







МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 620.3:616.314

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2679>**Электродное формирование биомиметического
органоминерального покрытия на природной эмали человеческого
зуба: морфология и поверхностные механические свойства**

EDN: BVNNLU

П.В. Середин¹  , Д.Л. Голощапов¹ , Т.А. Литвинова² ,
О.В. Дехнич² , Ю.А. Ипполитов³ ¹ Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород, Российская Федерация³ Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко,
г. Воронеж, Российская Федерация✉ paul@phys.vsu.ru**Аннотация**

Введение. Разработка покрытий, способных воспроизводить структурно-функциональные свойства зубной эмали, представляет значительный интерес для стоматологического материаловедения и биомиметической инженерии поверхностей. Несмотря на развитие биомиметических кальций-фосфатных систем, наиболее распространённые подходы по-прежнему основаны на многостадийных протоколах, чувствительных к условиям формирования межфазного слоя, и не обеспечивают в полной мере одновременного сокращения времени осаждения, контроля морфологии покрытия и воспроизводимого механического отклика поверхности. Цель данной работы состояла в экспериментальной оценке возможности одностадийного формирования биомиметического гибридного nHAp/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов, а также в установлении влияния режима осаждения на морфологию поверхности и микротвёрдость системы «покрытие–подложка».

Материалы и методы. В качестве модели природной апатитовой подложки использовали сегменты нативной эмали постоянных зубов человека. Сравнивали четыре состояния поверхности: нативную эмаль; слой nHAp/AA, сформированный после кислотного кондиционирования; покрытие PDA/nHAp, полученное в последовательном режиме; гибридное покрытие, сформированное при одновременной электрополовой минерализации и ускоренной полимеризации дофамина. Осаждение выполняли в потенциостатической ячейке с изолированными медными электродами. Морфологию поверхности оценивали методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Поверхностный механический отклик исследовали по микротвёрдости Виккерса при нагрузке 50 г, AFM-картированию отпечатков и локальной наноиндентации.

Результаты исследования. Установлено, что одностадийный электрополовой режим обеспечивает формирование наиболее плотного и равномерного поверхностного слоя толщиной порядка 1 мкм с минимальной шероховатостью около 20 нм. Для образца D зарегистрированы наибольшие значения поверхностной микротвёрдости — около 310 VHN; для нативной эмали они составили около 280 VHN, для образца В — около 120 VHN, для образца С — около 190 VHN. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил статистически значимое влияние типа образца на микротвёрдость ($p < 0,001$). AFM-картирование отпечатков подтвердило корректность оптической оценки диагоналей на текстурированной поверхности.

Обсуждение. Повышение поверхностной микротвёрдости образца, сформированного в электрополовом режиме, связано, по-видимому, с более организованным межфазным взаимодействием при участии полидофамина и более плотной упаковкой минеральной составляющей покрытия. При этом микротвёрдость Виккерса и AFM-наноиндентация характеризуют различные масштабные уровни механического отклика и должны интерпретироваться как взаимодополняющие методы.

Заключение. Показано, что одностадийное формирование гибридного nHAp/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов позволяет получить морфологически организованный слой с поверхностным механическим откликом, сопоставимым с интактной эмалью. Предложенный подход представляет интерес для ускоренного формирования функциональных органоминеральных покрытий на апатитсодержащих подложках.

Ключевые слова: электрическое поле, органоминеральное покрытие, природная эмаль, микротвёрдость, атомно-силовая микроскопия

Благодарности. Авторы выражают благодарность «Бразильской лаборатории синхротронного излучения (LNLS)» Бразильского центра исследований в области энергетики и материалов (CNPq) за предоставленное оборудование в рамках проекта №20252761 и возможность проведения сопутствующих исследований.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №26-15-20057, <https://rscf.ru/project/26-15-20057>

Для цитирования. Середин П.В., Голошchapов Д.Л., Литвинова Т.А., Дехнич О.В., Ипполитов Ю.А. Электрополевое формирование биомиметического органоминерального покрытия на природной эмали человеческого зуба: морфология и поверхностные механические свойства. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2679. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2679>

Original Empirical Research

Electric-Field-Assisted Formation of a Biomimetic Organomineral Coating on Natural Human Tooth Enamel: Morphology and Surface Mechanical Properties

Pavel V. Seredin¹  , Dmitry L. Goloshchapov¹ , Tatyana A. Litvinova² ,

Olga V. Dekhnich² , Yury A. Ippolitov³ 

¹ Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

² Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation

³ N.N. Burdenko Voronezh State Medical University, Voronezh, Russian Federation

 paul@phys.vsu.ru

Abstract

Introduction. The development of coatings capable of reproducing the structural and functional properties of dental enamel is of considerable interest for dental materials science and biomimetic surface engineering. Despite the progress achieved in biomimetic calcium-phosphate systems, the most common approaches still rely on multistep protocols that are highly sensitive to interfacial-layer formation conditions and do not always ensure simultaneous reduction of deposition time, control of coating morphology, and reproducible surface mechanical response. The objective of this study was to experimentally evaluate the feasibility of one-step formation of a biomimetic hybrid nHAp/PDA coating in an electric field using isolated electrodes, and to determine the effect of the deposition mode on surface morphology and the surface microhardness of the “coating–substrate” system.

Materials and Methods. Segments of native human permanent tooth enamel were used as a model of a natural apatite-containing substrate. Four surface conditions were compared: native enamel, an nHAp/AA layer formed after acid conditioning, a PDA/nHAp coating obtained by sequential deposition, and a hybrid coating formed via simultaneous electric-field-assisted mineralization and accelerated dopamine polymerization. Deposition was performed in a potentiostatic cell with isolated copper electrodes. Surface morphology was evaluated using scanning electron microscopy and atomic force microscopy (AFM). Surface mechanical response was assessed by Vickers microhardness testing at a 50 g load, AFM mapping of indentation imprints, and local nanoindentation.

Results. The one-step electric-field-assisted mode was found to produce the densest and most uniform surface layer, approximately 1 μm thick, with a minimum roughness of about 20 nm. Sample D demonstrated the highest surface microhardness values, reaching approximately 310 VHN, whereas native enamel showed values of approximately 280 VHN, sample B — about 120 VHN, and sample C — about 190 VHN. One-way ANOVA confirmed a statistically significant effect of sample type on microhardness ($p < 0.001$). AFM mapping of the indentation imprints confirmed the accuracy of optical diagonal measurements on the textured surface.

Discussion. The increased surface microhardness of the electric-field-assisted sample appears to be associated with more organized interfacial interactions involving polydopamine and a denser packing of the mineral component of the coating. At the same time, Vickers microhardness testing and AFM nanoindentation characterize different scale levels of the mechanical response and should therefore be interpreted as complementary methods.

Conclusion. It is shown that one-step formation of a hybrid nHAp/PDA coating in an electric field using isolated electrodes makes it possible to obtain a morphologically organized layer with a surface mechanical response comparable to that of intact enamel. The proposed approach appears promising for the accelerated formation of functional organomineral coatings on apatite-containing substrates.

Keywords: electric field, organomineral coating, native enamel, microhardness atomic force microscopy

Acknowledgements. The authors would like to thank the Brazilian Synchrotron Light Laboratory (LNLS), Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), for providing access to equipment and related experimental infrastructure for SINS and s-SNOM experiments at the Imbuia beamline of Sirius (Proposal 20252761).

Funding Information. The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 26-15-20057, <https://rscf.ru/project/26-15-20057>

For Citation. Seredin PV, Goloshchapov DL, Litvinova TA, Dekhnich OV, Ippolitov YuA. Electric-Field-Assisted Formation of a Biomimetic Organomineral Coating on Natural Human Tooth Enamel: Morphology and Surface Mechanical Properties. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2679. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2679>

Введение. Эмаль представляет собой высокоминерализованную иерархически организованную ткань, механические характеристики которой определяются ориентацией апатитовых кристаллитов, градиентом состава и структурной анизотропией [1]. Научная и прикладная значимость разработки покрытий, способных частично воспроизводить либо восстанавливать указанные характеристики, связана не только с задачами локальной регенерации твёрдых тканей зуба, но и с созданием управляемых биомиметических систем, в которых межфазная организация и механический отклик регулируются составом и режимом формирования покрытия [2].

Современные подходы к реминерализации и получению эмалеподобных покрытий включают системы на основе функциональных неорганических материалов, органических матриц и полимерных носителей [3]. Отдельное направление представлено гидрогелевыми системами, позволяющими моделировать гелеобразную среду минерализации и контролировать локальную доставку ионов [4]. Значительный интерес представляет гидроксипатит (nHAp) как функциональный материал, обладающий высокой биоактивностью и структурным сходством с минеральной фазой твёрдых тканей [5]. Клинические и материаловедческие обзоры подтверждают высокий потенциал гидроксипатитсодержащих систем для профилактики повреждений и восстановления эмали [6]. Однако применение преимущественно минеральных систем не всегда обеспечивает устойчивую адгезию покрытия к поверхности эмали и контролируемую межфазную организацию на границе «покрытие – подложка», что ограничивает воспроизводимость морфологии и механических свойств формируемого слоя.

Вместе с тем полидофамин (PDA) рассматривается как один из наиболее универсальных межфазных компонентов благодаря выраженным адгезионным свойствам и способности инициировать связывание неорганической фазы с подложкой [7]. Современные обзоры, посвящённые химии полидофамина, показывают, что такие плёнки не только стабилизируют поверхность, но и формируют функциональную межфазу, способную направлять минералообразование [8]. Хотя схемы ускоренного осаждения с участием системы $\text{CuSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ позволяют существенно сократить время получения более однородного слоя [9], проблема воспроизводимого управления морфологией и межфазной организацией гибридных покрытий остаётся актуальной. Для стоматологических применений важно, что PDA способен инициировать минералообразование на деминерализованной эмали [10] и усиливать реминерализационный эффект в одностадийных покрытиях, сочетающих полидофамин и фторид-ион [11]. Показано также, что полидофаминовые покрытия влияют на характер нуклеации кальций-фосфатной фазы на поверхности минерализованных подложек [12].

Вместе с тем альтернативные биомиметические матрицы, включая амелогениноподобные системы, способны направлять ориентированное формирование эмалеподобной минеральной структуры, однако, как правило, требуют более сложных многостадийных протоколов [13]. Электрокинетические подходы, напротив, улучшают транспорт ионов в толщу эмали, но сами по себе не решают задачу контролируемой межфазной организации гибридного покрытия [14]. В ранее выполненной авторами работе была показана возможность быстрого осаждения гибридных гидроксипатит-полидофаминовых слоёв на природной эмали [15]. Однако вопрос о том, может ли одностадийное формирование покрытия в электрическом поле при изолированных электродах одновременно обеспечить сокращение времени осаждения, контролируемую морфологию и воспроизводимый поверхностный механический отклик, остаётся недостаточно изученным. Особый интерес представляет возможность более локализованного управления процессами осаждения и межфазного взаимодействия в условиях пространственного разделения электродных процессов, что потенциально позволяет повысить однородность и структурную организованность формируемого гибридного слоя.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка возможности одностадийного формирования гибридного nHAp/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов, а также установление влияния режима осаждения на морфологию поверхности и поверхностную микротвёрдость системы «покрытие – подложка».

Данное исследование отвечает на следующие вопросы.

1. Обеспечивает ли одностадийный электрополевой режим более равномерное и структурно организованное покрытие по сравнению с последовательными схемами осаждения?
2. Сопровождаются ли морфологические изменения поверхности ростом поверхностной микротвёрдости?
3. Соплосуются ли результаты микротвёрдости Виккерса и локального АСМ-наноиндентирования при оценке механического отклика сформированного гибридного слоя?

Материалы и методы. Исследование включало следующие основные этапы.

Этап 1 — подготовка образцов зубной эмали. В качестве подложки использовали сегменты эмали постоянных зубов человека без видимых кариозных поражений, трещин и реставраций. Подготовку эмалевых образцов, их первичную обработку и формирование исследуемых серий проводили в соответствии с протоколом, ранее подробно описанным для близкой системы осаждения [15]. На этапе отбора зубы подвергали предварительному клиническому осмотру для подтверждения отсутствия кариозных поражений, дефектов, включая эрозии и клиновидные повреждения, а также визуально определяемых изменений структуры эмали.

Сегменты зубной эмали размером 5×5 мм² и толщиной приблизительно 2 мм получали с использованием алмазной низкооборотной пилы с водяным охлаждением. После завершения сегментации срезы помещали в герметичные контейнеры с поддержанием постоянной влажности, где они хранились до начала экспериментальных исследований.

Этап 2 — формирование серий А и В. Образец А представлял собой нативную эмаль и использовался в качестве контрольной группы. Для получения образца В поверхность нативной эмали кондиционировали 37 %-ной ортофосфорной кислотой в течение 30 с, после чего осуществляли осаждение слоя nHAp/AA.

Этап 3 — формирование серии С. После кондиционирования поверхности 37 %-ной ортофосфорной кислотой в течение 30 с и последующей щелочной активации последовательно формировали гибридный слой: сначала проводили полимеризацию дофамина в течение 2 ч, затем выполняли осаждение nHAp. Таким образом получали покрытие PDA/nHAp, позволяющее оценить вклад полидофамина при последовательной организации межфазного слоя и минеральной фазы.

Этап 4 — формирование серии D. Образец D получали в одну стадию при совместном протекании электрополевой минерализации и полимеризации дофамина. Покрытие формировали в потенциостатической ячейке с изолированными медными электродами, не контактировавшими с рабочим раствором. Базовый режим одностадийного осаждения включал TRIS-буфер с pH = 8,5, дофамин гидрохлорид — 2 мг/мл, 5 мМ CuSO₄·6H₂O, 20 ммоль H₂O₂, суспензию nHAp со средним размером частиц 20–30 нм и конечной концентрацией 1 мг/мл. В качестве аминокислотного компонента использовали аспарагиновую кислоту в концентрации 0,1 мг/мл. Напряжение составляло около 45 В, расстояние между электродами — около 4 мм, продолжительность процесса — 4 ч. Использование системы Cu²⁺/H₂O₂ соответствует опубликованным данным об ускоренном осаждении более однородных плёнок PDA [8]. Такая схема позволяла последовательно оценить вклад предварительной обработки, минеральной фазы, полидофамина и электрического поля. Отдельная контрольная серия без электрического поля или без ускоряющей системы в рамках настоящего исследования не предусматривалась, что учитывали при интерпретации полученных результатов.

Этап 5 — морфологический анализ полученных образцов. Морфологию поверхности исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JEOL JSM-6700F (JEOL, Япония) и атомно-силовой микроскопии с использованием установки для ультрамикроскопии станции IMBUA-nano Бразильской лаборатории синхротронного излучения (LNLS), сочетающей сканирующую оптическую микроскопию ближнего поля (s-SNOM) с ИК-излучением синхротрона. СЭМ применяли для оценки сплошности слоя, характера перекрытия подложки и определения толщины покрытия на поперечных сколах. Оборудование IMBUA-nano использовали для анализа нанорельефа, профилей поверхности и геометрии отпечатков. Количественную оценку шероховатости выполняли по параметру Ra на сканах 10×10 мкм. Выбор указанных методов и параметры их применения соответствовали ранее использованному протоколу исследования гибридных покрытий на эмали [15, 16].

Этап 6 — оценка механических свойств и статистическая обработка. Поверхностные механические свойства оценивали по микротвёрдости Виккерса на приборе HVS-1000 (TIME Group Inc., Китай) при нагрузке 50 г и времени выдержки 15 с; для каждого образца выполняли по 10 измерений. Поскольку толщина покрытия является конечной, измеряемую величину интерпретировали как поверхностную микротвёрдость композитной системы «покрытие – эмаль», а не как собственную твёрдость изолированного слоя [16]. Для образца D дополнительно проводили АСМ-картирование отпечатков Виккерса и локальный анализ кривых DvZ/DFL.

Такая последовательность этапов позволяла сопоставить влияние предварительной обработки, способа формирования гибридного слоя и режима осаждения на морфологические и механические характеристики системы «покрытие — эмаль».

Статистическую обработку результатов проводили методом однофакторного дисперсионного анализа ANOVA с последующим множественным попарным сравнением групп по критерию Тьюки; различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования. В соответствии с целью работы сначала была проанализирована морфология покрытий, сформированных в различных режимах, а затем оценён их поверхностный механический отклик. Сравнение режимов формирования покрытия показало, что тип межфазного взаимодействия существенно влияет на конечную морфологию поверхности (таблица 1). Для образца В, в котором после предобработки осаждали слой nHAp/AA, формировался развитый, но тонкий и слабо интегрированный слой толщиной около 0,4 мкм; по данным морфометрического анализа шероховатость поверхности в этой серии достигала $47,8 \pm 5,6$ нм, тогда как для нативной эмали она составляла $22,1 \pm 3,4$ нм. При последовательном введении полидофамина в образце С толщина покрытия возрастала примерно до 0,9 мкм, а параметр R_a снижался до $25,4 \pm 3,2$ нм. Наиболее выраженный эффект зарегистрирован для образца D: одностадийный электрополевой режим обеспечивал более равномерное перекрытие подложки и формирование плотного слоя толщиной 1,0–1,2 мкм с минимальной шероховатостью $18,3 \pm 2,6$ нм, что может свидетельствовать о более высокой степени морфологической упорядоченности покрытия.

По данным АСМ для образца D характерно наличие упорядоченных наноагрегатов размером около 50–80 нм, формирующих выраженный рельеф и более плотную поверхностную упаковку. Наличие более плотной упаковки и упорядоченных наноагрегатов согласуется с предположением о более организованной межфазной структуре покрытия [13, 18].

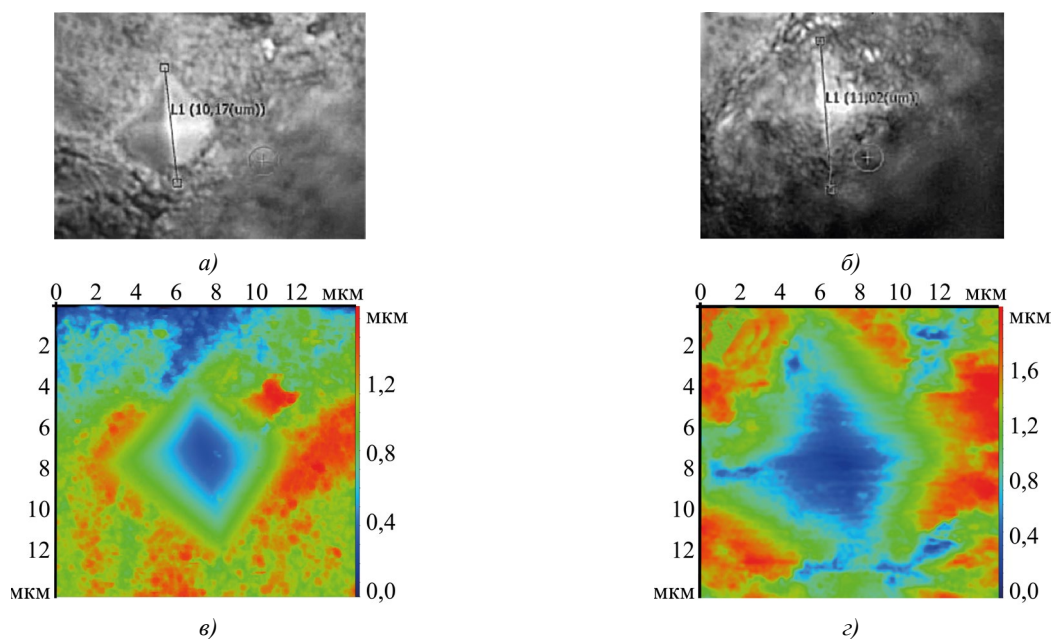
Таблица 1

Поверхностная микротвёрдость Виккерса при нагрузке 50 г

Показатель	А, нативная эмаль	В, nHAp/AA	С, PDA/nHAp	Д, (электрополевой)
VHN, М ± SD	280 ± 20	120 ± 10	190 ± 13	310 ± 22

Результаты измерений микротвёрдости показали, что минимальное значение характерно для образца В — около 120 VHN. Для образца С зарегистрировано повышение твёрдости примерно до 190 VHN. Максимальные значения получены для образца D — около 310 VHN, что несколько превышает средний уровень, характерный для нативной эмали, — около 280 VHN. Однофакторный дисперсионный анализ показал статистически значимое влияние типа образца на микротвёрдость ($p < 0,001$). По данным апостериорного анализа по критерию Тьюки достоверные различия выявлены между всеми парами образцов, за исключением пары А–D, что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий между образцом D и интактной эмалью в условиях проведённого эксперимента.

Для верификации механических характеристик образца D сначала были проанализированы оптические изображения отпечатков индентора Виккерса на нативной эмали и в электрополевой серии (рис. 1 а, б). Для более точного определения геометрии отпечатков на текстурированной поверхности их затем дополнительно исследовали методом АСМ-картирования (рис. 1 в, г). По данным такого анализа для образца D были получены значения порядка 320 VHN при нагрузке 50 г и порядка 290 VHN при нагрузке 10 г. Полученные значения согласуются с результатами оптического микротвердомера и подтверждают, что высокий уровень поверхностной микротвёрдости не является артефактом измерения диагоналей отпечатка на текстурированной поверхности (рис. 1 а–г).



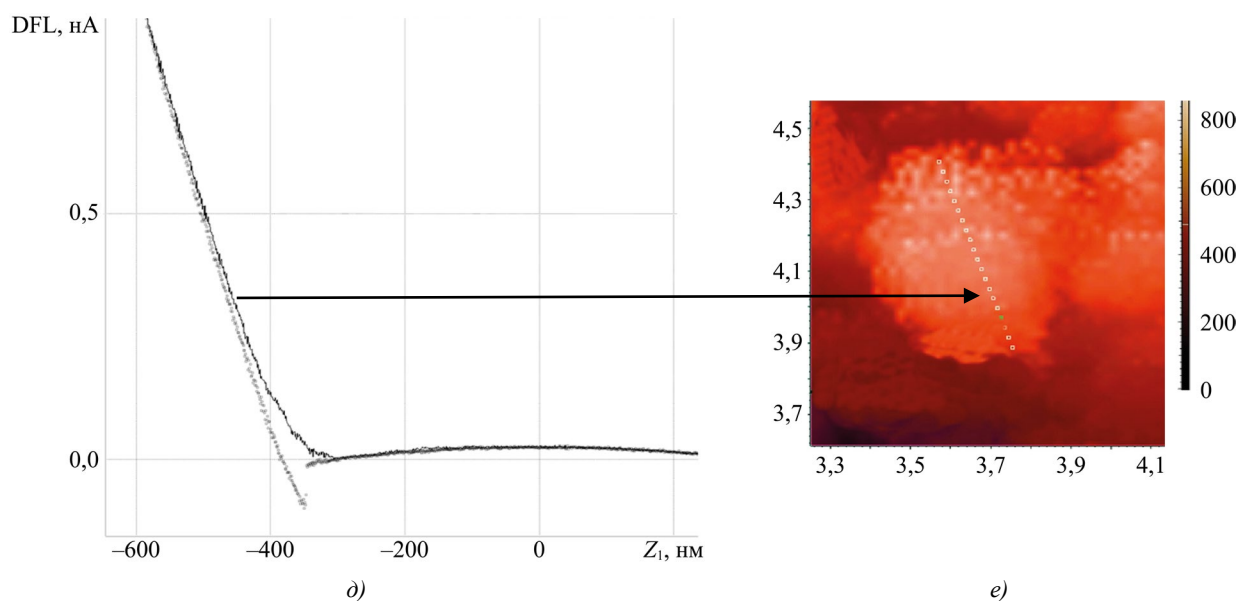


Рис. 1. Исследования механических характеристик нативной эмали и образца D: *a, б* — оптические изображения отпечатков индентора Виккерса; *в, г* — АСМ-топография отпечатков; *д* — типичная силовая кривая локального АСМ-наноиндентирования; *е* — АСМ-изображение участка поверхности, на котором регистрировали силовой отклик

Для дополнительной оценки локального механического отклика приповерхностного слоя проводили АСМ-наноиндентирование.

При локальном АСМ-наноиндентировании на глубинах менее 50 нм регистрировался отклик приповерхностной PDA-богатой оболочки с модулем Юнга порядка 1 ГПа; типичная силовая кривая приведена на рис. 1 *д*, а участок поверхности, на котором регистрировали силовой отклик, показан на рис. 1 *е*.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что более высокий уровень поверхностной микротвёрдости у образца D связан не только с наличием минеральной составляющей, но и с характером межфазной организации гибридного слоя. Это согласуется с уже известными данными о том, что полидофамин способен выполнять функцию адгезионной межфазы и одновременно влиять на ранние стадии минералообразования [8, 10, 12].

По сравнению с образцом В, у которого после кислотного кондиционирования формировался тонкий и слабо интегрированный слой, а также с образцом С, где улучшение морфологии достигалось преимущественно благодаря последовательному введению PDA, электрополевой режим обеспечивал более плотную упаковку покрытия и более равномерное перекрытие подложки. Вероятно, более организованная межфазная структура и снижение локальной неоднородности покрытия способствовали стабильному распределению механической нагрузки при индентировании. Вместе с тем представленные данные не позволяют однозначно связать повышение твёрдости исключительно с воздействием электрического поля, поскольку химическое ускорение полимеризации также могло вносить заметный вклад.

Принципиально важно, что регистрируемая микротвёрдость характеризует не изолированное покрытие, а композитную систему «покрытие – подложка». Сопоставление толщины слоя порядка 1,0–1,2 мкм с масштабом деформации при нагрузке 50 г показывает, что вклад подложки в измеряемый механический отклик остаётся существенным. Поэтому полученные значения корректнее интерпретировать как поверхностную микротвёрдость системы в целом. В этом смысле данные индентирования по Виккерсу и АСМ-наноиндентирования являются взаимодополняющими: первая методика отражает интегральный ответ гибридного слоя и подложки, тогда как вторая характеризует локальные свойства приповерхностной PDA-богатой оболочки [16].

Полученные данные подтверждают, что сочетание органической межфазы и минерального компонента может играть важную роль в формировании механически стабильных эмалеподобных покрытий. Результаты согласуются с современными подходами, согласно которым наиболее перспективные биомиметические материалы для твёрдых тканей сочетают управляемую органическую межфазу и минеральный компонент [2, 17, 18]. В этом контексте одностадийная схема с изолированными электродами представляет интерес не только как вариант реминерализации, но и как инженерная стратегия ускоренного формирования организованного поверхностного слоя. Ограничением работы остаётся отсутствие специальной контрольной серии, позволяющей полностью разделить вклад электрического поля и химического ускорителя полимеризации, что не позволяет полностью разделить вклад электрического поля и химического ускорителя в наблюдаемые изменения морфологии и механических характеристик покрытия. Дальнейшие исследования должны включать специальные контрольные режимы и оценку долговременной стабильности сформированных покрытий, в том числе с использованием комплекса методов и алгоритмов машинного обучения [19].

Заключение. Разработан способ одностадийного формирования гибридного nHAp/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов.

Показано, что электрополевой режим обеспечивает формирование более плотного и морфологически организованного слоя по сравнению с последовательными схемами осаждения и сопровождается наибольшими значениями поверхностной микротвёрдости — до 310 VHN при нагрузке 50 г.

Результаты АСМ-анализа отпечатков и локального наномеханического тестирования подтверждают согласованность оценки механического отклика на различных масштабных уровнях.

Полученные данные позволяют рассматривать предложенный подход как перспективный способ ускоренного формирования функциональных органоинеральных покрытий на апатитсодержащих подложках. Дальнейшие исследования целесообразно направить на варьирование параметров электрического поля, контроль толщины слоя и оценку долговременной стабильности покрытия при комбинированном химико-механическом воздействии.

Список литературы / References

1. Ya-Rong Zhang, Wen Du, Xue-Dong Zhou, Hai-Yang Yu. Review of Research on the Mechanical Properties of the Human Tooth. *International Journal of Oral Science*. 2014;6(2):61–69. <https://doi.org/10.1038/ijos.2014.21>
2. Shuxian Tang, Zhiyun Dong, Xiang Ke, Jun Luo, Jianshu Li. Advances in Biomineralization-Inspired Materials for Hard Tissue Repair. *International Journal of Oral Science*. 2021;13:42. <https://doi.org/10.1038/s41368-021-00147-z>
3. Jiarong Xu, Hui Shi, Jun Luo, Haiyan Yao, Pei Wang, Zhihua Li, et al. Advanced Materials for Enamel Remineralization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022;10:985881. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.985881>
4. Jiayi Liao, Junhong Qiu, Yarfang Lin, Zhihua Li Z. The Application of Hydrogels for Enamel Remineralization. *Heliyon*. 2024;10(13):e33574. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33574>
5. Sudip Mondal, Sumin Park, Jaeyeop Choi, Thi Thu Ha Vu, Vu Hoang Minh Doan, Truong Tien Vo, et al. Hydroxyapatite: A Journey from Biomaterials to Advanced Functional Materials. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023;321:103013. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103013>
6. Pawinska M, Paszynska E, Amaechi BT, Meyer F, Enax J, Limeback H. Clinical Evidence of Caries Prevention by Hydroxyapatite: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Dentistry*. 2024;151:105429. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105429>
7. Haeshin Lee, Dellatore SM, Miller WM, Messersmith PB. Mussel-Inspired Surface Chemistry for Multifunctional Coatings. *Science*. 2007;318(5849):426–430. <https://doi.org/10.1126/science.1147241>
8. Ji Hyun Ryu, Messersmith PB, Haeshin Lee. Polydopamine Surface Chemistry: A Decade of Discovery. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2018;10(9):7523–7540. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b19865>
9. Chao Zhang, Yang Ou, Wen-Xi Lei, Ling-Shu Wan, Jian Ji, Zhi-Kang Xu. CuSO₄/H₂O₂-Induced Rapid Deposition of Polydopamine Coatings with High Uniformity and Enhanced Stability. *Angewandte Chemie International Edition*. 2016;55(9):3054–3057. <https://doi.org/10.1002/anie.201510724>
10. Yun-Zhi Zhou, Ying Cao, Wei Liu, Chun Hung Chu, Quan-Li Li. Polydopamine-Induced Tooth Remineralization. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2012;4(12):6901–6910. <https://doi.org/10.1021/am302041b>
11. Seok-Min Choi, Hee-Won Jung, Ji Hyun Ryu, Hyung-Keun You. Effect of Polydopamine and Fluoride Ion Coating on Dental Enamel Remineralization: An in vitro Study. *BMC Oral Health*. 2023;23:526. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03221-6>
12. Murari G, Bock N, Huan Zhou, Lei Yang, Liew T, Fox K, et al. Effects of Polydopamine Coatings on Nucleation Modes of Surface Mineralization from Simulated Body Fluid. *Scientific Reports*. 2020;10:14982. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71900-3>
13. Dong Wang, Jingjing Deng, Xuliang Deng, Changqing Fang, Xu Zhang, Peng Yang. Controlling Enamel Remineralization by Amyloid-Like Amelogenin Mimics. *Advanced Materials*. 2020;32(31):e2002080. <https://doi.org/10.1002/adma.202002080>
14. NamBeng Tay, HiongYapGan, Frederico Barbosa de Sousa, Lu Shen, Diego Figueiredo Nóbrega, Chenhui Peng, et al. Improved Mineralization of Dental Enamel by Electrokinetic Delivery of F⁻ and Ca²⁺ Ions. *Scientific Reports*. 2023;13:516. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26423-4>
15. Seredin P, Goloshchapov D, Emelyanova A, Eremeev K, Peshkov Y, Shikhaliev K, et al. Rapid deposition of the biomimetic hydroxyapatite-polydopamine-amino acid composite layers onto the natural enamel. *ACS Omega*. 2024;9(15):17012–17027. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08491>
16. Chi-Dat Lam, Soyeun Park. Nanomechanical Characterization of Soft Nanomaterial Using Atomic Force Microscopy. *Materials Today Bio*. 2025;31:101506. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101506>
17. Xinyu Luo, Jiayue Niu, Guanyu Su, Linxi Zhou, Xue Zhang, Ying Liu, et al. Research Progress of Biomimetic materials in oral medicine. *Journal of Biological Engineering*. 2023;17:72. <https://doi.org/10.1186/s13036-023-00382-4>

18. Seredin P, Goloshchapov D, Peshkov Ya, Potapov A, Gribanova Ya, Shikhaliev K, et al. Biomimetic Organomineral Layers with Antibacterial Properties Based on Di/Tetrahydroquinolinediol and Nanocrystalline Hydroxyapatite Deposited on Enamel Surface. *Biomaterials Science*. 2025;13(9):2444–2461. <https://doi.org/10.1039/D5BM00070J>

19. Kondratieva T.N., Chepurnenko A.S. Prediction of Rheological Parameters of Polymers by Machine Learning Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):36–47. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-36-47>

Об авторах:

Павел Владимирович Середин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика твёрдого тела и наноструктур» Воронежского государственного университета (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), paul@phys.vsu.ru

Дмитрий Львович Голощачов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика твёрдого тела и наноструктур» Воронежского государственного университета (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), goloshchapov@phys.vsu.ru

Татьяна Александровна Литвинова, доктор филологических наук, профессор кафедры «Возрастная и социальная психология» Белгородского государственного национального исследовательского университета (308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), centr_rus_yaz@mail.ru

Ольга Витальевна Дехнич, кандидат филологических наук, доцент кафедры «Английская филология и межкультурная коммуникация» Института межкультурной коммуникации и международных отношений Белгородского государственного национального исследовательского университета (308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), dekhnich@bsu.edu.ru

Юрий Алексеевич Ипполитов, доктор медицинских наук, профессор кафедры «Детская стоматология с ортодонтией» Воронежского государственного медицинского университета имени Н.Н. Бурденко (394036, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Студенческая, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), dsvigma@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

П.В. Середин: разработка концепции, курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, валидация результатов, написание черновика рукописи.

Д.Л. Голощачов: получение финансирования, формальный анализ, проведение исследования.

Т.А. Литвинова: курирование данных, формальный анализ, валидация результатов.

О.В. Дехнич: написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

Ю.А. Ипполитов: проведение исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Pavel V. Seredin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Solid State Physics and Nanostructures, Voronezh State University (1, University Sq., Voronezh, 394018, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), paul@phys.vsu.ru

Dmitry L. Goloshchapov, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Solid-State Physics and Nanostructures Department, Voronezh State University (1, University Sq., Voronezh, 394018, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), goloshchapov@phys.vsu.ru

Tatyana A. Litvinova, Dr.Sci. (Philol.), Professor of the Developmental and Social Psychology Department, Belgorod State National Research University (85, Pobeda Str., Belgorod, 308015, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), centr_rus_yaz@mail.ru

Olga V. Dekhnich, Cand.Sci. (Philol.), Associate Professor of the Department of English Philology and Intercultural Communication, Institute of Intercultural Communication and International Relations, Belgorod National Research University (85, Pobeda Str., Belgorod, 308015, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), dekhnich@bsu.edu.ru

Yury A. Ippolitov, Dr.Sci. (Med.), Professor of the Department of Pediatric Dentistry with Orthodontics, N.N. Burdenko Voronezh State Medical University (10, Studencheskaya Str., Voronezh, 394036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), dsvigma@mail.ru

Claimed Contributorship:

PV Seredin: conceptualization, data curation, formal analysis, investigation, methodology, project administration, validation, writing – original draft preparation.

DL Goloshchapov: funding acquisition, formal analysis, investigation.

TA Litvinova: data curation, formal analysis, validation.

OV Dekhnich: writing – review & editing.

YA Ippolitov: investigation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 26.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 08.06.2026

Принята к публикации / Accepted 15.06.2026