

УДК 531/534: [57+61]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИНИЧЕСКОГО ОТБЕЛИВАНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ЭМАЛИ ЗУБОВ

И.А. Морозов¹, А.Л. Свистков¹, О.С. Гилёва², Е.С. Ерофеева²

¹ Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614013, Пермь, ул. акад. Королева, 1, e-mail: ilya.morozov@gmail.com, svistkov@icmm.ru

² Кафедра пропедевтики и физиотерапии стоматологических заболеваний Пермской государственной медицинской академии имени акад. Е.А. Вагнера, Россия, 614990, Пермь, ул. Куйбышева, 39, e-mail: sunlen@mail.ru, ogileva@rambler.ru

Аннотация. Работа посвящена количественному анализу микрорельефа зубной эмали и влияния отбеливания на ее структуру. Исследования проводились на областях размером 15×15 мкм, полученных при помощи атомно-силового микроскопа с неотбеленного, отбеленного один, а затем еще два раза зуба. Для описания общего вида микрорельефа предложен картографический метод – на эмали выделялись «равнинные» участки, а также низменности и возвышенности. Разработана методика структурного анализа этих составляющих: компактность, размер, периметр, площадь, объем, фрактальные размерности. Установлено, что структуры на поверхности эмали связаны фрактальными зависимостями, это говорит об их самоподобии на всем масштабе наблюдаемых размеров. 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. Установленное уменьшение фрактальной размерности возвышенностей говорит об уменьшении прочности данных участков рельефа.

Ключевые слова: микроструктура, атомно-силовая микроскопия, зубная эмаль, отбеливание, прочность.

ВВЕДЕНИЕ

Эстетическая стоматология входит в состав популярных и быстроразвивающихся областей медицины. Красивая улыбка всегда будет привлекать внимание человека. Важнейшими составляющими эстетики улыбки являются оптические свойства тканей здорового зуба во всем многообразии цветовых оттенков эмали зуба, насыщенности цвета, светлоты, опалесценции и блеска [2, 4]. Отбеливание зубов стало особенно популярным и доступным за последние несколько лет. Тем не менее специалисты указывают на возможность негативного воздействия отбеливающих средств на минеральный состав и структуру твердых тканей зубов. Обширный обзор

© Морозов И.А., Свистков А.Л., Гилёва О.С., Ерофеева Е.С., 2010

Морозов Илья Александрович, к.ф.-м.н., Лаборатория микромеханики структурно-неоднородных сред, Пермь

Свистков Александр Львович, д.ф.-м.н., заведующий Лабораторией микромеханики структурно-неоднородных сред, Пермь

Гилёва Ольга Сергеевна, д.м.н., профессор, завкафедрой пропедевтики и физиотерапии стоматологических заболеваний, Пермь

Ерофеева Елена Сергеевна, аспирант кафедры пропедевтики и физиотерапии стоматологических заболеваний, Пермь

современных медицинских работ по данной тематике содержится в публикации Н.И. Крихели и О.О. Янушевича [6].

К настоящему времени существует немало исследований, так или иначе посвященных изучению влияния различных местных и общих факторов на микроструктуру эмали: возрастные изменения [10], употребление различных напитков [14, 15, 18], дегидратация [16], зубные пасты [13, 19] и зубные щетки [17], отбеливание [6, 12, 20] и т.д. В литературе изображения эмали, полученные при помощи сканирующей микроскопии, зачастую используются лишь в качестве подкрепляющих иллюстраций. Детальный количественный анализ особенностей микрорельефа даст новую информацию о состоянии эмали и ее изменениях под действием внешних или внутриорганных воздействий.

Целью данной работы являлась разработка методики анализа микроструктуры эмали зубов, полученной при помощи атомно-силовой микроскопии, и ее приложение к исследованию влияния различных методик отбеливания. Предлагаемые методические подходы включают в себя как первичную обработку микроизображений эмали в соответствии с картографическим подходом, когда на рельефе поверхности зуба согласно определенным критериям выделяются «горы», «равнины» и «впадины», так и структурный анализ отдельных составляющих рельефа (размеры, форма, фрактальные характеристики). На основе разработанных методов показаны количественные различия в микроструктуре эмали отбеленных и неотбеленных зубов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для проведения экспериментальных исследований служили биопрепараты интактных зубов человека, удалённых по пародонтологическим показаниям по разработанной авторами методике (рацпредложение № 2488 от 30 ноября 2009 ГОУ ВПО Пермской государственной медицинской академии имени академика 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 [3]. После каждого этапа отбеливания со средней части поверхности эмали был также снят ряд изображений для дальнейшего сравнительного анализа.

Эксперименты проводили на атомно-силовом микроскопе *Nano-DST* в полуконтактном режиме работы прибора. Номинальный радиус кончика зонда <10 нм. Все представленные результаты являются результатами осреднения данных, снятых с различных участков соответствующих зубов. Размер изображения – 15×15 мкм при разрешении в плоскости xu 1024×1024 точки. Обработка результатов производилась при помощи собственных алгоритмов, созданных на *Matlab*.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Микроструктура эмали представляет собой сложный рельеф. Изображения на первый взгляд существенно отличаются и сложны для сравнения (рис. 1). Для классификации полученных результатов был предложен картографический метод анализа. Данные приводятся к среднему уровню, выбранному следующим образом: при движении с малым шагом Δh от минимального к максимальному значению высоты h были построены зависимости $\rho = S(h \pm \Delta h)/S$, где $S(h \pm \Delta h)$ – площадь рельефа, попавшая в интервал $h \pm \Delta h$; S – общая площадь. На рис. 1 представлены два необработанных снимка эмали и соответствующие им кривые $\rho(h)$.

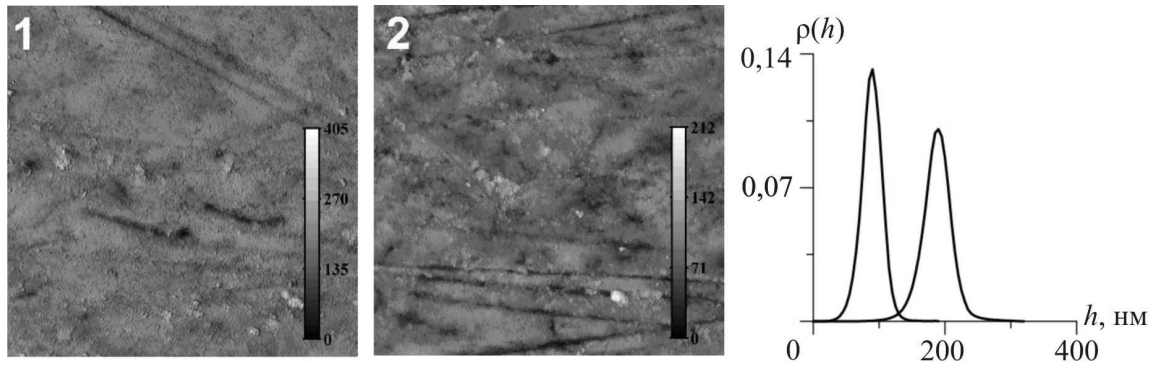


Рис. 1. Примеры необработанных изображений эмали и соответствующие им характеристики площади рельефа $\rho(h)$

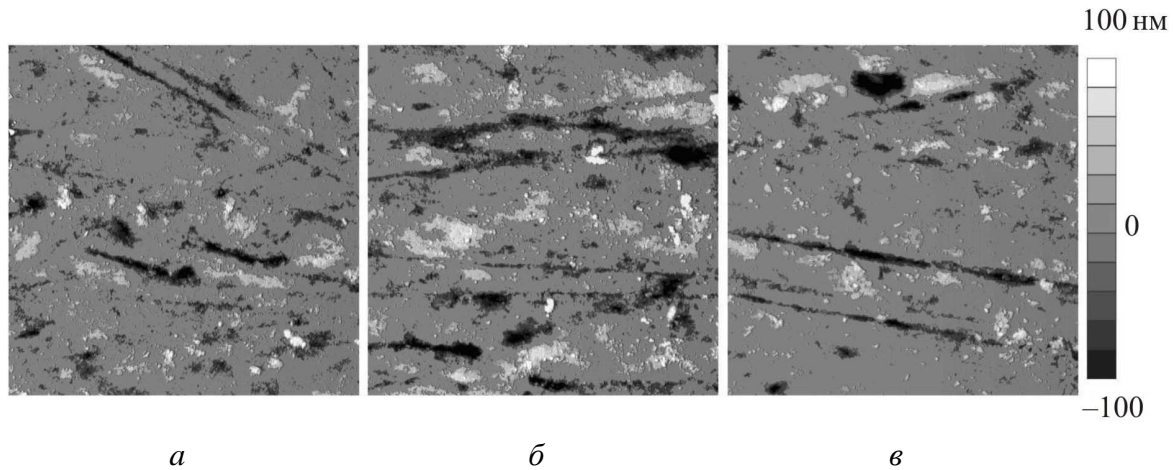


Рис. 2. Поверхность эмали неотбеленного (а), отбеленного один (б) и три (в) раза зуба

Все полученные зависимости $\rho(h)$ качественно имели вид, показанный на рис. 1. Нулевой уровень изображения смещается в ту область, где значение $S(h \pm \Delta h)/S$ максимально.

Разобьем условно рельеф на три составляющие в зависимости от найденной высоты относительно нулевого уровня h :

- 1) $abs(h) < 25$ нм – равнинная часть;
- 2) $h \leq -25$ нм – низменности;
- 3) $h \geq 25$ нм – возвышенности.

Кроме того, для удобства визуализации части рельефа, высоты которых больше по абсолютной величине 100 нм, были обрезаны. На рисунке они выглядят как черные впадины или белые вершины гор. Результаты проведенных операций представлены на рис. 2.

Качественно на рис. 2 видно, что рельеф неотбеленного зуба по сравнению с отбеленным более неоднороден, впадины и возвышенности занимают значительную площадь изображения.

В табл. 1 представлены значения общей шероховатости R_{rms} (среднее квадратичное отклонение высоты, нм); процентные вклады равнинных участков, низменностей и возвышенностей в общую картину рельефа, а также их локальные шероховатости r_{rms} .

Таблица 1

Характеристики рельефа							
Эмаль	Шероховатость R_{rms} , нм	Плоскости		Низменности		Возвышенности	
		%	r_{rms} , нм	%	r_{rms} , нм	%	r_{rms} , нм
Неотбеленная	29	67	14	19	19	14	18
Отбеленная 1 раз	34	59	14	29	29	12	22
Отбеленная 3 раза	22	80	12	12	12	8	15

Данные, представленные в табл. 1, говорят о том, что наиболее неровной является эмаль однократно отбеленного зуба. Можно предположить, что в результате первого отбеливания были удалены фрагменты пелликулы зуба и обнажён поверхностный слой эмали. Дальнейшее двухкратное отбеливание привело к очаговой деминерализации (порозности) поверхностного слоя эмали, при этом процентное соотношение как возвышенностей, так и низменностей упало примерно в 1,5–2 раза.

Структура поверхности, получаемая при помощи атомно-силового микроскопа, представляет собой сложный трехмерный рельеф. Для его детального структурного анализа применим процедуру, аналогичную описанной в работе [8] – при увеличении высоты h над найденным нулевым уровнем рельеф распадается на отдельные «островки». Будем отдельно рассматривать структуру возвышенностей ($h > 0$) и низменностей ($h < 0$). В последнем случае рельеф с отрицательной высотой инвертировался и далее рассматривался как возвышенности.

В зависимости от h построим следующие зависимости:

1. Число участков $N(h)$, на которые распадается структура поверхности.
2. Компактность сечения объекта $c(h)$. Для оценки компактности фигуры существует ряд критериев [11], один из которых имеет вид $2\sqrt{\pi A} / P$ (A, P – площадь и периметр фигуры). Это выражение показывает, насколько фигура отличается от круга. Применительно к нашему случаю компактность можно записать в виде

$$c(h) = \frac{2\sqrt{\pi} \sum_{k=1}^N \sqrt{A_k(h)}}{N(h) P_k(h)}, \quad (1)$$

где A_k, P_k – площадь и периметр сечения k -го объекта. Чем меньше c , тем менее компактен профиль сечения.

3. Суммарная площадь сечения объектов A .

При вычислении $N(h), c(h)$ и $A(h)$ использовали только те объекты, которые не пересекают границу изображения и чья площадь сечения $A_k \geq 0,05 \text{ мкм}^2$. На рис. 3

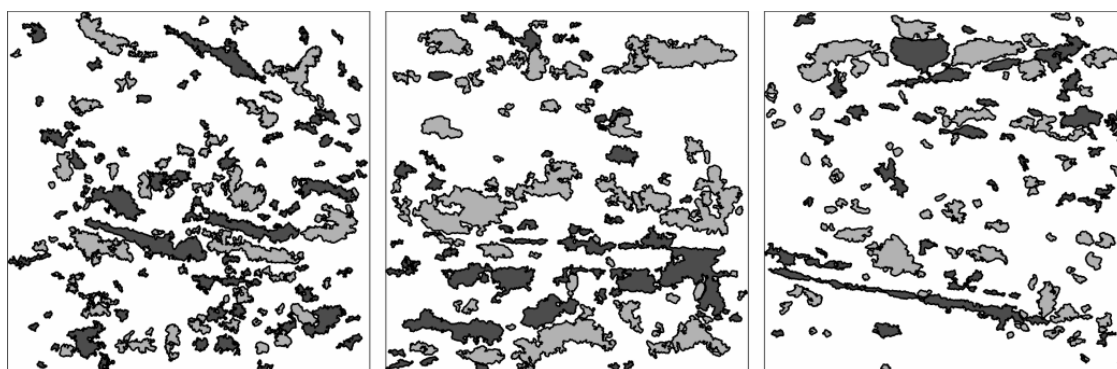


Рис. 3. Примеры сечений вершин и впадин

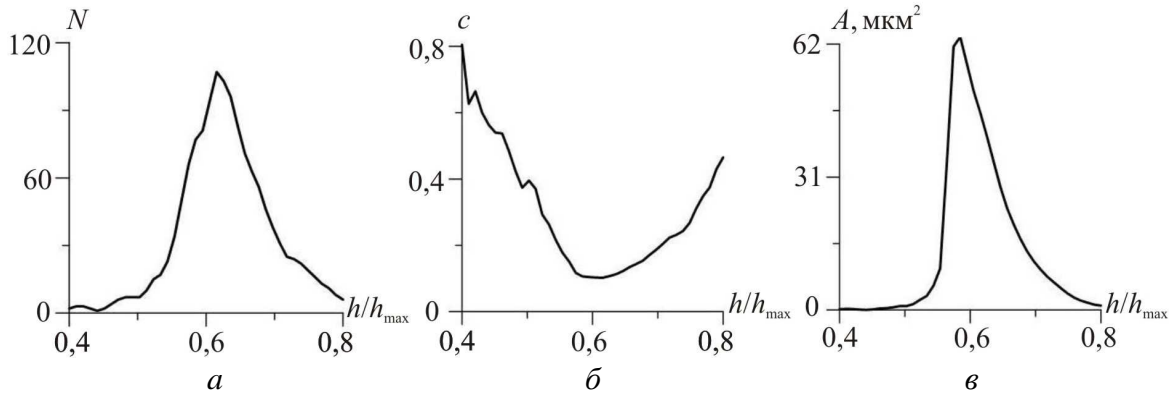


Рис. 4. Зависимости числа объектов (а), компактности (б) и площади сечения (в) объектов

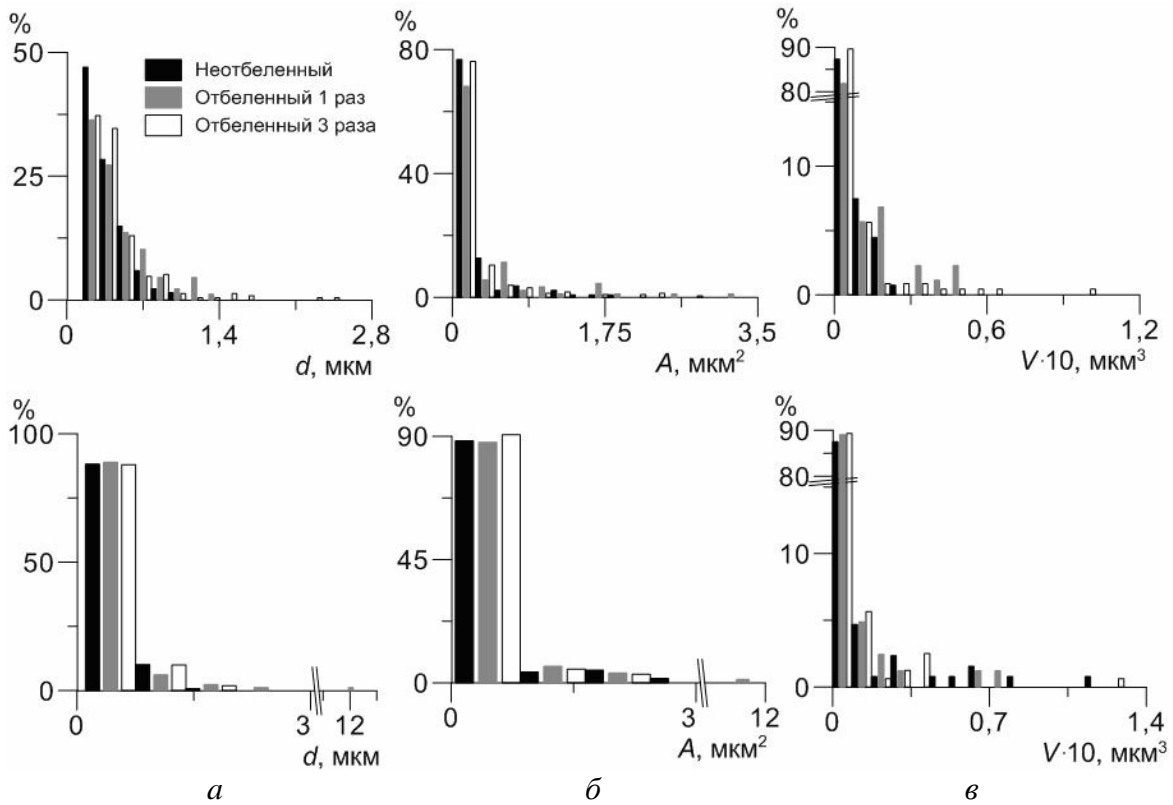


Рис. 5. Распределение размеров (а), площади (б) и объемов (в) сечения возвышенностей (верхний ряд) и впадин (нижний ряд) поверхности неотбеленного, отбеленного один и три раза зуба

показаны сечения полученных объектов для структур рельефа рис. 2. Светлым изображены сечения возвышенностей, темным – впадин. Характерные кривые N , c и A в зависимости от приведенной высоты h/h_{\max} изображены на рис. 4.

Для всех полученных изображений рельефа качественный вид кривых (см. рис. 4) оставался неизменным. На определенной высоте h^* над нулевым уровнем рельефа число объектов (низменностей либо возвышенностей) и их суммарная площадь были максимальными, в то же время их форма наименее компактна. Объясняется это следующим образом. На малых высотах ($h < h^*$) рельеф распадается на массивные компактные единичные структуры. При больших высотах ($h > h^*$) мы имеем дело

Таблица 2

Средние значения площадей сечения и размеров структур эмали

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

с вершинками рельефа, представляющими собой компактные структуры. Таким образом, все дальнейшие результаты основаны на анализе только верхней ($h \geq h^*$) части рельефа поверхности зуба.

На рис. 5 представлены распределения размеров d (a) площадей A (b), объемов (v) сечений возвышенностей и впадин для неотбеленного и отбеленного случаев.

Полученные средние значения $\langle A \rangle$, $\langle d \rangle$ и $\langle V \rangle$ сведены в табл. 2.

Анализ геометрии возвышенностей показал, как уже упоминалось ранее, что первое отбеливание сопровождается уменьшением толщины поверхностных структур эмали, формированием порозного поверхностного слоя эмали – размер, площадь и объем возвышенных участков возрастают. Повторные процедуры отбеливания приводят к выравниванию рельефа эмали (снижение средних характеристик возвышенностей). Следует также обратить внимание на максимальные величины d , A , V (см. рис. 5). Во всех случаях значения для неотбеленного зуба лежат левее, чем для отбеленных участков. Это еще раз указывает на то, что на поверхности неотбеленной эмали содержится значительное количество небольших «наростов» (качественно это видно на рис. 2), которые счищаются при первом отбеливании.

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 вместе со снижением доли возвышенностей и низменностей (см. табл. 1) говорит о том, что происходит углубление отрицательных частей рельефа. Уменьшение объема возвышенностей и постоянство (или рост) объема низменностей указывает на то, что процесс истирания эмали вглубь идет быстрее, чем выравнивание ее поверхности.

В 1975 году французским ученым Бенуа Мандельбротом было введено понятие фрактальности [7]. Как оказалось, многие составные части структур окружающего нас мира самоподобны объекту целиком, т.е. имеют общую природу: например, ветви дерева подобны всему дереву. Если таковая связь имеется, то такие структуры называют фрактальными, а величину, связывающую характеристики объекта и являющуюся неизменной, – фрактальной размерностью. Проведем фрактальный анализ структуры поверхности эмали. Фрактальная связь между площадью сечения объектов (см. рис. 3) и периметром имеет вид [1]

$$P_k = \mu_1 A_k^{D_p/2}, \quad (2)$$

где P_k , A_k – периметр и площадь сечения k -го объекта; μ_1 – константа; D_p – фрактальная размерность периметра. Существует подобная зависимость [9], связывающая размер d_k и объем V_k объектов,

$$V_k = \mu_2 d_k^{D_v}, \quad (3)$$

Таблица 3

Значения фрактальных размерностей

Эмаль	Вершины		Впадины	
	$D_p - R^2$	$D_v - R^2$	$D_p - R^2$	$D_v - R^2$
Неотбеленная	1,48 – 0,91	2,37 – 0,72	1,47 – 0,95	2,09 – 0,78
Отбеленная 1 раз	1,46 – 0,94	2,31 – 0,87	1,41 – 0,94	2,39 – 0,90
Отбеленная 3 раза	1,39 – 0,92	2,32 – 0,83	1,35 – 0,93	2,47 – 0,90

где μ_2 – константа; D_v – фрактальная размерность объема (массы). В двойных логарифмических координатах выражения (2) и (3) можно аппроксимировать прямой методом наименьших квадратов. В табл. 3 представлены полученные значения фрактальных размерностей, а также критерий достоверности аппроксимации R -квадрат (чем он ближе к единице, тем выше точность приближения).

Наименьшую точность приближения имеют значения D_v для неотбеленной эмали (табл. 3). 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. Поэтому о некоей фрактальности структур можно уверенно говорить лишь в случае отбеленной эмали. Наличие фрактальных связей (2), (3) между геометрическими характеристиками объектов говорит об их самоподобии на всем масштабе наблюдаемых размеров (см. рис. 5), т.е. малые неровности – дефекты поверхности эмали подобны большим. Связь между их геометрическими параметрами имеет вид (2) и (3).

Для описания степени шероховатости поверхности используется показатель Херста [1, 5] H : $H = 2 - D_p$. Значения H для вершин составили: 0,52; 0,54 и 0,61; для впадин: 0,53; 0,59; 0,65. Все значения $H > 0,5$ и возрастают при переходе от неотбеленной к отбеленной эмали. Это говорит о том, что в результате отбеливания шероховатость поверхности уменьшается на рассмотренном масштабе, что согласуется с данными табл. 1. Форма впадин и возвышенностей становится более округлой – фрактальная размерность объема D_v возрастает (для шара $D_v \equiv 3$).

Критическая энергия разрушения (прочность) поверхности хрупких материалов (стекло, керамика и пр.) связана с фрактальной размерностью [21] и имеет следующий вид:

$$\gamma_c = \gamma_0 + \frac{a_0 \cdot E \cdot D^*}{2}, \quad (4)$$

где γ_0 – энергия разрушения гладкой поверхности; a_0 – структурная константа материала; E – модуль Юнга; D^* – дробная часть фрактальной размерности.

С уменьшением фрактальной размерности критическая энергия разрушения (4) падает. Применительно к отбеливанию зубов это означает, что возвышенности становятся менее прочными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, площадь которой имеет максимальный вклад в общую площадь 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, были исследованы следующие характеристики: компактность, размер, периметр, площадь, объем, фрактальные размерности.

Результаты показали, что первичное отбеливание биопрепаратов удалённых зубов снимает пелликулу с поверхности эмали. Происходит рост шероховатости, а также средних геометрических характеристик структур на эмали. Повторные процедуры отбеливания приводят к истиранию, порозности эмали, особенно в области низменностей рельефа. Площадь и периметр, а также объем и размер структурных составляющих поверхности эмали связаны фрактальными зависимостями, что говорит об их самоподобии на всем масштабе наблюдаемых размеров. Анализ фрактальной размерности D_p показал уменьшение шероховатости поверхности на рассмотренном масштабе, формирование более округлой формы впадин и возвышенностей.

В целом полученные в условиях эксперимента результаты свидетельствуют о том, что клиническое отбеливание биопрепаратов удалённых интактных зубов системой «*Opalescent Xtra Boost*» в режиме однократной процедуры, имитирующей лечебный режим отбеливания, не оказывает прямого негативного воздействия собственно на структуру эмали. Повторно проводимое отбеливание оказывает повреждающее воздействие на структуру эмали, особенно в области низменностей рельефа, что сопровождается углублением дефектов на поверхности зуба.

Результаты экспериментальных исследований следует учитывать в клинической практике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности, инноваций и науки Пермского края, грант №09-08-99102-р_офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасименко Н.А., Апрелов С.А. Фрактальные методы анализа степени упорядоченности наноструктур // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 1–2. – С. 136–139.
2. Гилёва Е.С. Дисколорит зубов как параметр нарушения эстетики улыбки // Материалы научной сессии. – Пермь, 2007. – С. 75–77.
3. Ерофеева Е.С., Гилёва О.С. Влияние процедуры отбеливания зубов на возникновение гиперчувствительности зубов // Актуальные вопросы стоматологии: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 20–21 октября. – Уфа, 2009. – С. 83–84.
4. Ерофеева Е.С., Гилёва О.С., Ракинцева Н.А. Субъективная оценка осветления зубов при различной степени их дисколорита // Стоматология Большого Урала. Профилактика стоматологических заболеваний: материалы Всерос. конгресса 20–21 октября. – Пермь, 2009– С. 65–67.
5. Калуж Ю.А., Логинов В.М. Показатель Херста и его скрытые свойства // Сиб. журн. индустр. матем. – 2002. – Т. 5, № 4. – С. 29–37.
6. Крихели Н.И., Янушевич О.О. Влияние отбеливающих препаратов на проницаемость эмали, ее минеральный состав и структуру твердых тканей зуба // Российская стоматология. – 2009. – Т. 2, № 3. – С. 20–25.
7. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Институт компьютерных исследований. – М., 2002. – 656 с.
8. Морозов И.А. Анализ микроструктуры наполненной резины при помощи атомно-силовой микроскопии // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т.15, № 1. – С. 83–94.
9. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
10. Цимбалистов А.В., Пихур О.Л., Франк-Каменецкая О.В., Голубцов В.В., Плоткина Ю.В. Результаты исследования морфологического строения, химического состава и параметров кристаллической решетки апатитов твердых тканей зубов // Институт стоматологии. – 2004. – № 2 (23). – С. 60–63.

11. Bogaert J., Rousseau R., Van Hecke P., Impens I. Alternative area-perimeter ratios for measurement of 2D shape compactness of habitats // *Appl. Math. Comp.* – 2000. – Vol. 111, No. 1. – P. 71–85.
12. Dahl J.E., Pallesen U. Tooth bleaching – a critical review of the biological aspects // *Crit. Rev. Oral. Biol. Med.* – 2003. – Vol. 14, No. 4. – P. 292–304.
13. Ehrhardt J.J. Absolute measurements of the depth of abrasion, a testing method for dentifrices // *J. Appl. Sci. Res.* – 1947. – Vol. A1. – P. 87–93.
14. Finke M., Hughes J.A., Parker D.M., Jandt K.D. Mechanical properties of in situ demineralised human enamel measured by AFM nanoindentation // *Surf. Sci.* – 2001. – Vol. 491, No. 3. – P. 456–467.
15. Finke M., Parker D.M., Jandt K.D. Influence of soft drinks on the thickness and morphology of in situ acquired pellicle layer on enamel // *J. Colloid Interface Sci.* – 2002. – Vol. 251, No. 2. – P. 263–270.
16. Kubinek R., Zapletalova Z., Vujtek M., Novotný R., Kolarova H., Chmelickova H. Examination of dentin surface using AFM and SEM // *Modern Research and Educational Topics in Microscopy.* – 2007. – Vol. 2, No. 3. – P. 593–598.
17. Lippert F., Parker D.M., Jandt K.D. Toothbrush abrasion of surface softened enamel studied with tapping mode AFM and AFM nanoindentation // *Caries Research.* – 2004. – Vol. 38, No. 5. – P. 464–472.
18. Machado C., Lacefield W., Catledge A. Human Enamel Nanohardness, Elastic modulus and surface integrity after beverage contact // *Braz. Dent. J.* – 2008. – Vol. 19, No. 1. – P. 68–72.
19. Meyers I.A., McQueen M.J., Harbrow D., Seymour G.J. The surface effect of dentifrices // *Aust. Dent. J.* – 2000. – Vol. 45, No. 2. – P. 118–124.
20. Ogiwara M., Miake Y., Yanagisawa T. Changes in dental enamel crystals by bleaching // *J. Hard Tissue Biol.* – 2008. – Vol. 17, No. 1. – P. 11–16.
21. Quinn G.D. *Fractography of Ceramics and Glasses.* – Washington: National Institute of Standards and Technology, 2006. – 546 p.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF BLEACHING ON ENAMEL SURFACE MICROSTRUCTURE

I.A. Morozov, A.L. Svistkov, O.S. Gileva, E.S. Erofeeva (Perm, Russia)

This paper focuses on the quantitative analysis of the enamel surface microrelief obtained by atomic force microscopy and the effect of bleaching on the microstructure of enamel surface. The images 15x15 μm obtained by atomic force microscope that exhibited the enamel surface of the unbleached tooth, the tooth bleached once and the tooth bleached thrice were examined. To clarify the general pattern of the enamel microrelief alteration, we applied the cartographic method showing flat areas, depressions and elevations on the surface of a tooth. We present a method for structural analysis of such parameters as compactness, size, perimeter, area, volume, and fractal dimensions. The obtained results show that the first bleaching removes pellicles (adsorbed salivary protein film) from the surface of teeth enamel, and further bleaching causes enamel wear, especially in the lowland areas of the relief; elevations and depressions become more round in shape. The structures observed on enamel surface are found to be related by fractal relationships, which is indicative of their self-similarity over the entire range of sizes observed in this study. Assigned decrease of the fractal dimension of elevations is said to reduce the toughness of these areas of relief.

Key words: microstructure, atomic force microscopy, tooth enamel, bleaching, toughness.

Получено 12 марта 2010