



Бабаев Д.В.¹ ✉, Адамчик А.А.¹, Рубникович С.П.², Денисова Ю.Л.²

¹ Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Россия

² Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

Выбор оптимального способа препарирования пришеечных эрозий: сравнительный анализ лазерного, воздушно-абразивного и ультразвукового методов в концепции минимально инвазивной стоматологии

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: концепция и дизайн исследования, сбор материала, написание текста – Д.В. Бабаев; редактирование статьи, обработка текста – А.А. Адамчик, С.П. Рубникович, Ю.Л. Денисова.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Подана: 01.04.2026

Принята: 08.06.2026

Контакты: mr.dmitriibabaev@mail.ru,

Резюме

Введение. Пришеечные эрозии зубов кислотной этиологии представляют собой одну из наиболее актуальных проблем современной терапевтической стоматологии. Эрозивные поражения характеризуются специфической морфологией утраты твердых тканей, деминерализацией подповерхностного слоя и близостью пульпарной камеры, что предъявляет особые требования к методу препарирования. Концепция минимально инвазивной стоматологии предполагает максимальное сохранение жизнеспособных тканей зуба при обеспечении надежной адгезии реставрационного материала.

Цель. Провести сравнительный анализ эффективности Er:YAG-лазерного, воздушно-абразивного и ультразвукового методов препарирования пришеечных эрозий кислотной этиологии на основании данных современной рецензируемой литературы.

Материалы и методы. Выполнен систематический обзор литературы по базам PubMed, Scopus, Web of Science (2000–2026). Проанализированы исследования *in vitro*, *in vivo* и клинические исследования, оценивающие морфологию препарированной поверхности, прочность адгезивного соединения, термическое воздействие на пульпу, степень сохранения здоровых тканей и клинический комфорт пациента.

Результаты. Er:YAG-лазер формирует микроретентивный рельеф и обеспечивает минимальное термическое повреждение при водяном охлаждении, однако без дополнительного кислотного протравливания прочность адгезии снижается. Воздушно-абразивный метод демонстрирует наибольшую селективность удаления пораженных тканей с сохранением призматической структуры эмали. Ультразвуковое препарирование обеспечивает высокую точность при минимальной вибрации, но характеризуется низкой скоростью.

Заключение. На основании проведенного сравнительного анализа установлено, что не существует единственного универсально оптимального метода препарирования

пришеечных эрозий кислотной этиологии. Выбор методики должен определяться индивидуальными клиническими условиями: глубиной и протяженностью дефекта, состоянием маргинального пародонта, психоэмоциональным статусом пациента и техническими возможностями клиники. Оптимальным представляется дифференцированный подход с комбинированием методов в зависимости от глубины и стадии эрозивного поражения.

Ключевые слова: эрозия зубов, минимально инвазивная стоматология, Er:YAG-лазер, воздушно-абразивное препарирование, ультразвуковое препарирование, адгезия, некариозные пришеечные поражения

Babaev D.¹ ✉, Adamchik A.¹, Rubnikovich S.², Denisova Ju.²

¹ Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia

² Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

Choosing the Optimal Method for the Preparation of Cervical Lesions: A Comparative Analysis of Laser, Air-Abrasive and Ultrasound Methods in the Concept of Minimally Invasive Dentistry

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: the concept and design of research, collecting material, writing text – Babaev D.; editing, processing text – Adamchik A., Rubnikovich S., Denisova J.

Funding: the authors declare no funding for the study.

Submitted: 01.04.2026

Accepted: 08.06.2026

Contacts: mr.dmitriibabaev@mail.ru

Abstract

Introduction. Cervical dental erosions of acid aetiology constitute one of the most pressing challenges in contemporary restorative dentistry. Erosive lesions are characterised by a distinctive pattern of hard tissue loss, subsurface demineralisation, and proximity to the pulp chamber, all of which impose specific demands on the preparation technique. The concept of minimally invasive dentistry advocates maximum preservation of vital tooth structure while ensuring reliable adhesion of the restorative material.

Purpose. To conduct a comparative analysis of the efficacy of Er:YAG laser, air-abrasion, and ultrasonic preparation methods for cervical erosions of acid aetiology, based on current peer-reviewed literature.

Materials and methods. A systematic literature review was performed using the PubMed, Scopus, and Web of Science databases (2000–2026). In vitro, in vivo, and clinical studies evaluating the morphology of the prepared surface, adhesive bond strength, thermal effects on the pulp, degree of sound tissue preservation, and patient comfort were analysed.

Results. The Er:YAG laser produces a micro-retentive surface topography and causes minimal thermal damage when used with water irrigation; however, in the absence of supplementary acid etching, adhesive bond strength is reduced. Air-abrasion

demonstrates the highest selectivity in removing affected tissues while preserving the prismatic enamel structure. Ultrasonic preparation affords high precision with minimal vibration, yet is characterised by a comparatively low cutting rate.

Conclusion. The present comparative analysis demonstrates that no single universally optimal method exists for the preparation of cervical erosions of acid aetiology. The choice of technique should be determined by individual clinical circumstances: the depth and extent of the defect, the condition of the marginal periodontium, the psycho-emotional status of the patient, and the technical capabilities of the clinical setting. A differentiated approach combining methods according to the depth and stage of the erosive lesion appears to be the most rational strategy.

Keywords: dental erosion, minimally invasive dentistry, Er:YAG laser, air-abrasion preparation, ultrasonic preparation, adhesion, non-carious cervical lesions

■ ВВЕДЕНИЕ

Эпидемиологические данные свидетельствуют о значительном росте распространенности эрозий твердых тканей зубов: статистические показатели достигают отметки 82% среди взрослого населения [1]. Эрозивное поражение зубов определяется как необратимая потеря твердых тканей вследствие химического растворения кислотами небактериального происхождения [2]. Однако это определение не учитывает пьезоэлектрические и протеолитические эффекты, которые являются неотъемлемой частью биохимических и электрохимических процессов изнашивания твердых тканей зуба. В этом смысле термин «биокоррозия» более точно определяет это состояние [3, 4]. Пришеечная локализация эрозивных дефектов заслуживает особого внимания в связи с тонкостью эмалевого слоя в цервикальной области, близостью пульпы зуба и специфическим характером распределения окклюзионных нагрузок [5]. В связи с этими особенностями необходимо отметить, что в отличие от кариеса, который прогрессирует по треугольной схеме, эрозивные поражения эмали и дентина прогрессируют по поверхности, характеризующейся постепенной декальцинацией в параллельной плоскости [6].

Морфологически эрозии кислотной этиологии отличаются от кариозных поражений: они характеризуются поверхностным размягчением, градиентным переходом в здоровую ткань без четких границ и наличием зоны частично деминерализованного дентина, потенциально способного к реминерализации [7]. Это принципиально важно, поскольку агрессивное удаление таких тканей приводит к необоснованной потере структур, сохраняющих репаративный потенциал [8].

Концепция минимально инвазивной стоматологии, сформулированная Tyas et al. и развитая Frencken et al., постулирует приоритет биологического подхода: максимальное сохранение тканей, управление факторами риска и применение адгезивных технологий [8, 9]. В рамках этой концепции традиционное ротационное препарирование турбинным наконечником все чаще рассматривается как избыточно инвазивное для неглубоких эрозивных поражений [10].

Альтернативные методы – Er:YAG-лазерное (длина волны 2940 нм), воздушно-абразивное (частицы оксида алюминия) и ультразвуковое препарирование – позволяют реализовать принцип селективного удаления тканей [8–10]. Однако

систематический сравнительный анализ этих методов применительно к пришеечным эрозиям кислотной этиологии в литературе представлен недостаточно широко.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести сравнительный анализ эффективности Er:YAG-лазерного, воздушно-абразивного и ультразвукового методов препарирования пришеечных эрозий кислотной этиологии на основании данных современной рецензируемой литературы.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен обзор литературы в базах данных PubMed/MEDLINE, Scopus и Web of Science. Поисковые запросы: dental erosion AND laser preparation, air abrasion AND tooth erosion, ultrasonic preparation AND minimally invasive dentistry, Er:YAG AND bond strength, non-carious cervical lesions AND preparation methods. Период поиска: 2000–2026 гг. Язык: английский и русский. Критерии включения: оригинальные исследования *in vitro* и *in vivo*, клинические исследования, систематические обзоры и метаанализы, оценивающие альтернативные методы препарирования твердых тканей зубов при эрозивных и некариозных пришеечных поражениях. Критерии исключения: описания единичных клинических случаев, публикации без рецензирования. Анализируемые параметры: морфология поверхности (СЭМ), прочность адгезивного соединения, температурные изменения в пульпарной камере, объем удаленных тканей, субъективный комфорт пациента.

Весь процесс поиска и отбора научной литературы по заданным параметрам представлен на рис. 1.

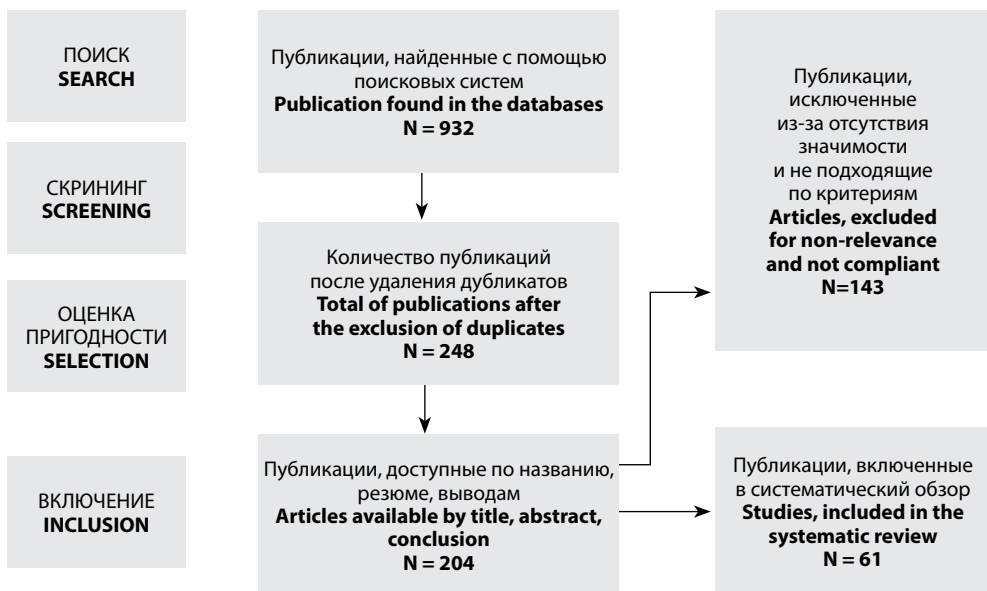


Рис. 1. Критерии отбора публикаций
Fig. 1. Publication selection criteria

■ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Er:YAG-лазерное препарирование

Er:YAG-лазер (2940 нм) является наиболее изученным лазерным источником для препарирования твердых тканей зуба. Механизм действия основан на поглощении излучения водой и гидроксипатитом, что вызывает микровзрывное испарение и абляцию ткани [11–13]. При параметрах 100–300 мДж, 10–20 Гц с водяным охлаждением повышение температуры в пульпарной камере не превышает критического порога 5,5 °С, установленного Zach и Cohen [14].

Принцип Er:YAG-лазерного препарирования представлен на рис. 2.

СЭМ-исследования показали, что Er:YAG-лазер формирует характерную микрошероховатую поверхность полости с закругленными углами и открытыми дентинными канальцами, при этом отсутствует смазанный слой, а также нет сколов и царапин на стенках и дне полости [11, 12, 30]. De Munck et al. продемонстрировали, что прочность адгезии к облученному лазером дентину при использовании etch-and-rinse адгезивов сопоставима с классическим ротационным препарированием, тогда как без дополнительного протравливания она снижается на 20–30% [15].

Специфика эрозивного поражения – наличие деминерализованного, но структурно сохранного дентина. Применительно к эрозивным поражениям существенное значение приобретает способность эрбиевого лазера к избирательному взаимодействию с тканями различной степени минерализации. Деминерализованный эрозией дентин содержит больше воды, и, следовательно, абляция происходит при меньших энергетических параметрах, чем удаление интактной ткани [16, 17]. Варьирование длительности импульса Er:YAG-лазера позволяет контролировать глубину абляции и оптимизировать адгезивный потенциал поверхности дентина [18]. Микроскопические исследования также показали, что лазерное облучение вызывает множество

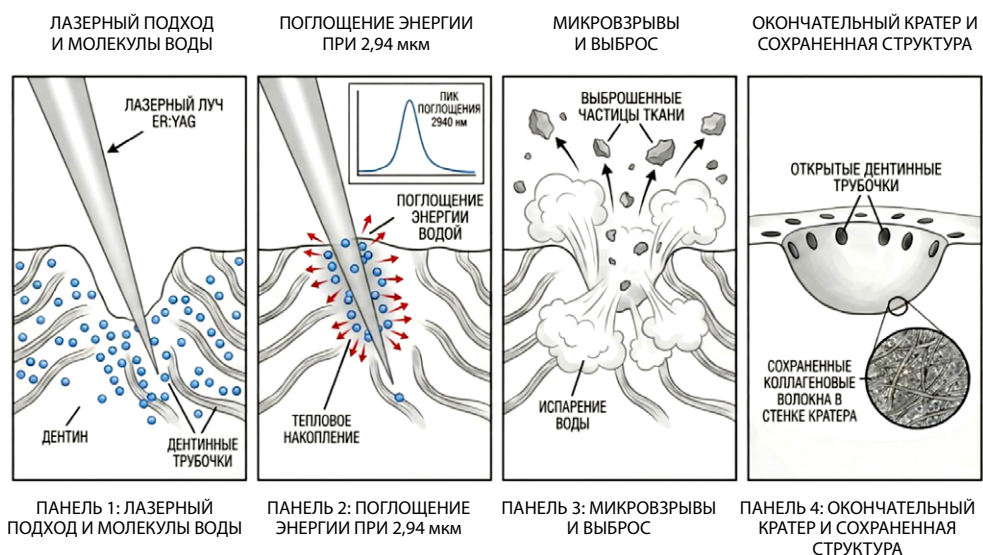


Рис. 2. Принцип Er:YAG-лазерного препарирования
Fig. 2. Principle of Er:YAG laser preparation

неровностей поверхности диаметром в микрон. Таким образом, лазер улучшает химическую и механическую прочность соединения между дентином и реставрационными материалами, изменяя поверхность дентина за счет увеличения поверхностной энергии и уменьшения количества неровностей. Твердость дентина в полостях после обработки лазером выше, чем в полостях, обработанных бором. Это объясняется более высоким содержанием минералов в дентине после препарирования лазером, было обнаружено меньше кальция и больше фосфора по сравнению с полостями, препарированными классическим ротационным способом. Твердость и минеральный состав дентина являются важными факторами сцепления со стоматологическими материалами, поэтому в полости, подготовленной лазером, ожидается лучшее сцепление [19].

Клинически значимым преимуществом является снижение болевых ощущений. Большинство процедур лазерного препарирования пришеечных дефектов выполняются без местной анестезии. Результаты, полученные в ходе нескольких исследований, представленных в настоящем обзоре, показали, что применение лазеров эффективно не только с точки зрения лечения гиперестезии твердых тканей зубов, но и для ее профилактики после препарирования [20]. Schwass et al. в обзоре применения лазеров в минимально инвазивной стоматологии подтвердили анальгетический потенциал Er:YAG-лазера и его совместимость с адгезивными реставрациями при условии кислотного протравливания [21].

Преимущества лазерного препарирования перед традиционными методами включают:

- сокращение времени на психологическую подготовку пациента;
- отсутствие необходимости в анестезии, что экономит 10–15 мин времени;
- упрощение работы врача, так как используется только один инструмент (лазер), без необходимости частой смены боров и наконечников;
- уничтожение микрофлоры, что снижает риск глубокого инфицирования дентина [11, 12].

Однако лазерное препарирование имеет свои ограничения:

- оптимальность метода при неглубоких поражениях с прямым доступом (тогда как обработка обширных полостей может быть длительной и трудоемкой);
- высокая стоимость оборудования и дороговизна лечения для пациентов;
- необходимость высокой квалификации врача;
- вероятность травмирования мягких тканей при нарушении техники [22, 23].

Важно отметить, что лазерное препарирование в основном успешно применяется при лечении необширных кариозных поражений эмали и дентина, особенно в пришеечной области, где довольно часто наблюдается повышенная чувствительность. К сожалению, имеется недостаточное количество исследований, подтверждающих эффективность эрбиевого лазера при лечении некариозных поражений, таких как клиновидные дефекты или эрозии эмали кислотного генеза. Это указывает на необходимость дальнейших исследований в данной области [24].

2. Воздушно-абразивное препарирование

Воздушно-абразивный метод основан на кинетическом воздействии потока частиц оксида алюминия (27–50 мкм), подаваемых сжатым воздухом при давлении 40–120 psi. Метод позволяет удалять деминерализованные ткани с высокой селективностью, сохраняя призматическую структуру эмали [25].

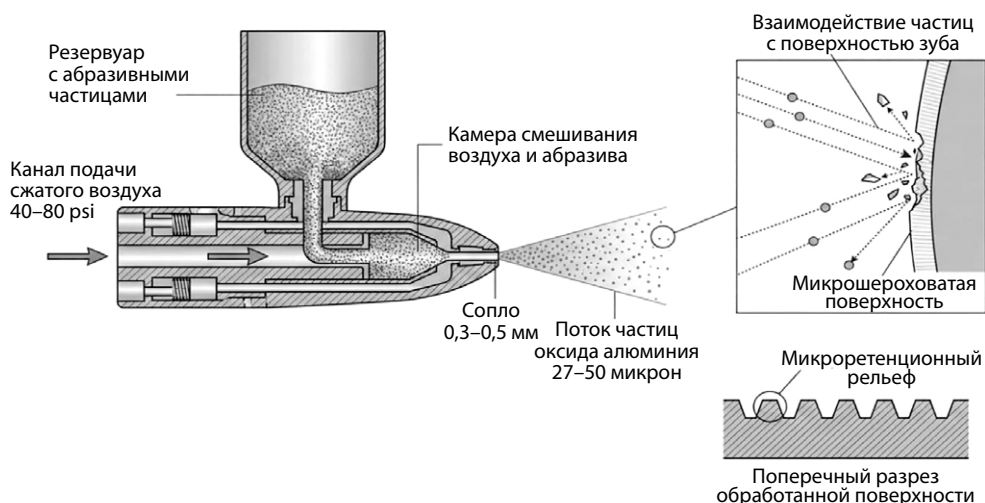


Рис. 3. Принцип работы воздушно-абразивного препарирования
Fig. 3. Principle of air abrasive preparation

Принцип работы воздушно-абразивного метода представлен на рис. 3.

Основные преимущества данного метода:

- отличается минимальной инвазией, что позволяет селективно удалять пораженные ткани, максимально сохраняя здоровые структуры зуба;
- метод не требует анестезии, так как отсутствуют вибрация, шум и перегрев тканей;
- процедура занимает 10–15 мин и не вызывает стресса у пациентов;
- после препарирования поверхность зуба остается шероховатой, что улучшает сцепление с пломбировочными материалами;
- подходит для детей и пациентов с дентофобией – метод бесшумный и не вызывает страха перед лечением [26, 27].

Выявлены недостатки воздушно-абразивного метода препарирования:

- метод подходит только для небольших кариозных полостей на ранних стадиях. Для глубоких полостей или труднодоступных участков требуется дополнительное использование боров;
- после процедуры у некоторых пациентов может временно усиливаться чувствительность зубов;
- некоторые области (например, контактные поверхности зубов) будут недоступны для препарирования из-за конструктивных особенностей наконечника аппарата;
- существуют ограничения по выбору пломбировочных материалов (можно использовать только композитные материалы – они хорошо сцепляются с обработанной поверхностью. Для других материалов, например цемента, требуется традиционная подготовка полости);
- оборудование имеет высокую стоимость, что может сделать его недоступным для большинства клиник;
- метод требует от врача определенных навыков и опыта, что может дополнительно увеличить время на подготовку полости;

- отличается ограниченной эффективностью при удалении старых реставраций;
- для защиты слизистой оболочки и соседних зубов от воздействия абразива требуется использование раббердама или защитных герметиков, что может усложнить проведение процедуры;
- при воздушно-абразивном методе препарирования зуба рекомендуется использовать респиратор (аспиратор) для удаления аэрозольных частиц. Это связано с тем, что частицы абразива, например оксида алюминия, могут вызывать респираторные проблемы у пациента и врача [26, 27].

Фундаментальные работы Banerjee et al. продемонстрировали, что воздушно-абразивное препарирование формирует поверхность с минимальным смазанным слоем и выраженной микроретенцией [25]. Прочность адгезивного соединения после воздушно-абразивной обработки сопоставима или превышает таковую после борного препарирования при использовании систем тотального протравливания. Исследования подтверждают, что воздушно-абразивная обработка оксидом алюминия 27 мкм создает оптимальный микрорельеф для адгезии композитных материалов к эмали и дентину [29].

Для пришеечных эрозий кислотной этиологии метод имеет специфическое преимущество: при обработке размягченного эрозией дентина достигается оптимальный баланс между удалением поврежденной ткани и сохранением реминерализуемого слоя. Количественные данные свидетельствуют о потере ткани на 40–60% меньше, чем при ротационном препарировании [28, 29].

Ограничения метода: невозможность работы с глубокими полостями, образование аэрозоля, необходимость коффердама и эффективной аспирации, а также малая эффективность при удалении интактной эмали для формирования финишной линии [30].

3. Ультразвуковое препарирование

Ультразвуковые наконечники с алмазным покрытием (частота 25–30 кГц) обеспечивают прецизионное удаление тканей за счет осцилляторных движений рабочей части с амплитудой 10–100 мкм. Изначально ультразвуковое препарирование было разработано с использованием наконечников различной формы, чтобы помочь подготовить заранее определенные контуры полости, но также хорошо подходит для удаления твердых тканей на этапе завершения подготовки полости [25]. Данный метод широко применяется при минимально инвазивном препарировании, особенно в труднодоступных пришеечных зонах. Интересен тот факт, что если прилагаемое давление при работе наконечником слишком велико, то эффективность препарирования заметно снижается из-за физического эффекта гашения колебаний – важный момент в концепции минимально инвазивного вмешательства [25, 33].

Ультразвуковые насадки, предназначенные для минимально инвазивного препарирования твердых тканей зубов, представлены на рис. 4.

Рабочее действие ультразвуковых абразивных наконечников основано на 4 различных эффектах:

1. Вибрация, характеризуемая частотой (определяет амплитуду и траекторию движения наконечника), управляет воздействием инструмента на ткани. Она варьируется в зависимости от мощности, обеспечиваемой генератором, применяемого наконечника и количества жидкости, используемой с помощью наконечника (при использовании большего количества жидкости вибрация ослабляется).

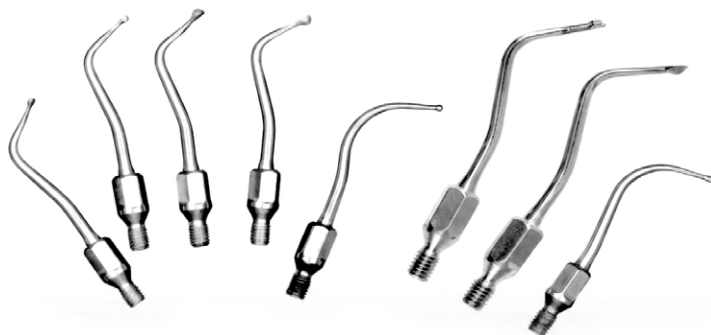


Рис. 4. Ультразвуковые насадки SONICflex от KaVo
Fig. 4. KaVo SONICflex ultrasonic tips

2. Механическое истирание – это физическое воздействие, связанное с вибрацией, которое зависит от размера алмазного покрытия наконечника и твердости ткани: чем тверже ткань, тем эффективнее истирание (эмаль > деминерализованная эмаль > дентин > цемент > разрушенные ткани > мягкие ткани). Ультразвуковая абразия менее эффективна на мягких материалах, поэтому она в меньшей степени подходит для удаления мягкого кариозного дентина, но оказывает незначительное негативное ятрогенное воздействие на пародонт и мягкие ткани.
3. Тепловой эффект. Зависит от вибрации и продолжительности использования, поэтому необходимо применять водяное охлаждение и работать при прерывистом контакте, чтобы избежать нагревания тканей.
4. Кавитация – это схлопывание микропузырьков, образующихся под действием ультразвуковых волн в жидкости во время работы. Она играет важную роль в очистке поверхности и удалении дебриса [34].

Морфология поверхности после ультразвуковой обработки характеризуется относительной гладкостью с тонким, частично дезорганизованным смазанным слоем. При пришеечных эрозиях данный метод привлекателен прежде всего возможностью тактильного контроля глубины воздействия и отсутствием макровибрации, что снижает вероятность формирования микротрещин в ослабленной деминерализацией эмали. Термический фактор при адекватном водяном охлаждении не представляет опасности для пульпы. Основные недостатки ультразвукового препарирования – существенно меньшая скорость работы по сравнению с ротационными и лазерными инструментами, ограниченная номенклатура насадок для цервикальной области и, что особенно важно, крайне малое количество рандомизированных клинических исследований, позволяющих оценить долгосрочные результаты реставраций, выполненных с применением данной технологии [34–36].

В исследовании Zesewitz et al. (2005) 36 образцов дентина с рассеченными пополам коренными зубами человека были обработаны 6 различными методами препарирования кариеса, воспроизведены и затем исследованы с помощью сканирующего

электронного микроскопа. Поверхности были исследованы до и после удаления смазанного слоя при увеличении в 200 и 1000 раз. При увеличении в 200 раз образцы, обработанные ультразвуком, показали значительно более волнистый рельеф дентина, чем образцы, обработанные другими методами, что теоретически может положительно влиять на микроретенцию, однако требует дополнительных клинических исследований для подтверждения [35].

Исследования образцов зубов *in vitro* с участками УЗ-препарирования под микроскопом показали, что стенки полостей получались мелкозубчатыми, без трещин, без признаков разрушения эмалевых призм и структуры дентинных канальцев. Исследования пульпы показали отсутствие некроза и каких-либо морфологических изменений структуры одонтобластов. Однако были отмечены обратимые гиперемия сосудов и отек пульпы. Таким образом, при обработке полости ультразвуком элиминируются только размягченные деминерализованные эмаль и дентин, при этом не затрагиваются интактные ткани зуба, что полностью соответствует принципам биологической целесообразности и минимально инвазивной стоматологии [41].

■ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ свидетельствует, что ни один из рассмотренных методов не обладает безусловным превосходством по всему спектру клинически значимых параметров. Это согласуется с позицией Banerjee et al., сформулированной в консенсусном документе по минимально инвазивному удалению пораженных тканей: выбор инструмента должен определяться конкретной клинической ситуацией, а не унифицированным протоколом [25, 28, 32].

Традиционное препарирование алмазными борами считается самым быстрым из всех исследуемых методик препарирования ($6,9 \pm 1,2$ мин). Время, затраченное лазером Er,Cr:YSGG ($10,5 \pm 2,1$), больше, чем при ротационном препарировании, но сопоставимо с ультразвуковым методом, – $11,2 \pm 1,1$. Самой длительной по времени процедурой оказалось воздушно-абразивное препарирование – $12,5 \pm 2,5$ [37–39]. Данные по длительности изучаемых альтернативных методов препарирования сведены в график (рис. 5).

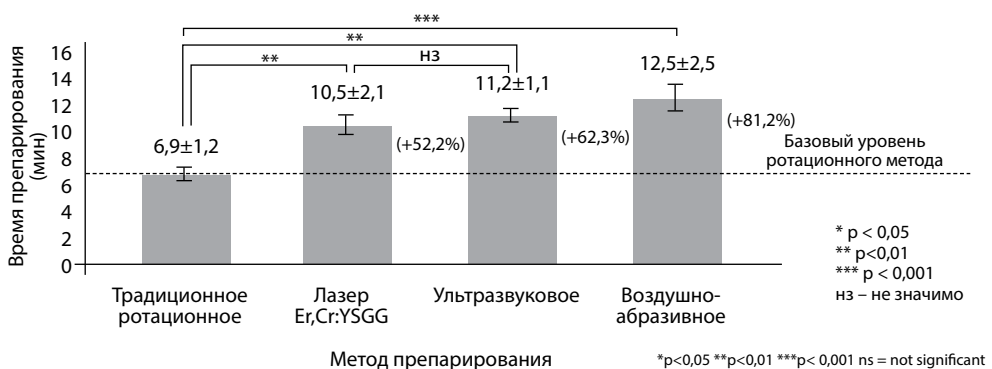


Рис. 5. Сравнение среднего времени препарирования различными методами
Fig. 5. Comparison of average preparation times for different methods

Для систематизации показаний целесообразно опираться на классификацию Basic Erosive Wear Examination (BEWE), предложенную Bartlett et al. и позволяющую стандартизировать оценку тяжести эрозивного износа [31].

При поверхностных и средних эрозиях (BEWE 1–2), когда деструкция ограничена эмалью и поверхностным дентином, воздушно-абразивный метод представляется оптимальным выбором. Его преимущества – наивысшая селективность, сохранение призматической структуры маргинальной эмали и возможность одновременной реминерализации при использовании биоактивного стекла – наиболее полно реализуются именно в данном клиническом сценарии [10, 18, 19]. При глубоких эрозиях (BEWE 3), сопровождающихся значительной потерей дентина, предпочтение следует отдать Er:YAG-лазеру. Возможность контролируемой послойной абляции размягченного дентина, анальгетический эффект, снижающий необходимость в местной анестезии, и формирование микроретентивной поверхности с открытыми дентинными канальцами обеспечивают оптимальные условия для последующей адгезивной реставрации при условии дополнительного кислотного протравливания [28, 29]. Ультразвуковой метод целесообразно применять в поддесневых и труднодоступных участках цервикальной зоны, где его прецизионность и атравматичность наиболее востребованы [37–39].

Говоря о препарировании, важно учитывать термическую безопасность по отношению к пульпе зуба. Классическим ориентиром остается работа Zach & Cohen (1965), установивших, что повышение интрапульпарной температуры на 5,5 °C вызывает необратимые повреждения пульпы в 15% случаев. В пришеечной зоне остаточная толщина дентина минимальна, что делает термический контроль критически важным [14].

Ротационное препарирование (алмазный бор) – наиболее термоагрессивный метод. При работе без водяного охлаждения подъем температуры пульпы достигает 16–18 °C, что гарантированно повреждает ткань [40]. Даже при адекватной ирригации (50 мл/мин) регистрируется повышение на 2,5–4,8 °C, приближающееся к критическому порогу [46]. Основные факторы – высокая скорость вращения, давление на ткань и фрикционное теплообразование. В пришеечной области риск возрастает из-за малой толщины дентинного барьера [14]. Высокоскоростное роторное препарирование демонстрирует наиболее агрессивный термический профиль, превышая критический порог уже к 10-й секунде и достигая 49 °C (+12 °C) к концу цикла. Был зафиксирован подъем температуры до 16–18 °C при недостаточной ирригации [40].

Механизм абляции Er:YAG-лазера основан на микровзрывном испарении воды в твердых тканях (длина волны 2940 нм совпадает с пиком поглощения воды), и при работе с водно-воздушным спреем повышение интрапульпарной температуры составляет 1,5–3,5 °C [41–43]. Без охлаждения температура возрастает значительно – до 8–12 °C, что уже опасно [14]. Ключевой параметр – плотность энергии: при превышении 300 мДж/импульс даже с охлаждением возможны термические артефакты в дентине [44]. Er:YAG-лазер пересекает критическую границу около 35-й секунды препарирования, достигая 44 °C (+7 °C). Это объясняется накоплением тепловой энергии при длительной экспозиции, несмотря на «холодный» механизм абляции. Соблюдение импульсного режима и водно-воздушного охлаждения критически важно [43].

Воздушно-абразивный метод (Al_2O_3) считается наиболее термобезопасным. Кинетическая энергия частиц оксида алюминия (27–50 мкм) удаляет ткань без



прямого теплового контакта. Повышение интрапульпарной температуры составляет 0,5–2,0 °C – значительно ниже критического порога [45, 29]. Отмечается даже незначительное охлаждение поверхности за счет расширения воздушной струи, температура стабилизируется на 38 °C (+1 °C). Метод оптимален для тонкостенных пришеечных дефектов [29].

Ультразвуковые насадки работают на частоте 25–30 кГц с обязательной водяной ирригацией. Повышение температуры пульпы составляет 1,0–3,0 °C [46, 47]. Термобезопасность обеспечивается низкой амплитудой колебаний и постоянным потоком охлаждающей жидкости. Однако при недостаточной ирригации или избыточном давлении возможен локальный нагрев до 5–6 °C [40]. Ультразвуковой метод препарирования удерживается в безопасной зоне (до 40 °C, +3 °C) при адекватной ирригации [46].

Данные по термическому воздействию на пульпу зуба изучаемых альтернативных методов препарирования представлены в виде графиков на рис. 6 и 7.

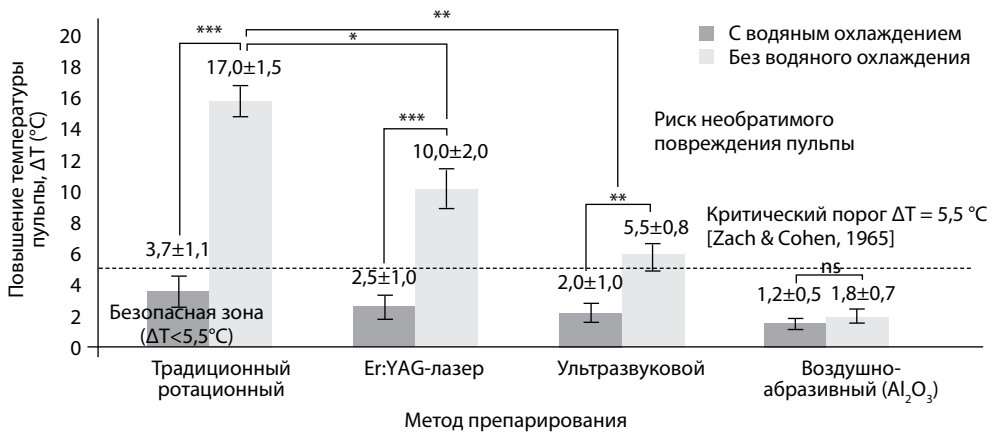


Рис. 6. Общее изменение температуры пульпы во время препарирования
Fig. 6. Overall change in pulp temperature during preparation

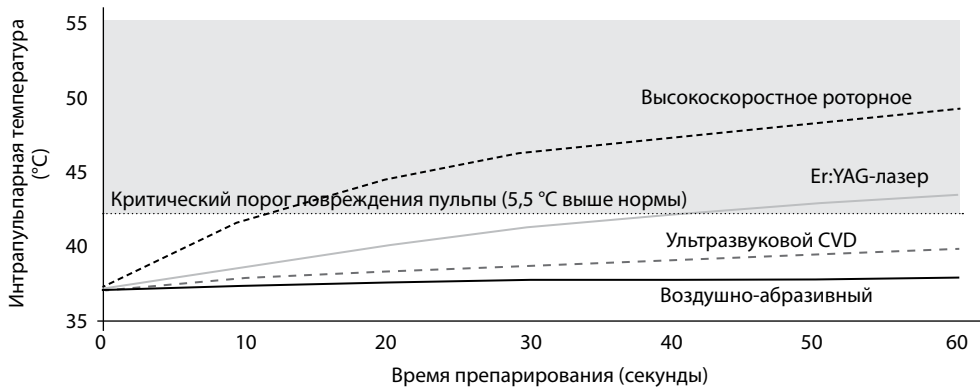


Рис. 7. Сравнение повышения температуры в пульповой камере зуба во время непрерывного препарирования (60 с) различными методами
Fig. 7. Comparison of temperature increase in the pulp chamber during continuous preparation (60 seconds) using different methods

Необходимо подчеркнуть 2 принципиальных положения. Во-первых, решение о необходимости оперативного вмешательства при эрозиях кислотной этиологии должно приниматься только после устранения или надежного контроля этиологического фактора и стабилизации процесса деминерализации [48]. Во-вторых, при поверхностных дефектах, не достигших дентина, современные адгезивные системы и композитные материалы нередко позволяют выполнить реставрацию вовсе без препарирования – так называемая техника no-prep, которую Vailati и Belser успешно применили при комплексной адгезивной реабилитации эрозивно измененных зубных рядов [50]. Данный подход представляет собой высшее воплощение принципа минимальной инвазивности. Современные универсальные адгезивные системы, эволюцию которых проследили Van Meerbeek et al., от классической кислотно-протравочной техники Buonopore до самоадгезивных материалов обеспечивают надежную связь с различными по степени минерализации субстратами, расширяя возможности консервативного подхода [51, 52].

Проведем попарное сравнение каждого исследуемого альтернативного метода с классическим ротационным:

1. Лазерное препарирование (Er:YAG-лазер)

Таблица 1
Er:YAG-лазер vs ротационное препарирование
Table 1
Er:YAG-laser vs rotary dental preparation

Параметр сравнения	Er:YAG-лазер	Ротационное препарирование	Источник
μTBS к дентину (total-etch)	25,3±6,1 МПа (OptiBond FL)	28,7±5,4 МПа (OptiBond FL)	De Munck et al. (2002) [53]
μTBS к дентину (self-etch)	16,8±4,2 МПа (Clearfil SE Bond)	24,1±5,8 МПа (Clearfil SE Bond)	De Munck et al. (2002) [53]
μTBS к эмали (total-etch)	29,4±8,7 МПа	33,2±7,1 МПа	De Munck et al. (2002) [53]
Смазанный слой	Отсутствует полностью	Выражен (толщина 1–5 мкм)	Keller & Hibst (1989) [12]; Erickson (1992) [54]
Морфология поверхности (СЭМ)	Нерегулярная микрошероховатость, открытые дентинные каналы, «лавообразные» структуры рекристаллизации	Относительно гладкая поверхность с параллельными бороздами, смазанный слой, закупоренные каналы	Visuri et al. (1996) [55]
Повышение температуры пульпы (ΔT)	2,5–3,8 °C (при водяном охлаждении, 200–300 мДж, 10 Гц)	4,2–5,1 °C (при водяном охлаждении, 400 000 об/мин)	Zach & Cohen (1965) [14]; Hibst & Keller (1989) [11]
Скорость абляции дентина	0,3–0,5 мм³/с (при 300 мДж, 10 Гц)	1,2–2,0 мм³/с	Hedgehog et al.; Hibst & Keller (1989) [11]
Вибрация и шум	Отсутствуют	Выражены (вибрация бора, шум турбины ~70–80 дБ)	Keller & Hibst (1989) [12]
Необходимость анестезии	Во многих случаях не требуется (до 80% процедур на дентине)	Требуется в большинстве случаев	Schwass et al. (2013) [56]
Микроподтекание	Сопоставимо с ротационным при total-etch-протоколе	Контроль	Esteves-Oliveira et al. (2007) [57]

Окончание таблицы 1

Селективность к деминерализованному дентину	Умеренная (зависит от параметров) – более высокое содержание воды в пораженном дентине облегчает абляцию	Отсутствует – бор удаляет ткань вне зависимости от степени минерализации	Hibst & Keller (1989) [11]
---	--	--	----------------------------

Совокупность данных свидетельствует, что Er:YAG-лазер может обеспечить качество адгезивного соединения, сопоставимое с ротационным препарированием, при условии использования техники тотального протравливания. Это ключевая оговорка. De Munck et al. [53] однозначно продемонстрировали, что самопротравливающие адгезивы на лазерно-обработанной поверхности формируют достоверно более слабое соединение. Причина заключается в том, что самопротравливающие системы рассчитаны на взаимодействие со смазанным слоем, которого после лазерной обработки не существует, а также в том, что зоны термической модификации дентина (рекристаллизации гидроксиапатита) могут быть устойчивы к слабым кислотным мономерам. Главными клиническими преимуществами лазера остаются анальгетический эффект и атравматичность процедуры, главным недостатком – низкая скорость работы, что увеличивает продолжительность клинического приема и, соответственно, стоимость процедуры [11, 12, 56].

2. Воздушно-абразивное препарирование (Al_2O_3 / биоактивное стекло)

Таблица 2
Воздушно-абразивная обработка vs ротационное препарирование
Table 2
Air-abrasive treatment vs rotational preparation

Параметр сравнения	Воздушная абразия (Al_2O_3 / биоактивное стекло)	Ротационное препарирование	Источник
Объем удаленного здорового дентина	Достоверно меньше ($p < 0,05$); наибольшая тканесохранность среди всех методов	Контроль – наибольший объем избыточного удаления	Banerjee et al. (2000) [13]
μSBS к дентину (total-etch)	$18,9 \pm 4,3$ МПа (Al_2O_3 , 27 мкм) – различия с бором незначимы	$20,1 \pm 5,2$ МПа	Youssef et al. (2008) [58]
Смазанный слой	Минимальный или отсутствует	Выражен	Banerjee et al. (2000) [13]
Ретенция частиц на поверхности	Частицы Al_2O_3 или биоактивного стекла обнаруживаются на поверхности дентина при СЭМ	Не применимо	Paolinelis et al. (2008) [12]
Влияние ретенированных частиц на адгезию	Не ухудшает адгезию при total-etch протоколе	Не применимо	Paolinelis et al. (2008) [29]
Реминерализующий эффект (биоактивное стекло)	Подтвержден: высвобождение Ca^{2+} , PO_4^{3-} , SiO_4^{4-} , формирование апатитоподобного слоя	Отсутствует	Banerjee et al. (2011) [28] Paolinelis et al. (2008) [29]
Способность работать в глубоких полостях	Ограничена – эффективна преимущественно для поверхностных и среднеглубоких поражений	Не ограничена	Banerjee (2013) [10]
Контроль глубины препарирования	Затруднен – нет тактильной обратной связи	Тактильная обратная связь через бор	Banerjee (2013) [10]
Повышение температуры пульпы	Не регистрируется (атермический процесс)	$4,2\text{--}5,1$ °C	Banerjee et al. (2000) [13]

Окончание таблицы 2

Шум и вибрация	Шум воздушного потока (~65 дБ); вибрация отсутствует	Шум наконечника (~75 дБ); выраженная вибрация	Black (1945, цит. по [10])
Необходимость анестезии	Часто не требуется для поверхностных дефектов	Обычно требуется	Banerjee (2013) [10]
Формирование ретенционной формы полости	Невозможно – метод не создает макроретенцию	Возможно (поднутрения, скосы)	Banerjee (2013) [10]
Селективность к деминерализованному дентину	Высокая – «самоограничивающийся» эффект	Отсутствует	Banerjee et al. (2000) [13]

Воздушная абразия занимает уникальную нишу как наиболее тканесберегающий метод. Результаты Banerjee et al. [13] – единственное масштабное прямое сравнение 5 методов экскавации – убедительно показывают, что при воздушной абразии удаляется минимальный объем здоровой ткани. Однако это же свойство является и ограничением: метод неэффективен при глубоких обширных дефектах, требующих удаления значительного объема пораженного субстрата [10].

Принципиально важным является открытие реминерализующего потенциала частиц биоактивного стекла, описанное Banerjee et al. [28]. Это единственный метод препарирования, который не только удаляет, но и одновременно «лечит» прилежащие ткани. Для пришеечных эрозий с их градиентной зоной деминерализации данное свойство представляется исключительно ценным [59].

3. Ультразвуковое препарирование

Таблица 3
Ультразвуковое препарирование vs ротационное препарирование
Table 3
Ultrasound preparation vs rotational preparation

Параметр сравнения	Ультразвуковое препарирование	Ротационное препарирование	Источник
Точность оформления границ полости	Высокая – осциллирующий наконечник позволяет контролировать линейное удаление	Умеренная – ротационная кинематика затрудняет работу в узких пространствах	Veneziani (2017) [33]
Доступ к поддесневым участкам	Превосходный – тонкие насадки проникают в поддесневую зону	Ограничен геометрией бора	Veneziani (2017) [33]
μTBS к дентину	Сопоставим с ротационным (данные ограничены)	Контроль	Banerjee et al. (2000) [13]
Смазанный слой	Тонкий, частично нарушенный	Толстый, сплошной	Banerjee et al. (2000) [13] Decup et al. (2014) [39]
Скорость препарирования	Значительно ниже, чем у бора	Максимальная	Al-Sagheer et al. (2024) [37] Orekhova et al. (2025) [38]
Тактильная обратная связь	Присутствует (осцилляция передается оператору)	Присутствует	Общеклиническое наблюдение
Риск ятрогенного повреждения	Минимальный – малая амплитуда колебаний	Более высокий	Общеклиническое наблюдение
Повышение температуры пульпы	Минимальное при водяном охлаждении	4,2–5,1 °C	Zach & Cohen (1965) [14] Hibst & Keller (1989) [11]
Необходимость анестезии	Часто требуется (нет анальгетического эффекта)	Требуется в большинстве случаев	Общеклиническое наблюдение
Область оптимального применения	Финишная обработка границ, поддесневые зоны, вторичный кариес вокруг реставраций	Объемное удаление, формирование полости	Veneziani (2017) [33]

Необходимо констатировать, что ультразвуковое препарирование – наименее исследованный из 3 альтернативных методов в контексте реставрационной стоматологии. Veneziani [33] описал его применение преимущественно в контексте непрямых адгезивных реставраций (вкладки, накладки), где прецизионное оформление границ играет решающую роль. Однако специальных исследований, посвященных ультразвуковому препарированию именно пришеечных эрозивных дефектов, обнаружить не удалось.

Banerjee et al. [13] включили ультразвуковой метод в сравнительное исследование 5 способов экскавации дентина, однако использованный ими протокол ультразвуковой обработки не вполне соответствует современным алмазным насадкам, что ограничивает экстраполяцию результатов.

Ни один метод не лидирует по всем параметрам одновременно. Ротационное препарирование остается золотым стандартом по скорости, стоимости и объему доказательной базы. Er:YAG-лазер превосходит другие методы по комфорту для пациента. Воздушная абразия – по селективности и уникальному реминерализующему эффекту. Ультразвук – по точности оформления границ и доступу к поддесневым зонам. Именно этот профиль взаимодополняемости создает рациональную основу для комбинированных протоколов.

Далее оценим эффективность комбинаций каждого из изучаемых альтернативных методов препарирования с ротационным:

1. Комбинация ротационного и ультразвукового способов препарирования

Таблица 5
Комбинация ротационного+ультразвукового методов
Table 5
Combination of rotary+ultrasonic methods

Параметр	Характеристика	Обоснование	Источник
Логика комбинации	Бор – объемное удаление основной массы пораженной ткани; ультразвук – прецизионная финишная обработка границ полости	Различная кинематика: ротационная (бор) для объема, линейно-осциллирующая (УЗ) для точности препарирования	Orehkova et al. (2025) [38] Banerjee et al. (2000) [13]
Качество маргинальной адаптации после применения комбинации	Улучшение прилегания непрямых реставраций при ультразвуковом формировании границ после препарирования борами	Ультразвук удаляет поврежденную призматическую эмаль на краях полости, создает более чистый маргинальный субстрат	Veneziani (2017) [33]
Доступ к поддесневым границам	Расширенный – УЗ-насадки достигают участков, недоступных для бора из-за его геометрии	Тонкие профили УЗ-насадок (0,3–0,5 мм) vs минимальный диаметр бора (~0,8 мм)	Современная клиническая практика
Время процедуры	Увеличивается на 5–10 мин за счет дополнительного этапа	Компромисс между временем и качеством	Общеклиническая оценка
Целостность краевой эмали	Улучшена – бор создает сколы эмалевых призм, которые УЗ-насадка удаляет	Снижение микроподтекания на границе реставрации	Veneziani (2017) [33] Esteves-Oliveira (2008) [57]
Область доказанного применения	Непрямые реставрации (вкладки, виниры, коронки) с поддесневыми границами	Описано преимущественно в контексте адгезивной ортопедической стоматологии	Veneziani (2017) [33]
Применимость к пришеечным эрозиям	Универсальная комбинация методов	Теоретически обоснована при глубоких дефектах (BEWE 3) с субгингивальным распространением	Экстраполяция авторов обзора

Комбинация ротационного+ультразвукового метода является наиболее консервативным отступлением от традиционного протокола. Она не требует дорогостоящего оборудования (ультразвуковые наконечники широко доступны), легко интегрируется в существующий рабочий процесс и имеет обоснование [33]. Для пришеечных эрозий с поддесневным распространением это может быть единственный способ адекватно оформить апикальную границу полости. Однако данная комбинация не решает фундаментальную проблему селективности: на первом этапе бор по-прежнему удаляет ткань без дифференциации здоровой и пораженной. Banerjee et al. [13] показали, что именно ротационный компонент является основным источником избыточного удаления здоровой ткани.

2. Комбинация воздушно-абразивного и ротационного препарирования

Таблица 6

Комбинация воздушно-абразивного и ротационного методов

Table 6

Combination of air-abrasive and rotary methods

Параметр	Характеристика	Обоснование	Источник
Логика комбинации	Вариант А: бор – основное формирование полости; воздушная абразия – селективное очищение дна и стенок. Вариант Б: воздушная абразия – начальная селективная обработка; бор – удаление резистентных участков	Уменьшение агрессивности ротационного препарирования селективностью воздушной абразии	Banerjee (2013) [10]
Селективность	Повышена по сравнению с монометодом ротационного препарирования: после борного удаления основной массы воздушная абразия очищает дно полости, останавливаясь на здоровом дентине	Самоограничивающийся эффект абразии при переходе к минерализованному субстрату	Banerjee et al. (2000) [13]
Реминерализация (при использовании биоактивного стекла)	Обеспечена на финальном этапе: частицы биоактивного стекла остаются на дне полости и стенках, высвобождая ионы	Уникальное свойство биоактивного стекла, отсутствующее у других методов	Banerjee et al. (2011) [28] Paolinelis et al. (2008) [29]
Кондиционирование поверхности	Воздушная абразия эффективно удаляет смазанный слой (практически полностью), созданный бором	Кинетическая энергия частиц разрушает тонкий смазанный слой на дне полости	Paolinelis et al. (2008) [29]
μTBS после комбинации	Прямых данных нет; косвенно: поверхность после воздушной абразии обеспечивает адгезию, сопоставимую с борной+протравленной	Открытые каналы + микрошероховатость = хороший субстрат для адгезии	Paolinelis et al. (2008) [29] Youssef et al. (2008) [58]
Время процедуры	Увеличивается умеренно (3–8 мин на дополнительный этап)	Воздушная абразия работает быстрее ультразвука на плоских поверхностях	Клиническая оценка
Применимость к пришеечным эрозиям	Высокая – особенно для средне-глубоких дефектов (BEWE 2–3)	Бор удаляет основной объем; биоактивное стекло финиширует и реминерализует	Banerjee et al. (2011) [28] Paolinelis et al. (2008) [29] Shellis et al. (2014) [51]

Данная комбинация представляется наиболее практичной для широкого внедрения. Она сочетает привычность ротационного инструмента с преимуществами воздушной абразии и не требует радикальной перестройки клинического протокола. Концептуально этот подход поддержан Banerjee [10, 13, 28], который описал стратегию «инструментального арсенала» – последовательного применения различных инструментов на разных этапах одной процедуры.

Особая ценность комбинации проявляется при пришеечных эрозиях, где после традиционного препарирования бором пораженной ткани остается зона градиентной деминерализации [59]. Воздушная абразия биоактивным стеклом на этом этапе выполняет двойную функцию: селективно удаляет необратимо пораженный слой и одновременно реминерализует потенциально восстановимый [10, 13].

3. Комбинация Er:YAG-лазерного и ротационного препарирования

Таблица 7
Комбинация «ротационный+Er:YAG-лазер»
Table 7
Combination “rotary+Er:YAG laser”

Параметр	Характеристика	Обоснование	Источник
Логика комбинации	Бор – быстрое объемное удаление основной массы пораженной ткани; лазер – финишная селективная обработка дна полости вблизи пульпы	Компенсация низкой скорости препарирования твердых тканей лазером за счет ротационного способа на начальном этапе; использование селективности и анальгезии лазера на критическом финишном этапе	Schwass et al. (2013) [56]
Контроль глубины на финишном этапе	Улучшен – лазер позволяет послойное удаление (5–30 мкм за импульс) в непосредственной близости от пульпы	Высокая управляемость глубины абляции при низкой энергии импульса	Hibst & Keller (1989) [11]
Термическая безопасность на финишном этапе	Повышена по сравнению с традиционным препарированием – лазер с водяным охлаждением генерирует меньше тепла	ΔT пульпы 2,5–3,8 °C vs 4,2–5,1 °C при ротационном методе	Zach & Cohen (1965) [14] Hibst & Keller (1989) [11] Castilho (2007) [60]
Бактерицидный эффект	Возможен на финишном этапе – Er:YAG демонстрирует бактерицидную активность	Поглощение энергии водой в бактериальных клетках	Schwass et al. (2013) [56]
Время процедуры	Увеличение умеренное – лазер используется только на финишном этапе, объемная работа выполнена бором	Более рационально, чем монолазерное препарирование	Клиническая оценка
Морфология поверхности дна полости	Микрощероховатая, без смазанного слоя – оптимальна для адгезии при total-etch протоколе	Лазер на финишном этапе удаляет смазанный слой, созданный бором, и формирует микропоретенцию	De Munck et al. (2002) [53]
Адгезия после применения комбинации	Прямых подтвержденных данных о μ TBS именно при комбинации не найдено; косвенно: финишная лазерная обработка устраняет смазанный слой от бора и создает субстрат, эквивалентный полностью лазерно-обработанному	Финальная поверхность определяется последним примененным инструментом	De Munck et al. (2002) [53] Cardoso et al. (2008) [17]

Окончание таблицы 7

Анальгетический эффект	Лазерная обработка глубоких слоев дентина вблизи пульпы менее болезненна, чем при традиционном способе препарирования	Подавление нервной проводимости за счет импульсного воздействия	Keller & Hibst (1989) [12] Schwass et al. (2013) [56]
Применимость к пришеечным эрозиям	Обоснована при глубоких дефектах (BEWE 3), где толщина остаточного дентина над пульпой критически мала	Комбинация скорости работы борами и прецизионности лазера вблизи пульпы	Castilho et al. (2007) [60]

Комбинация «ротационный способ + Er:YAG-лазер» является наиболее технологичной и дорогостоящей. Ее рациональность основана на элементарной логике: бор быстро убирает основной объем ткани (компенсируя главный недостаток лазера – низкую скорость), а лазер обеспечивает безопасную и контролируемую обработку в критической зоне вблизи пульпы (компенсируя главный недостаток бора – неселективность и термическое воздействие).

Schwass et al. [48] в обзоре лазерных технологий в минимально инвазивной стоматологии косвенно поддерживали такой подход, отметив, что «полное лазерное препарирование не всегда целесообразно, и комбинация с традиционными инструментами может быть более рациональной». Однако авторы не предоставили протокола или клинических данных.

Принципиальное ограничение: данная комбинация экономически оправдана только в клиниках, уже располагающих Er:YAG-лазером. Приобретение лазерной установки исключительно для финишного этапа препарирования пришеечных эрозий не имеет экономического обоснования.

■ ВЫВОДЫ

На основании проведенного сравнительного анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Ни один альтернативный метод не превосходит ротационное препарирование по всем параметрам одновременно, однако каждый из них обладает доказанными преимуществами по отдельным клинически значимым характеристикам. Это подтверждает концепцию, предложенную Banerjee [10, 13].
2. Адгезия к альтернативно обработанным поверхностям сопоставима с адгезией к обработанным борами при условии применения техники тотального протравливания. Данный вывод подтвержден для Er:YAG-лазера [1, 9] и воздушной абразии [11, 12].
3. Комбинация «ротационный метод + воздушная абразия» представляется наиболее практичной и научно обоснованной для большинства пришеечных эрозий благодаря сочетанию селективности, реминерализующего эффекта [13], доступной стоимости и низкой кривой обучения.
4. Комбинация «ротационный+ультразвуковой метод» показана при поддесневом распространении дефекта, что нередко наблюдается при пришеечных эрозиях в сочетании с рецессией десны [33].
5. Комбинация «ротационный+Er:YAG-лазер» оправдана при глубоких дефектах с критической близостью пульпы, однако ограничена высокой стоимостью оборудования [56].

6. Наиболее значимым пробелом в доказательной базе является отсутствие долгосрочных клинических исследований (≥ 5 лет) выживаемости реставраций пришеечных эрозий, выполненных с применением альтернативных методов препарирования. Reumans et al. [16] подчеркнули эту проблему еще в 2014 г., и к настоящему времени она остается нерешенной. Как справедливо отметила Kidd [61], конечным мерилем успеха любого метода препарирования является долговечность реставрации, а не морфология поверхности *in vitro*.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сравнительный анализ научной литературы позволяет заключить, что универсального метода препарирования пришеечных эрозий кислотной этиологии не существует. Каждая из рассмотренных технологий занимает определенную нишу в клиническом алгоритме. Воздушно-абразивное препарирование обеспечивает наивысшую селективность при поверхностных дефектах и особенно перспективно в варианте с биоактивным стеклом, но по длительности уступает другим методам. Er:YAG-лазер является методом выбора при глубоких эрозиях, требующих контролируемого удаления значительного объема размягченного дентина. Ультразвуковой инструментарий оптимален для прецизионного финишного оформления полости. Комбинированные протоколы, адаптированные к глубине и стадии поражения, представляются наиболее обоснованной стратегией. Необходимы дополнительные клинические исследования с длительным периодом наблюдения для валидации предложенного дифференцированного подхода.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Jaeggi T, Lussi A. Prevalence, incidence and distribution of erosion. *Monogr Oral Sci.* 2006;20:44–65. PMID: 16687884. doi: 10.1159/000093350
2. Lussi A, Carvalho TS. Erosive tooth wear: a multifactorial condition of growing concern and increasing knowledge. *Monogr Oral Sci.* 2014;25:1–15. Epub 2014 Jun 26. PMID: 24993253. doi: 10.1159/000360380
3. Grippo JO. Biocorrosion vs. erosion: the 21st century and a time to change. *Compend Contin Educ Dent.* 2012 Feb;33(2):e33–7. PMID: 23268573.
4. Grippo JO, Simring M, Coleman TA. Abfraction, abrasion, biocorrosion, and the enigma of noncarious cervical lesions: a 20-year perspective. *J Esthet Restor Dent.* 2012 Feb;24(1):10–23. Epub 2011 Nov 17. PMID: 22296690. doi: 10.1111/j.1708-8240.2011.00487.x
5. Bartlett DW, Lussi A, West NX, et al. Prevalence of tooth wear on buccal and lingual surfaces and possible risk factors in young European adults. *J Dent.* 2013;41(11):1007–1013. PMID: 24004965.
6. Bassiouny MA. Effects of common beverages on the development of cervical erosion lesions. *Gen Dent.* 2009 May-Jun;57(3):212–23; quiz 224–5. PMID: 19819809.
7. Shellis RP, Featherstone JD, Lussi A. Understanding the chemistry of dental erosion. *Monogr Oral Sci.* 2014;25:163–79. Epub 2014 Jun 26. PMID: 24993265. doi: 10.1159/000359943
8. Tyas MJ, Anusavice KJ, Frencken JE, Mount GJ. Minimal intervention dentistry – a review. FDI Commission Project 1–97. *Int Dent J.* 2000;50(1):1–12. PMID: 10945174.
9. Frencken JE, Peters MC, Manton DJ, et al. Minimal intervention dentistry for managing dental caries – a review. *Int Dent J.* 2012;62(5):223–243. PMID: 23106836.
10. Banerjee A. Minimal intervention dentistry: part 7. Minimally invasive operative caries management: rationale and techniques. *Br Dent J.* 2013 Feb;214(3):107–11. PMID: 23392023. doi: 10.1038/sj.bdj.2013.106
11. Hibst R, Keller U. Experimental studies of the application of the Er:YAG laser on dental hard substances: I. Measurement of the ablation rate. *Lasers Surg Med.* 1989;9(4):338–44. PMID: 2761329. doi: 10.1002/lsm.1900090405
12. Keller U, Hibst R. Experimental studies of the application of the Er:YAG laser on dental hard substances: II. Light microscopic and SEM investigations. *Lasers Surg Med.* 1989;9(4):345–51. PMID: 2503667. doi: 10.1002/lsm.1900090406
13. Banerjee A, Kidd EA, Watson TF. In vitro evaluation of five alternative methods of carious dentine excavation. *Caries Res.* 2000 Mar-Apr;34(2):144–50. PMID: 10773632. doi: 10.1159/000016582
14. Zach L, Cohen G. Pulp response to externally applied heat. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1965;19:515–530. PMID: 14263662.
15. De Munck J, Van Meerbeek B, Yudhira R, et al. Micro-tensile bond strength of two adhesives to Erbium:YAG-lased vs. bur-cut enamel and dentin. *Eur J Oral Sci.* 2002;110(4):322–329. PMID: 12206595.
16. Peumans M, De Munck J, Mine A, Van Meerbeek B. Clinical effectiveness of contemporary adhesives for the restoration of non-carious cervical lesions. A systematic review. *Dent Mater.* 2014 Oct;30(10):1089–103. Epub 2014 Aug 3. PMID: 25091726. doi: 10.1016/j.dental.2014.07.007

17. Cardoso MV, Coutinho E, Ermis RB, et al. Influence of Er,Cr:YSGG laser treatment on the microtensile bond strength of adhesives to dentin. *J Adhes Dent*. 2008 Feb;10(1):25–33. PMID: 18389733.
18. Flury S, Koch T, Peutzfeldt A, Lussi A. Micromorphology and adhesive performance of Er:YAG laser-treated dentin of primary teeth. *Lasers Med Sci*. 2012 May;27(3):529–35. Epub 2011 Feb 5. PMID: 21298311. doi: 10.1007/s10103-011-0882-5
19. Arbabzadeh F, Birang E, Nazem R, et al. A Comparative Study on Micro Hardness and Structural Changes of Dentin Floor Cavity Prepared by Er:YAG Laser Irradiation and Mechanical Bur. *J Dent (Shiraz)*. 2013 Jun;14(2):73–7. PMID: 24724123; PMCID: PMC3977546.
20. Sgreccia PC, Damé-Teixeira N, Barbosa RES, et al. Assessment of the Oral Health Impact Profile (OHIP-14) improvement of different treatments for dentin hypersensitivity in noncarious cervical lesions-a randomized clinical study. *Clin Oral Investig*. 2022 Nov;26(11):6583–6591. Epub 2022 Jul 7. PMID: 35796800. doi: 10.1007/s00784-022-04610-x
21. Schwass D. Most cited: Number 2. Laser irradiation of human dental enamel and dentine. *N Z Dent J*. 2008 Sep;104(3):109–10. PMID: 18980052.
22. Lutsikaya I.K., Lopatin O.A. Alternative methods of preparation of permanent teeth on the example of a class I carious cavity according to Black. *Modern dentistry*. 2018;70(1):15–20. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/alternativnye-metody-preparirovaniya-postoyannyh-zubov-na-primere-karioznoy-polosti-i-klassa-po-bleku>. (in Russian)
23. Ignatieva M.I., Medyakova N.V. Preparation of carious cavities using erbium lasers. In: Dentistry of the XXI century: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, dedication. In memory of Prof. Khamitova F.S. Cheboksary; 2015. P. 29–32. Available at: <https://elibrary.ru/vjycud>. (in Russian)
24. Bolashova S.V. Clinical and laboratory substantiation of the use of an erbium laser in the treatment of wedge-shaped defects. *Review russian dentistry*. 2019;12(1):32–35. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39256690>. (in Russian)
25. Banerjee A., Watson T.F., Kidd E.A.M. Dentine caries excavation: a review of current clinical techniques. *Br Dent J*. 2000;188(9):476–482. PMID: 10859846.
26. Fleisher G.M. Air-abrasive (kinetic) denture treatment technique. *Scientific news*. 2018;1(1):80–85. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdushno-abrazivnaya-kineticheskaya-metodika-lecheniya-zubov>. (in Russian)
27. Gazhva S.I., Manukyan A.G., Teteterin A.I., Yanyshva K.A., Yakubova E.Yu. Influence of various methods of tooth preparation on the structure and microelement composition of enamel. *Clinical Stomatology*. 2023;1(1):24–31. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50465565>. (in Russian)
28. Banerjee A., Thompson ID, Watson TF. Minimally invasive caries removal using bio-active glass air-abrasion. *J Dent*. 2011 Jan;39(1):2–7. Epub 2010 Oct 1. PMID: 20888883. doi: 10.1016/j.jdent.2010.09.004
29. Paolinelis G, Banerjee A, Watson TF. An in vitro investigation of the effect and retention of bioactive glass air-abrasive on sound and carious dentine. *J Dent*. 2008 Mar;36(3):214–8. Epub 2008 Jan 30. PMID: 18237840. doi: 10.1016/j.jdent.2007.12.004
30. Ramos TM, Ramos-Oliveira TM, de Freitas PM, et al. Effects of Er:YAG and Er,Cr:YSGG laser irradiation on the adhesion to eroded dentin. *Lasers Med Sci*. 2015 Jan;30(1):17–26. Epub 2013 May 7. PMID: 23649611. doi: 10.1007/s10103-013-1321-6
31. Bartlett D, Ganss C, Lussi A. Basic Erosive Wear Examination (BEWE): a new scoring system for scientific and clinical needs. *Clin Oral Investig*. 2008 Mar;12 Suppl 1(Suppl 1):S65–8. Epub 2008 Jan 29. PMID: 18228057; PMCID: PMC2238785. doi: 10.1007/s00784-007-0181-5
32. Banerjee A, Frencken JE, Schwendicke F, Innes NPT. Contemporary operative caries management: consensus recommendations on minimally invasive caries removal. *Br Dent J*. 2017 Aug 11;123(3):215–222. PMID: 28798430. doi: 10.1038/sj.bdj.2017.672
33. Veneziani M. Posterior indirect adhesive restorations: updated indications and the Morphology Driven Preparation Technique. *Int J Esthet Dent*. 2017;12(2):204–230. PMID: 28653051.
34. Duruk G, Kizilci E, Malkoç MA. Effectiveness of Different Methods in Removing Dentin Caries of Primary Teeth: Micro-CT and SEM Evaluation. *J Clin Pediatr Dent*. 2022 May 1;46(3):211–218. PMID: 35830639. doi: 10.17796/1053-4625-46.3.7
35. Zesewitz H, Klaiber B, Hotz P, Burkhard H. Cavity micro-morphology following caries removal. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*. 2005;115(10):896–902. PMID: 16295708. (in German)
36. Duruk G, Kizilci E, Malkoç MA. Effectiveness of Different Methods in Removing Dentin Caries of Primary Teeth: Micro-CT and SEM Evaluation. *J Clin Pediatr Dent*. 2022 May 1;46(3):211–218. PMID: 35830639. doi: 10.17796/1053-4625-46.3.7
37. Al-Sagheer RM, Addie AJ, Al-Tae LA. An in vitro assessment of the residual dentin after using three minimally invasive caries removal techniques. *Sci Rep*. 2024 Mar 26;14(1):7087. PMID: 38528204; PMCID: PMC10963738. doi: 10.1038/s41598-024-57745-0
38. Orekhova L.Yu., Leletkina N.A., Borodin S.A. Methods of preparation of dental hard tissues. *Problems of dentistry*. 2025;2(73):84. doi: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-73-84. (in Russian)
39. Decup F, Lasfargues JJ. Minimal intervention dentistry II: part 4. Minimal intervention techniques of preparation and adhesive restorations. The contribution of the sono-abrasive techniques. *Br Dent J*. 2014 Apr;216(7):393–400. PMID: 24722092. doi: 10.1038/sj.bdj.2014.246
40. Öztürk B, Uşümez A, Öztürk AN, Özer F. In vitro assessment of temperature change in the pulp chamber during cavity preparation. *J Prosthet Dent*. 2004 May;91(5):436–40. PMID: 15153850. doi: 10.1016/S0022391304001131
41. Maucoski C, Price RB, Arrais CAG, Sullivan B. In vitro temperature changes in the pulp chamber caused by laser and Quadwave LED-light curing units. *Odontology*. 2023 Jul;111(3):668–679. Epub 2022 Dec 19. PMID: 36534223. doi: 10.1007/s10266-022-00780-y
42. Gutknecht N, Franzen R, Meister J, et al. Temperature evolution on human teeth root surface after diode laser assisted endodontic treatment. *Lasers Med Sci*. 2005 Sep;20(2):99–103. Epub 2005 Jul 9. PMID: 16007476. doi: 10.1007/s10103-005-0347-9
43. Cavalcanti BN, Lage-Marques JL, Rode SM. Pulpal temperature increases with Er:YAG laser and high-speed handpieces. *J Prosthet Dent*. 2003 Nov;90(5):447–51. PMID: 14586308. doi: 10.1016/j.prosdent.2003.08.022
44. Visuri SR, Walsh JT Jr, Wigdor HA. Erbium laser ablation of dental hard tissue: effect of water cooling. *Lasers Surg Med*. 1996;18(3):294–300. PMID: 8778525. doi: 10.1002/(SICI)1096-9101(1996)18:3<294::AID-LSM11>3.0.CO;2-6
45. Lau XE. Heat generated during dental treatments affecting intrapulpal temperature: a review. *Clinical Oral Investigations*. doi: 10.1007/S00784-023-04951-15
46. Thomas MS, Kundabala M. Pulp hyperthermia during tooth preparation: the effect of rotary-instruments, lasers, ultrasonic devices, and airborne particle abrasion. *J Calif Dent Assoc*. 2012 Sep;40(9):720–31. PMID: 23097827.
47. Ettrich CA, Labossière PE, Pitts DL, Johnson JD. An investigation of the heat induced during ultrasonic post removal. *J Endod*. 2007 Oct;33(10):1222–6. Epub 2007 Jul 23. PMID: 17889694. doi: 10.1016/j.joen.2007.06.007
48. Yudina N.A. Dental erosion: terminology, diagnosis, prevention and treatment. *Modern Dentistry*. 2015;1(60). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eroziya-zubov-terminologiya-diagnostika-profilaktika-i-lechenie>. (in Russian)
49. Fedotova Yu.M., Kiselev A.Y. Modern aspects of preparation in therapeutic dentistry. *International Student Scientific Bulletin*. 2016;(6). Available at: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=16683>. (in Russian)

50. Vailati F, Vaglio G, Belser UC. Full-mouth minimally invasive adhesive rehabilitation to treat severe dental erosion: a case report. *J Adhes Dent.* 2012 Feb;14(1):83–92. PMID: 21734973. doi: 10.3290/jjad.a21852
51. Van Meerbeek B, Yoshihara K, Van Landuyt K, et al. From Buonocore's Pioneering Acid-Etch Technique to Self-Adhering Restoratives. A Status Perspective of Rapidly Advancing Dental Adhesive Technology. *J Adhes Dent.* 2020;22(1):7–34. PMID: 32030373. doi: 10.3290/jjad.a43994
52. Van Meerbeek B, Yoshihara K, Yoshida Y, et al. State of the art of self-etch adhesives. *Dent Mater.* 2011 Jan;27(1):17–28. Epub 2010 Nov 24. PMID: 21109301. doi: 10.1016/j.dental.2010.10.023
53. De Munck J, Van Meerbeek B, Yudhira R., et al. Micro-tensile bond strength of two adhesives to Erbium:YAG-lased vs. bur-cut enamel and dentin. *Eur J Oral Sci.* 2002 Aug;110(4):322–9. PMID: 12206595. doi: 10.1034/j.1600-0722.2002.21281.x
54. Erickson RL. Surface interactions of dentin adhesive materials. *Oper Dent.* 1992;(Suppl 5):81–94. PMID: 1470557.
55. Visuri SR, Gilbert JL, Wright DD, et al. Shear strength of composite bonded to Er:YAG laser-prepared dentin. *J Dent Res.* 1996 Jan;75(1):599–605. PMID: 8655766. doi: 10.1177/00220345960750011401
56. Schwass DR, Leichter JW, Purton DG, Swain MV. Evaluating the efficiency of caries removal using an Er:YAG laser driven by fluorescence feedback control. *Arch Oral Biol.* 2013 Jun;58(6):603–10. Epub 2012 Nov 1. PMID: 23123070. doi: 10.1016/j.archoralbio.2012.09.017
57. Esteves-Oliveira M, Carvalho WL, Eduardo Cde P, Zezell DM. Influence of the additional Er:YAG laser conditioning step on the microleakage of class V restorations. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2008 Nov;87(2):538–43. PMID: 18546195. doi: 10.1002/jbm.b.31141
58. Youssef MN, Youssef FA, Souza-Zaroni WC, et al. Effect of enamel preparation method on in vitro marginal microleakage of a flowable composite used as pit and fissure sealant. *Int J Paediatr Dent.* 2006 Sep;16(5):342–7. PMID: 16879331. doi: 10.1111/j.1365-263X.2006.00751.x
59. Shellis R.P., Featherstone J.D.B., Lussi A. Understanding the chemistry of dental erosion. *Monogr Oral Sci.* 2014;25:163–179. doi: 10.1159/000359943
60. Castilho MS, de Souza-Gabriel AE, Marchesan MA, et al. Temperature changes in the deciduous pulp chamber during cavity preparation with the Er:YAG laser. *J Dent Child (Chic).* 2007 Jan-Apr;74(1):21–5. PMID: 18430350.
61. Kidd EA. How 'clean' must a cavity be before restoration? *Caries Res.* 2004 May-Jun;38(3):305–13. PMID: 15153704. doi: 10.1159/000077770