

## ВЛИЯНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОТБЕЛИВАНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ЭМАЛИ ЗУБОВ\*



И.А. Морозов,  
кандидат физико-  
математических наук,  
ведущий инженер,  
Институт механики сплошных  
сред УрО РАН



А.Л. Свистков,  
доктор физико-  
математических наук,  
заведующий лабораторией  
микромеханики структурно-  
неоднородных сред,  
Институт механики сплошных  
сред УрО РАН



А.П. Скачков,  
старший преподаватель  
кафедры механики сплошных  
сред и вычислительных  
технологий,  
Пермский государственный  
университет



О.С. Гилева,  
доктор медицинских наук,  
заведующая кафедрой  
пропедевтики и физиотерапии  
стоматологических заболеваний,  
Пермская государственная  
медицинская академия  
им. ак. Е.А. Вагнера



Е.С. Ерофеева,  
Пермская государственная  
медицинская академия  
им. ак. Е.А. Вагнера

Изложены результаты исследования влияния отбеливания на микроструктуру эмали при помощи атомно-силовой микроскопии. Для описания общего вида микрорельефа предложен картографический метод – на эмали выделялись «равнинные» участки, а также низменности и возвышенности. Разработана методика структурного анализа этих составляющих. Результаты показали, что первое отбеливание снимает пелликулу (пленка адсорбированных из слюны протеинов) с поверхности эмали. Дальнейшие отбеливания приводят к стиранию эмали, особенно в области низменностей рельефа; форма возвышенностей и впадин становится более округлой.

### ВВЕДЕНИЕ

Отбеливание зубов – одна из самых распространенных косметических стоматологических процедур, востребованных

пациентами. Желание иметь белые зубы все больше возрастает у населения благодаря средствам массовой информации,

\* Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности, инноваций и науки Пермского края, грант № 09-08-99102-р\_офи.

которые широко пропагандируют звезд шоу-бизнеса с их ослепительными голливудскими улыбками. Использование различных отбеливающих технологий привлекает и врачей-стоматологов, так как отбеливание представляет собой относительно неинвазивную (без нарушения целостности тканей) и легко выполнимую процедуру.

Еще в III в. до н.э. люди старались, по возможности, изменить цвет и форму своих зубов. С древности люди украшали зубы различными стразами, проводили косметическое контурирование. Древние римляне полировали зубы при помощи мочевины (карбамида). В средние века отбеливание зубов проводилось цирюльниками, которые не только удаляли зубы, но и отбеливали их раствором aqua fortis. Последний в своем составе содержал азотную кислоту. Лечение начиналось с обработки зубов железной теркой. В XX в. для лечения зубов с измененным цветом применяли в основном ортопедические методы, заключающиеся в протезировании металлокерамическими коронками. Использование перекиси водорода в качестве отбеливающего препарата стало известно лишь в 1884 г. благодаря A.W. Harlan. Однако эффективность и безопасность отбеливающих препаратов была признана Американской ассоциацией стоматологов (ADA) лишь в 1994 г. Лишь после этого началось широкое применение процедуры отбеливания зубов.

Стойкое окрашивание твердых тканей зубов (дисколорит) возникает по разным причинам. Оно может быть внешнее, связанное с окрашиванием поверхностных структур зуба различными красителями, содержащимися в кофе, чае, красном вине, табаке, и внутреннее – окрашивание твердых тканей зубов изнутри.

Отбеливание зубов – это химический процесс окисления, в результате которого под действием кислорода происходит расщепление органических веществ до углекислого газа и воды. Перекись водорода является активным окисляющим агентом. В процессе отбеливания она проникает в эмаль и дентин по органической матрице, расположенной между не-

органическими кристаллами твердых тканей зубов, и вызывает окислительное расщепление пигментов. По виду применения отбеливание разделяется на клиническое и домашнее; по области нанесения – наружное, внутреннее и комбинированное. При отбеливании зубов в клинических условиях используют 15–38 %-ную перекись водорода или 30–35 %-ную перекись карбамида. В клинике применяют либо систему химической активации («Opalescence Xtra Boost» Ultradent Products Inc.), либо форсированную систему отбеливания. Для последней применяются специальные лампы, которые отличаются по виду излучения: ультрафиолетовый свет, «холодный свет» (галогеновый, «синий»), плазменно-дуговые лампы, ксеноновые дуги, лазерная система.

При этом следует учитывать некоторые побочные эффекты, которые могут возникнуть при использовании высококонцентрированных отбеливающих препаратов:

1. Отбеливающие препараты содержат пероксиды. Они увеличивают мутагенный эффект других химических соединений, например тех, которые присутствуют в сигаретах.

2. Типичным побочным эффектом отбеливания является временная повышенная чувствительность зубов. Практически во всех случаях она устраняется после прекращения отбеливания и проведения реминерализации тканей зуба фторсодержащими препаратами.

3. Сразу после отбеливания не следует производить реставрацию зуба, поскольку прочность соединения пломбировочного материала с тканями зуба снижается. Реставрацию рекомендуется проводить не раньше, чем через 2 недели после отбеливания.

Результат отбеливания с течением времени ослабевает, и через некоторое время могут потребоваться дополнительные процедуры отбеливания. Эти изменения могут быть вызваны различными причинами, например, употреблением кофе, красного вина, фруктовых соков, курением.

Целью данного исследования являлась

разработка методики анализа микро-структуры эмали зубов, полученной при помощи атомно-силовой микроскопии, и, в дальнейшем, ее приложение к исследованию влияния различных методик отбе-

ливания. Детальный количественный анализ особенностей микрорельефа даст новую информацию о состоянии эмали и ее изменениях под действием внешних или внутриорганных воздействий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для проведения экспериментальных исследований служили биопрепараты неповрежденных зубов человека, удаленных по пародонтологическим показаниям по разработанной нами методике (рацпредложение № 2488 от 30 ноября 2009 г. ГОУ ВПО ПГМА им. ак. Е.А. Вагнера Росздрава). Первоначально исследованию подвергалась поверхность эмали неотбеленного зуба, после чего данный зуб отбеливали, повторяя процедуру дважды. В качестве отбеливающего средства использовался гель «Opalescent Xtra Boost», клиническая эффективность которого подтверждена в ранних исследованиях авторов [4].

Эксперименты проводили на базе Института механики сплошных сред УрО РАН на атомно-силовом микроскопе

«Nano-DST» в полуконтактном режиме работы. Микроскоп такого типа позволяет получать трехмерные картины поверхности исследуемых материалов с расстоянием между отдельными точками изображения до нескольких нанометров. До и после каждого этапа отбеливания со средней части поверхности эмали были получены картины рельефа 15×15 мкм с разрешением в латеральной плоскости 1024×1024 точки, т.е. расстояние между пикселями полученных изображений составило ~15 нм, что сопоставимо с размерами используемых стандартных зондов с радиусом кончика <10 нм. Обработка результатов производилась при помощи алгоритмов, специально разработанных исследователями Института механики.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура эмали представляет собой сложный рельеф. Изображения, на первый взгляд, существенно отличаются и трудны для сравнения (рис. 1).

Для классификации полученных результатов был предложен картографический метод анализа, давно применяемый

в географии. Речь идет об использовании понятий «уровень мирового океана», «равнины», «возвышенности и горы», «впадины». Для их изображения на карте применяются соответствующие цвета. Используются обозначения:

1. Черный цвет – очень глубокие

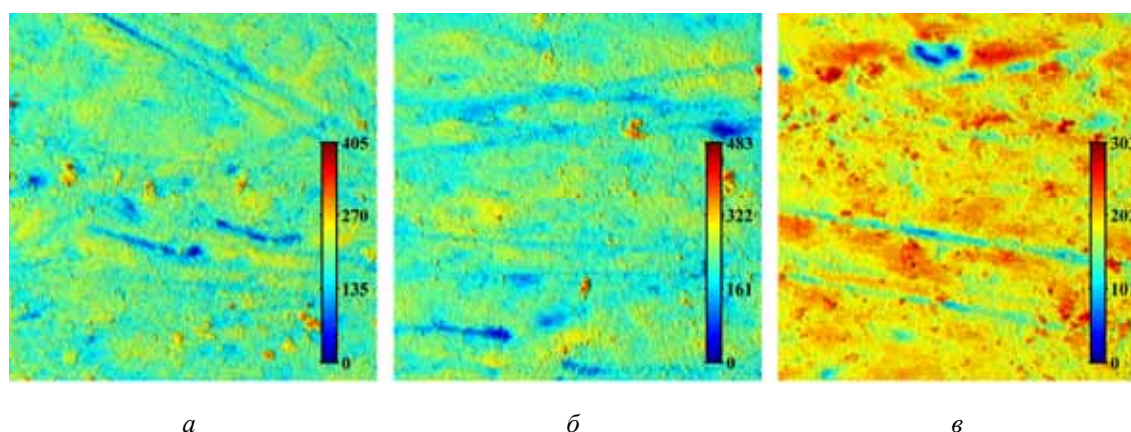


Рис. 1. Изображения поверхности зуба: неотбеленного (а), отбеленного один раз (б) и три раза (в)

впадины («ущелья, у которых не видно дна»).

2. Синие цвета – впадины.
3. Зеленые – равнины.
4. Коричневые – возвышенности и

где эта функция имеет максимум. То значение  $h$ , при котором функция  $Sh$  имеет максимальное значение, и выбирается за уровень отсчета.

На рис. 2 представлены изображения обработанного микрорельефа (рис. 1).

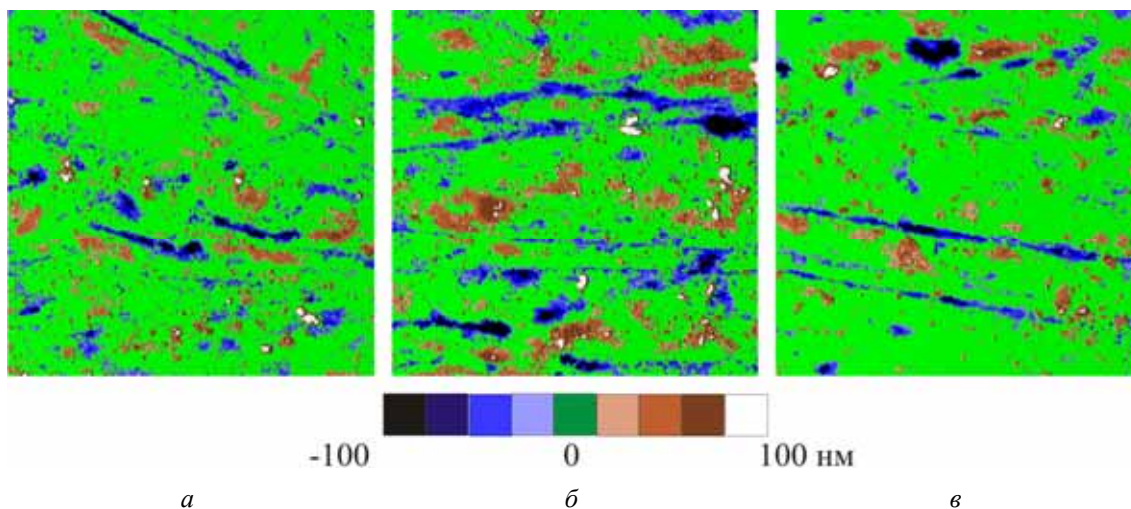


Рис. 2. Обработанные изображения поверхности эмали зуба: неотбеленного (а), отбеленного один раз (б) и три раза (в)

горы.

5. Белый цвет – очень высокие горы («покрытые снегом»).

Применительно к микрорельефу эмали, вначале определяется «уровень мирового океана», то есть уровень, от которого происходит отсчет высот «гор» и глубин «впадин». Делается это следующим образом.

1. Для значений координаты  $h$  (где  $h$  – это координата на вертикальной оси) вычисляется площадь тех частей поверхности зуба  $Sh$ , координаты  $h$  которых по-

Части рельефа, высоты которых больше по абсолютной величине 100 нм, были обрезаны. На рисунке они выглядят как черные «впадины» или белые вершины «гор».

На рис. 2 видно, что рельеф неотбеленного и отбеленного один раз зуба, по сравнению с отбеленным три раза, более неоднороден, впадины и возвышенности занимают значительную площадь изображения. Диаграммы процентного соотношения между составляющими рельефа представлены на рис. 3.

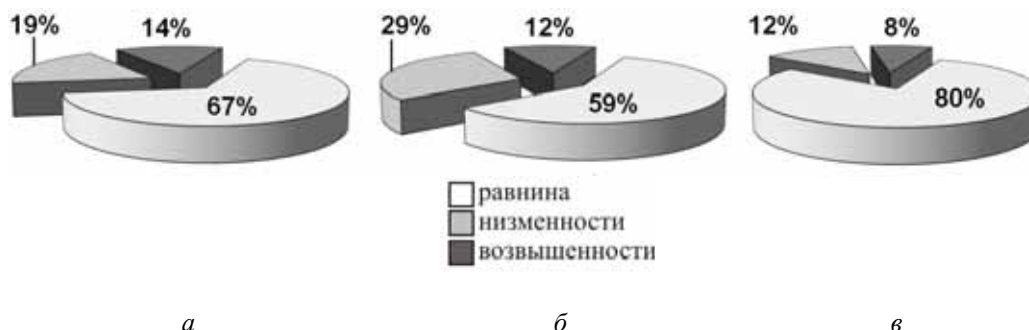


Рис. 3. Процентное соотношение между составляющими рельефа эмали зуба: неотбеленного (а), отбеленного один раз (б) и три раза (в)

падают в интервал от  $h-\Delta h$  до  $h+\Delta h$ .

2. Строится функция зависимости площади  $Sh$  от значения  $h$ . Определяется,

Шероховатость поверхности эмали (среднее квадратичное отклонение высоты) составила 29, 34 и 22 нм для неотбе-

ленной, отбеленной один раз и три раза эмали соответственно. Полученные значения шероховатости, а также данные, представленные на рис. 4, говорят о том, что наиболее неровной является эмаль

показал, что первое отбеливание сопровождается уменьшением толщины поверхностных структур эмали, формированием порозного поверхностного слоя эмали – размер, площадь и объем возвышенных

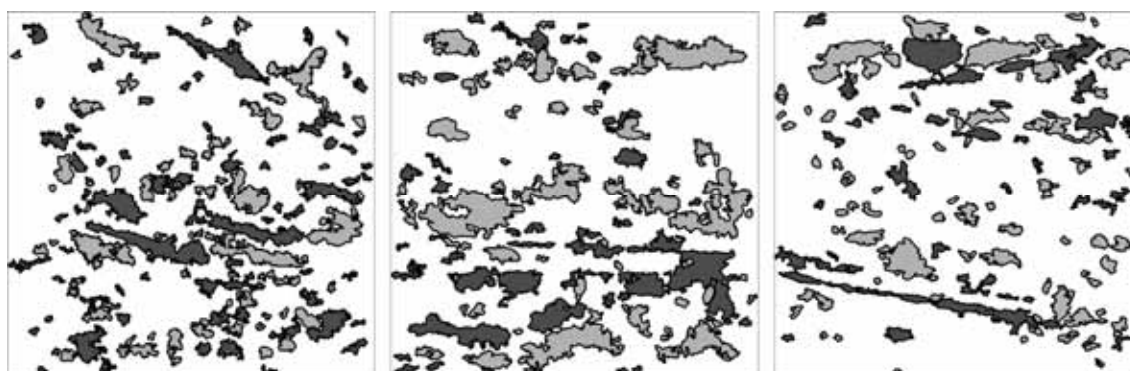


Рис. 4. Результат разбивки непрерывного изображения на отдельные объекты

однократно отбеленного зуба. Можно предположить, что в результате первого отбеливания были удалены фрагменты пелликулы (пленка адсорбированных из слюны протеинов) зуба и обнажен поверхностный слой эмали. Повторное двукратное отбеливание привело к очаговой деминерализации (порозности) поверхностного слоя эмали, при этом процентное соотношение как возвышенностей, так и низменностей упало приблизительно в 2 раза.

Перейдем к анализу отдельно структуры впадин и возвышенностей, для этого применим процедуру, аналогичную описанной в работе [1], разбив непрерывный рельеф на отдельные «островки» низменностей и возвышенностей, оставив только те, которые не пересекают границу изображения и чья площадь сечения основания  $A \geq 0,05 \text{ мкм}^2$  (рис. 4). Имея в наличии набор низменностей и возвышенностей, можно вычислить их геометрические характеристики – средний размер  $\langle d \rangle$ , площадь  $\langle A \rangle$ , объем  $\langle V \rangle$  (таблица).

Анализ геометрии возвышенностей

участков возрастают. Повторные процедуры отбеливания приводят к выравниванию рельефа эмали (снижение средних характеристик возвышенностей). В отличие от возвышенностей структура низменностей, их размеры, площадь и объем не уменьшаются после первого отбеливания. Средний размер увеличивается – структуры становятся более вытянутыми относительно горизонтали (см. рис. 2), а неумещающийся объем, наряду со снижением доли возвышенностей и низменностей (рис. 3), говорит о том, что происходит углубление отрицательных частей рельефа. Уменьшение объема возвышенностей и постоянство (или рост) объема низменностей указывают на то, что процесс истирания эмали вглубь идет быстрее, чем выравнивание ее поверхности.

В 1975 году французским ученым Бенуа Мандельбротом было введено понятие фрактальности [3]. Под фракталом понимается самоподобная геометрическая фигура, каждый фрагмент которой повторяется при уменьшении масштаба. Многие объекты в природе обладают

Таблица

Средние значения размеров, площадей и объемов структур эмали

Эмаль	Возвышенности			Низменности		
	$\langle d \rangle$ , мкм	$\langle A \rangle$ , мкм <sup>2</sup>	$\langle V \rangle$ , мкм <sup>3</sup>	$\langle d \rangle$ , мкм	$\langle A \rangle$ , мкм <sup>2</sup>	$\langle V \rangle$ , мкм <sup>3</sup>
Неотбеленная	0,38	0,24	0,003	0,43	0,40	0,006
Отбеленная 1	0,47	0,39	0,006	0,59	0,47	0,005
Отбеленная 3	0,44	0,27	0,004	0,45	0,32	0,005

фрактальными свойствами, например, побережья, облака, кроны деревьев, кровеносная система. Фрактальные структуры обладают дробной метрической размерностью или метрической размерностью, превосходящей топологическую, а также могут быть построены при помощи рекурсивной процедуры. Величину, коэффициент самоподобия, связывающую характеристики объекта и являющуюся неизменной, называют фрактальной размерностью [2, 3, 5].

В результате анализа фрактальных связей между периметрами и площадью, а также объемом и размерами структур поверхности эмали были сделаны следующие заключения:

1. Геометрия впадин и возвышенностей на неотбеленной эмали не является фрактальной – невозможно подобрать величину фрактальной размерности, которая бы связывала объем и размеры объектов с достаточной степенью достоверности. Скорее всего, это связано с тем, что на поверхности неотбеленного зуба имеется большое количество «искусственных» изменений рельефа, нанесенных при удалении зуба и его первичной обработке.

массивные неровности поверхности эмали состоят из некоторого числа подобных, но более мелких образований.

3. Форма впадин и возвышенностей становится более округлой – фрактальная размерность, связывающая объем и размеры структур, возрастает и стремится к трем (для шара эта величина равна 3).

Дальнейшие исследования по данной тематике направлены на применение разработанных методик для исследования влияния различных отбеливающих средств на структуру поверхности эмали. Для изучения эволюции структуры в результате отбеливаний строго определенного участка эмали на поверхность зуба предложено наносить царапины при помощи установки Nanotest 600 (Пермский государственный университет). Царапины производятся индентором Берковича (усеченная трехгранная алмазная пирамидка) с силой внедрения 200 мН. Далее при помощи атомно-силового микроскопа снимается топология микрорельефа в районе царапин, видимых в оптический микроскоп прибора, а также фиксируется изменение самих царапин в результате отбеливания (рис. 5).

Подобный подход позволит более «ад-

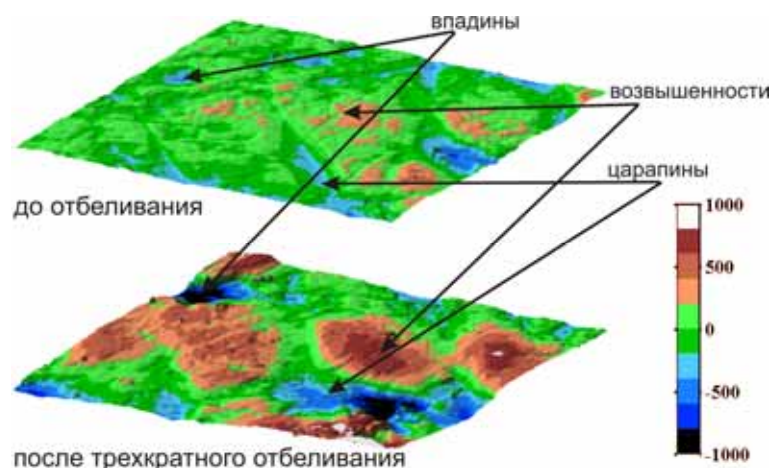


Рис. 5. Изменение одного и того же участка эмали в районе нанесенных царапин

2. О некоей фрактальности структур можно уверенно говорить лишь в случае отбеленной эмали. Это свидетельствует о самоподобии геометрии низменностей или возвышенностей на всем масштабе наблюдаемых размеров, то есть большие

ресно» изучить влияние отбеливания на структуру эмали, а также определить толщину слоя эмали, снимаемого с ее поверхности в результате применения того или иного отбеливающего средства.

## ВЫВОДЫ

Разработана методика структурного исследования эмали зубов при помощи атомно-силовой микроскопии. На первом этапе полученный рельеф выравнивался относительно нулевого уровня, за который выбиралась часть рельефа, имеющая наибольшую площадь в общей поверхности снятого изображения. По аналогии с географическими картами были введены понятия равнин, низменностей и возвышенностей поверхности зуба.

На основе предложенной методики проведен структурный анализ низменностей и возвышенностей рельефа эмали, исследованы следующие характеристики: компактность, размер, периметр, пло-

щадь, объем, фрактальные размерности.

Полученные в условиях эксперимента результаты свидетельствуют о том, что профессиональное отбеливание биопрепаратов удаленных интактных зубов системой «Opalescent Xtra Boost» в режиме однократной процедуры, имитирующей лечебный режим отбеливания, не оказывает прямого негативного воздействия собственно на структуру эмали. Повторное отбеливание повреждает структуру эмали, особенно в области низменностей рельефа, что сопровождается углублением дефектов на поверхности зуба.

### Библиографический список

1. Герасименко Н.А., Апрелов С.А. Фрактальные методы анализа степени упорядоченности наноструктур // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 1–2. – С. 136–139.
2. Ерофеева Е.С., Гилева О.С. Влияние процедуры отбеливания зубов на возникновение гиперчувствительности зубов // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы стоматологии». – Уфа, 2009. – С. 83–84.
3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
4. Морозов И.А. Анализ микроструктуры наполненной резины при помощи атомно-силовой микроскопии // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 83–94.
5. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.