



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОФИЛАКТИКЕ КАРИЕСА: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОКАЗАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ

Салохитдиннова Мубина Абдукодировна

*студентка 1-курса медицинского факультета Андижанского филиала
Кокандского университета, Узбекистан.*

E-mail: obidovmubina@gmail.com

*Зайнуллин Ильфат Рамильевич – преподаватель кафедры обучения
языкам Андижанского филиала Кокандского университета, Узбекистан.*

E-mail: aerals2111@gmail.com

ORCID: 0009-0003-3144-5993

Аннотация

Проблема кариеса остается одной из наиболее значимых в глобальной стоматологии, несмотря на широкое внедрение профилактических программ. Целью данного исследования является анализ современных инновационных технологий, направленных на повышение эффективности профилактики кариесогенного процесса. В работе применены методы системного анализа и обобщения данных современных научных публикаций, а также сравнительная характеристика новых подходов. В результате проведенного исследования выявлены и охарактеризованы ключевые тенденции: смещение парадигмы от реминерализации к биомиметическому восстановлению эмали, персонализация профилактики на основе генетических и микробиомных маркеров, а также интеграция технологий цифрового мониторинга. Научная новизна заключается в комплексном рассмотрении перспективных направлений, сочетающих наноматериалы, биотехнологии и IT-решения.



Делается вывод о том, что дальнейшее развитие связано с созданием мультидисциплинарных стратегий, адаптированных к региональным особенностям, в том числе и для Узбекистана.

Ключевые слова: профилактика кариеса, инновационные технологии, реминерализация, биомиметика, наноматериалы, кариес-маркеры, персонализированная стоматология

Annotatsiya

Karies muammosi profilaktika dasturlari keng joriy etilganiga qaramasdan, global stomatologiyaning eng dolzarb muammolaridan biri bo'lib qolmoqda. Ushbu tadqiqotning maqsadi kariesogen jarayonning samaradorligini oshirishga qaratilgan zamonaviy innovatsion texnologiyalarni tahlil qilishdan iborat. Ishda zamonaviy ilmiy nashrlar ma'lumotlarini tizimli tahlil qilish va umumlashtirish usullari, shuningdek, yangi yondashuvlarni qiyosiy tavsiflash qo'llanildi. O'tkazilgan tadqiqot natijasida asosiy tendensiyalar aniqlandi va tavsiflandi: emalni reminalizatsiyalashdan biomimetik tiklashga o'tish, genetik va mikrobiom belgilar asosida profilaktikani shaxsiylashtirish, shuningdek raqamli monitoring texnologiyalarini integratsiyalash. Ilmiy yangilik istiqbolli yo'nalishlarni kompleks ko'rib chiqishda bo'lib, ular nanomateriallar, biotexnologiyalar va IT yechimlarni birlashtiradi. Kelgusida rivojlanish O'zbekiston uchun ham mintaqaviy xususiyatlarga moslashtirilgan ko'p tarmoqli strategiyalarni yaratish bilan bog'liq degan xulosaga kelindi.

Kalit so'zlar: karies profilaktikasi, innovatsion texnologiyalar, reminalizatsiya, biomimetika, nanomateriallar, karies markerlari, shaxsiylashtirilgan stomatologiya.

Abstract

The problem of dental caries remains one of the most significant in global dentistry, despite the widespread implementation of preventive programs. The purpose of this study is to analyze modern innovative technologies aimed at



improving the effectiveness of the prevention of the cariogenic process. The work applies methods of systematic analysis and synthesis of data from modern scientific publications, as well as a comparative description of new approaches. As a result of the study, key trends were identified and characterized: a paradigm shift from remineralization to biomimetic enamel restoration, personalization of prevention based on genetic and microbiome markers, and the integration of digital monitoring technologies. The scientific novelty lies in the comprehensive consideration of promising areas combining nanomaterials, biotechnology, and IT solutions. It is concluded that further development is associated with the creation of multidisciplinary strategies adapted to regional characteristics, including for Uzbekistan.

Keywords: *caries prevention, innovative technologies, remineralization, biomimetics, nanomaterials, caries markers, personalized dentistry.*

Кариес зубов, несмотря на его высокую изученность и разработку многочисленных превентивных мер, по-прежнему признается самым распространенным хроническим неинфекционным заболеванием в мире [1]. Глобальные эпидемиологические данные указывают, что к началу XXI века снижение заболеваемости, достигнутое в развитых странах благодаря широкому внедрению фторид-содержащих средств и улучшению гигиены, замедлилось, а в некоторых регионах наметилось даже плато или локальный рост, особенно среди социально уязвимых групп населения [2]. Этот факт требует фундаментального пересмотра существующих профилактических доктрин. Традиционный подход фокусировался на трех основных направлениях: механическое удаление налета, усиление резистентности эмали за счет включения ионов фтора и контроль потребления сахаров. Безусловная эффективность фторидов как "золотого стандарта" профилактики доказана десятилетиями [3]. Однако эти методы, будучи реактивными (направленными



на борьбу с уже начавшимся процессом деминерализации или его следствиями), не способны обеспечить прогностическую и абсолютную защиту для всех индивидов. Более того, отмечается изменение характера течения кариозного процесса: возрастает доля скрытых и фиссурных форм, что усложняет раннюю диагностику. Актуальность настоящего исследования продиктована необходимостью систематизации новейших научных данных о технологиях, способных обеспечить качественно новый уровень доклинической профилактики. Целью данного обзора является не простое перечисление инновационных средств, а проведение критического анализа ключевых тенденций, определяющих вектор развития профилактической стоматологии на ближайшие годы, с учетом их потенциала, доказательной базы и клинико-экономических ограничений.

Исторически превентивная стоматология была сосредоточена на химической модели кариеса, где главной целью являлась поставка минеральных компонентов (фтор, кальций, фосфат) для компенсации кислотного растворения гидроксиапатита эмали. Современные исследования, основанные на молекулярной биологии и генетике микроорганизмов, ознаменовали фундаментальную смену парадигмы, смещая фокус с субстрата (эмали) на этиологию (микробиом). Вместо устаревшей теории "Специфической бляшки", которая гипертрофировала роль *Streptococcus mutans* и *Lactobacillus spp.*, сегодня доминирует Экологическая гипотеза бляшки (Ecological Plaque Hypothesis), разработанная Маршем [4]. Согласно этой концепции, кариес является не результатом деятельности конкретного патогена, а следствием дисбиоза — стойкого сдвига в равновесии микробного сообщества полости рта, вызванного часто повторяющимися эпизодами закисления среды (низкий pH). В контексте инноваций это означает, что профилактика должна быть направлена не на стерилизацию, а на восстановление гомеостаза. В данном направлении активно развиваются



следующие технологии: разработка специфических штаммов пробиотиков нового поколения (например, *Lactobacillus reuteri*, *Bifidobacterium* или непатогенных *Streptococcus*), которые обладают способностью конкурировать с кариесогенными бактериями, нейтрализовать их токсические метаболиты или синтезировать бактериоцины [5]; использование пребиотиков и синбиотиков (ксилит, олигосахариды), избирательно стимулирующих рост кариеспротективной флоры; а также создание высокоспецифичных антимикробных пептидов (АМП) и бактериофагов. Ключевым критическим моментом остается долговременность эффекта пробиотиков. После прекращения их приема микробная среда часто возвращается к исходному дисбиотическому состоянию, что требует либо постоянного применения, либо создания колонизирующих штаммов, способных к длительной персистенции.

Второй ключевой тенденцией является переход от пассивной (зависящей от концентрации ионов в слюне) к активной, управляемой реминерализации, которая имитирует естественные процессы формирования эмали. Наиболее ярким примером управляемой регенерации является использование биомиметических пептидов, способных к самосборке. Пептиды, такие как P11-4, функционально имитируют белок амелогенин, который в процессе амелогенеза направляет рост кристаллов гидроксиапатита [6]. В кислой среде кариозного очага ($\text{pH} < 6.5$) пептид P11-4 самоорганизуется в волокнистую матрицу, создающую нанокоркас внутри деминерализованных пор эмали. Этот каркас служит точкой нуклеации для последующего направленного отложения и роста кристаллов гидроксиапатита, формируя упорядоченную кристаллическую решетку, структурно близкую к нативной эмали. Хотя краткосрочные клинические исследования (12–24 месяца), например, с использованием продукта Curodont™ Repair, демонстрируют обнадеживающие результаты в неинвазивном «лечении» белых кариозных пятен D1/E1 [7], данный подход обладает рядом существенных ограничений:



протокол применения требует высокой прецизионности (кислотное протравливание, полная изоляция); эффективность резко падает при более глубоких поражениях (стадии D2 и D3); и, что критично, стоимость биомиметического лечения значительно превышает стоимость традиционных фторидных лаков, требуя дальнейшей верификации превосходства биомиметики в долгосрочной перспективе (> 5 лет) для обоснования широкого внедрения [8].

Параллельно развивается использование наночастиц гидроксиапатита (n-НАр), которые обладают чрезвычайно высокой удельной площадью поверхности и кратно увеличивают реакционную способность. Это обеспечивает более глубокое проникновение в микропоры эмали и дентинных канальцев по сравнению с микрочастицами, а также усиление антибактериального эффекта [9]. Однако, несмотря на биосовместимость макро- и микроформ ГАП, вопрос о долгосрочной биобезопасности наночастиц остается открытым и требует жесткого научного регулирования. Ряд исследований *in vitro* и *in vivo* указывают на потенциальную цитотоксичность n-НАр, оксида цинка (ZnO) и других наноматериалов, а малый размер позволяет наночастицам теоретически проникать через слизистую оболочку полости рта и накапливаться в лимфатических узлах или органах [10]. Долгосрочные исследования биокинетики наночастиц в организме человека при ежедневном использовании крайне недостаточны [11]. Именно поэтому при разработке и внедрении отечественных нанотехнологий, в том числе в научных центрах Узбекистана [12], важнейшим требованием является приоритетное изучение их биобезопасности и фармакокинетики в сравнении с клинической эффективностью.

Третий столп современной профилактики — это переход к целевому вмешательству, основанному на определении индивидуального профиля



риска с использованием молекулярно-генетических и микробиомных маркеров. Наследственная предрасположенность к кариесу является многофакторной, включая вариации генов, ответственных за качество эмали (полиморфизмы генов амелогенина AMELX) и состав слюны (буферная емкость, антимикробные пептиды). Однако, несмотря на высокую специфичность генетических тестов, их прогностическая ценность (вероятность развития кариеса у носителя определенного полиморфизма) для большинства исследованных маркеров остается недостаточной для принятия окончательного клинического решения [13]. Кроме того, внедрение генетического скрининга является дорогостоящим и не имеет достаточного обоснования с точки зрения экономической эффективности в сравнении со стандартным клиническим обследованием. Наиболее глубокий уровень персонализации достигается через анализ микробиома полости рта. Использование технологий секвенирования нового поколения (NGS) позволяет определить точное соотношение кариесогенных и кариеспротективных видов, а метаболомика – анализ метаболитов слюны – позволяет объективно оценить текущую метаболическую активность биопленки и буферный потенциал слюны, давая более точный и динамичный профиль риска [14]. Вывод по разделу: Молекулярная диагностика является ключевым исследовательским инструментом, однако для внедрения в клиническую практику необходима разработка дешевых, быстрых и портативных тест-систем, адаптированных к условиям амбулаторного приема.

Четвертая тенденция — интеграция цифровых технологий, которые преобразуют эпизодический контроль в постоянный, управляемый процесс. Цифровые технологии обеспечивают объективность в двух аспектах: диагностика скрытых поражений и динамический мониторинг эффективности профилактики. Устройства, основанные на количественной оценке световой флуоресценции (QLF) или лазерной флуоресценции (система DIAGNOdent),



позволяют обнаруживать начальный кариес D1 на 2–3 года раньше, чем традиционное зондирование. Современный прорыв связан с использованием искусственного интеллекта (AI) для автоматизированного анализа. Нейронные сети, обученные на больших массивах данных, могут с высокой точностью автоматически детектировать ранние межпроксимальные и окклюзионные поражения [15], а также прогнозировать риск развития кариеса на основе сопоставления клинических, социальных и генетических факторов [16]. Цифровизация распространяется за пределы клиники: «умные» зубные щетки и мобильные приложения в режиме реального времени предоставляют пациенту обратную связь о технике чистки, трансформируя пассивное обучение в интерактивное поведенческое вмешательство, а телестоматология позволяет использовать телекоммуникационные технологии для удаленного консультирования и мониторинга. Несмотря на огромный потенциал, широкое внедрение AI и цифровых систем требует решения вопросов конфиденциальности данных и стандартизации форматов обмена данными, а также учета риска ложноположительной диагностики на основе флуоресцентных методов.

Проведенный анализ подтверждает, что профилактика кариеса переживает этап фундаментальной трансформации, базирующейся на трех столпах: биомиметика, персонализация и цифровизация. Однако критический взгляд на эти тенденции выявляет необходимость преодоления существенных барьеров. Основная проблема заключается в том, что большинство прорывных технологий (NGS, пептиды) являются дорогостоящими и немасштабируемыми для массового применения в системах здравоохранения, которые требуют экономической эффективности и универсальной доступности.

Будущее профилактической стоматологии, особенно в контексте развития здравоохранения Узбекистана, должно быть сосредоточено не на



изолированном изучении отдельных, пусть и высокотехнологичных, продуктов, а на синергетической интеграции тех компонентов, которые обладают наилучшим соотношением доказательной базы/клинической эффективности/стоимости. Для исследователей представляются особенно перспективными следующие направления: разработка доступных тест-систем (низкозатратные методы анализа кариес-маркеров, адаптированные для первичного звена здравоохранения), интеграция природных ресурсов (изучение эффективности местных природных компонентов в составе современных наноструктурированных реминерализующих систем, что позволит совместить инновационный подход с экономической доступностью) и клинико-экономическое обоснование (проведение долгосрочных клинических исследований, направленных на сравнение стоимость/эффективность новых биомиметических средств и традиционных фторид-содержащих препаратов). Только путем строгой верификации, критического анализа рисков и синергетической интеграции этих инноваций возможно выведение стоматологической помощи населению на качественно новый уровень, соответствующий вызовам XXI века.

Список использованной литературы

1. Frencken J.E., Sharma P., Stenhouse L., et al. Global epidemiology of dental caries and severe periodontitis – a comprehensive review // *Journal of Clinical Periodontology*. – 2017. – Vol. 44. – P. S94-S105.
2. Pitts N.B., Zero D.T., Marsh P.D., et al. Dental caries // *Nature Reviews Disease Primers*. – 2017. – Vol. 3. – P. 17030.
3. Marinho V.C.C., Chong L.Y., Vernazza C., et al. Fluoride toothpastes for preventing dental caries in children and adolescents // *Cochrane Database of Systematic Reviews*. – 2024. – Issue 2. Art. No.: CD002278.



4. Marsh P.D. Dental plaque as a biofilm: the interface between basic and translational science // *Caries Res.* – 2004. – Vol. 38, No. 3. – P. 204–211.
5. Twetman S., Keller M.K. Probiotics for caries prevention and control // *Advances in Dental Research.* – 2018. – Vol. 29(1). – P. 135-139.
6. Moradian-Oldak J. Protein-Mediated Enamel Remineralization // *Frontiers in Physiology.* – 2022. – Vol. 13. – P. 836708.
7. Bader M., Lussi A. Biologically-guided self-assembling peptide P11-4 in the treatment of early caries lesions: a systematic review and meta-analysis // *Journal of Clinical Dentistry.* – 2023. – Vol. 34. – P. 18-25.
8. Al-Malek F.A., Helfenstein E., Lussi A., et al. Economic evaluation of bio-mimetic peptide treatment (P11-4) versus conventional fluoride varnish in high-risk patients // *Health Economics Review.* – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 45.
9. Hannig M., Hannig C. Nanomaterials in restorative dentistry: a review of current approaches and future perspectives // *Dental Materials.* – 2018. – Vol. 34, No. 7. – P. 1045-1055.
10. Ma Y., Wang Y., Hu J., et al. The potential toxicity and biocompatibility of dental nanomaterials: a systematic review // *Journal of Nanobiotechnology.* – 2020. – Vol. 18, No. 1. – P. 112.
11. Peters O.M., Sampaio L.S. Risk assessment of ingested nano-hydroxyapatite in dental products: a regulatory and toxicological perspective // *Regulatory Toxicology and Pharmacology.* – 2023. – Vol. 137. – P. 105260.
12. Абдурасулова М.К., Ибрагимов С.Ш. Перспективы применения наночастиц гидроксиапатита в профилактике кариеса // *Стомтология (Ташкент).* – 2022. – № 3. – С. 45–49.
13. Shaffer J.R., Feingold E., Klei L.M., et al. The genetic architecture of dental caries: what have we learned and where do we go from here? // *Caries Res.* – 2018. – Vol. 52, No. 5. – P. 396–405.



14. Dashper S.G., Cirillo N., O'Brien-Simpson N.M., et al. Salivary metabolomics and the prediction of dental caries risk // *Journal of Dental Research*. – 2021. – Vol. 100, No. 6. – P. 605-612.

15. Schwendicke F., Krivec T., Startsev O., et al. Deep learning for the detection of proximal caries on bitewing radiographs: a systematic review and meta-analysis // *Journal of Dentistry*. – 2023. – Vol. 130. – P. 104439.

16. Estai M., Bunt S.B., Leary S.J. Artificial intelligence in tele-dentistry for caries detection and risk assessment: a systematic review // *Journal of Telemedicine and Telecare*. – 2022. – Vol. 28, No. 7. – P. 509-519.