



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11264>

Особенности молекулярного состава зубной биопленки у пациентов в зависимости от степени развитости кариеса и метода его профилактики: исследования с использованием синхротронной FTIR-спектроскопии

П. В. Середин¹✉, Д. Л. Голощапов¹, В. М. Кашкаров¹, Н. С. Буйлов¹, Ю. А. Ипполитов²,
И. Ю. Ипполитов², J. Vongsvivut³

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»
Университетская пл. 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко»,
ул. Студенческая, 10, Воронеж 394036, Российская Федерация

³Australian Synchrotron (Synchrotron Light Source Australia Pty LTD),
800 Blackburn Road, Clayton, Victoria 3168 Australia

Аннотация

В нашей работе изучены особенности молекулярного состава зубной биопленки у пациентов в норме и при множественной кариозной патологии на различных этапах проведения профилактических мероприятий заболеваний ротовой полости путем экзогенного и эндогенного характера.

Обнаруженные трансформации в синхротронных ИК-спектрах на различных стадиях эксперимента свидетельствуют о дисбалансе между процессами де- и минерализации твердой ткани вследствие отличий в механизмах адсорбции веществ, попадающих в ротовую полость эндо и экзогенным путем. Все обнаруженные изменения являются следствием различий в микробиоте биопленки в норме и при кариозной патологии, а также при воздействии на биопленку агентами профилактических средств.

Ключевые слова: биопленка, молекулярные свойства, эндо и экзогенная профилактика, ИК-микроспектроскопия, синхротронное излучение

Источник финансирования: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда №23-15-00060.

Благодарности: Доступ к научному оборудованию и методологии предоставлен при поддержке Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2021-1351.

Часть исследования была проведена на канале инфракрасной микроспектроскопии (IRM) на Австралийском синхротроне.

Для цитирования: Середин П. В., Голощапов Д. Л., Кашкаров В. М., Буйлов Н. С., Ипполитов Ю. А., Ипполитов И. Ю., Vongsvivut J. Особенности молекулярного состава зубной биопленки у пациентов в зависимости от степени развитости кариеса и метода его профилактики: исследования с использованием синхротронной FTIR-спектроскопии. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;23(3): 398–405. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11264>

For citation: Seredin P. V., Goloshchapov D. L., Kashkarov V. M., Buylov N. S., Ippolitov Yu. A., Ippolitov I. Yu., Vongsvivut J. Features of the molecular composition of dental biofilm in patients depending on the degree of caries and the method of its prevention: synchrotron FTIR spectroscopic studies. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;23(3): 398–405. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11264>

✉ Середин Павел Владимирович, paul@phys.vsu.ru

© Середин П. В., Голощапов Д. Л., Кашкаров В. М., Буйлов Н. С., Ипполитов Ю. А., Ипполитов И. Ю., Vongsvivut J., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Современная концепция исследования патологических процессов деминерализации твёрдых тканей скелета человека, кариеса, эрозии, образования трещин и сколов зубов, а также механизмов профилактики, препятствующих данным патологиям, постулирует важность исследований молекулярного состава и фазовых превращений на границе эмаль/зубная биоплёнка на микро и наноуровне [1–4]. Биопленка выполняет роль буфера, расположенного на поверхности эмали, через который происходят все обменные процессы между органоминеральным матриксом апатита эмали [1, 5] и ротовой жидкостью, в которой присутствуют активные компоненты реминерализации: фосфатные и кальциевые комплексы [4,6]. Качественные исследования и контроль заболеваний ротовой полости, когда анализом выступает биопленка, требует прецизионного определения изменений в ее молекулярном составе.

Информативной и высокоточной методикой для подобного рода анализа биологических систем является ИК-спектроскопия (FTIR) [7, 8]. Использование FTIR при анализе биопленок уже продемонстрировало многообещающие результаты, в частности, для обнаружения и идентификация бактерий, входящих в состав биопленки [7–10]. Кроме того, неоспоримым преимуществом FTIR перед генетическими анализами является тот факт, что последние могут давать информацию, которая не всегда соответствует клеточным фенотипам, в то время как FTIR позволяет надёжно отслеживать происходящие в анализе молекулярные биохимические изменения, в том числе с течением времени [7–10].

Ранее нами уже демонстрировалось, что синхротронная ИК-спектроскопия является удобным методом изучения вторичной структуры протеинов в биологических жидкостях ротовой полости, а также развития патологических процессов в ней. Вторичная структура белков определяет их пространственное и конформационное положение и потому, при наличии сопутствующих факторов, может быть связана с патологическими процессами в организме человека.

Следует отметить, что в литературе практически отсутствует информация об изменениях в молекулярном составе зубной биопленки человека в зависимости от степени развитости кариеса и метода его профилактики.

Поэтому целью нашего исследования является изучение особенностей молекулярного со-

става зубной биопленки в норме и патологии с привлечением методов синхротронной ИК-спектроскопии.

2. Материалы и методы

2.1. Дизайн исследования

В нашем исследовании приняли образцы зубной биопленки, полученные у пациентов с различным типом кариесогенной ситуации их ротовой полости. Участники исследования первой группы были клинически здоровыми, не имели кариозных поражений зубной ткани. Во вторую группу участников исследования были отобраны пациенты, у которых имелись множественные поражения зубной эмали кариесом (ICDAS 1–2).

На 1 этапе эксперимента биоплёнка у обеих групп участников эксперимента была отобрана после механической очистки зубов.

На 2 этапе эксперимента биопленка взята у всех участников после чистки зубов с использованием зубной пасты, имеющей в своем составе глицерофосфат кальция.

На 3 этапе эксперимента пациенты в течение 3 суток принимали минеральный комплекс с глицерофосфатом кальция, затем после механической очистки зубов были взяты образцы биопленки.

2.2. Экспериментальная установка

Исследования молекулярного состава биоплёнок были выполнены с привлечением оборудования синхротронного центра г. Мельбурн, Австралия. Спектры были зарегистрированы в спектральном диапазоне $3100–900\text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением 4 см^{-1} , для чего использовался ИК-спектрометр Bruker Vertex 80v и ИК-микроскоп Bruker Hyperion 2000, оснащенный алмазной приставкой высокого давления для микроколичественного анализа субстанций.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

FTIR-спектры, собранные в режиме поглощения, для образцов биопленки пациентов в норме и при развитии кариозной патологии, а также на различных этапах проведения эксперимента представлены на рис. 1, 2. Анализ полученных результатов показал, что все спектры независимо от экспериментальной группы и стадии эксперимента содержат один и тот же набор максимумов, которые можно приписать характеристическим молекулярным связям. Предварительное рассмотрение спектральных наборов

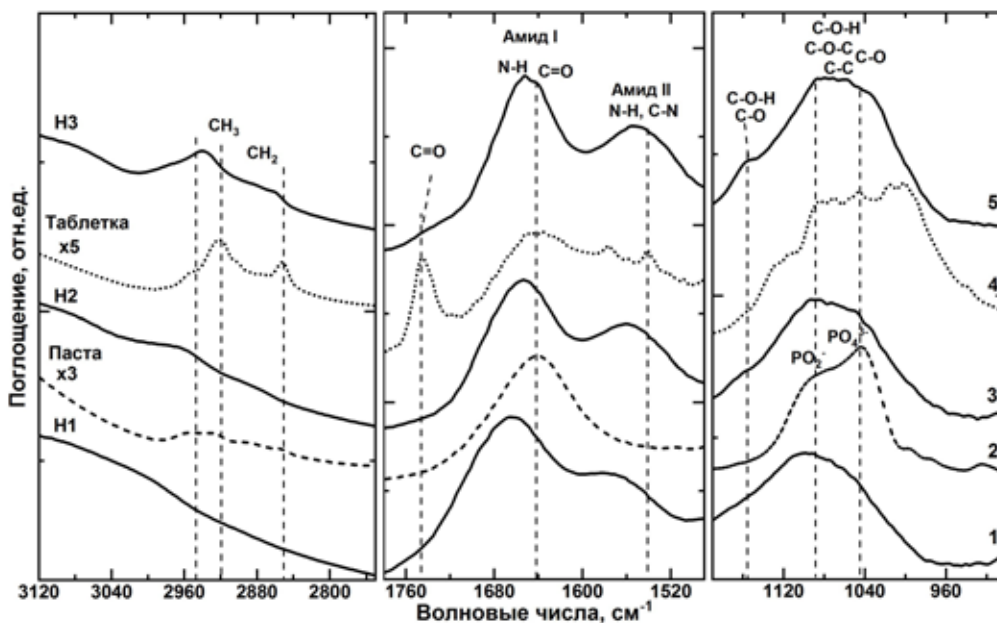


Рис. 1. Инфракрасные спектры поглощения образцов биопленки полученной с поверхности эмали зубов у клинически здоровой группы пациентов на различных этапах исследования: 1 – до проведения профилактики; 2, 3 – после проведения экзогенной и эндогенной профилактики

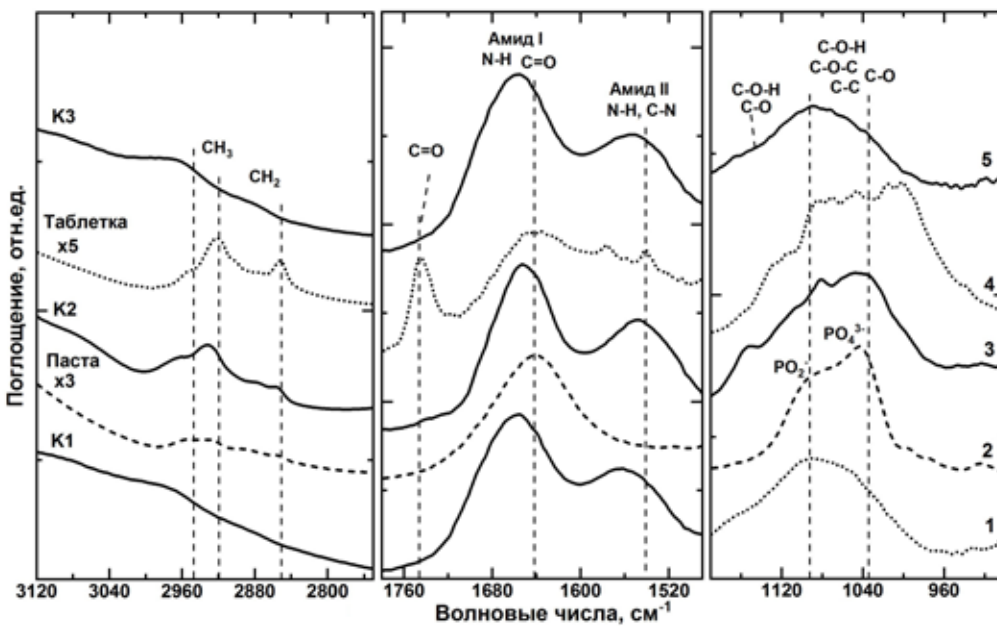


Рис. 2. Инфракрасные спектры поглощения образцов биопленки полученной с поверхности эмали зубов у группы пациентов с множественным кариесом на различных этапах исследования: 1 – до проведения профилактики; 2, 3 – после проведения экзогенной и эндогенной профилактики

конкретных выборок также демонстрировало, что ИК-спектры в наборах отличаются друг от друга незначительно. Поэтому в нашей работе мы приводим усредненные по выборкам ИК-спектры поглощения зубной биопленки.

Анализ экспериментальных ИК-спектров поглощения биопленки выполнен на основе

массива известных данных [7, 8, 11–15]. В этих работах методом колебательной ИК-спектроскопии исследованы ротовая жидкость человека и зубная ткань при различных патологиях в ротовой полости, а также биопленки. Анализ показал, что собранные нами на различных стадиях эксперимента ИК-спектры биопленок

имеют набор характеристических колебаний, которые можно соотнести с молекулярными группами различных белков, органических и минеральных агентов, а также микробиоты ротовой полости.

Наиболее значительные изменения в относительных интенсивностях и профилях полос поглощения, присутствующих во всех ИК-спектрах образцов биопленки, сосредоточены в диапазонах 3120–2760, 1780–1500 см^{-1} и 1200–900 см^{-1} и представлены на рис. 1 и 2. При анализе колебательных мод образцов биопленки обращает на себя внимание группа полос, локализованных в области 2950–2750 см^{-1} и приписываемых колебаниям С–Н связей различных жирных кислот и липидов [7, 8]. Следует отметить, что наибольшее изменение относительных интенсивностей данных полос в ИК-спектрах биопленок наблюдается для спектров, полученных для групп с различной кариесогенной ситуацией (рис. 2) на этапе применения профилактических средств. Анализ ИК-спектров биопленки от клинически здоровых пациентов (рис. 1) показал, что изменения в спектральной области 2950–2750 см^{-1} обусловлены типом проводимой профилактики. Этот факт легко детектируется с учетом характерных спектральных особенностей в указанном диапазоне у используемых профилактических средств. В тоже время рассмотрение ИК-спектров биопленки от лиц с множественным кариесом (рис. 2) демонстрирует, что значительные изменения в молекулярном составе биопленки происходят при непосредственном внесении в ротовую полость профилактических средств (обработка пастой), в то время как эндогенная профилактика менее интенсивно влияет на изменение молекулярного состава биопленки.

Аналогичную тенденцию можно проследить при анализе спектров в диапазоне 1200–900 см^{-1} , где наблюдается группа высокоинтенсивных колебаний, ассоциированная с производными фосфора, такими как фосфаты, глицерофосфаты и фосфолипиды, важными с точки зрения рассмотрения процессов минерализации зубов [7, 8, 14]. Следует отметить, что в ИК-спектрах поглощения биопленок присутствуют полосы, появление которых и интенсивность в данном диапазоне зависит как от кариесогенной ситуации, так и от стадии эксперимента, т. е. вида профилактических мероприятий. К таким модам в спектре следует отнести, во-первых, моду в области 1082 см^{-1} , которая ассоциирована с PO_2 асимметричным и симметричным валентным коле-

баниями фосфатных остатков и фосфолипидами [7, 8, 14]. Во-вторых, моду, расположенную в области 1070–1020 см^{-1} , и представляющую собой перекрывающиеся полосы колебаний, ассоциируемых с органическими производными фосфатов, глицерофосфатом и фосфатазой, комплексом С–О–Р–О–С, а также клеточным карбогидратом. Сопоставление результатов устанавливает, что проводимая профилактика с использованием органоминерального комплекса, содержащегося в таблетке и пасте, приводит к значительным перестроениям профиля полосы 1160–960 см^{-1} в случае биопленки полученной у клинически здоровых пациентов. При этом для группы с множественным кариесом подобные изменения наблюдаются только при непосредственном внесении профилактического средства, молекулярный состав которого приводит к значительным изменениям в молекулярном составе биопленки в данном диапазоне. В случае использования органоминерального комплекса таблеток – молекулярный состав биопленки слабо изменяется относительно ситуации до проведения профилактики (рис. 3).

Следующий рассматриваемый диапазон ИК-спектров, для которого наблюдаются значительные изменения, находится в области 1780–1500 см^{-1} . Одним из наблюдаемых спектральных изменений в составе биопленки можно отнести полосу в области 1730 см^{-1} , которая может быть отнесена к полосам ($>\text{C}=\text{O}$) фосфолипидов, сложных эфиров, жирных кислот и соотносится с характерной областью протеинов [7, 8, 11–13, 15]. В тоже время к наиболее интенсивным полосам протеинов относятся: колебания Амид I (N–H, C=O) в области 1675–1615 см^{-1} ; полоса Амид II (N–H и C–N) в области 1575–1520 см^{-1} по данным работ [7, 8, 11–13, 15]. В случае зубной биопленки данные колебательные моды также могут быть соотнесены с пептидами [7, 13].

Хорошо видно, что влияние типа профилактического средства в зависимости от кариесогенной ситуации у пациентов отражается на положении и форме колебательных моды Амид I и Амид II (рис. 1, 2). Так, для первой (здоровой) группы использование зубной пасты и таблетки приводит к значительному (до 14 см^{-1}) сдвигу полосы Амид I в низкочастотную область по отношению к ее положению на I этапе эксперимента (без использования профилактических средств). Аналогичная тенденция наблюдается и для группы колебательных полос составляющих профиль Amide II, где для здоровой группы

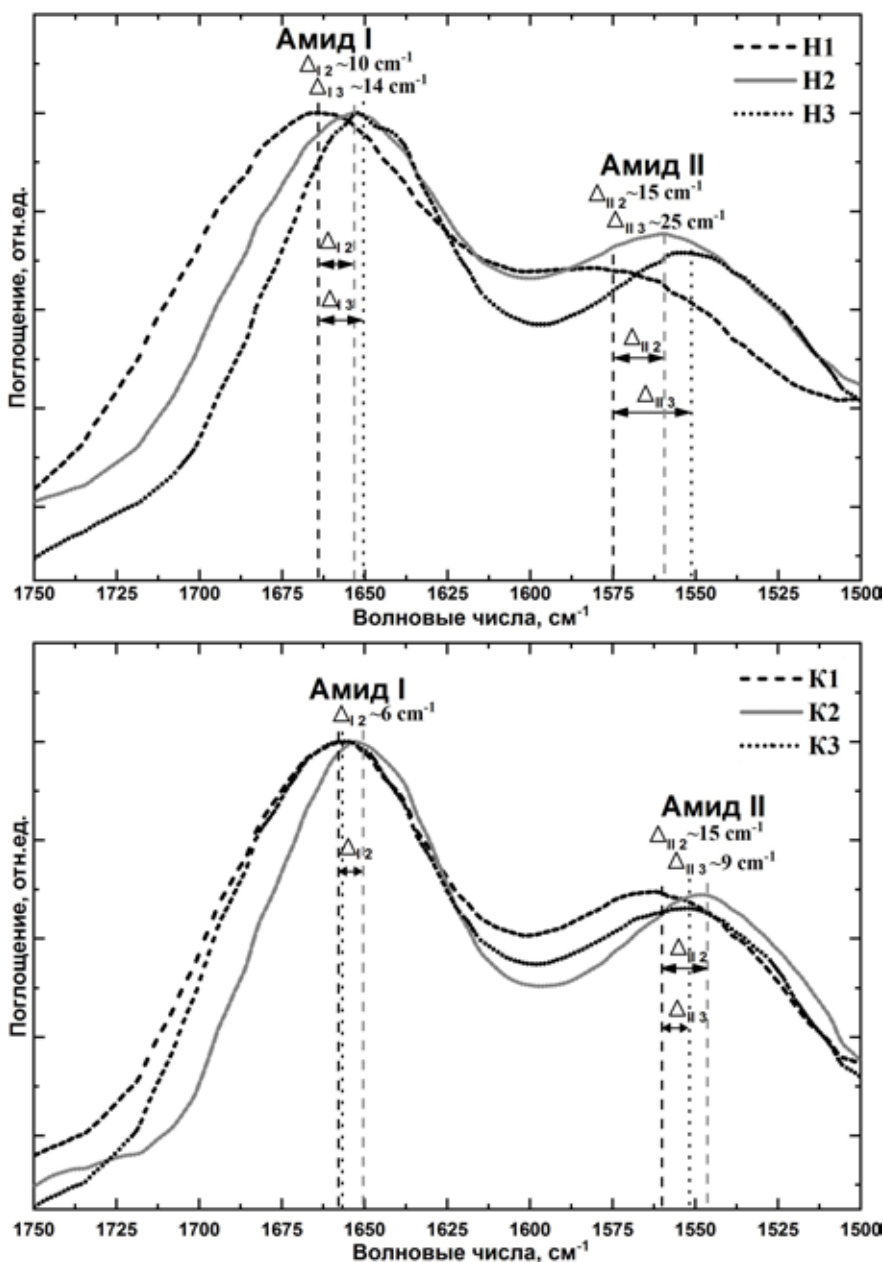


Рис. 3. Профиль полос Amid I и Amid II в инфракрасных спектрах поглощения здоровой (сверху) и кариозной (снизу) групп, на различных этапах исследования: 1 – до проведения профилактики; 2, 3 – после проведения экзогенной и эндогенной профилактики

использование зубной пасты и таблетки приводит к значительному (до 25 см⁻¹) сдвигу центра взвешивания полосы в низкочастотную область по отношению к ее положению на I этапе эксперимента (без использования профилактических средств).

Для кариозной группы пациентов рассмотренные особенности проявляются в меньшей степени. Так, низкочастотный (до 6 см⁻¹) сдвиг для полосы Amid I зафиксирован лишь на II этапе (использование зубной пасты), а для III-эта-

па (использование таблетки) сдвиг отсутствует. При этом сдвиг максимума полосы Amid II составляет 15 см⁻¹ на II этапе (использование зубной пасты), а для III-этапа (использование таблетки) менее выражен и составляет 9 см⁻¹.

Наблюдаемые изменения связаны с изменением молекулярного состава биопленки как в результате различной кариесогенной ситуации, так и в результате действия профилактических средств. Исходя из сопоставления результатов видно, что перестроение профиля полосы

Амид II (N–H и C–N) оказывается даже больше, чем Амид I. Данный факт больше относится к типу колебаний C–N, которые могут изменяться в широких пределах, отражая действия разнообразных факторов на молекулярные связи.

Более детально проследить за изменениями во вторичной структуре белка помогает полоса Амид I, которая чувствительна к подобным перестроениям. Следует отметить, что FTIR-спектроскопия весьма часто используется для изучения процессов конформации и агрегации протеинов *in vitro* [15, 16]. На основе наблюдаемых сдвигов в частоте компонент вторичной структуры полосы Амид I [11, 15, 17, 18] можно установить влияние различных факторов на процессы конформации белка. Поэтому в данной работе был выполнен прецизионный сравнительный анализ данных ИК-спектроскопии для выделенного частотного диапазона 1750–1500 см^{-1} . Сопоставление спектров образцов биопленки как для клинически здоровых пациентов, так и в случае множественного кариеса показывает, что положение и форма (полуширина) высокочастотной компоненты полосы Амид I в области 1700–1600 см^{-1} зависят не только от вида профилактики, но и от кариесогенной ситуации у пациента. Так, в норме (для пациентов здоровой группы) использование зубной пасты и таблеток приводит не только к сдвигу полосы Амид I в низкочастотную область спектра относительно I стадии (без использования профилактических средств), но и к уменьшению полуширины полосы с 55 см^{-1} до 47 см^{-1} и 37 см^{-1} соответственно. При этом в случае использования таблеток сдвиг положения и уменьшение полуширины линии значительно выше, чем при использовании зубной пасты. Это, вероятно, связано со временем нахождения в ротовой жидкости компонент профилактических средств и их взаимодействия с биопленкой.

В ИК-спектре пациентов кариозной группы на I этапе эксперимента (без профилактики) положение высокочастотной компоненты полосы Амид I уже сдвинуто относительно того, которое наблюдается в ИК-спектре здоровой группы на 7 см^{-1} в низкочастотную область. При этом при использовании зубной пасты происходит сдвиг положения и уменьшение полуширины полосы Амид I аналогично тому, которое наблюдается для здоровой группы (т. е. в норме). Однако при использовании таблеток, содержащих минеральный комплекс с глицерофосфатом кальция, сдвиг полосы Амид I и уменьшение полушири-

ны линии не наблюдается. Более заметные различия в изменении полосы Амид II, для которой фиксируется изменение спектрального профиля и частотного положения как в случае использования пасты, так и таблеток. Следует отметить, что в случае использования пасты сдвиг полосы Амид II более выражен, но относительная интенсивность максимума ниже, чем в случае использования таблеток, где она превосходит интенсивность данной спектральной полосы, полученной от образцов до проведения профилактических мероприятий.

Полученные нами спектроскопические данные свидетельствуют о различном конформационном окружении и вторичной структуре протеинов зубной биопленки пациентов с различной кариесогенной ситуацией. Наблюдаемый сдвиг максимума высокочастотной компоненты полосы Амид I и уменьшение полуширины связаны с перераспределением интенсивности компонент вторичной структуры протеинов, известной по работам [11, 15, 19], а именно *random coil* (1648–1641 см^{-1}) и α -helix (около 1660 см^{-1}). Об изменениях в молекулярном составе также свидетельствует изменения относительной интенсивности, частотного положения и спектрального профиля полосы Амид II, коррелирующие с изменениями полосы Амид I. Все обнаруженные изменения являются следствием различий в микробиоте в норме и при кариозной патологии [20] при воздействии на биопленку агентами профилактических средств [21].

Понимание изменений, происходящих в молекулярном и фазовом составе не только твердых тканей зуба, но и ротовой жидкости и зубной биопленки в зависимости от кариесогенной ситуации и типа профилактики, позволят учесть индивидуальные особенности пациентов и провести эффективную терапию по лечению кариесогенных заболеваний, деминерализации, эрозии и преждевременного истирания эмали.

4. Заключение

В нашей работе методом синхротронной ИК-микроспектроскопии изучены особенности, проявляющиеся в молекулярном составе зубной биопленки пациентов, при проведении профилактики экзогенного и эндогенного характера у пациентов в норме и при множественной кариозной патологии.

Обнаруженные трансформации в ИК-спектрах свидетельствуют о дисбалансе между процессами де- и минерализации твердой ткани в

следствие отличий в механизмах адсорбции веществ, попадающих в ротовую полость эндо- и экзогенным путем. Все обнаруженные изменения являются следствием различий в микробиоте биопленки в норме и при кариозной патологии, а также при воздействии на биопленку агентами профилактических средств.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. García-Godoy F., Hicks M. J. Maintaining the integrity of the enamel surface: The role of dental biofilm, saliva and preventive agents in enamel demineralization and remineralization. *The Journal of the American Dental Association*. 2008;139: 25S–34S. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2008.0352>
2. Hicks J., Garcia-Godoy F., Flaitz C. Biological factors in dental caries: role of saliva and dental plaque in the dynamic process of demineralization and remineralization (part 1). *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*. 2004;28(1): 47–52. <https://doi.org/10.17796/jcpd.28.1.yg6m443046k50u20>
3. Hara A. T., Zero D. T. The caries environment: saliva, pellicle, diet, and hard tissue ultrastructure. *Dental Clinics of North America*. 2010;54(3): 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2010.03.008>
4. Odanaka H., Obama T., Sawada N., Sugano M., Itabe H., Yamamoto M. Comparison of protein profiles of the pellicle, gingival crevicular fluid, and saliva: possible origin of pellicle proteins. *Biological Research*. 2020;53(1): 3. <https://doi.org/10.1186/s40659-020-0271-2>
5. Lee Y. H., Zimmerman J. N., Custodio W., Xiao Y., Basiri T., Hatibovic-Kofman S., Siqueira W. L. Proteomic evaluation of acquired enamel pellicle during in vivo formation. *PLOS ONE. Public Library of Science*. 2013;8(7): e67919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067919>
6. Meyer F., Enax J., Epple M., Amaechi B. T., Simader B. Cariogenic biofilms: development, properties, and biomimetic preventive agents. *Dentistry Journal*. 2021;9(8): 88. <https://doi.org/10.3390/dj9080088>
7. Chirman D., Pleshko N. Characterization of bacterial biofilm infections with Fourier transform infrared spectroscopy: a review. *Applied Spectroscopy*

Reviews. 2021;56(8–10): 673–701. <https://doi.org/10.1080/05704928.2020.1864392>

8. Gieroba B., Krysa M., Wojtowicz K., Wiater A., Pleszczyńska M., Tomczyk M., Sroka-Bartnicka A. The FT-IR and Raman spectroscopies as tools for biofilm characterization created by cariogenic streptococci. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(11): 3811. <https://doi.org/10.3390/ijms21113811>

9. Azam M. T., Khan A. S., Muzzafar D., Faryal R., Siddiqi S. A., Ahmad R., Chauhdry A. A., Rehman I. U. Structural, surface, in vitro bacterial adhesion and biofilm formation analysis of three dental restorative composites. *Materials*. 2015;8(6): 3221–3237. <https://doi.org/10.3390/ma8063221>

10. Cheeseman S., Shaw Z. L., Vongsvivut J., Crawford R. J., ... Truong V. K. Analysis of pathogenic bacterial and yeast biofilms using the combination of synchrotron ATR-FTIR microspectroscopy and chemometric approaches. *Molecules*. 2021;26(13): 3890. <https://doi.org/10.3390/molecules26133890>

11. Baldassarre M., Li C., Eremina N., ... Barth A. Simultaneous fitting of absorption spectra and their second derivatives for an improved analysis of protein infrared spectra. *Molecules*. 2015;20(7): 12599–12622. <https://doi.org/10.3390/molecules200712599>

12. Barth A., Haris P. I. *Biological and biomedical infrared spectroscopy*. IOS Press; 2009. 449 p.

13. Matthäus C., Bird B., Miljković M., Chernenko T., Romeo M., Diem M. Infrared and Raman microscopy in cell biology. *Methods in Cell Biology*. 2008: 275–308. [https://doi.org/10.1016/S0091-679X\(08\)00610-9](https://doi.org/10.1016/S0091-679X(08)00610-9)

14. Ren Z., Do L. D., Bechkoff G., ... Buchet R. Direct determination of phosphatase activity from physiological substrates in cells. *PLoS ONE*. 2015;10(3): e0120087. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120087>

15. Yang S., Zhang Q., Yang H., Shi H., Dong A., Wang L., Yu S. Progress in infrared spectroscopy as an efficient tool for predicting protein secondary structure. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022: 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.104>

16. Ripanti F., Luchetti N., Nucara A., Minicozzi V., Venere A. D., Filabozzi A., Carbonaro M. Normal mode calculation and infrared spectroscopy of proteins in water solution: Relationship between amide I transition dipole strength and secondary structure. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021;185: 369–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.092>

17. Seredin P., Goloshchapov D., Ippolitov Y., Jitraporn Vongsvivut. Spectroscopic signature of the pathological processes of carious dentine based on FTIR investigations of the oral biological fluids. *Biomedical Optics Express*. 2019;10(8): 4050–4058. <https://doi.org/10.1364/BOE.10.004050>

18. Miller L. M., Bourassa M. W., Smith R. J. FTIR spectroscopic imaging of protein aggregation in living cells. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*. 2013;1828(10): 2339–2346. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2013.01.014>

19. Seredin P., Goloshchapov D., Ippolitov Y., Vongsvivut J. Comparative analysis of dentine and gingival fluid molecular composition and protein conformations during development of dentine caries: A pilot study. *Vibrational Spectroscopy*. 2020;108: 103058. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103058>

20. Kriebel K., Hieke C., Müller-Hilke B., Nakata M., Kreikemeyer B. Oral biofilms from symbiotic to pathogenic interactions and associated disease – connection of periodontitis and rheumatic arthritis by peptidylarginine deiminase. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00053>

21. Meyer F., Amaechi B. T., Fabritius H.-O., Enax J. Overview of calcium phosphates used in biomimetic oral care. *The Open Dentistry Journal*. 2018;12(1): 406 – 423. <https://doi.org/10.2174/1874210601812010406>

Информация об авторах

Середин Павел Владимирович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6724-0063>
paul@phys.vsu.ru

Голощанов Дмитрий Леонидович, к. ф.-м. н., доцент, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1400-2870>
goloshchapov@phys.vsu.ru

Кашкаров Владимир Михайлович, к. ф.-м. н., н. с., кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9460-9244>
vmkashkarov@gmail.com

Буйлов Никита Сергеевич, к. ф.-м. н., преподаватель, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1793-4400>
buylov@phys.vsu.ru

Ипполитов Юрий Алексеевич, д. м. н., профессор, заведующий кафедрой стоматологии института последипломного медицинского образования, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9922-137X>
dsvigma@mail.ru

Ипполитов Иван Юрьевич, к. м. н., ассистент, кафедра ортопедической стоматологии, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0012-6482>
dsvigma@mail.ru

Jitraporn (Pimm) Vongsvivut, н. с., Австралийский синхротрон (Мельбурн, Австралия).

jitrapov@ansto.gov.au
<https://orcid.org/0000-0003-0699-3464>

Поступила в редакцию 27.12.2022; одобрена после рецензирования 25.05.2022; принята к публикации 15.06.2022; опубликована онлайн 25.09.2023.