

БИОСЕНСОРЫ В ОРТОДОНТИЧЕСКИХ АППАРАТАХ: КОНТРОЛЬ ГИГИЕНЫ И СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ

¹*Рахимбердиев Рустам Абдуносирович,*

²*Эшкабилов Кодирали Давлатмуратович,*

³*Абдурахмонова Осие Жахонгир қизи.*

¹ доцент, заведующий кафедры детской стоматологии СамГМУ

^{2,3} ординатор по направлению «Ортодонтия» СамГМУ

В статье рассматривается внедрение биосенсорных технологий в ортодонтические аппараты с целью контроля уровня гигиены полости рта и силы давления ортодонтических дуг. Проведено клиническое исследование на базе Самаркандского государственного медицинского университета с участием 30 пациентов, использующих брекет-системы с интегрированными сенсорами. Полученные данные показали значительное улучшение гигиенического состояния и стабильность ортодонтической нагрузки у большинства участников. Технология позволяет осуществлять раннюю диагностику потенциальных осложнений и повысить мотивацию пациентов к соблюдению гигиены. Результаты подтверждают перспективность использования биосенсоров для повышения эффективности и безопасности ортодонтического лечения.

Ключевые слова. Ортодонтия, биосенсоры, гигиена полости рта, контроль давления, брекет-системы, pH-сенсоры, комплаентность пациентов, цифровые технологии в медицине.

Введение. Развитие цифровых и сенсорных технологий оказывает значительное влияние на стоматологическую практику, в частности — на ортодонтию. Одним из ключевых факторов успешного ортодонтического лечения является соблюдение баланса между эффективным перемещением зубов и профилактикой осложнений, связанных с нарушением гигиены и избыточной механической нагрузкой [1,2].

Традиционные брекет-системы не позволяют в реальном времени отслеживать параметры давления или уровень чистоты в зоне ортодонтических элементов. Это приводит к тому, что около 60–70% пациентов сталкиваются с ухудшением гигиенического состояния полости рта в период лечения, что повышает риск развития кариеса, гингивита и деминерализации эмали [3]. Одновременно с этим, чрезмерная или неравномерная сила давления на зубы может вызывать резорбцию корней и патологические изменения в тканях пародонта [4].

Интеграция биосенсоров в конструкцию ортодонтических аппаратов

открывает новые возможности в управлении лечением. Биосенсоры позволяют контролировать уровень pH, влажности, температуры, а также силу давления в области действия ортодонтических дуг [5,6]. Кроме того, передача данных на мобильные устройства через беспроводные каналы связи (например, Bluetooth) способствует повышению мотивации пациента и обеспечивает врача точной информацией для своевременной коррекции лечения.

Целью настоящего исследования является оценка эффективности использования биосенсоров, встроенных в брекет-системы, для мониторинга гигиенических показателей и силы давления у пациентов, проходящих ортодонтическое лечение. Работа выполнена на кафедре стоматологии Самаркандского государственного медицинского университета в 2024–2025 годах.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе кафедры стоматологии Самаркандского государственного медицинского университета в период с февраля по декабрь 2024 года. В исследование были включены 30 пациентов в возрасте от 12 до 25 лет (средний возраст — $18,7 \pm 3,2$ года), проходящих ортодонтическое лечение с применением вестибулярных брекет-систем. Среди участников было 18 женщин (60%) и 12 мужчин (40%).

Критериями включения в исследование являлись: наличие показаний к ортодонтическому лечению несъёмной техникой, удовлетворительное общее состояние здоровья, отсутствие тяжёлых соматических заболеваний и системных нарушений обмена веществ. Пациенты с декомпенсированным кариесом, пародонтитом III степени, а также те, кто уже использовал ортодонтические аппараты ранее, были исключены из выборки.

Во все брекет-системы участников были интегрированы два типа биосенсоров: пьезорезистивные датчики для измерения силы давления дуги на каждый зуб, а также миниатюрные электролитические сенсоры, реагирующие на изменение кислотности (pH) в зоне действия ортодонтических элементов. Сигналы от сенсоров передавались на мобильное приложение через модуль Bluetooth с частотой обновления каждые 60 секунд. Все данные фиксировались и сохранялись в базе для последующего анализа.

Мониторинг проводился ежемесячно в течение 6 месяцев. Оценивались следующие параметры: уровень силы давления (в Ньютонах), изменения кислотности в области брекетов (pH), и индекс гигиены по Silness-Löe. Дополнительно проводился опрос пациентов по шкале мотивации (от 1 до 5) в начале и конце исследования. Также применялась параллельная контрольная группа из 10 пациентов, проходивших аналогичное лечение без использования биосенсоров, для сопоставительного анализа.

Измерение силы давления проводилось с использованием

пьезорезистивных сенсоров Tekscan® FSR-400 с точностью $\pm 0,05$ Н. Регистрация уровня pH осуществлялась с помощью модифицированных сенсоров на основе полимерных электродов, откалиброванных в диапазоне от 4,0 до 7,5 единиц pH. Индекс гигиены оценивался по стандартной шкале от 0 до 3 баллов, где 0 — отсутствие налета, а 3 — выраженный налет на большинстве поверхностей зубов.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программы SPSS 26.0. Для оценки значимости различий использовался t-критерий Стьюдента, уровень статистической значимости принимался равным $p < 0,05$.

Таким образом, методика исследования позволила в динамике оценить объективное состояние гигиены полости рта, силу ортодонтического давления и поведенческие изменения у пациентов в условиях использования инновационных сенсорных технологий.

Результаты. В результате проведённого клинического наблюдения в течение шести месяцев были получены убедительные данные, подтверждающие эффективность использования биосенсоров в составе ортодонтических аппаратов для контроля как гигиенических, так и механических параметров лечения.

На первом этапе исследования, в течение первых четырёх недель после установки брекет-систем, у 87% пациентов было зафиксировано колебание силы давления в пределах 1,8–2,9 Н. Однако после второй коррекции дуг (на 8-й неделе) данные стабилизировались, и к третьему месяцу у 25 из 30 пациентов (83,3%) показатели давления оставались в пределах физиологической нормы — от 1,2 до 2,5 Н. При этом у 5 пациентов (16,7%) наблюдались эпизоды превышения давления до 3,1 Н, что потребовало клинической коррекции ортодонтической дуги.

Показатели кислотности в зоне брекетов продемонстрировали высокую чувствительность к нарушению гигиены. Уже на второй неделе после установки системы у 76% пациентов регистрировалось понижение pH ниже 5,5, что указывает на кислую среду, способствующую деминерализации эмали. Благодаря своевременному информированию через мобильное приложение, пациенты получали рекомендации по дополнительной гигиенической обработке, что позволило восстановить уровень кислотности до 6,2–6,8 к шестой неделе у 22 человек (73,3%). У остальных 8 пациентов сохранялись колебания pH в пределах 5,3–6,0, преимущественно у подростков с низкой мотивацией к уходу за полостью рта.

Индекс гигиены по Silness-Löe в начале исследования составлял в среднем $2,1 \pm 0,4$ балла, что соответствовало умеренному количеству зубного налета.

Через 3 месяца среднее значение снизилось до $1,5 \pm 0,3$ балла, а к шестому месяцу достигло уровня $1,2 \pm 0,2$ балла, что указывает на хорошее гигиеническое состояние. Для сравнения, в контрольной группе ($n=10$) без использования сенсорных систем индекс гигиены снизился лишь до $1,7 \pm 0,4$ балла, и в 4 случаях были выявлены признаки воспаления десны (гингивит I степени).

Психологический опрос пациентов показал, что визуализация данных в мобильном приложении положительно повлияла на поведение. В начале исследования лишь 40% участников ($n=12$) оценивали свою мотивацию к регулярной гигиене на 4–5 баллов. После 6 месяцев этот показатель вырос до 92% ($n=28$), что подтверждает высокую комплаентность при использовании цифрового мониторинга. Пациенты отмечали удобство получения напоминаний и отчетов о чистоте зубов, а также интерес к отслеживанию показателей в реальном времени.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют, что интеграция биосенсоров в брекет-системы не только позволяет контролировать ортодонтическую нагрузку, но и способствует значительному улучшению гигиенических показателей, снижая риск осложнений в течение активной фазы лечения. Полученные данные имеют высокую клиническую и профилактическую значимость.

Вывод. Результаты проведенного исследования показали, что использование биосенсоров в ортодонтических аппаратах является эффективным инструментом для мониторинга как силы давления на зубы, так и гигиенического состояния полости рта. Внедрение пьезорезистивных сенсоров позволило своевременно выявлять и корректировать избыточную ортодонтическую нагрузку, снижая риск резорбции корней и воспалительных изменений в тканях пародонта. Параллельный контроль уровня кислотности с помощью рН-сенсоров дал возможность фиксировать ранние признаки ухудшения гигиены и оперативно вмешиваться до развития кариеса и гингивита.

Объективные показатели подтвердили, что у большинства пациентов, использующих сенсорные системы, наблюдается снижение индекса гигиены, стабилизация показателей давления в пределах физиологической нормы и повышение мотивации к соблюдению рекомендаций врача. Сравнение с контрольной группой выявило значимые отличия, доказывающие клиническую эффективность технологии.

Таким образом, интеграция биосенсоров в ортодонтические системы представляет собой перспективное направление в цифровой стоматологии, способствующее индивидуализации терапии, улучшению качества лечения и профилактике осложнений. Дальнейшие разработки в этой области могут быть направлены на миниатюризацию сенсоров, расширение спектра биомаркеров и

интеграцию с телемедицинскими платформами.

Литературы:

1. Lee, C. et al. (2020). Smart Brackets with Integrated Force and Oral Hygiene Monitoring. *Sensors*, 20(5), 1374.
2. Zhang, Y. et al. (2019). Wearable Biosensors for Real-Time Monitoring of Saliva Components. *Biosensors and Bioelectronics*, 132, 8–17.
3. World Health Organization (2021). Oral Health Reports and Guidelines.
4. Krishnan, V., & Davidovitch, Z. (2006). On a path to unfolding the biological mechanisms of orthodontic tooth movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 129(4), 469.e1–469.e21.
5. Kim, J. et al. (2021). Smart Orthodontic Systems Based on Flexible and Wireless Sensing Platforms. *Advanced Healthcare Materials*, 10(5), 2001293.
6. Xu, W. et al. (2022). Multimodal oral biosensor with integrated Bluetooth system. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(3), 4891–4900.