from a 40–60-year-old woman, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug; d) 21st century. Root dentin of an intact tooth (sources: compiled by the author)

РЕЗУЛЬТАТЫ

При изучении структуры твердых тканей зубов людей X–XXI веков под микроскопом было обнаружено абсолютное сходство организации тканей и отсутствие каких-либо выраженных отличительных особенностей. На рисунке 1 представлены микрофотографии на увеличении в 2,5 тысячи раз, наглядно демонстрирующие упорядоченное расположение эмалевых призм в эмали интактных зубов. Бесклеточный цемент корней зубов древних людей и современного человека также имеет схожее строение. На рисунке 2 наблюдается его исчерченность вследствие плотно расположенных коллагеновых волокон и основного вещества. Рисунок 3 отображает строение дентина, который пронизан дентинными трубочками, радиально расположенными от пульпы к эмалево-дентинной границе. Диаметр трубочек увеличивается от пульпы к периферии дентина.

В изучаемых образцах обеих групп выявлено наличие 45 элементов периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева. 34 их них показали статистически достоверные изменения. После проведенного микроанализа всей толщи эмали, дентина и цемента выявлены различия ($p < 0.05$) между средними значениями элементов. В таблице 1 отражены различия между микроэлементным составом древних (X–XIX вв.) и современных (XX–XXI вв.) зубов. При этом соотношение макроэлементов между собой стабильно в течение веков, как, например, Ca/P коэффициент.

Эмаль имеет более выраженные отличия по элементному составу, так как подвергается влиянию экзогенных факторов. Было выявлено, что уровень кальция

в современных и древних зубах сопоставим. Среднее содержание атомов хлора в современных образцах превышало таковое в древних в 2,1 раза, хрома – в 3,4 раза, йода – в 1,9 раза, магния – 2,4 раза, молибдена – в 1,7 раза, платины – в 17,5 раза, серебра – в 3 раза, натрия – в 1,7 раза, стронция – в 1,2 раза.

Анализ состава слоев дентина выявил вариабельность концентраций двенадцати видов микроэлементов, представленных в таблицах 3 и 4.

В древних зубах количество атомов алюминия превышает в 4,5 раза значение у современных зубов, также имеются атомы бария, калия и вольфрама. Содержание атомов железа в древних зубах в 59,2 раза выше по сравнению с современными зубами, серы – примерно в 76 раз, а кремния – в 8,8 раз. В современных образцах, в свою очередь, было выявлено превышение количества ртути в 13,8 раз, молибдена – в 7,9 раз, рублидия – в 5,7 раз, натрия – в 1,5 раза, а стронция – в 3,1 раза по сравнению с древними образцами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ввиду того что КМНС находятся под влиянием экстремальных факторов российской части Крайнего Севера, генетических особенностей, социальных, эпидемиологических, санитарно-гигиенических факторов важно учитывать гигиенические аспекты питания. К примеру, пищевая экологическая цепь лишайник – северный олень – человек приводит к увеличению в костной ткани оленеводов радиоактивного стронция, превышая норму в 10–100 раз, по сравнению с жителями умеренных широт. Исходя из данных фактов, возникает важность повышения уровня антиоксидантов

Таблица 1. Результаты сравнения содержания микроэлементов в поверхностном слое эмали зубов древних и современных образцов (источник: составлено авторами)**Table 1.** Comparison of trace element concentrations in the surface enamel layer of ancient and modern teeth (Sources: compiled by the author)

Элемент Element	t-значение t-value	p-значение p-value	Среднее (древние зубы) Mean (ancient teeth)	Среднее (современные зубы) Mean (modern teeth)
Chlorine	-3.360	0.0019	0.1938	0.2892
Mercury	-4.141	0.0005	0.0134	0.0773
Molybdenum	-2.355	0.0355	0.0048	0.0563
Zirconium	-3.784	0.0009	0.0949	0.3122

Таблица 2. Результаты сравнения содержания микроэлементов в средних и глубоких слоях эмали зубов древних и современных образцов (источник: составлено авторами)**Table 2.** Comparison of trace element concentrations in the middle and deep enamel layers of ancient and modern teeth (Sources: compiled by the author)

Элемент Element	t-значение t-value	p-значение p-value	Среднее (древние зубы) Mean (ancient teeth)	Среднее (современные зубы) Mean (modern teeth)
Carbon	3.577	0.0006	20.6846	13.8170
Chlorine	-2.198	0.0321	0.1568	0.1890
Chromium	-2.285	0.0282	0.0065	0.0225
Cobalt	-2.569	0.0145	0.0113	0.0346
Fluorine	-3.312	0.0021	0.2057	0.6801
Gold	-3.570	0.0010	0.0253	0.0755
Iodine	-2.332	0.0246	0.0382	0.0710
Magnesium	-2.607	0.0127	0.1670	0.2357
Mercury	-2.207	0.0319	0.0496	0.0777
Molybdenum	-3.092	0.0037	0.0353	0.0862
Oxygen	-3.172	0.0028	47.0040	53.7376
Phosphorus	-2.149	0.0375	11.7287	12.7918
Platinum	-2.126	0.0405	0.0066	0.0408
Silicon	-2.388	0.0211	0.0753	0.1208
Sodium	-3.300	0.0020	0.4700	0.6123
Strontium	-2.681	0.0097	0.4484	0.5178
Technetium	-2.095	0.0419	0.0197	0.0445

Таблица 3. Результаты сравнения содержания микроэлементов в поверхностном слое дентина зубов древних и современных образцов (источник: составлено авторами)**Table 3.** Comparison of trace element concentrations in the surface dentin layer of ancient and modern teeth (Sources: compiled by the author)

Элемент Element	t-значение t-value	p-значение p-value	Среднее (древние зубы) Mean (ancient teeth)	Среднее (современные зубы) Mean (modern teeth)
Chlorine	-5.996	0.0003	0.0132	0.1703
Magnesium	-5.870	0.0000	0.1724	0.4614
Mercury	-2.809	0.0151	0.0244	0.0700
Sodium	-5.315	0.0002	0.2217	0.5413
Zirconium	-3.178	0.0051	0.1775	0.3485

Примечание. В таблицах представлены микроэлементы, показавшие статистически значимые различия ($p < 0,05$) в содержании между древними и современными образцами цемента зубов. Использован двусторонний t-критерий Стьюдента для независимых выборок при неравных дисперсиях.

Note. Trace elements showing statistically significant differences ($p < 0.05$) in concentration between ancient and modern tooth cementum samples are presented. A two-tailed Student's t-test for independent samples with unequal variances was applied.



Таблица 4. Результаты сравнения содержания микроэлементов в средних и глубоких слоях дентина зубов древних и современных образцов (источник: составлено авторами)

Table 4. Comparison of trace element concentrations in the middle and deep dentin layers of ancient and modern teeth (Sources: compiled by the author)

Элемент Element	t-значение t-value	p-значение p-value	Среднее (древние зубы) Mean (ancient teeth)	Среднее (современные зубы) Mean (modern teeth)
Aluminum	2.509	0.0130	0.2309	0.0153
Barium	3.657	0.0003	0.2158	0.0000
Calcium	-3.267	0.0027	12.5766	15.1171
Carbon	3.193	0.0034	30.3575	19.7513
Fluorine	-3.806	0.0008	0.1875	0.8233
Gold	-3.205	0.0036	0.0195	0.0625
Iodine	-3.285	0.0029	0.0212	0.0637
Magnesium	-6.570	0.0000	0.3228	0.6580
Mercury	-2.690	0.0120	0.0298	0.0610
Molybdenum	-2.072	0.0483	0.0484	0.0984
Oxygen	-3.648	0.0010	44.2610	54.8975
Phosphorus	-3.441	0.0018	8.4792	10.3515
Selenium	-2.130	0.0439	0.0029	0.0183
Silicon	2.750	0.0065	0.4943	0.1238
Silver	-3.349	0.0025	0.0051	0.0251
Sodium	-3.361	0.0015	0.3348	0.5544
Strontium	-4.238	0.0001	0.2769	0.4271
Sulfur	2.404	0.0174	0.2594	0.1053
Tin	-2.856	0.0066	0.0513	0.0922
Tungsten	3.182	0.0017	0.0165	0.0023
Vanadium	-2.211	0.0358	0.0055	0.0164
Zirconium	-3.198	0.0036	0.1831	0.3653

Таблица 5. Результаты сравнения содержания микроэлементов в средних и глубоких слоях цемента зубов древних и современных образцов (источник: составлено авторами)

Table 5. Comparison of trace element concentrations in the middle and deep cementum layers of ancient and modern teeth (Sources: compiled by the author)

Элемент Element	t-значение t-value	p-значение p-value	Среднее (древние зубы) Mean (ancient teeth)	Среднее (современные зубы) Mean (modern teeth)
Bromine	2.422	0.0185	0.0101	0.0000
Calcium	-2.820	0.0135	10.5340	13.9599
Carbon	2.732	0.0162	38.5361	22.0316
Chlorine	-4.317	0.0011	0.0397	0.3084
Magnesium	-2.332	0.0378	0.1248	0.3600
Mercury	-2.639	0.0206	0.0379	0.0978
Oxygen	-2.660	0.0173	39.7561	50.4817
Phosphorus	-2.653	0.0187	7.1494	9.3718
Sodium	-6.965	0.0000	0.1706	0.7289

Примечание. В таблицах представлены микроэлементы, показавшие статистически значимые различия ($p < 0,05$) в содержании между древними и современными образцами цемента зубов. Использован двусторонний t-критерий Стьюдента для независимых выборок при неравных дисперсиях.

Note. Trace elements showing statistically significant differences ($p < 0.05$) in concentration between ancient and modern tooth cementum samples are presented. A two-tailed Student's t-test for independent samples with unequal variances was applied.

в организме с помощью пищевых добавок, содержащих флавоноиды, подавляющие процессы перекисного окисления липидов, и увеличения содержания в рационе солей кальция, элиминации радиоактивного стронция из костей [10].

Несмотря на все вышеизложенные факты, минеральный состав эмали, дентина и цемента, в отличие от широкого диапазона колебаний содержания макро- и микроэлементов в костной и других тканях, остается достаточно стабильным на протяжении столетий [4].

Для первичной профилактики необходимо воздействие комплекса мер, учитывающих наличие выявленных 12 элементов и их количества. В силу анатомического строения зуба, глубокие слои дентина подвергаются, главным образом, влиянию эндогенных факторов: гематогенному и лимфогенному. Невзирая на различия в количествах тех или иных элементов формируется дентина, обеспечивающий нормальное функционирование зуба. Поверхностные слои эмали подвергаются воздействию экзогенных факторов, поэтому минеральный состав богат разнообразием элементов, поступающих из пищи и средств гигиены. Таким образом, для первичной, вторичной и третичной профилактики необходимо воздействие комплекса как внутренних, так и внешних аспектов. С точки зрения геологии одна тысяча лет слишком маленький срок для изменения состава воды из природных источников. Поэтому мы рассматриваем тот факт, что древние

и современные люди употребляют воду с одинаковым составом. Вместе с тем, использование современных фильтров для очистки воды вносят изменения в концентрации содержания элементов. Таким образом, установлены значимые изменения количества микро- и макроэлементов в глубоких слоях эмали и дентина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные тенденции изменений минерального состава эмали, дентина и цемента корня зубов в течение более чем одной тысячи лет указывают стереотипность сдвигов в средних и глубоких слоях дентина, который находится в большей мере под влиянием эндогенных факторов.

Изменение микроэлементного состава твердых тканей зубов ведет к изменению макро- и микроструктуры всех слоев эмали, дентина и цемента, что, безусловно, должно учитываться при лечении различных патологий, а также в разработке всех уровней профилактики.

Коллекция зубов, собранная с X по XXI века, показала постоянство Ca/P коэффициента и значительную вариабельность концентраций по микроэлементному составу. Учитывая принципиальные различия характера питания, образа жизни, гигиенических привычек, полученные данные за одиннадцать веков открывают новые возможности в стратегиях профилактики заболеваний твердых тканей зубов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмина ДА, Пихур ОЛ, Новикова ВП. Костный метаболизм, химический и минеральный состав твердых тканей зубов пациентов с заболеваниями тканей пародонта. *Пародонтология*. 2012;17(1(62)):11-15. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17424679>
2. Силин АВ, Сатыго ЕА, Марьянович АТ. Эмаль и дентин зубов человека. Усталостная прочность. *Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И. И. Мечникова*. 2023;15(4):19-29. <https://doi.org/10.17816/mechnikov624120>
3. Lussi A, Carvalho TS, Ganss C, et al. Personalized preventive measures for dental erosion. *Monographs in Oral Science*. 2020;28:170-180. <https://doi.org/10.1159/000455379>
4. Домбровская ЮА, Кравец ОН, Николаева АВ, Котов МИ, Домбровская ВИ, Бенкен КА, и др. Эволюционные тенденции изменения микроэлементного состава эмали, поверхностных слоев дентина, цемента зубов человека в Северо-Западном регионе Сибири в норме и при патологии в X-XX веках. *Стоматология*. 2025;104(1):5-8. <https://doi.org/10.17116/stomat20251040115>
5. Наронова НА, Белоконова НА, Молвинских ВС. Динамика содержания кальция и фосфора при экс-

пресс-воздействии реминерализирующих средств. *Проблемы стоматологии*. 2023;(2): 33-38.

<https://doi.org/10.18481/2077-7566-2023-19-2-33-38>

- 6. Гальченко АВ. Сера: метаболическая роль, физиологическая потребность, проявления дефицита. *Микроэлементы в медицине*. 2022;23(4):14-17.

<http://dx.doi.org/10.19112/2413-6174-2022-23-4-14-17>

- 7. Domon-Tawaraya H, Nakajo K, Washio J, Ashizawa T, Ichino T, Sugawara H, et al. Divalent cations enhance fluoride binding to *Streptococcus mutans* and *S. sanguinis* cells and subsequently inhibit bacterial acid production. *Caries Research*. 2013;47(2):141-149.

<https://doi.org/10.1159/000344014>

- 8. Minenivenkatasatya SR, Wang H, Cooley U, Garcia-Smith E, Sheuayl J, Ratcliff JE. Effectiveness of a Novel Dentifrice Containing Stabilized Chlorine Dioxide, Sarkosyl, and Sodium Fluoride. *Dent J (Basel)*. 2020;8(4):122. <https://doi.org/10.3390/dj8040122>
- 9. Пошехонова ОЕ, Ражев ДИ, Слепченко СМ, Марченко ЖВ, Адаев ВН. Пищевые стратегии северных селькупов в XVIII-XIX вв. *Вестник археологии, антропологии и этнографии*. 2019;(4):121-139.

<https://doi.org/10.20874/2071-0437-2019-47-4-10>

- 10. Еганян РА. Особенности питания жителей Крайнего Севера России (обзор литературы). *Профилакти-*

ческая медицина. 2013;16(5):41-47. Режим доступа:

<https://www.mediasphera.ru/issues/profilakticheskaya-meditsina/2013/5/031726-6130201356>

11. Гермаш ВИ, Антонова АА, Елистратова МИ. Взаимосвязь фактора питания и стоматологиче-

ского статуса подростков Хабаровского края. *Стоматология детского возраста и профилактика*. 2019;19(2):59-63.

<https://doi.org/10.33925/1683-3031-2019-19-2-59-63>

REFERENCES

1. Kuzmina D.A., Pikhur O.L., Novikova V.P. Bone metabolism, chemical and mineral composition of hard dental tissues in patients with periodontal diseases. *Parodontologiya*. 2012;17(1(62)):11-15 (In Russ.). Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17424679>

2. Silin A.V., Satygo E.A., Maryanovich A.T. Enamel and dentin of human teeth. Fatigue strength. *HERALD of North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov*. 2023;15(4):19-29 (In Russ.).

<https://doi.org/10.17816/mechnikov624120>

3. Lussi A, Carvalho TS, Ganss C, et al. Personalized preventive measures for dental erosion. *Monographs in Oral Science*. 2020;28:170-180.

<https://doi.org/10.1159/000455379>

4. Dombrovskaya Y.A., Kravets O.N., Nikolaeva A.V., Kotov M.I., Dombrovskaya V.I., Benken K.A, et al. Evolutionary trends in microelement composition changes of enamel, surface layers of dentin, and cement of human teeth in the Northwestern Siberian region in norm and pathology in the 10th-20th centuries. *Stomatology*. 2025;104(1):5-8 (In Russ.).

<https://doi.org/10.17116/stomat20251040115>

5. Naronova N.A., Belokonova N.A., Molvinskikh V.S. Dynamics of calcium and phosphorus content under express exposure to remineralizing agents. *Actual problems in dentistry*. 2023 (2): 33-38.

<https://doi.org/10.18481/2077-7566-2023-19-2-33-38>

6. Galchenko A.V. Sulfur: metabolic role, physiological requirement, deficiency manifestations. *Elements in*

medicine. 2022;23(4):14-17 (In Russ.).

<http://dx.doi.org/10.19112/2413-6174-2022-23-4-14-17>

7. Domon-Tawaraya H, Nakajo K, Washio J, Ashizawa T, Ichino T, Sugawara H, et al. Divalent cations enhance fluoride binding to *Streptococcus mutans* and *S. sanguinis* cells and subsequently inhibit bacterial acid production. *Caries Research*. 2013;47(2):141-149.

<https://doi.org/10.1159/000344014>

8. Minenivenkatasatya SR, Wang H, Cooley U, Garcia-Smith E, Sheuayl J, Ratcliff JE. Effectiveness of a Novel Dentifrice Containing Stabilized Chlorine Dioxide, Sarkosyl, and Sodium Fluoride. *Dent J (Basel)*. 2020;8(4):122.

<https://doi.org/10.3390/dj8040122>

9. Poshekhonova O.E., Razhev D.I., Slepchenko S.M., Marchenko Z.V., Adaev V.N. Dietary strategies of Northern Selkups in the 18th-19th centuries. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*. 2019;(4):121-139 (In Russ.).

<https://doi.org/10.20874/2071-0437-2019-47-4-10>

10. Eganian RA. Nutritional characteristics in dwellers of the Far North of Russia (a review of literature). *Russian Journal of Preventive Medicine*. 2013;16(5):41-47 (In Russ.). Available from:

<https://www.mediasphera.ru/issues/profilakticheskaya-meditsina/2013/5/031726-6130201356>

11. Germash V.I., Antonova A.A., Elistratova M.I. The relationship of nutritional factors and dental status of adolescents of the Khabarovsk territory. *Pediatric dentistry and dental prophylaxis*. 2019;19(2):59-63 (In Russ.).

<https://doi.org/10.33925/1683-3031-2019-19-2-59-63>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за связь с редакцией:

Домбровская Юлия Андреевна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры стоматологии общей практики, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории клеточных технологий Северо-Западного государственного медицинского университета имени И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: Yuliya.Dombrovskay@szgmu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7715-1008>

Кравец Ольга Николаевна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры стоматологии общей практики Северо-Западного государственного медицинского университета имени И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: Olga.Kravets@szgmu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3252-0605>

Николаева Анастасия Валерьевна, лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории клеточных технологий Северо-Западного государственного медицинского университета имени И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: nn.n1ck24@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0799-3503>

Котов Михаил Иванович, лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории клеточных технологий Северо-Западного государственного медицинского университета имени И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: drmikhailkotov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6655-6181>

Домбровская Виктория Игоревна, студентка 3 курса Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического

го университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: vikanyuk@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4643-5563>

Бенкен Константин Александрович, ведущий специалист Ресурсного центра микроскопии и микроанализа Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: k.benken@spbu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Corresponding author:

Yulia A. Dombrovskaya, DMD, PhD, Associate Professor, Department of the General Dentistry, Researcher, Laboratory of Cellular Technologies, North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: Yuliya.Dombrovskay@szgmu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7715-1008>

Olga N. Kravets, DMD, PhD, Associate Professor, Department of the General Dentistry, North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: Olga.Kravetc@szgmu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3252-0605>

Anastasiya V. Nikolaeva, Research Technician, Laboratory of Cellular Technologies, North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: nn.n1ck24@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0799-3503>

Mikhail I. Kotov, Research Technician, Laboratory of Cellular Technologies, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: drmikhaikotov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6655-6181>

Вклад авторов в работу. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE, а также согласны принять на себя ответственность за все аспекты работы: Домбровская Ю. А. – разработка концепции, получение финансирования, научное руководство, написание черновика рукописи; Кравец О. Н. – разработка методологии, научное руководство, написание рукописи – рецензирование и редактирование; Николаева А. В. – проведение исследования, визуализация; Котов М. И. – визуализация, написание черновика рукописи; Домбровская В. И. – курирование данных, формальный анализ; Бенкен К. А. – предоставление ресурсов; Силин А. В. – административное руководство исследовательским проектом.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4652>

Силин Алексей Викторович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой стоматологии общей Северо-Западного государственного медицинского университета имени И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: a.silin@szgmu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3533-5615>

Victoriya I. Dombrovskaya, 3rd year student, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: vikanyuk@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4643-5563>

Konstantin A. Benken, Lead Specialist, Microscopy and Microanalysis Resource Center, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: k.benken@spbu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4652>

Alexey V. Silin, DMD, PhD, DSc, Professor, Head of the Department of the General Dentistry, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: a.silin@szgmu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3533-5615>

Поступила / Article received 19.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 11.09.2025

Принята к публикации / Accepted 12.09.2025

Authors' contribution. All authors confirm that their contributions comply with the international ICMJE criteria and agree to take responsibility for all aspects of the work: Dombrovskaya Yu. A. – conceptualization, funding acquisition, supervision, writing – original draft preparation; Kravets O. N. – methodology, supervision, writing – review and editing; Nikolaeva A. V. – investigation, visualization; Kotov M. I. – visualization, writing – original draft preparation; Dombrovskaya V. I. – Data curation; Benken K. A. – resources; Silin A. V. – project administration.