

DOI: 10.18481/2077-7566-2023-19-1-126-132
УДК: 616.314-77

МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ЗУБОПРОТЕЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Брандт Н. Н.¹, Вердиян С. А.², Лебеденко С. И.³, Саркисян М. С.², Лебеденко И. Ю.²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

³ ООО «Клиника Боско», г. Москва, Россия

Аннотация

Предмет. При возбуждении ультрафиолетовым излучением естественные зубы флуоресцируют в синей спектральной области, поэтому в состав используемых в стоматологической практике композитных материалов и стеклокерамики добавляют флуоресцирующие компоненты. Керамика на основе диоксида циркония может флуоресцировать за счет нанесения глазури, красителей или флуоресцентных паст. Однако методики количественного определения интенсивности флуоресценции зубопротезных материалов на сегодняшний день отсутствуют.

Цель — разработка методики количественного определения интенсивности флуоресценции зубопротезных материалов.

Методология. Исследования проводились на физическом факультете МГУ. Спектры флуоресценции измерялись на специально созданной экспериментальной установке на основе волоконно-оптического спектрофлуориметра Ocean Optics. Математическая обработка экспериментальных данных выполнялась с помощью программного продукта Origin. В качестве образцов использовались керамические заготовки из диоксида циркония «Ziceram T» A2 отечественного производства без покрытия и с нанесением флуоресцентной глазури «Ivocolor fluo», а также натуральные зубы пациентов.

Результаты. Измерены спектры флуоресценции серии образцов натуральных зубов и зубных протезов из диоксида циркония с различным числом нанесенных слоев флуоресцентной глазури. Интенсивность флуоресценции образцов диоксида циркония линейно возрастает при увеличении числа слоев глазури.

Выводы. Предложена методика количественного определения интенсивности флуоресценции натуральных зубов и зубопротезных материалов. Спектр флуоресценции образца может быть охарактеризован предложенным в работе параметром флуоресценции Ф. Интенсивность флуоресценции зубного протеза на основе диоксида циркония может быть увеличена до значения, соответствующего натуральному зубу, путем нанесения на протез заданного числа слоев флуоресцентной глазури.

Ключевые слова: спектрофлуориметрия, флуоресценция, зубы, диоксид циркония, флуоресцентные глазури

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Николай Николаевич БРАНДТ ORCID ID 0000-0003-1100-9652

к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
brandt@physics.msu.ru

Самвел Арменович ВЕРДИЯН ORCID ID 0000-0003-0105-7917

очный аспирант кафедры ортопедической стоматологии Медицинского Института Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия
samvelverdiyan@gmail.com

Степан Игоревич ЛЕБЕДЕНКО ORCID ID 0000-0001-6337-9319

к.ф.-м.н., директор по развитию ООО «Клиника Боско», г. Москва, Россия
si@lasi.ru

Мартiros Сергеевич САРКИСЯН ORCID ID 0000-00024132-9377

д.м.н., доцент кафедры ортопедической стоматологии, Медицинский Институт Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия
sarkisyan_ms@pfur.ru

Игорь Юльевич ЛЕБЕДЕНКО ORCID ID 0000-0002-8318-9966

д.м.н., профессор, заведующий кафедрой ортопедической стоматологии, Медицинский Институт Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия
lebedenkoi@mail.ru

Адрес для переписки: Самвел Арменович ВЕРДИЯН

117 198 г. Москва ул. Миклухо-Маклая, д. 10. Кафедра ортопедической стоматологии — Медицинский институт РУДН
+7 (999) 7164342
samvelverdiyan@gmail.com

Образец цитирования:

Брандт Н. Н., Вердиян С. А., Лебеденко С. И., Саркисян М. С., Лебеденко И. Ю.

МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ЗУБОПРОТЕЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ. Проблемы стоматологии. 2023; 1: 126-132.

© Брандт Н. Н. и др., 2023

DOI: 10.18481/2077-7566-2023-19-1-126-132

Поступила 29.03.2023. Принята к печати 27.04.2023

DOI: 10.18481/2077-7566-2023-19-1-126-132

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DENTAL PROSTHETIC FLUORESCENCE

Brandt N.N.¹, Verdiyán S.A.², Lebedenko S.I.³, Sarkisyan M.S.², Lebedenko I.Y.²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

³ LLC «Bosco Clinic», Moscow, Russia

Annotation

Subject. Ceramics based on zirconia can fluoresce through the additional application of fluorescent glazes, fluorescent dyes, as well. To date, there are no methods for assessing the fluorescence of dental materials used in prosthetics.

The aim: development of a method for quantitative determination of the fluorescence intensity of dental prosthetic materials.

Methodology. The study was conducted in the laboratory of the Faculty of Physics of Moscow State University. Fluorescence was excited by an ultraviolet lamp. The fluorescence spectra of the samples were measured using the Ocean Optics fiber optic spectrofluorometer. Ceramic billets made of zirconia «Ziceram T» A2 of domestic production without and with the staining of fluorescent glaze «Ivocolor fluo», as well as natural teeth were used as samples for patients.

Results. Samples of domestic zirconia acquire fluorescent properties after applying and sintering the fluorescent glaze. The varied number of layers of the applied glaze explains why the fluorescence intensity increases. The authors compare the fluorescence spectra of two natural teeth with the spectra of zirconia samples with two and three layers of glaze. The spectra coincide well with each other in pairs. A fluorescence spectrum that is similar to one of the natural tooth samples can thus be achieved by varying the number of glaze layers.

Conclusions. The analysis of the fluorescence spectra of samples of zirconia from domestic production after application and sintering of fluorescent glaze shows a similar fluorescence spectrum to samples of natural teeth.

Keywords: Spectrofluorometry, fluorescence, fluorescence of teeth, zirconia fluorescence, fluorescent glaze

The authors declare no conflict of interest.

Nikolay N. BRANDT ORCID ID 0000-0003-1100-9652

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics and Wave Processes, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
brandt@physics.msu.ru

Samvel A. VERDIYAN ORCID ID 0000-0003-0105-7917 Full-time

Postgraduate Student of the Department of Prostodontic Dentistry, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
samvelverdiyán@gmail.com

Stepan I. LEBEDENKO ORCID ID 0000-0001-6337-9319

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Director of the Development, LLC «Bosco Clinic», Moscow, Russia
si@lasi.ru

Martiros S. SARKISYAN ORCID ID 0000-00024132-9377

Grand PhD in Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Prostodontic Dentistry, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
sarkisyan_ms@pfur.ru

Igor Y. LEBEDENKO ORCID ID 0000-0002-8318-9966

Grand PhD in Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Prostodontic Dentistry, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
lebedenkoi@mail.ru

Correspondence address: Samvel Armenovich VERDIYAN

117 198 Moscow, str. Mikluho-Maclaya 10

+7 (999) 7164342

samvelverdiyán@gmail.com

For citation:

Brandt N.N., Verdiyán S.A., Lebedenko S.I., Sarkisyan M.S., Lebedenko I.Y.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DENTAL PROSTHETIC FLUORESCENCE. Actual problems in dentistry. 2023; 1: 126-132. (In Russ.)

© Brandt N.N. et al., 2023

DOI: 10.18481/2077-7566-2023-19-1-126-132

Received 29.03.2023. Accepted 27.04.2023

Введение

В последние годы стало очень популярным использование цельнокерамических конструкций при протезировании зубов. К таким конструкциям относятся керамические протезы на основе дисиликата лития, диоксида циркония или полевошпатной керамики. При изготовлении зубного протеза основное внимание уделяется форме, цвету (оттенку, хроматичности и яркости), транслюценции и опалесценции протеза. Кроме того, немаловажной особенностью естественного зуба является его флуоресценция [10, 11]. Эффект флуоресценции состоит в свечении объекта в некоторой спектральной области при его облучении светом более коротких длин волн. Таким образом, флуоресценция зуба в видимой области спектра (длины волн 400–700 нм) будет наблюдаться при его облучении светом ультрафиолетового (УФ) диапазона (300–400 нм). В связи с этим в повседневной жизни флуоресценция зубов практически не проявляется ввиду отсутствия УФ источников света. Однако в развлекательных комплексах, игровых центрах и даже в парках отдыха все чаще применяются УФ лампы для достижения тех или иных визуальных эффектов. Например, большинство современной одежды содержит искусственные красители, ярко флуоресцирующие в видимой области. Возбуждающего УФ излучения при этом глазом не видно, и создается впечатление, что одежда светится сама по себе. При облучении естественных зубов УФ свет проходит через эмаль и поглощается в пигментированном слое между эмалью и дентином. Затем поглотившие излучение молекулы испускают свет, но уже в видимом спектральном интервале, то есть кажутся белыми. Так, по результатам работы [2], здоровые ткани дентина флуоресцируют с максимумом на длине волны 410 ± 10 нм при возбуждении УФ лампой с максимумом интенсивности излучения на длине волны ~ 365 нм. В статьях [13–24] измерено, что при возбуждении дентина на длинах волн 300, 325, 380 и 410 нм спектры флуоресценции наблюдаются с максимумами на длинах волн 350, 400, 450 и 520 нм соответственно.

При УФ возбуждении керамических материалов из диоксида циркония флуоресценция практически не наблюдается, а изготовленные из них протезы в УФ свете кажутся темными, что эстетически неприемлемо. Зубопротезный фарфор, в отличие от диоксида циркония, флуоресцирует, что придает конструкции флуоресцентные свойства натуральных зубов [5]. Для получения требуемого флуоресцентного свечения можно наносить на протез из диоксида циркония слой флуоресцентного фарфора [3].

Для достижения флуоресценции, сравнимой с естественной, в диоксид циркония изначально добавляли уран в комбинации с оксидом церия. Впоследствии такая методика была запрещена по

понятным причинам, а уран был заменен на такие редкоземельные элементы, как церий, европий, тербий и иттербий [4, 8, 9]. Например, в работе [3] в качестве флуорофора был использован оксид тулия.

В работах [1, 5, 6] предложена методика окрашивания диоксида циркония до спекания специальным красителем «Colour Liquid Fluoreszenz, zirkonzahn». Часто применяется также методика глазурирования стоматологической керамики материалами на основе дисиликата лития [12]. После нанесения и спекания глазурей поверхность зубного протеза флуоресцирует, как и натуральные зубы. В России, к сожалению, такие глазури не производятся. Одна из глазурей, получивших сертификацию на территории РФ, — «Ivocolor Fluo» 667691 фирмы «Ivoclar Vivadent», Лихтенштейн (регистрационное удостоверение на медицинское изделие от 26.01.2016 № ФСЗ 2011/09067 пункт 10.7).

Для измерения спектров флуоресценции обычно используются спектрофлуориметры (см., например, [26, 25, 7]). Эти приборы содержат источник УФ излучения, к примеру, ксеноновую лампу, монохроматор возбуждения, монохроматор регистрации испускаемого и детектор. Монохроматор выделяет из спектра попадающего в него излучения определенную длину волны или спектральную полосу. Так, монохроматор возбуждения вырезает из спектра источника только ту длину волны, которая необходима для возбуждения спектра флуоресценции. Монохроматор регистрации испускаемого перестраивает длину волны так, что детектор каждый раз измеряет интенсивность света на заданной длине волны. В результате получается зависимость интенсивности флуоресценции от длины волны испускаемого света при фиксированной длине волны возбуждения.

Согласно существующим литературным данным, сегодня отсутствует общепринятая лабораторно-клиническая методика и специализированное зуботехническое оборудование, позволяющие измерить интенсивность флуоресценции наносимых глазурей. В научных статьях используются разные длины волн возбуждения флуоресценции, разные типы спектрофлуориметров и разные методы обработки данных.

В статье [3] описана методика по проведению флуориметрии с помощью спектрофлуориметра JASCO FP-6500 при возбуждении на длине волны 365 нм. В качестве образцов использованы три вида диоксида циркония фирмы Tosoh (Япония), стабилизированного иттрием: TZ-3Y-E, Zrex и Zrex Smile. Образец TZ-3Y-E представляет собой непрозрачный диоксид циркония, содержащий 0,25% оксида алюминия, а Zrex и Zrex Smile — полупрозрачные образцы без оксида алюминия, но содержание иттрия в Zrex Smile больше, чем в других образцах. Ко всем образцам добавлялся порошок оксида тулия (Tm_2O_3) в массовых концентрациях 0, 0,5, 0,8, 1,0, 1,2 и 1,5%. При воздействии УФ

излучения на образцы, не содержащие оксида тулия, флуоресценции не наблюдалось. При наличии оксида тулия образцы флуоресцировали в синей спектральной области. При возбуждении образцов, содержащих 0,8% оксида тулия, на длине волны 365 нм интенсивность флуоресценции максимальна, а ее максимум приходится на длину волны 460 нм. При равных концентрациях оксида тулия интенсивность флуоресценции полупрозрачных образцов Zрех оказалась в 1,8–2,7 раза больше, чем у образцов TZ-3Y-E. Интенсивность флуоресценции Zрех Smile превысила интенсивность TZ-3Y-E в 1,4–2,1 раза.

В работе [27] проведено флуоресцентное исследование полимера Lava Ultimate с керамическим нанонаполнителем, тетрагонального диоксида циркония Lava Plus с добавлением 3% Y_2O_3 (3Y-TZP) в качестве стабилизирующей добавки и диоксида циркония Lava Esthetic с добавлением 5% 3Y-TZP. Измерения проводились на спектрофлуориметре FluorologSpex, Horiba Jobin Yvon. Флуоресценция Lava Ultimate соответствовала двум диапазонам излучения с максимумами при 482 нм (отвечавшим возбуждению 320 нм) и при 435 нм (отвечавшим возбуждению 380 нм). Материалы Lava Plus и Lava Esthetic имели только по одному диапазону излучения с максимумом при 435 нм (отвечавшим возбуждению 310 нм). Наибольшей интенсивностью флуоресценции обладал материал Lava Esthetic.

В источнике [28] проводились изучения флуоресцентных качеств стоматологических керамик различных фирм и производителей: Vita VM9 feldspathic ceramic (A2; Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany), IPS e.max (Ivoclar HT, A2; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), zirconia (ZircoStar, A2; Keriox Dental Ltd., Diósd, Hungary) and Vita Enamic (A2; Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany). Из каждого материала были изготовлены 12 образцов с диаметром 10 мм с толщиной в 0,5 мм и 1 мм. Оценка максимального возбуждения, была проведена с использованием фотолюминесцентного спектрометра (LS55; Perkin Elmer, USA). По данным источников [29–31] пик флуоресценции стоматологических материалов достигает длины волны 430 нм, что, в свою очередь, послужило основанием для настроек датчика на данную длину волны. Возбуждение образцов проводилось в диапазоне 200–800 нм и измерялось на длине волны 430 нм. Максимальное возбуждение наблюдалось при длинах волн от 350 до 360 нм. В ходе оценки максимального возбуждения было подтверждено отсутствие флуоресценции у керамики из диоксида циркония, что повлекло его исключение из исследования.

При измерении флуоресценции авторы разработали новый подход. Для осуществления данной цели использовался спектродиометр (CS-2000; Konica Minolta, Japan). Сначала образцы освещались коллимированным источником света накаливания и устрой-

ство калибровалось с использованием белой плитки, затем была измерена отражательная способность образцов. После этого для возбуждения образцов был применен изготовленный на заказ источник ультрафиолетового светодиода. Уф-светодиодный проектор был изготовлен с использованием 6 промышленных Уф-светодиодов мощностью 1 Вт и длиной волны 360 нм. Система была еще раз откалибрована с использованием ламп накаливания и ультрафиолетового излучения. Затем с помощью спектродиометра измеряли коэффициент отражения возбужденных образцов. Чтобы в полной мере использовать поверхность образца, оптическая апертура спектродиометра была установлена на 1° .

Таким образом, имеющиеся в литературе данные о флуоресценции зубов и зубопротезных материалах можно сравнивать друг с другом только по положению максимумов флуоресценции. Сравнительный анализ интенсивности флуоресценции возможен только в рамках одного исследования с использованием одной и той же экспериментальной установки.

Целью настоящей работы является разработка методики количественного определения интенсивности флуоресценции зубопротезных материалов.

Материалы и методы

В работе использованы керамические образцы из диоксида циркония Ziceram T цвета A2 (Циркон Керамика, Санкт-Петербург) размером $(28,0 \times 3,5 \times 5,0) \pm 0,2$ мм, полученные методом CAD/CAM в зуботехнической лаборатории «Дент Сервис» без покрытия и с нанесением от 1 до 3-х слоев флуоресцирующей зуботехнической глазури Ivocolor Fluo 667691 (Ivoclar Vivadent, Лихтенштейн, регистрационное удостоверение на медицинское изделие No ФСЗ 2011/09067 пункт 10.7 от 26.01.2016). Синтеризация керамических образцов проводилась при температуре 1450°C в течение 12 часов. Глазурь спекалась при температуре 850°C в течение 15 минут. Для сравнения были использованы удаленные естественные зубы человека с интактной коронковой частью цвета 2M2 по шкале VITA 3D Master.

Для возбуждения флуоресценции использована лампа черного света DORS 115 с максимумом на длине волны около 370 нм. Лампа представляет собой две горизонтальные цилиндрические трубки диаметром 1 см и длиной 20 см каждая, расположенные параллельно друг другу на расстоянии 2 см между осями трубок. Образцы располагаются под лампой на расстоянии 10 см от ее центра на перпендикуляре к ее оси. Спектры флуоресценции образцов измеряются с помощью волоконно-оптического спектрофлуориметра Ocean Optics HR4000 со спектральным разрешением 0,5 нм. Торец волокна располагается на расстоянии ~1 см от поверхности образца. Волокно при этом ориентировано по углом 45° к вертикали

в плоскости, перпендикулярной оси лампы. Диаметр торца волокна вместе с держателем составляет 2 мм. Таким образом, излучение лампы беспрепятственно попадает на образец, а рассеянное и испущенное образцом излучение собирается волокном.

Методика измерения и обработки спектров флуоресценции

На рис. 1 приведен спектр использованного источника возбуждения за вычетом «темнового» спектра, измеренного с выключенной лампой. Время накопления спектра составляет 1 минуту.

Спектр лампы черного света состоит из одной относительно широкой линии (ширина на полувысоте ~ 18 нм) с максимумом вблизи 368 нм

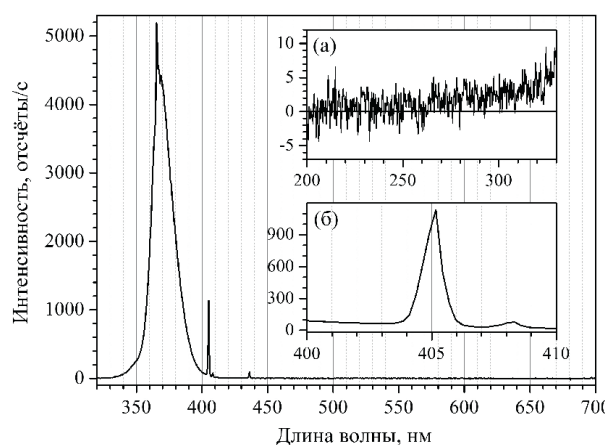


Рис. 1. Спектр испускания лампы черного света DORS 115. На панелях (а) и (б) показаны шумовая составляющая спектра и детали линии на длине волны 405 нм

Fig. 1. Black-light lamp emission spectrum of DORS 115. Panels (a) and (b) show the noise component of the spectrum and the details of the line at a wavelength of 405 nm

и нескольких относительно узких линий (ширина на полувысоте ~ 1 нм) с максимумами на длинах волн 365, 405, 408 и 436 нм. Других особенностей в интервале 200–700 нм лампа не имеет.

На верхней вставке к рис. 1 спектр лампы показан в более крупном масштабе в интервале, где спектральные линии отсутствуют. Видно, что в диапазоне 200–250 нм интенсивность флуоресценции принимает как положительные, так и отрицательные значения, что обусловлено вычтенным «темновым» спектром. Среднее значение сигнала при этом близко к нулю. На длинах волн больше 250 нм интенсивность начинает возрастать за счет крыла линии испускания лампы. Шумовая компонента в спектре не превышает 5 отсчетов в секунду при максимальной интенсивности излучения 5000 отсчетов в секунду. Таким образом, при времени накопления 1 мин спектрометр позволяет проводить измерения с отношением шум/сигнал порядка 0,1%.

В отсутствие спектральных фильтров в канале регистрации измеряемый спектр представляет собой сумму спектра флуоресценции образца и спектра рэлеевского рассеяния света образцом. Интенсивность неупругого рассеяния, как правило, на несколько порядков меньше интенсивности флуоресценции, а потому ей можно пренебречь. Интенсивность и диаграмма направленности рэлеевского рассеяния в первую очередь зависят от поляризации возбуждающего излучения, его длины волны и распределения по размерам частиц в облучаемом образце. Поскольку для различных образцов мы используем одно и то же возбуждающее излучение и одинаковую геометрию светосбора, то при мало отличающихся размерах рассеивающих частиц в образцах можно говорить о близких интенсивностях рэлеевского рассеяния от разных зубов.

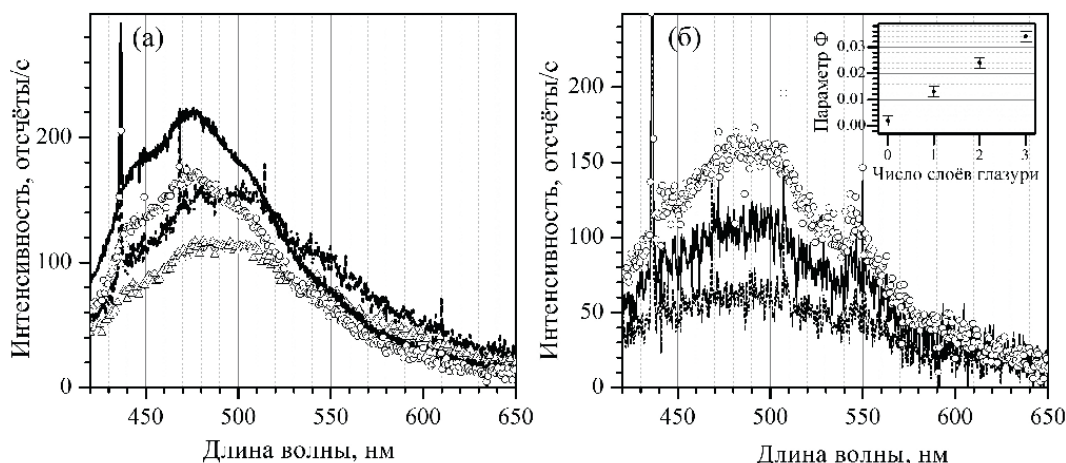


Рис. 2. Характеристический спектр флуоресценции человеческого зуба при возбуждении лампой черного света DORS 115. Пунктиром отмечены интенсивности рэлеевского рассеяния (368 нм) и флуоресценции (490 нм)

Fig. 2. Characteristic fluorescence spectrum of a human tooth under excitation with a DORS 115 black light lamp. Dashed lines indicate the intensities of the Rayleigh scattering (368 nm) and fluorescence (490 nm)

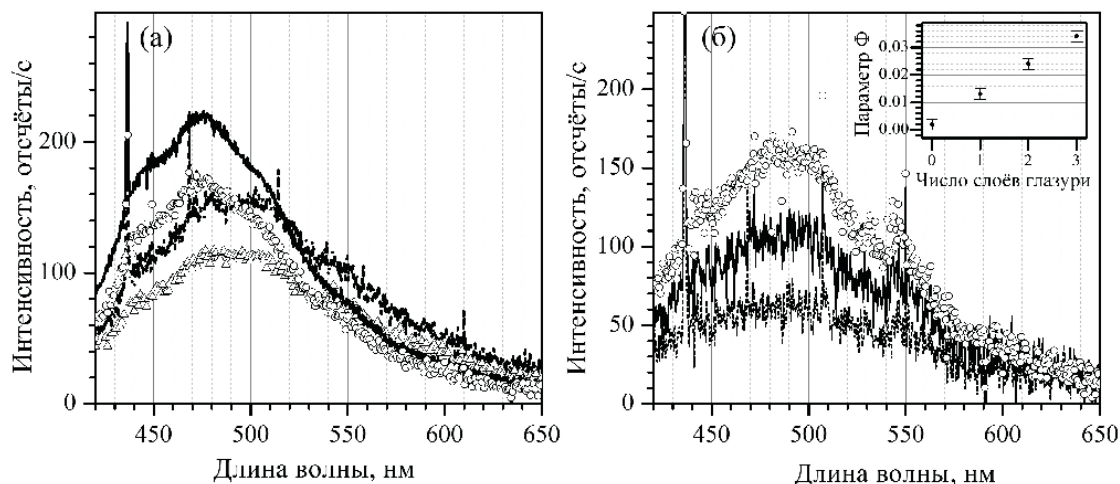


Рис. 3. Спектры флуоресценции (а) четырех образцов естественных зубов человека и (б) образцов диоксида циркония после нанесения и спекания (пунктир) одного, (сплошная линия) двух и (кружки) трех слоев флуоресцентной глазури Ivocolor Fluo 667691. На вставке показана зависимость параметра флуоресценции Φ образцов в зависимости от числа нанесенных слоев

Fig. 3. Fluorescence spectra of (a) four natural human tooth samples and (b) zirconia dioxide samples after application and firing (dotted line) of one, (solid line) two, and (circles) three layers of Ivocolor Fluo 667691 fluorescent glaze. The insert shows the dependence of the fluorescence parameter F of the samples on the number of applied layers

Таким образом, можно предложить следующую методику получения количественных данных об интенсивности флуоресценции в заданной геометрии проведения эксперимента. Спектр флуоресценции измеряется без использования фильтров и без вычитания сигнала рэлеевского рассеяния. После вычитания «темнового» спектра измеренный спектр нормируется на интенсивность линии возбуждения, что обеспечивает одновременную корректировку интенсивности флуоресценции. Такой порядок обработки позволяет корректно сравнивать спектры флуоресценции не только по положению максимумов спектральных компонент, но и по интенсивностям.

Для определения количественного параметра, характеризующего интенсивность флуоресценции, рассмотрим характерный спектр флуоресценции зуба (рис. 2). В этом измерении интенсивность флуоресценции (на длине волны около 490 нм) равна приблизительно 160 отсчетов/с. Максимальное значение интенсивности рэлеевского рассеяния (на длине волны около 368 нм) составляет примерно 4700 отсчетов/с.

Для созданной экспериментальной установки отношение этих значений $\Phi = 160/4700 \approx 0,034 \pm 0,002$ (параметр флуоресценции) может быть использовано для количественного измерения интенсивности флуоресценции.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3а показаны нормированные спектры флуоресценции четырех образцов естественных зубов человека. Спектры хорошо согласуются с литературными данными [4]. Максимум флуоресценции лежит в интервале 480–500 нм в зависимости от конкрет-

ного образца естественного зуба. Видно, что для некоторых образцов линия флуоресценции состоит из нескольких спектральных компонент. Параметр флуоресценции для рассмотренных образцов составляет $\Phi = 0,045, 0,032, 0,024$ и $0,034$. Отметим, что в пределах ошибки измерений все полученные значения отличаются друг от друга. Узкие пики представляют собой низкоинтенсивное паразитное излучение в спектре возбуждения.

На рис. 3б приведены спектры флуоресценции образцов отечественного диоксида циркония после нанесения и спекания одного, двух и трех слоев флуоресцентной глазури. Видно, что при увеличении числа слоев параметр флуоресценции Φ возрастает и принимает значения $0,013, 0,023$ и $0,034$, соответственно. На вставке к рис. 3б показана зависимость параметра флуоресценции Φ от числа нанесенных слоев глазури (флуоресценция диоксида циркония в отсутствие глазури практически отсутствует). Для приведенного числа слоев зависимость с хорошей степенью точности линейная, что говорит об одинаковом вкладе каждого слоя во флуоресцентный сигнал и может быть использовано для оценки параметра флуоресценции Φ при большем числе слоев.

На рис. 4 проведено сравнение спектров флуоресценции двух натуральных зубов (треугольники и пунктирная линия на рис. 3а) со спектрами образцов из диоксида циркония с двумя и тремя слоями глазури (сплошная линия и кружки на рис. 3б) соответственно. Спектры попарно хорошо совпадают друг с другом. Значения параметра флуоресценции Φ для спектров в каждой паре практически совпадают: $0,024$ и $0,034$ для двух естественных зубов и $0,023$ и $0,034$ для про-

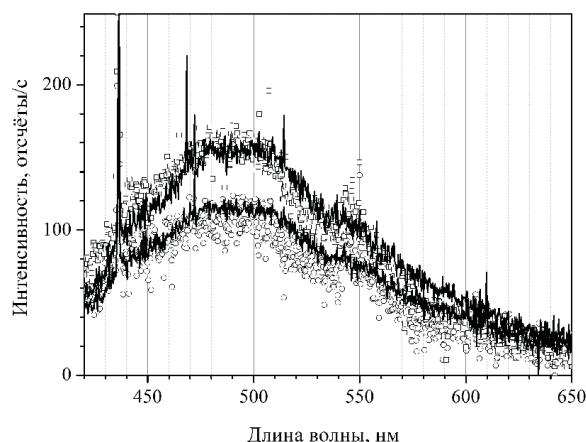


Рис. 4. Спектры флуоресценции (сплошные линии) двух образцов естественных зубов человека и образцов диоксида циркония после нанесения и спекания (кружки) двух и (квадратики) трех слоев флуоресцентной глазури Ivocolor Fluor 667691

Fig. 4. Fluorescence spectra of (solid lines) two natural human tooth samples and zirconia dioxide samples after application and firing of (circles) two and (squares) three layers of Ivocolor Fluor 667691 fluorescent glaze

тезов с глазурью. Таким образом, варьирование числа слоев флуоресцентной глазури позволяет получить спектр флуоресценции протеза, сходный с заданным спектром натурального зуба.

Заключение

В работе предложена методика количественного определения интенсивности флуоресценции натуральных зубов и зубопротезных материалов. Методика основана на измерении спектров в строго определенной геометрии на специально созданной экспериментальной установке и последующей стандартизированной математической обработке данных. В результате спектр флуоресценции образца может быть охарактеризован предложенным в работе параметром флуоресценции Φ . Показано, что значения этого параметра отличаются для разных образцов натуральных зубов. При этом значение Φ для зубного протеза на основе диоксида циркония может быть приведено к соответствующему значению для натурального зуба путем нанесения на протез определенного числа слоев флуоресцентной глазури «Ivocolor fluo».

Литература/References

1. Iñaki Gamborena, Markus B. Blatz The Gray Zone Around Dental Implants: Keys to Esthetic Success // The American journal of aesthetic dentistry. – 2011;1:26-46. https://www.drgamborena.com/wp-content/uploads/2016/07/2011_Gamborena_PROOF.pdf
2. Max Schmeling. Color Selection and Reproduction in Dentistry. Part 2: Light Dynamics in Natural Teeth // J. Dent. Sc. – 2016;18-2:1253-2420. DOI:10.15517/jjds.v0i0.24493
3. Takashi Nakamura, Shinya Okamura, Hisataka Nishida, Hirofumi Usami, Yoshiro Nakano, Kazumichi Wakabayashi, Tohru Sekino and Hirofumi Yatani. Fluorescence of thulium-doped translucent zirconia // Dental Materials Journal. – 2018;37:1010-1016. doi:10.4012/dmj.2017-384
4. Claudia Angela Maziero Volpato, Filipe Samuel Silva, Filipe Samuel Silva. Fluorescence of natural teeth and restorative materials, methods for analysis and quantification: A literature review // J Esthet Restor Dent. – 2018;30:397-407. DOI: 10.1111/jerd.12421
5. Arndt Happe, Verena Schulte-Mattler, Christian Strassert, Michael Naumann, Michael Stimmelmayer, Joachim E. Zöller, Daniel Rothamel. In Vitro Color Changes of Soft Tissues Caused by Dyed Fluorescent Zirconia and Nondyed, Nonfluorescent Zirconia in Thin Mucosa // Int J Periodontics Restorative Dent. – 2013;33:e1-e8. doi: 10.11607/prd.1303
6. Caroline Freitas Rafael, Paulo Francisco Cesar, Marcio Frede, Ricardo de Souza Magini, Anja Liebermann, Claudia Angela Maziero Volpato. Impact of laboratory treatment with coloring and fluorescent liquids on the optical properties of zirconia before and after accelerated aging // The Journal of Prosthetic Dentistry. – 2018;120:276-281. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.10.017
7. Дьяконенко Е.Е., Вердиян С.А., Сакхавиева Д.А., Лебедево И.Ю. Флуоресценция стоматологических керамических материалов на основе диоксида циркония. Стоматология. 2021;100(3):109-114. [E.E. Dyakonenko, S.A. Verdiyann, D.A. Sakhabieva, I.Yu. Lebedenko. Fluorescence of zirconia-based dental ceramic materials. Dentistry. 2021;100(3):109-114. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17116/stomat2021100031109>
8. Monsénégó G., Burdairon G., Clerjaud B. Fluorescence of dental porcelain // J Prosthet Dent. – 1993;69(1):106-113. doi:10.1016/0022-3913(93)90249-n
9. Горбань С.А., Михалева Е.А., Полтанов В.Н., Степкин В.И., Чув В.П. Восстановление эффекта флуоресценции в стоматологической керамике «Ультропаллин». Современная ортопедическая стоматология. 2014;21:71-74. [S.A. Gorban, E.A. Mikhaleva, V.N. Poltanov, V.I. Stepkin, V.P. Chuev. Reconstruction of the fluorescence effect in dental ceramics "Ultropalín". Modern orthopedic dentistry. 2014;21:71-74. (In Russ.)]. <https://vladmiva.ru/publications/vossozhdanie-effekta-floresentsentsii-v-stomatologicheskoy-keramike-ultrapalín/>
10. Takahashi M.K., Vieira S., Rached R.N., de Almeida J.B., Aguiar M., de Souza E.M. Fluorescence intensity of resin composites and dental tissues before and after accelerated aging: a comparative study // Oper Dent. – 2008;33(2):189-195. doi:10.2341/07-74
11. Stübel H. Die fluoreszenz tierischer gewebe in ultraviolettem licht // Arch Ges Physiol. – 1921;142:1-14. <https://doi.org/10.1007/BF01680690>
12. Johan A. Figueria, Edward McLaren, Sean Park. The essence of fluorescence // Journal of cosmetic dentistry. – 2015; 30(4):82-92. https://thinkbluc.me/Pubs/PDFs/Ess_of_Fluorescence.pdf
13. Ten Bosch J.J., Zijp J.R. Optical properties of dentin // Dentine and dentine reactions in the oral cavity. Oxford, England: IRL Press. 1987:59-65. <https://www.goodreads.com/book/show/7340020-dentine-and-dentine-reactions-in-the-oral-cavity>
14. Zijp J.R., Ten Bosch J.J. Theoretical model for scattering of light by dentin and comparison with measurements // Applied Optics. – 1993;32:411-415. DOI: 10.1364/AO.32.000411
15. Ko C.C., Tantbrirojn D., Wang T., Douglas W.H. Optical scattering power for characterization of mineral loss // Journal of Dental Research. – 2000;79:1584-1589. doi: 10.1177/00220345000790081001.
16. Spitzer D., Ten Bosch J.J. The absorption and scattering of light in bovine and human enamel // Calcified Tissue Research. – 1975;17:129-137. doi: 10.1007/BF02547285.
17. Zijp J.R., Ten Bosch J.J., Groenhuis R.A.J. HeNe-laser scattering by human dental enamel // Journal of Dental Research. – 1995;74:1891-1898. doi: 10.1177/00220345950740121301.
18. Perry A., Biel M., DeJongh O., Hefferen J.J. A comparative study of the native fluorescence of human dentine and bovine skin collagens // Archives of Oral Biology. – 1969;14:1193-1211. doi: 10.1016/0003-9969(69)90158-7.
19. Fujimoto D., Akiba K., Makamura N. Isolation and characterization of a fluorescent material in bovine achilles tendon collagen // Biochemical and Biophysics Research Communications. – 1977;76:1124-1129. doi: 10.1016/0006-291x(77)90972-x.
20. Booij M., Ten Bosch J.J. A fluorescent compound in bovine dental enamel matrix compared with synthetic dihydroxytyrosine // Archives of Oral Biology. – 1982;27:417-421. doi: 10.1016/0003-9969(82)90152-2.
21. Seghi R.R., Johnston W.M., O'Brien W.J. Performance assessment of colorimetric devices on dental porcelains // Journal of Dental Research. – 1989;68:1755-1759. doi: 10.1177/00220345890680120701.
22. Paul S., Peter A., Pietrobán N., Hammerle C.H.F. Visual and spectrophotometric shade analysis of human teeth // Journal of Dental Research. – 2002;81:578-582. doi: 10.1177/154405910208100815.
23. Okubo S.R., Kanawati A., Richards M.W., Childress S. Evaluation of visual and instrument shade matching // Journal of Prosthetic Dentistry. – 1998;80:642-648. doi: 10.1016/s0022-3913(98)70049-6.
24. Schwabacher W.B., Goodkind R.J. Three-dimensional color coordinates of natural teeth compared with three shade guides // J Prosthet Dent. – 1990;64(4):425-431. doi: 10.1016/0022-3913(90)90038-e.
25. Mualla S. Fluorescence and dentistry // J Dent Med Scie. – 2016;15(3):65-75. <https://doi.org/10.9790/0853-1503096575>
26. Lakowicz R. Principles of Fluorescence Spectroscopy. 3rd ed. New York: Springer. 2006. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-46312-4>
27. Kauling A., Volpato C., Carvalho O., Pereira M., Güth J. Translucency, contrast ratio and fluorescence of esthetic materials // Dental Materials. – 2018:e127. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.08.264>
28. Sedighe Sadat Hashemikamangar, Sara Valizadeh, Alireza Mahmoudi Nahavandi, Masoomeh Hasani Tabatabaei, Marzieh Daryadar. Effect of Thickness on Fluorescence of Some Clinical Dental Ceramics // Front Dent. – 2021;18:41. doi: 10.18502/rid.v18i41.8013
29. Meller C., Klein C. Fluorescence properties of commercial composite resin restorative materials in dentistry // Dent Mater J. – 2012;31(6):916-923. doi: 10.4012/dmj.2012-079.
30. Takahashi M.K., Vieira S., Rached R.N., de Almeida J.B., Aguiar M., de Souza E.M. Fluorescence intensity of resin composites and dental tissues before and after accelerated aging: a comparative study // Oper Dent. – 2008;33(2):189-195. doi: 10.2341/07-74.
31. Lee Y.K. Fluorescence properties of human teeth and dental calculus for clinical applications // J Biomed Opt. – 2015;20(4):040901. doi: 10.1117/1.JBO.20.4.040901.