

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-289-297

УДК 616.314-77:616.314-74:543.42

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА АДГЕЗИОННОГО ИНТЕРФЕЙСА КЕРАМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДГЕЗИВНЫХ СИСТЕМ V ПОКОЛЕНИЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОГО МИКРОЗОНДОВОГО АНАЛИЗА

Сахабутдинова Д. Р., Тиунова Н. В., Бычкова К. И., Исманова А. М.,  
Бегинян А. Д., Махман-Эмирова Ш. С.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

### Аннотация

**Введение.** Современная стоматология активно развивается благодаря внедрению новых материалов и технологий, среди которых адгезивные системы занимают ключевое место, способствуя малоинвазивным подходам и улучшению клинических результатов. Системы пятого поколения представляют собой total-etch системы, формирующие прочный гибридный слой, который сочетает механическую инфильтрацию и химическое связывание, обеспечивая прочность и долговечность адгезионного соединения.

**Цель исследования.** Сравнительный анализ элементного состава зоны адгезионного соединения адгезивных систем V поколения с керамическими конструкциями методом рентгеновского микрозондового анализа (РМА).

**Материалы и методы.** Проведено сравнительное лабораторное исследование адгезионного соединения российской и иностранной адгезивных систем пятого поколения с керамическими конструкциями из дисиликата лития. Поверхность керамических образцов протравливалась, силанизировалась, после чего наносился адгезивный слой с последующей световой полимеризацией и послойным нанесением наногибридного композитного материала. Элементный состав и распределение компонентов в зоне адгезионного соединения определялись методом рентгеновского микрозондового анализа (РМА) с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-IT300LV (JEOL, Япония) с использованием детектора *X-Max<sup>N</sup> 20* (Oxford Instruments). Для каждого образца проводился анализ нескольких локальных спектров, чтобы оценить глубину инфильтрации адгезива, однородность гибридного слоя и локальные особенности химического взаимодействия адгезива с керамикой и тканями зуба.

**Результаты.** Результаты исследования подтвердили эффективность адгезивных систем V поколения в формировании адгезионного соединения. Зарубежная система показала более равномерный и стабильный адгезионный интерфейс с выраженными смоляными нитями и однородным распределением элементов. Российская система также обеспечивала формирование адгезивной связи с высокой долей полимерной матрицы и хорошим смачиванием поверхности, подтверждая ее функциональную состоятельность. Оптимизация наполненности и глубины инфильтрации адгезива может повысить прочность и долговечность соединения. Полученные данные указывают на перспективность отечественной системы и возможность приближения ее характеристик к уровню ведущих зарубежных аналогов.

**Ключевые слова:** адгезивные системы, адгезия, керамические реставрации, адгезионное соединение, рентгеновский микрозондовый анализ, стоматологические материалы, импортозамещение в стоматологии

---

**Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов**

**Диана Рамильевна САХАБУТДИНОВА** ORCID ID 0009-0008-8834-4225

ассистент кафедры клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия  
SDDianka@yandex.ru

**Наталья Викторовна ТИУНОВА** ORCID ID 0000-0001-9881-6574

д.м.н., профессор, заведующий кафедрой клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия  
natali5\_list.ru

**Ксения Игоревна БЫЧКОВА** ORCID ID 0009-0007-4222-962X

студент Института клинической медицины, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия  
sacredrisen@gmail.com

**Алеу Муратбековна ИСМАНОВА** ORCID ID 0009-0007-5481-6741

студент Института клинической медицины, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия  
alsu.ismanova@yandex.ru

**Артем Давидович БЕГИНЯН** ORCID ID 0009-0008-3891-3821

студент Института клинической медицины, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия  
artem.beginyan@yandex.ru

**Шахбаз Сенолаховна МАХМАН-ЭМИРОВА** ORCID ID 0009-0000-2561-6424

студент Института клинической медицины, Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия  
mahman-emirova-sh@mail.ru

**Адрес для переписки: Наталья Викторовна ТИУНОВА**

603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23 (Кафедра клинической стоматологии Института клинической медицины)  
+7 (930) 711-11-59  
natali5\_list.ru

---

**Образец цитирования:**

Сахабутдинова Д. Р., Тиунова Н. В., Бычкова К. И., Исманова А. М., Бегинян А. Д., Махман-Эмирова Ш. С.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА АДГЕЗИОННОГО ИНТЕРФЕЙСА КЕРАМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДГЕЗИВНЫХ СИСТЕМ V ПОКОЛЕНИЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОГО МИКРОЗОНДОВОГО АНАЛИЗА. Проблемы стоматологии. 2026; 2: 289-297.

© Сахабутдинова Д. Р. и др., 2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-289-297

Поступила 03.05.2026. Принята к печати 17.06.2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-289-297

## COMPARATIVE EVALUATION OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF THE ADHESIVE BONDING INTERFACE OF CERAMIC RESTORATIONS USING FIFTH-GENERATION ADHESIVE SYSTEMS BY ELECTRON PROBE MICROANALYSIS (EPMA)

Sakhabutdinova D.R., Tiunova N.V., Bychkova K.I., Ismanova A.N.,  
Beginyan A.D., Makhman-Emirova Sh.S.

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

### Abstract

**Introduction.** Modern dentistry is rapidly evolving due to the introduction of new materials and technologies, among which adhesive systems play a key role, promoting minimally invasive approaches and improving clinical outcomes. Fifth-generation adhesive systems are total-etch systems that form a durable hybrid layer, combining mechanical infiltration with chemical bonding to ensure the strength and longevity of the adhesive interface.

**Objective.** To perform a comparative analysis of the elemental composition of the adhesive interface of fifth-generation adhesive systems with ceramic restorations using electron probe microanalysis (EPMA).

**Materials and Methods.** A comparative laboratory study was conducted on the adhesive interface of domestic and foreign fifth-generation adhesive systems with lithium disilicate ceramic restorations. Ceramic surfaces were etched and silanized, followed by the application of the adhesive layer with subsequent light curing and incremental placement of a nanohybrid composite material. The elemental composition and distribution within the adhesive interface were determined using electron probe microanalysis (EPMA) with a JSM-IT300LV scanning electron microscope (JEOL, Japan) equipped with an X-Max<sup>NV</sup> 20 detector (Oxford Instruments). Multiple local spectra were analyzed for each sample to evaluate the depth of adhesive infiltration, hybrid layer uniformity, and local chemical interactions between the adhesive, ceramic, and dental tissues.

**Results.** The results confirmed the effectiveness of fifth-generation adhesive systems in forming a reliable adhesive interface. The foreign adhesive system demonstrated a more uniform and stable interface, with clearly visible resin tags and homogeneous elemental distribution. The domestic adhesive system also formed an adhesive interface with a high proportion of polymer matrix and effective surface wetting, confirming its functional performance. Optimization of adhesive filler content and infiltration depth may enhance bond strength and durability. These findings indicate the promise of the domestic adhesive system and its potential to approach the performance level of leading foreign analogues.

**Keywords:** adhesive systems, adhesion, ceramic restorations, adhesive interface, electron probe microanalysis, dental materials, import substitution in dentistry

The authors declare no conflict of interest

**Diana R. SAKHABUTDINOVA** ORCID ID 0009-0008-8834-4225

Teaching Assistant, Department of Clinical Dentistry, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia  
SDDtanka@yandex.ru

**Natalia V. TIUNOVA** ORCID ID 0000-0001-9881-6574

PhD, MD, DSc, Professor, Head of the Department of Clinical Dentistry  
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia  
natali5\_list.ru

**Ksenia I. BYCHKOVA** ORCID ID 0009-0007-4222-962X

Student, Institute of Clinical Medicine, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia  
sacredrisen@gmail.com

**Alsu M. ISMANOVA** ORCID ID 0009-0007-5481-6741

Student of the Institute of Clinical Medicine, National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia  
alsu.ismanova@yandex.ru

**Artem D. BEGINYAN** ORCID ID 0009-0008-3891-3821

Student of the Institute of Clinical Medicine, National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia  
artem.beginyan@yandex.ru

**Shakhbaz S. MAKHMAN-EMIROVA** ORCID ID 0009-0000-2561-6424

Student of the Institute of Clinical Medicine, National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia  
mahman-emirova-sh@mail.ru

**Correspondence address: Natalia V. TIUNOVA**

23 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod, 603022, Russia (Department of Clinical Dentistry, Institute of Clinical Medicine)

+7 (930) 711-11-59

natali5\_list.ru

### For citation:

Sakhabutdinova D.R., Tiunova N.V., Bychkova K.I., Ismanova A.N., Beginyan A.D., Makhman-Emirova Sh.S.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF THE ADHESIVE BONDING INTERFACE OF CERAMIC RESTORATIONS USING FIFTH-GENERATION ADHESIVE SYSTEMS BY ELECTRON PROBE MICROANALYSIS (EPMA). *Actual problems in dentistry*. 2026; 2: 289-297. (In Russ.)

© Sakhabutdinova D.R. et al., 2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-289-297

Received 03.05.2026. Accepted 17.06.2026

## Введение

Современная стоматология развивается высокими темпами, благодаря созданию новых материалов и технологий, способных эффективно решать задачи, стоящие перед врачами [1]. Адгезивная стоматология составляет ключевую основу всех глобальных трансформаций в стоматологическом материаловедении [2], способствуя более консервативным подходам, позволяя сохранить структуру твердых тканей зуба и улучшить клинические результаты [3]. За прошедшие годы адгезивные системы претерпели значительные изменения в современной стоматологии [4]: от первых разработок по кислотному протравливанию эмали зуба М. Буонокоре в 1955 году [5, 6] и открытия гибридного слоя Накабаяси в 1982 году [7, 8] до многофункциональных универсальных систем, обеспечивающих надежную связь с твердыми тканями зуба.

Развитие адгезивных технологий в стоматологии прошло несколько этапов, отражающих эволюцию представлений о механизмах сцепления с твердыми тканями зуба. Если ранние адгезивные системы обеспечивали преимущественно ограниченную микромеханическую ретенцию, реализующуюся за счет проникновения низковязких мономеров в микронеровности и поры, формируемые на поверхности зуба после кислотного протравливания [9], то современные материалы формируют сложные межфазные структуры, обеспечивающие как физико-механическую, так и химическую связь.

Механизмы адгезии в системах V поколения реализуются за счет формирования гибридного слоя — интердиффузной зоны полимерной матрицы адгезива и деминерализованного дентина, который объединяет механическую инфильтрацию и химическое связывание, обеспечивает прочность и герметичность адгезионного соединения [10]. Химическая адгезия реализуется через взаимодействие функциональных мономеров адгезива с минеральными и органическими компонентами зуба: фосфатные мономеры 10-MDP образуют стабильные ионные связи с гидроксипатитом кальция, а карбоксильные и другие полифункциональные группы создают ковалентные и водородные связи с коллагеновым матриксом дентина, что обеспечивает долговечность сцепления, устойчивость к гидролизу и формирование прочного гибридного слоя [11, 12]. Несмотря на клиническую эффективность, устойчивость гибридного слоя при взаимодействии с долгосрочными керамическими конструкциями остается предметом дискуссии, поскольку гидролитическая деградация полимерной матрицы, ферментативное разрушение коллагена матриксными металлопротеиназами и неполная инфильтрация коллагеновых волокон могут приводить к снижению адгезионной прочности [13, 14].

Особый интерес представляет взаимодействие адгезивных систем с керамическими конструкциями, широко применяемыми в современной ортопедической стоматологии благодаря их превосходным эстетическим свойствам, полупрозрачности, выдающимся механическим характеристикам, коррозионной стойкости, износостойкости и отличной биосовместимости [15, 16]. При формировании соединения «адгезив-керамика» возникает

сложная многокомпонентная система, включающая твердые ткани зуба, адгезивный слой, слой композитного материала и керамическую конструкцию, и требующая формирования надежного интерфейса. Состав и морфология интерфейса оказывают решающее влияние на распределение напряжений и долговечность реставрации.

Одним из наиболее информативных методов изучения элементного состава границы «адгезив-керамика» является рентгеновский микронзондовый анализ (РМА), позволяющий изучить локальное распределение химических элементов на микронном уровне, определить степень проникновения мономеров, однородность гибридного слоя и локальные особенности химического связывания между адгезивным материалом и керамическими конструкциями [17]. Такие данные критически важны для оценки прочности и долговечности адгезионного соединения, выявления потенциальных слабых мест и оптимизации состава адгезива. Исследование элементного состава и структуры интерфейса обеспечивает понимание ключевых факторов долговечности реставраций и позволяет прогнозировать эффективность использования стоматологического материала в клинической практике, что особенно важно при разработке новых отечественных адгезивных систем [18].

Ситуация с доминирующей долей импортируемых медицинских изделий на российском рынке подчеркивает зависимость сектора здравоохранения от международных поставок и технологий [19]. В условиях современных экономических и логистических ограничений особую актуальность приобретает разработка отечественных стоматологических материалов. Шаги в направлении политики импортозамещения медицинских изделий в перспективе гарантируют доступность современного оборудования для здравоохранения и укрепление обороноспособности страны в сфере медицины [20]. Снижение зависимости от импортных стоматологических материалов требует создания конкурентоспособных национальных аналогов, однако для их внедрения в клиническую практику необходимо проведение комплексных исследований, направленных на оценку структуры, состава и адгезионных свойств.

Таким образом, сравнительный анализ элементного состава зоны адгезионного соединения адгезивных систем V поколения с керамическими конструкциями с использованием рентгеновского микронзондового анализа представляет собой актуальную научную задачу. Полученные результаты позволят углубить понимание механизмов адгезии и обосновать выбор эффективных материалов для клинического применения.

## Цель исследования

Сравнительный анализ элементного состава зоны адгезионного соединения российской и зарубежной адгезивных систем V поколения с керамическими конструкциями методом рентгеновского микронзондового анализа для определения распределения элементов в адгезионном интерфейсе, выявления закономерности их взаимодействий и формирования межфазных связей, влияющих на стабильность и клиническую эффективность реставраций.

## Методы исследования

Данное экспериментальное исследование *in vitro* было проведено на 30 интактных постоянных третьих молярах верхней и нижней челюсти, удаленных по ортодонтическим показаниям. Все этапы исследования одобрены локальным этическим комитетом ННГУ (Протокол № 1 от 05.11.2025 г.). Критерием включения образцов в исследование было минимальное отклонение в пространственных размерах и анатомической форме, структурная целостность зубов — отсутствие признаков кариозного поражения и его осложнений, трещин, сколов, композитных или керамических реставраций, других повреждений коронки или корня. Образцы зубов, отличные от третьих моляров верхней и нижней челюсти, удаленные по любым показаниям, исключая ортодонтические, подвергшиеся ортопедическому или терапевтическому лечению (лечение кариеса и его осложнений), подвергшиеся химическому воздействию или обработке, меняющей их микроструктуру, а также имеющие трещины, сколы или иные дефекты, включая механические дефекты, возникшие при удалении зуба, или хранящиеся после удаления в неудовлетворительных условиях были исключены из исследования.

Для проведения сравнительного анализа все фрагменты были случайным образом распределены на две равные группы ( $n = 15$ ) в зависимости от примененной адгезивной системы, что обеспечивает обеспечение достоверной цепочки результатов и снижение влияния системных ошибок при определении данных.

После удаления и до начала исследования все образцы удаленных зубов подвергались предварительной очистке и подготовке: непосредственно после удаления образцы зубов подвергали тщательному удалению органических остатков и загрязнений, с последующим промыванием в дистиллированной воде и хранили в антисептической среде — 2 % растворе хлоргексидина в течение 3 недель с периодической заменой раствора каждые 10–14 дней для обеспечения стабильных условий и предотвращения микробной контаминации.

Перед проведением исследования образцы извлекались из раствора, высушивали и делили на две группы, каждая из которых содержала по 15 образцов:

**Группа 1.** К образцам зубов верхней и нижней челюсти, прошедшим предварительную подготовку, фиксировали керамические образцы из дисиликата лития E-max (Ivoclar Vivadent, Лихтенштейн) при помощи наногибридного светоотверждаемого композитного материала и однокомпонентной адгезивной системы V поколения иностранного производства — OptiBond Solo Plus (Kerr, США).

**Группа 2.** К образцам, прошедшим предварительную подготовку, фиксировали керамические образцы из дисиликата лития E-max (Ivoclar Vivadent, Лихтенштейн) при помощи наногибридного светоотверждаемого композитного материала и однокомпонентной адгезивной системы V поколения российского производства — «Белабонд» (Владива, Россия).

Все образцы проходили обработку и подготовку в стандартизированных лабораторных условиях, чтобы

избежать искажений при анализе поверхности. Через 3 недели все образцы подвергались механической обработке. Для этого образцы зубов фиксировались в блоке из акриловой смолы 1 на 1 см таким образом, чтобы сепарируемая окклюзионная поверхность оставалась доступной для механической обработки. Фиксация в блоке из акриловой смолы обеспечила механическую устойчивость, равномерно распределяя давление при шлифовании и полировке среза, снижая риск появления микродефектов, снизила воздействие внешних механических колебаний, а также позволила сохранить целостность краевых зон. После полимеризации акриловой смолы образцы зубов из обеих групп подвергались механической обработке- сепарации окклюзионной поверхности в пределах эмали на срезы до 2 мм при помощи триммера с карборундовым диском Klettfix с водяным охлаждением. После сепарации срезы окклюзионной поверхности подвергались шлифовке и полировке для обеспечения высокой гладкости отсепарированной поверхности зуба, так как даже незначительные неровности или царапины могут исказить результаты рентгеновского микронзондового анализа и снизить точность измерений. Многоступенчатая шлифовка включала в себя: шлифование абразивами с зернистостью 320–400 grit для устранения крупных сколов, дефектов и трещин, последовательное шлифование абразивами 600–800 grit для сглаживания микродефектов и шлифование абразивами 1000–1200 grit для доведения поверхности до зеркальной гладкости, удаления остаточных неровностей и минимизации микродефектов. Для окончательной подготовки поверхность полировали пастой на основе оксида алюминия для получения гладкой, однородной поверхности без царапин и микродефектов, пригодной для проведения исследования. После каждого из этапов шлифовки и полировки проводили визуальный контроль при помощи стоматологического микроскопа, при наличии дефектов повторяли шлифовку и полировку до достижения требуемой степени гладкости (рис. 1).

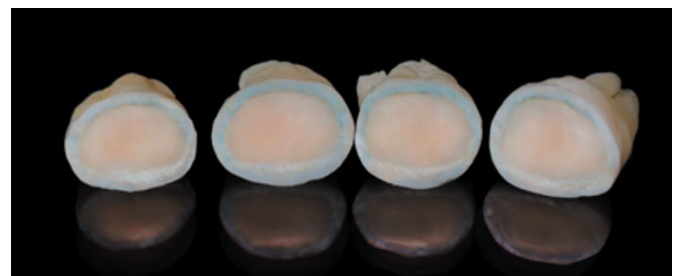


Рис. 1. Сепарированная окклюзионная поверхность образцов зубов  
Fig. 1. Separated occlusal surface of the tooth samples

Для исследования адгезии к керамическим конструкциям использовались блоки с основанием 5 на 5 мм из дисиликата лития E-max (Ivoclar Vivadent, Лихтенштейн) оттенка A2. Литий-дисиликатная керамика ( $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) представляет собой двухфазный стеклокерамический материал с высокой биосовместимостью, отличной эстетикой и значительной механической прочностью, широко

используемый в реставрационной стоматологии [21]. Стекловидная (аморфная) фаза содержит остаточный аморфный силикатный материал, определяющий оптические свойства и прозрачность реставрации, тогда как кристаллическая фаза преимущественно представлена интерлокированными игольчатыми или пластинчатыми кристаллами литий-дисиликата ( $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ), которые обеспечивают прочность на изгиб до 300–400 Мпа и препятствуют распространению трещин [22]. Химический состав литий-дисиликатной керамики включает в себя и обеспечивает следующие характеристики:  $\text{SiO}_2$  (57–80 %) — придает материалу твердость, прозрачность и оптические свойства, обеспечивает высокую адгезию к твердым тканям зуба,  $\text{Li}_2\text{O}$  (11–19 %) — повышает прочность на изгиб и устойчивость к микродефектам,  $\text{K}_2\text{O}$  (< 13 %) — улучшает обработку и шлифование,  $\text{P}_2\text{O}_5$  (< 11 %) — способствует устойчивости микроструктуры,  $\text{ZrO}_2$  (< 8 %) — улучшает механическую прочность и жесткость,  $\text{ZnO}$  (< 8 %) — повышает коррозионную стойкость,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (< 5 %),  $\text{MgO}$  (< 5 %), пигменты (< 0,8 %) [23]. Такая комбинация химического состава, фазовых превращений и микроструктуры делает литий-дисиликатную керамику надежным и эстетически привлекательным материалом для многих ортопедических конструкций.

Цифровая модель керамического образца создавалась в программном обеспечении Exocad, после чего файл экспортировали и изготовили с помощью компьютерного фрезерования (CAD/CAM) на фрезерном станке CEREC MC XL (Dentsply Sirona, Германия). После фрезеровки образцы не подвергались дополнительной обработке в лаборатории — окрашивание, глазурование, обжиг или полировка не выполнялись. Удаление хвостовиков и финишную обработку проводили с применением повышающего наконечника (Dentsply Sirona, Германия) и мелкозернистых алмазных боров категории «fine» (Meisinger, Германия) при использовании водяного и воздушного охлаждения.

Для обеих экспериментальных групп использовался стандартизированный протокол подготовки керамической поверхности. Поверхность литий-дисиликатной керамики протравливали 5 % плавиковой кислотой в течение 20 секунд для формирования микро рельефа, обеспечивающего микромеханическую ретенцию, затем промывали струей воды в течение 60 секунд и высушивали с помощью сжатого воздуха. После этого на поверхность наносили силан-содержащий агент на 60 секунд для активации керамики и повышения эффективности химической связи с композитным материалом, после чего излишки удаляли слабой струей воздуха, формируя равномерную тонкую пленку.

В исследовании применяли стандартизированный протокол использования адгезивных систем 5-го поколения. На сепарированную окклюзионную поверхность наносили 35 % ортофосфорную кислоту на 10–15 секунд для кратковременного травления с целью формирования микропор и удаления смазанного слоя [24], что обеспечивает оптимальные условия для инфильтрации моно-

меров адгезива и формирования гибридного слоя, затем промывали струей воды в течение 20–30 секунд и проводили контролируемое высушивание с помощью струи сжатого воздуха. После наносили однокомпонентный адгезив, равномерно распределяя его по поверхности и удаляя излишки легкой струей воздуха для формирования тонкой пленки, и полимеризовали его в течение 20 секунд с помощью стандартного светополимеризационного устройства. В I группе использовалась однокомпонентная адгезивная система 5-го поколения иностранного производителя OptiBond Solo Plus (Kerr, США), во второй — однокомпонентная адгезивная система V поколения отечественного производства Белабонд (Владивосток). Такой протокол позволяет комбинировать микромеханическое сцепление и химическое взаимодействие функциональных мономеров с тканями зуба, что обеспечивает высокую прочность сцепления и долговечность адгезионного интерфейса. Затем производили фиксацию литий-дисиликатного керамического фрагмента из материала E-max к поверхности подготовленного дентина с помощью наногибридного композитного материала светового отверждения.

После адгезивной фиксации образцов керамики с применением исследуемых адгезивных систем выполняли сепарацию медиальной или дистальной поверхности зуба вместе с прикрепленным керамическим образцом с целью получения адгезионного интерфейса для последующего рентгеновского микрозондового анализа. Для обеспечения точного позиционирования и воспроизводимости процедуры каждый образец предварительно фиксировали в акриловой смоле, оставляя свободный доступ к планируемой области среза. С помощью зуботехнического триммера формировали ровную и однородную плоскость, пригодную для последующего анализа адгезионного интерфейса между твердыми тканями зуба, адгезивом, композитным и керамическим материалом. Полученные срезы использовались для изучения особенностей микромеханической ретенции и химических взаимодействий в зоне межфазного интерфейса методом рентгеновского микрозондового анализа, что позволило оценить прочность и качество формирования гибридного слоя, выявить распределение элементов в адгезионном интерфейсе и сопоставить эффективность исследуемых адгезивных систем. Для удаления остатков абразивных частиц образцы подвергали обработке в ультразвуковой ванночке с дистиллированной водой, после чего тщательно высушивали с помощью струи сжатого воздуха.

Для изучения адгезионного интерфейса образцов применяли рентгеновский микрозондовый анализ (PMA) с детектором X — Max<sup>N</sup> 20 (Oxford Instruments) на сканирующем электронном микроскопе JSM-IT300LV (JEOL, Япония) (рис. 2), обеспечивающемся высокой точностью и высоким пространственное разрешение. Рентгеновский микрозондовый анализ позволяет исследовать зоны микромеханической инфильтрации и химических взаимодействий между адгезивным слоем и тканями зуба, а также определить элементный состав адгезивов, композитных и керамических материалов, включая анализ клю-

чевых элементов- кальция, кремния, фосфора и других микроэлементов, необходимых для формирования стабильного гибридного слоя и прочного интерфейса. Исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 0,8 нА и в режиме низкого вакуума, что позволяет проводить исследование органосодержащих образцов без нанесения проводящего покрытия, что необходимо для сохранения неизменного химического состава и картирования адгезионного интерфейса. Глубина зонда, использованная в исследуемых материалах (литий-дисиликатная керамика, композитные материалы и твердые ткани зуба), составляла 1–2 мкм, что позволяло изучать как поверхностные, так и подповерхностные слои каждого компонента. Такой подход позволяет получать количественные и качественные данные о межфазной границе и оценивать эффективность различных адгезивных систем в создании прочного и долговечного адгезионного соединения.

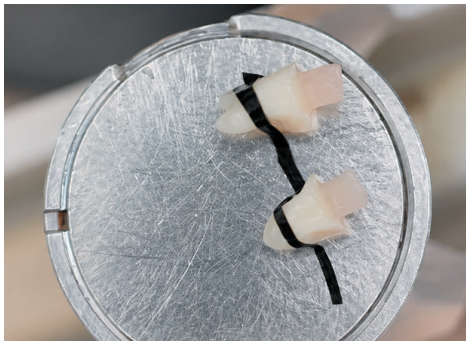


Рис. 2. Образцы зубов с адгезивно зафиксированными керамическими образцами, зафиксированные в модуле сканирующего электронного микроскопа JSM-IT300LV

Fig. 2. Tooth samples with ceramic specimens adhesively fixed in the scanning electron microscope module JSM-IT300LV

Полученные в результате рентгеновского микрозондового анализа карты распределения химических элементов дают возможность анализировать микроструктурные и химические особенности адгезионного интерфейса, включая плотность и равномерность распределения химических элементов в адгезионном слое, степень инфильтрации мономеров в дентин и эмаль, а также взаимодействие функциональных мономеров с минеральными компонентами зуба. Эти данные позволяют оценить эффективность отечественной и иностранной адгезивных систем пятого поколения, выявить потенциальные зоны слабого сцепления и предсказать долговечность адгезионного соединения.

#### Результаты исследования

С помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-IT300LV (JEOL, Япония) для образцов обеих групп были получены серии электронных микрофотографий при увеличениях  $\times 40$ ,  $\times 100$ ,  $\times 1000$ ,  $\times 2000$ ,  $\times 3000$  и  $\times 10\,000$ . На основе этих снимков и данных рентгеновского микрозондового анализа (РМА), выполненного с энергодисперсионным детектором X — Max<sup>N</sup> 20 (Oxford Instruments), провели количественный эле-

ментный анализ по локальным спектрам. Это дало возможность оценить распределение химических элементов в адгезионном интерфейсе и качество сформированного адгезионного соединения.

Результаты рентгеновского микрозондового анализа образца 1 (рис. 3) свидетельствует о формировании структурно целостной адгезионной зоны между керамическим образцом, наногибридным композитом пломбирочным материалом, адгезивной системой и тканями зуба. В табл. 1 представлены результаты рентгеновского микрозондового анализа образца 1. В спектре 147 соответствующем керамике, наличие кремния (Si = 10,13 %) и кислорода (O = 26,44 %) подтверждает силикатную природу материала, при этом высокое содержание углерода (C = 45,6 %) свидетельствует о наличии органического поверхностного слоя — силана, способствующего связыванию керамической поверхности с органической полимерной матрицей адгезива. Наиболее важным является спектр 148, соответствующий адгезиву: высокое содержание углерода (C = 56,47 %) свидетельствует о присутствии смоляной фазы, которая обеспечивает высокий уровень смачивания поверхности и глубокую инфильтрацию в микрорельеф, высокое содержание кислорода (O = 23,40 %) о химическом взаимодействии с поверхностями субстрата и другими компонентами, повышая устойчивость адгезивной системы и прочность адгезии. Значительный уровень кремния (Si = 11,51 %) в адгезивном слое улучшает механическую прочность и стабильность гибридного слоя, повышая устойчивость адгезивной системы к нагрузкам и снижая усадку во время полимеризации. Наличие кальция (Ca = 3,71 %) и фосфора (P = 2,56 %) в адгезионном интерфейсе является важным признаком взаимодействия с тканями зуба: кальций-фосфатные компоненты не ограничиваются только спектром тканей зуба, а частично определяются в адгезивной зоне, что указывает на формирование гибридного слоя и проникновение адгезива в деминерализованную поверхность. Наличие Ca и P в адгезионном интерфейсе свидетельствует об образовании смоляных нитей, что подтверждается смешанным органическим составом на границе «адгезив — зуб». Такая элементная картина образца 1 указывает на хорошее качество адгезионного соединения за счет выраженной органической полимерной матрицы адгезива, его химической близости к композиту, контакта с керамической поверхностью и инфильтрации в минерализованные ткани зуба.

Образец 2 (рис. 4, табл. 2) характеризуется удовлетворительным, но менее выраженным качеством адгезивного соединения. В спектре 151, соответствующем керамике, высокое содержание кислорода (O = 53,33 %) и кремния (Si = 34,87 %) повышает устойчивость и прочность адгезии, улучшает микромеханическую ретенцию.

Наиболее значимым является спектр 154, соответствующий адгезивному интерфейсу: высокие значения углерода (C = 57,93 %) и кислорода (O = 27,87 %) подтверждают преобладание органической полимерной матрицы адгезива, обеспечивающей смачивание поверхности, проникновение в микронеровности и формирование адге-

живной связи. Снижение уровня кремния (Si = 5,46 %) и бария (Ba = 2,62 %) в адгезионном интерфейсе указывает на сниженную инфильтрацию адгезива в подлежащий материал, и невысокую механическую стабильность гибридного слоя, а в сочетании с невысоким уровнем кальция (Ca = 3,05 %) и фосфора (P = 2,32 %) свидетельствует о преимущественно поверхностной инфильтрации и менее выраженном формировании смоляных нитей.

Неравномерное распределение элементов в зоне адгезионного интерфейса свидетельствует о неоднородности адгезивного слоя и возможных участках слабой связи, соединение обеспечивается преимущественно поверхностным гибридным слоем, без признаков глубокой и равномерной инфильтрации тканей зуба, что может повышать риск микроподтеканий, расслоений и снижения долговечности адгезивного соединения под функциональной нагрузкой.

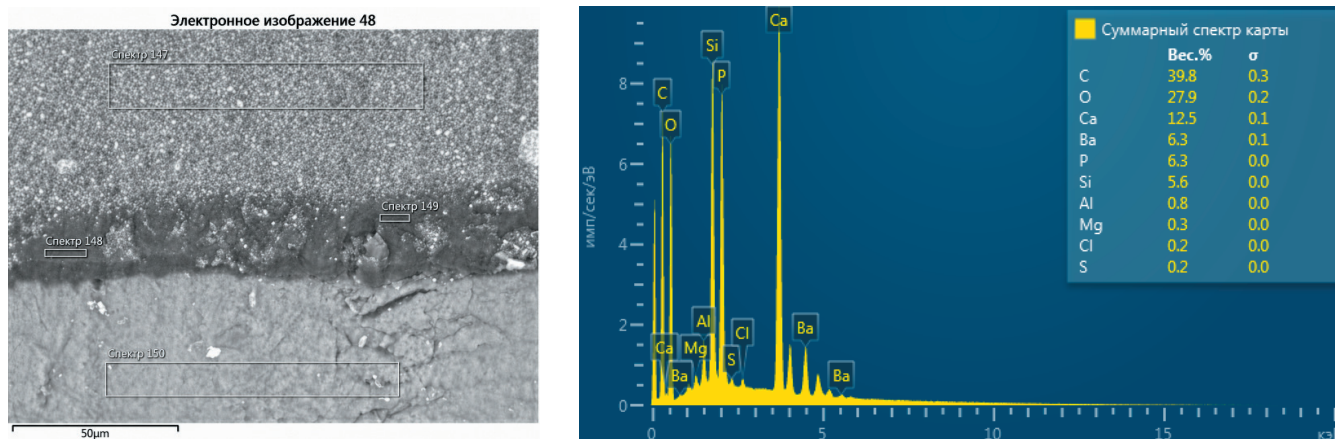


Рис. 3. Изображение участков исследования химического состава образца № 1: 1 — электронное изображение с зонами спектрального анализа; 2 — суммарный спектр элементного состава  
Fig. 3. Image of the areas of study of the chemical composition of sample No. 1: 1 — electron image with spectral analysis zones; 2 — total spectrum of elemental composition

Таблица 1

Результаты исследования элементного состава образца 1

Table 1. Results of the study of the elemental composition of sample 1

Название спектра	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Zn	Ba
Спектр 147	45,6	26,44			1,75	10,13	1,24				2,13			12,71
Спектр 148	56,47	23,4			0,2	11,51	2,56	0,13	0,25		3,71			1,76
Спектр 149	56,66	23,64			0,34	9,1	3,15				4,34			2,76
Спектр 150	23,72	34,57	0,5	0,61		0,69	12,44	0,27	0,33		26,63	0,23		

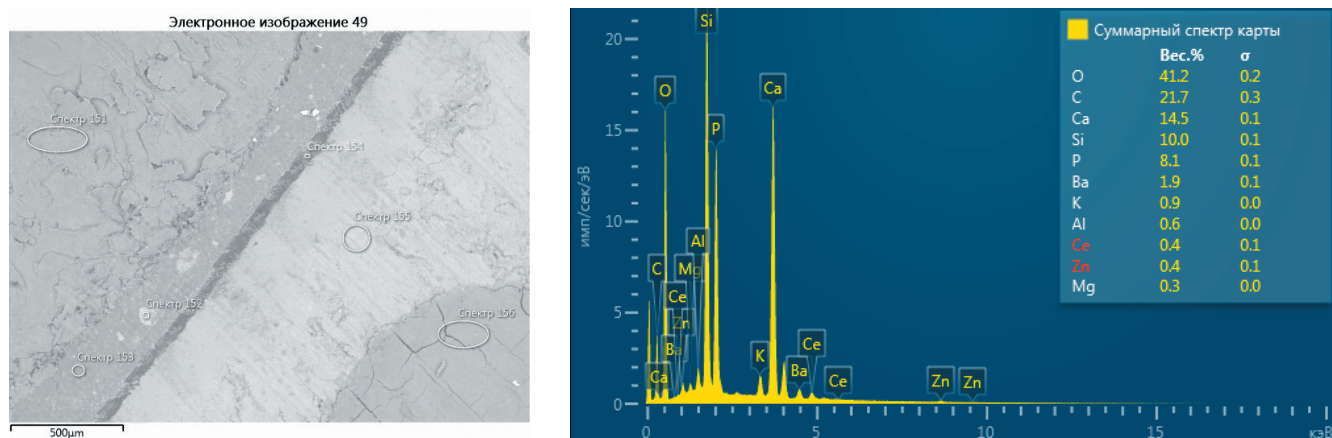


Рис. 4. Изображение участков исследования химического состава образца № 2: 1 — электронное изображение с зонами спектрального анализа; 2 — суммарный спектр элементного состава  
Fig. 4. Image of the areas of study of the chemical composition of sample No. 2: 1 — electron image with spectral analysis zones; 2 — total spectrum of elemental composition

Результаты исследования элементного состава образца 2

Table 2. Results of the study of the elemental composition of sample 2

Название спектра	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Zn	Ba	Ce	Сумма
Спектр 151		53,33		0,4	1,21	34,87	2,34		4,05	0,58	1,35		1,86	100
Спектр 153	50,67	29,97			1,3	8,16	0,82		0,12	1,43		7,51		100
Спектр 154	57,93	27,87			0,45	5,46	2,32	0,16	0,13	3,05		2,62		100
Спектр 155	8,63	39,9	0,69	0,25	0,16	2,13	15,51	0,16	0,11	31,81		0,65		100

**Заключение**

Результаты проведенного исследования подтвердили эффективность адгезивных систем 5-го поколения при формировании адгезионного соединения. Зарубежная адгезивная система продемонстрировала более стабильное и равномерное формирование адгезионного интерфейса, выраженное формирование смоляных нитей, более однородное распределение элементов и однородный гибридный слой. Вместе с тем российская адгезивная система также продемонстрировала высокий уровень полимерной органической матрицы адгезива, хорошее

смачивание поверхности и формирование адгезивной связи, что подтверждает ее функциональную состоятельность и перспективность дальнейшего применения после оптимизации состава. Оптимизация наполненности адгезива, повышение равномерности распределения компонентов и улучшение глубины инфильтрации могут способствовать повышению прочности и долговечности адгезивной связи. Полученные данные подтверждают перспективность отечественной адгезивной системы и возможность ее приближения к уровню ведущих зарубежных аналогов при дальнейшей доработке.

**Литература/References**

1. Хамидова С. Р., Хамидова С. Р., Гаджимурадова Х. Д. Использование адгезивных систем в современной стоматологической практике. Вестник науки. 2025;3(1):1344–1348. [Khamidova S. R., Khamidova S. R., Gadzhimuradova H. D. The use of adhesive systems in modern dental practice. Vestnik Nauki. 2025;3(1):1344–1348. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79713749>
2. Хасан А. М. Ретроспектива подходов к формированию поколений адгезивных систем в стоматологии. Вестник Челябинского государственного университета. Образование и здравоохранение. 2022;(2):38–45. [Hasan A. M. Retrospective of approaches to the formation of generations of adhesive systems in dentistry. Bulletin of Chelyabinsk State University. Education and Healthcare. 2022;(2):38–45. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.47475/2409-4102-2022-10206>
3. Breschi L., Maravic T., Mazzitelli C., Josic U., Mancuso E., Cadenaro M. et al. The evolution of adhesive dentistry: From etch-and-rinse to universal bonding systems. Dental Materials. 2025;41(2):141–158. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.11.011>
4. Bourgi R., Kharouf N., Cuevas-Suárez C. E., Lukomska-Szymanska M., Haikel Y., Hardan L. A Literature Review of Adhesive Systems in Dentistry: Key Components and Their Clinical Applications. Applied Sciences. 2024;14(18):8111. <https://doi.org/10.3390/app14188111>
5. Бордина Г. Е., Лопина Н. П., Андреев А. А., Некрасов И. А. Динамика развития адгезивных систем в стоматологической практике. Российский стоматологический журнал. 2022;26(1):63–74. [Bordina G. E., Lopina N. P., Andreev A. A., Nekrasov I. A. Dynamics of adhesive systems development in dental practice. Russian Journal of Dentistry. 2022;26(1):63–74. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2022-26-1-63-74>
6. Staehle H. J., Sekundo C. 75 Years Ago: Discovery of Resin Adhesion to Acid-etched Enamel — A Comparison of the 1949 and 1955 Methods. Journal of Adhesive Dentistry. 2024;26:87–92. <https://doi.org/10.3290/j.jad.b5057135>
7. Sebold M., André C. B., Sahadi B O., Breschi L., Giannini M. Chronological history and current advancements of dental adhesive systems development: a narrative review. Journal of Adhesion Science and Technology. 2021;35(18):1941–1967. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1865611>
8. Singh S., Chandrasekhar P. The hybrid layer paradox: Rethinking the foundations of adhesive dentistry. Journal of Conservative Dentistry and Endodontics. 2025;28(12):1181–1182. [https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE\\_988\\_25](https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_988_25)
9. Alkattan R. Adhesion to enamel and dentine: an update. Primary Dental Journal. 2023;12(3):33–42. <https://doi.org/10.1177/20501684231196756>
10. Naik A., Narasimha V. V., Yesaswani B., Mishra B., Kumar K. Hybrid layer and hybridization of dental hard tissues: mechanisms, properties, and clinical implications. International Journal for Multidisciplinary Research. 2025;7(5). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i05.55720>
11. Delgado A., Ahmed M., Ferreira M., Azul A., Polido M., Yoshihara K. et al. Physico-Chemical Properties and Performance of Functional Monomers Used in Contemporary Dental Adhesive Technology. Journal of Adhesive Dentistry. 2025;27:175–193. [https://doi.org/10.3290/j.jad.c\\_2297](https://doi.org/10.3290/j.jad.c_2297)
12. Pimentel de Oliveira R., de Paula B. L., Ribeiro M. E., Alves E., Costi H. T., Silva C. Evaluation of the Bond Strength of Self-Etching Adhesive Systems Containing HEMA and 10-MDP Monomers: Bond Strength of Adhesives Containing HEMA and 10-MDP. International Journal of Dentistry. 2022;2022:5756649. <https://doi.org/10.1155/2022/5756649>
13. Mokeem L. S., Garcia I. M., Melo M. A. Degradation and Failure Phenomena at the Dentin Bonding Interface. Biomedicines. 2023;11(5):1256. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11051256>
14. Brandt W. C., Silva I D., Matos A C., Gonçalves F., Boaro L. Improving Bonding Durability in Dental Restorations: The Impact of Bioactive and Reinforcement Particles on Universal Adhesives. Materials. 2025;18(19):4433. <https://doi.org/10.3390/ma18194433>
15. Liu X., Yao X., Zhang R., Sun L., Zhang Z., Zhao Y. et al. Recent advances in glass-ceramics: Performance and toughening mechanisms in restorative dentistry. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials. 2024;112(1): e35334. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35334>
16. Sikri A., Sikri J. Recent Advances in Dental Ceramics: A Narrative Review. ICON Journal of Applied Medical Sciences. 2025;1(4):23–26. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.17636388>
17. Sarhan H., Mehesen R., Hamama H., Mahmoud S. H. Elemental analysis and micromorphological patterns of tooth/restoration interface of three ion-releasing class V restorations. BMC Oral Health. 2024;24(1):1221. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04944-w>
18. Preoteasa E., Preoteasa E., Suciu I., Bartok R. Atomic and nuclear surface analysis methods for dental materials: A review. AIMS Materials Science. 2018;5(4):781–844. <https://doi.org/10.3934/mat.2018.4.781>
19. Тонконог В. В. Актуальные вопросы импорта медицинских изделий и оборудования в Российскую Федерацию. Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2024;32(S2):1176–1180. [Tonkonog V. V. Current issues of import of medical devices and equipment to the Russian Federation. Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine. 2024;32(S2):1176–1180. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2024-32-s2-1176-1180> <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74621979>
20. Тонконог В. В. Проблемы и перспективы импортозамещения в медицинской промышленности. Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2024;32(3):339–345. [Tonkonog V. V. The problems and prospects of import substitution in medical industry. Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine. 2024;32(3):339–345. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2024-32-3-339-345> <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68366648>
21. Kaur K., Talibi M., Parmar H. Do you know your ceramics? Part 3: lithium disilicate. British Dental Journal. 2022;232(3):147–150. <https://doi.org/10.1038/s41415-022-3882-x>
22. Guaita-Sáez R., Montiel-Company J. M., Agustín-Panadero R., Fons-Badal C., Serra-Pastor B., Solá-Ruiz M. F. Analysis of Different Lithium Disilicate Ceramics According to Their Composition and Processing Technique — A Systematic Review and Meta-Analysis. Materials. 2025;18(12):2709. <https://doi.org/10.3390/ma18122709>
23. Al-Johani H., Haider J., Satterthwaite J., Silikas N. Lithium Silicate-Based Glass Ceramics in Dentistry: A Narrative Review. Prosthesis. 2024;6(3):478–505. <https://doi.org/10.3390/prosthesis603034>
24. Ismail I. H., Razak N A., Ramzi N M., Yusof M M. Microtensile Bond Strength of Total-Etch and Self-Etch Universal Adhesives Containing 10-MDP: A Systematic Review. The Journal of Dentists. 2022;10:12–24. <https://doi.org/10.12974/2311-8695.2022.10.03>