

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2012

УДК 612.31.014.2

В. А. Загорский<sup>1</sup>, И. М. Макеева<sup>1</sup>, В. В. Загорский<sup>2</sup>**ПЛОТНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБА. ЧАСТЬ 1**<sup>1</sup>Кафедра ортопедической стоматологии, кафедра терапевтической стоматологии Первого МГМУ им. И. М. Сеченова (199991, г. Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2); <sup>2</sup>кафедра общей и эстетической стоматологии МГМСУ (127473, г. Москва, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1)

*Знание физических и морфофункциональных свойств твердых тканей зубов позволяет судить о способности зубочелюстной системы воспринимать нагрузки и при этом не разрушаться. Методом микрорадиографии проведено изучение плотности эмали и дентина с шагом в 0,05 мм и представлены результаты исследования в виде гистограмм. Качественная оценка результатов исследования плотности эмали и дентина зубов в поперечном направлении показала их различия, что обусловлено разными морфофункциональными свойствами, а именно ориентированием белково-минерального каркаса эмали и дентина в продольном направлении в соответствии с нагрузкой, необходимой для пережевывания пищи.*

Ключевые слова: *твердая ткань зуба, плотность эмали, нагрузки*

**DENSITY OF THE DENTAL HARD TISSUE. PART 1**

Zagorsky V.A., Makeeva I.M.

*The knowledge of the mechanical, morphological, and functional properties of hard dental tissues makes it possible to estimate the ability of the dentofacial system to withstand loading without deformation. The microradiographic technique was used to study the density of enamel and dentin with a resolution of 0.05 mm; the data are presented in the form of histograms. The qualitative analysis of the results of the study revealed marked differences in the cross-sectional density of the enamel and dentin attributable to their different morpho-functional properties, such as the longitudinal orientation of the protein and mineral structure of these tissues ensuring the resistance to the loading associated with mastication.*

Key words: *hard dental tissue, density enamel, loading*

В настоящее время существуют две точки зрения относительно развития зубов как элементов живого организма. Согласно первой, они являются частью внутреннего скелета, согласно второй — частью наружного скелета, трансформированного и эволюционировавшего в течение длительного времени. Не углубляясь в рассмотрение процесса эволюции живых организмов и возникновения человека, рассмотрим третью точку зрения — зубы не являются частью какого бы то ни было скелета. Тот факт, что они в основном состоят из ткани, подобной костной, не является достаточным аргументом для их идентификации как части скелета любого типа.

Основной признак наружного скелета — непрерывный рост покровной ткани, ее наращивание во всех трех измерениях. При этом поверхностный слой, подвергаясь воздействию внешней среды, изнашивается, отшелушивается и его место занимают внутренние слои. Как известно, у зубов подобный процесс отсутствует.

Формирование зубов происходит во внутриутробный период развития, и эмалевый орган дифференцируется из эктодермальных тканей. В дальнейшем образовавшаяся эмаль в виде колпачка не изменяется, в ней не происходят внутренние количественные изменения. Пожалуй, это единственный элемент организма, в котором не наблюдаются процессы отмирания и восстановления ткани на клеточном уровне. Образовавшись на VI мес. внутриутробной жизни как элемент зуба эмаль "служит" всю жизнь и только подвергается разрушению, не возобновляясь.

Основным признаком внутреннего скелета является наличие жестких элементов, соединения которых друг с другом обеспечивают различную степень его подвижности. В течение жизни структура костей, состоящая из пластичного белкового каркаса, заполненного хрупким минеральным веществом, постоянно изменяется. В зависимости от условий жизни и преодолеваемых физических нагрузок происходит достаточно быстрый (в течение нескольких недель) процесс преобразования структуры костей и образующих ее веществ, но при этом отсутствует процесс отторжения элементов скелета. В организме предусмотрен процесс отторжения больших или сломанных зубов. При этом их замены, как при росте чеши, не происходит.

Таким образом, зубы, хотя и взаимодействуют с костями скелета, но, по нашему мнению, не являются его составной частью.

Исследования показывают, что независимо от типа зубов (резец, клык, премоляр, моляр) и их конфигурации все они построены по одному принципу. Его суть — обеспечение выполнения определенных функций при условии однотипности принципов построения конструкции и набора материалов для ее создания. При этом обеспечиваются прочность и надежность конструкции, необходимой для функционирования организма.

Рассмотрим, какими средствами решаются поставленные задачи с точки зрения биомеханики.

Механическая прочность зуба обеспечивается за счет его оптимальной конструкции, в которой имеется высокопрочный тонкий поверхностный слой, предохраняющий костную ткань от действия "сосредоточенной", точечной нагрузки, причем прочность эмали обеспечивается на ультра-, микро- и макроуровне.

Костная ткань зуба — дентин имеет более плотную структуру, чем кости скелета. Дентин, покрытый слоем эмали, через дентинно-эмалевую границу воспринимает внешнюю нагрузку на зуб, образуя с эмалью на ультра- и микроуровне композитную гетерогенную волокнистую структуру, являющуюся демпфером при нагрузке на эмаль. При этом особенности строения дентина и эмали соответствуют их функциям.

Структура дентина более аморфна по сравнению с костной тканью и не имеет столь ярко выраженного, как у костей, каркаса, ячейки которого заполнены фрагментами более хрупкого материала. Это обусловлено прежде всего отсутствием необходимости в "оперативном" изменении структуры под действием внешних нагрузок.

В условиях вертикальной нагрузки твердые ткани зуба находятся под действием сжимающих напряжений, а клиновидная форма его корня с закругленной вершиной обеспечивает равномерное распределение внутренних сил по всей поверхности корня и альвеолы и по высоте, и по поперечному сечению. Волокна пародонта при вертикальной нагрузке находятся под действием растягивающих сил, а костные ламеллы челюстей — сжимающих напряжений. В ситуациях, когда коронка и корень зуба подвергаются изгибу, материал в его продольном сечении также распределен оптимальным образом. В средней части зуба, где в случае изгиба внутренние силы минимальны, располагается пульпа, обеспечивающая питание дентина и компенсацию внутренних напряжений. Максимальные внутренние силы действуют в периферийной части ткани зуба, и его прочность, прежде всего на растяжение, достаточна, чтобы обеспечить целостность зуба.

При подобных условиях работы важно, что эластические волокна в дентине расположены под углом 30—50° к вертикальной оси зуба. В этом же направлении действуют главные (растягивающие или сжимающие) напряжения.

Износостойкость рабочей поверхности твердых тканей зуба, а именно прочность и плотность, тесно связаны. Знание физических и морфофункциональных свойств твердых тканей зуба позволяет глубже понять механизмы их работы, которые могут изменить взгляды на восстановление эмали и дентина.

Наименее изученной физической характеристикой твердых тканей зубов является определение ее плотности. Плотность массы в механике определяется в ее единицах ( $\text{г/см}^3$ ) либо в относительных единицах одного из составляющих твердых тканей зубов. Плотность массы мы определяли по результатам сканирования, полученных в виде гистограмм в единицах плотности на различных уровнях и сечениях на различных уровнях с помощью метода микрорадиографии (рис. 1, на вклейке). Этот метод позволяет определять плотность массы или степень микроминерализации в сечении эмаль—дентин с разрешающей способностью до 0,05 мм. По результатам исследований мы получали гистограмму распределения плотностей заданного сечения зуба поверхностей эмали и дентина.

Результаты анализа гистограмм плотностей эмали и дентина одного и того же зуба в сечении наибольшей величины (область экватора) и плотности (в области шейки зуба) показали различные их значения в пределах исследуемых областей (экватор или шейка зуба).

Анализ гистограммы плотности эмали в поперечном сечении в области экватора зуба показал, что толщина эмали доходит до 1,45 мм (рис. 2, на вклейке). Показатели плотности колеблются от наружной поверхности зуба с максимальным значением от 11 400 до 5300 ЕД на границе с дентином, причем значения плотностей на всем протяжении эмали определяются в виде чередующихся, не менее 30, разноминерализованных полос, где наряду с высокими значениями определяется минимальная их величина в эмали с колебаниями в пределах 1200 ЕД и шагом в 0,05 мм.

Снаружи эмаль на толщину до 0,15 мм закрыта минеральным слоем с плотностью до 500 ЕД, мы полагаем, что это пиликула с минеральными и белковыми отложениями на гистограмме отмечена желтым цветом. С глубины 0,15 до 0,3 мм собственно в эмали значения плотностей резко возрастают до величины в 11 400 ЕД. На шлифах зуба это соответствует гомогенному слою эмали (рис. 3, на вклейке), на гистограмме он выделен темно-синим цветом. Причем в гомогенном поверхностном слое с глубины 0,15 до 0,3 мм значения плотности прямо пропорционально возрастают до максимальных (11 400 ЕД) с шагом 0,05 мм, от глубины 0,3 до 0,45 мм значения плотностей снижаются постепенно до значения 9400 ЕД. Поверхностный гомогенный слой эмали толщиной до 0,45 мм (см. рис. 2, 3) имеет зону перехода в основной базовый слой эмали на глубине 0,45—0,55 мм, который характеризуется тем, что в этой зоне происходит обратно пропорциональное постепенное снижение плотности эмали. На рис. 2 переход отмечен стрелкой.

Основной или базовый слой эмали на всем его протяжении (отмечен на рис. 2 голубым цветом), при его толщине от 0,45 до 1,45 мм определяется в виде различных разноминерализованных по плотности слоев, организованных по типу "сандвича" или "луковицы" с шагом в 0,05 мм и минерализацией с постепенным снижением значений плотности эмали до дентинно-эмалевой границе.

На глубине 1,45—1,50 мм в области перехода эмали в дентин (отмечено стрелкой) плотность эмали резко падает от величины 8350 до 4500 ЕД в области контакта с дентином. Затем в области дентина определяется подъем значений плотностей до 5650 ЕД на глубине 1,55 мм. Колебания величин плотностей дентина составляют от 5650 до 4500 ЕД с шагом плотностей 0,05 мм.

В результате сканирования эмали и дентина в области экватора зуба определяются равномерно чередующиеся разноминерализованные слои твердых тканей зуба с шагом в 0,05 мм, которые функционально организованы по типу "сандвича" или "луковицы", что позволяет им в достаточной степени компенсировать как жевательную нагрузку, так и температурные колебания.

Анализ гистограммы плотностей зуба в области его шейки показывает несколько иную картину (рис. 4, на вклейке). Эмаль снаружи на глубину до 0,1 мм покрыта пиликулой с величинами от 500 до 7300 ЕД. На глубине от 0,1 до 0,2 мм значения плотностей эмали резко возрастают до 15 750 ЕД. Затем идет плавный спад плотностей эмали от 0,2 мм до глубины 0,5 мм с величинами до 12 800 ЕД. От глубины 0,5 до 0,6 мм определяется резкий спад значений минерализа-

ции эмали до величины в 7500 ЕД. На глубине от 0,6 до 0,75 мм выявлена зона перехода эмали в дентин, имеющая более плавный вид, с величинами от 7500 до 7900 ЕД плотностей. В области дентина определяются полосы различной минерализации с шагом в 0,05 мм и величинами от 7300 до 7900 ЕД.

Анализ результатов сканирования твердых тканей зуба показал, что значения плотностей дентина и эмали различаются не только между собой, но и в пределах одного зуба. Так, в области экватора эмаль зуба толщиной до 1,45 мм имеет не менее 30 разноминерализованных слоев со значениями от 11 400 до 8350 ЕД. В то же время эмаль в области шейки зуба толщиной до 0,75 мм имеет только до 12 слоев с высокими значениями плотности от 7500 до 15 750 ЕД.

Аналогичные картины распределения плотностей и в дентине. В месте контакта эмали с дентином определяется резкий спад значений плотностей эмали в дентин, который затем постепенно повышается (см. рис. 2, 3, отмечено стрелками). Однако сама зона перехода эмали в дентин в области экватора зуба составляет 0,1 мм, а в области шейки зуба — 0,2 мм, имеющая более пологий вид.

Исследование показало, что природа не может быть расточительной, даже в пределах одного зуба. В построении твердых тканей зубов огромную роль играет функция. Нагрузка от окклюзионной поверхности зуба воспринимается в первую очередь эмалью, в которой определяется наибольшее (до 30) количество разноминерализованных слоев с шагом 0,05 мм. Задача этого слоя эмали — воспринимая, минимализировать напряжения и передать их на дентин. В области шейки зуба слоев эмали в 2 раза меньше (до 12), но с большей на 30% плотностью. Задача этого слоя эмали — восприятие напряжений и сохранения эмали зуба от растрескивания.

Сравнение значений плотностей между эмалью и дентином установило, что они достоверно различаются и эта величина составляет 1,7 раза. В то же время анализ механических свойств этих материалов показал значения, различающиеся между собой в 7—10 раз. Если бы плотность эмали и дентина значительно не различалась, а представляла собой однородный гомогенный слой, то в этом случае напряжения при нагрузке имели бы иной, некомпенсированный характер, приводящий к разрушению конструкции.

Полученные данные свидетельствуют о том что задача эмали состоит в восприятии жевательных и температурных нагрузок и передаче их на дентин, который

является основной структурой, в которой напряжения от эмали, активно воспринимаемые, перераспределяются и гасятся в коронковой и корневой частях дентина зуба независимо от его механических свойств. Об этом свидетельствуют структура и минеральный состав дентина, которые приспособлены в основном для работы на сжатие и лишь частично на растяжение.

Хотя дентин и эмаль являются гетерогенными белково-минеральными композиционными материалами, принципы их строения различны. В основе эмали — жесткий массивный каркас, хорошо противостоящий вертикальной нагрузке. Промежутки между кристаллами заполнены менее прочным гидратным и органическими веществами. Подобные системы обладают высокой прочностью, но не способны трансформироваться, расти, они ориентированы прежде всего на противостояние сжатию. По такой схеме изготавливают детали в технических устройствах. Дентин, как и кости скелета, состоит из пластичного каркаса, промежутки которого заполнены твердым веществом, что позволяет дентину расти, хотя изменения абсолютных размеров на порядок меньше, чем у костей скелета. Рост дентина ограничен эмалевым колпачком и цементом корня, поэтому он растет в сторону пульповой камеры. Дентин благодаря своему строению ориентирован как на растяжение, так и в большей степени на сжатие, т. е. передачу нагрузки от эмали на ткани пародонта.

Таким образом, твердые ткани зуба представляют собой многослойную систему, организованную по типу "сэндвича" или "луковицы", каждый из слоев имеет минеральную структуру, соответствующую действующим на него нагрузкам.

Результаты исследования показали:

- что твердые ткани зубов природой построены из одного белково-минерального материала, однако имеют различную структуру, что обуславливает различные механические характеристики: прочность эмали выше прочности дентина в 7—10 раз, однако модули упругости веществ, образующих твердые ткани зуба, при определенных условиях работы плавно изменяются таким образом, что напряжения и деформации при нагрузке на зубы не образуют паразитарных значений;
- твердые ткани зуба структурно разнородны, плотность эмали выше плотности дентина в 1,7 раза;
- минеральные и органические вещества, образующие твердые ткани зуба, отличаются друг от друга, что обусловлено их разными функциями и строением.



К ст. В. А. Загорского и соавт.

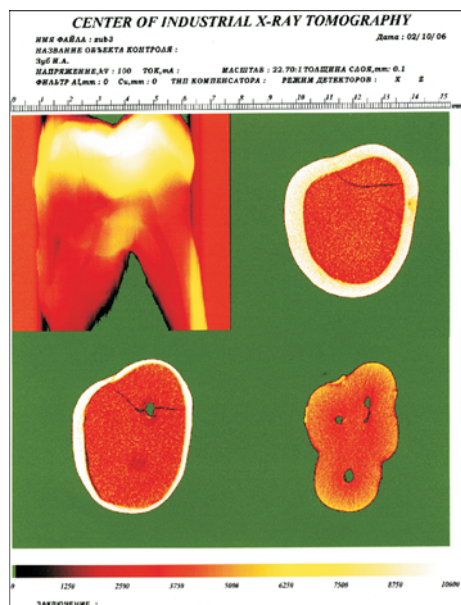


Рис. 1. Микрорадиограмма различных уровней зуба.

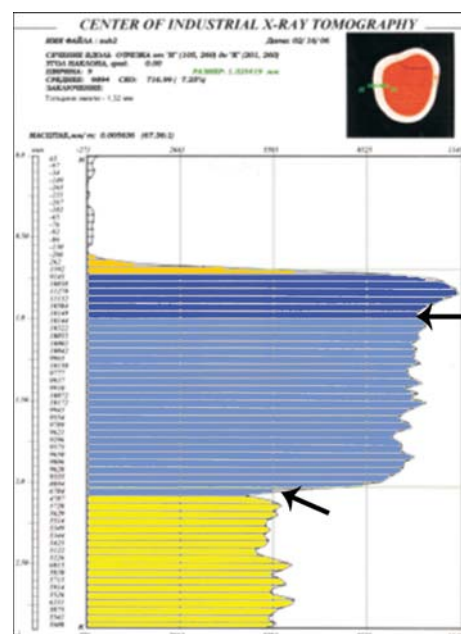


Рис. 2. Гистограмма сканирования твердых тканей зуба в области экватора. Оранжевым цветом отмечена пульпула, темно-синим — гомогенный поверхностный слой эмали, голубым — базовый слой эмали, желтым — дентин. Первая стрелка обозначает зону перехода поверхностного гомогенного слоя эмали в базовый слой, вторая — зону перехода эмали в дентин.

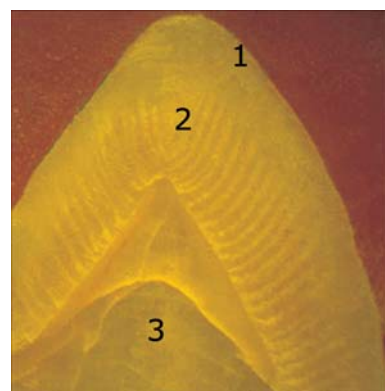


Рис. 3. Продольный шлиф зуба. 1 — гомогенный слой эмали, 2 — базовый слой эмали, 3 — дентин.

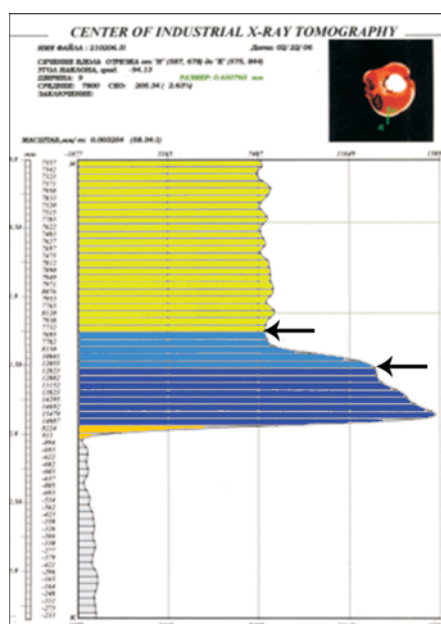


Рис. 4. Гистограмма сканирования твердых тканей зуба в области его шейки. Обозначения те же, что на рис. 2.

К ст. И. А. Шугайлова и соавт.

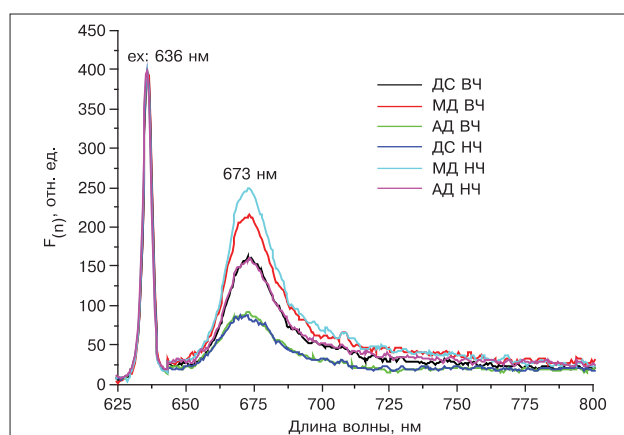


Рис. 1. Типичные спектры лазериндуцированной флюоресценции, измеренные в контрольных ВЧ и НЧ через 5 мин экспозиции ФС и его изоляции каплей. Спектры нормированы на величину обратного рассеянного в ткани сигнала возбуждающего лазерного излучения (636 нм).

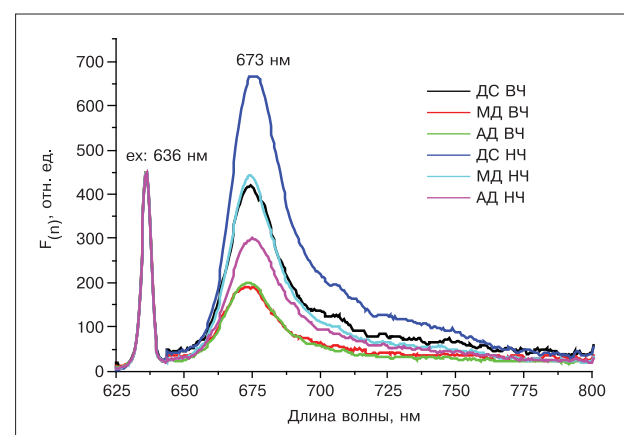


Рис. 2. Типичные спектры лазериндуцированной флюоресценции, измеренные в контрольных точках ВЧ и НЧ через 45 мин экспозиции ФС и его изоляции каплей. Спектры нормированы на величину обратного рассеянного в ткани сигнала возбуждающего лазерного излучения (636 нм).

К ст. В. А. Маланчука и соавт.

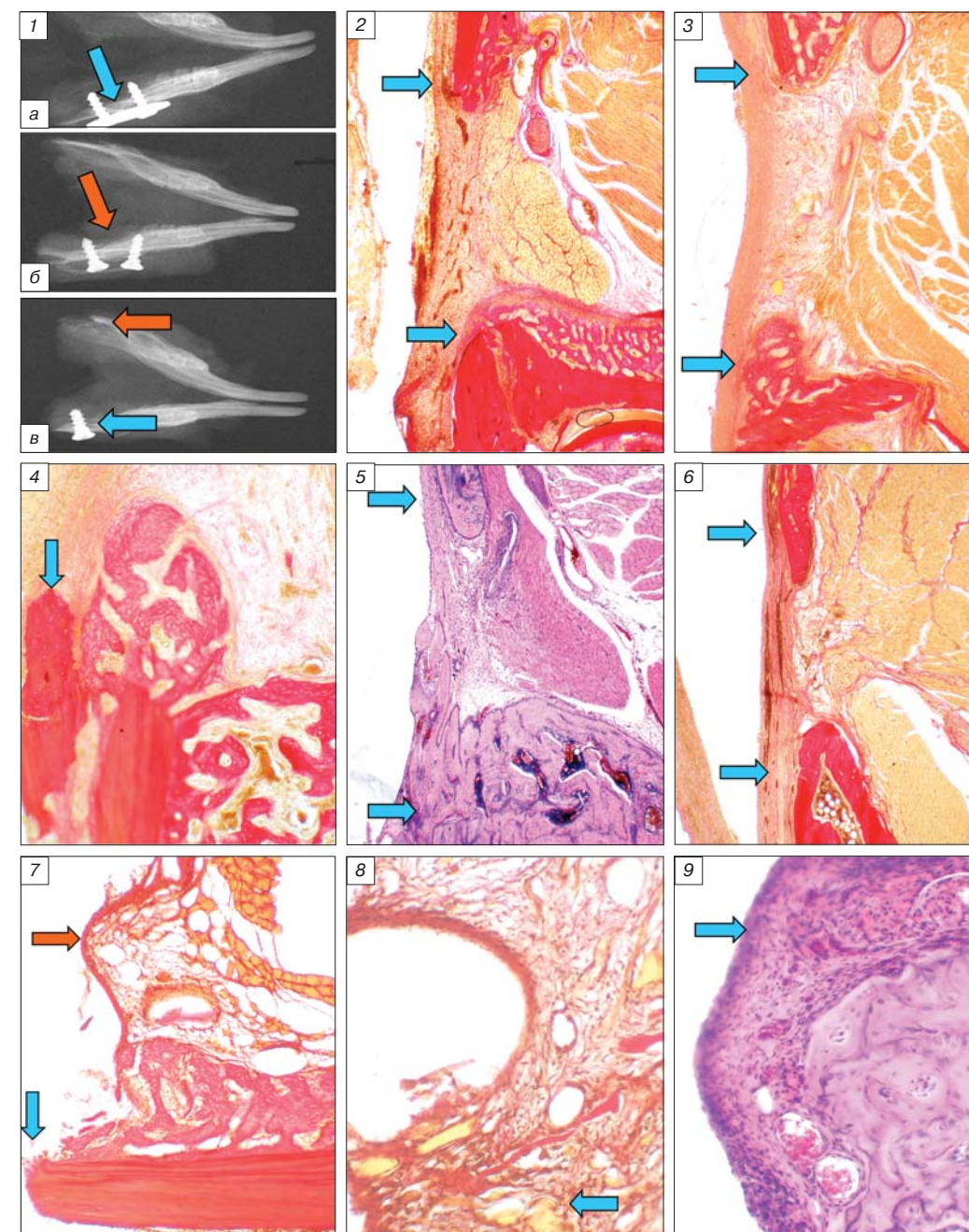


Рис. 1. На рентгенограммах: титановая пластина закреплена шурупами на латеральной поверхности нижней челюсти. Дырчатый дефект указан стрелкой. Срок наблюдения 14 сут (а); полиуретановая пластина закреплена шурупами на латеральной поверхности нижней челюсти. Дырчатый дефект указан стрелкой. Срок наблюдения 30 сут (б); титановый (синяя стрелка) и полиуретановый (не контрастируется, красная стрелка) шурупы в двух половинах нижней челюсти. Срок наблюдения 90 сут (в).

Рис. 2. Микрофотография гистопрепарата через 7 сут после имплантации пластины. По краям дырчатого дефекта (указано стрелками) располагаются незрелые костные регенераты, лишь незначительно закрывающие дефект; ложе титановой пластины слева. Окраска гематоксилином и пикрофуксином по ван Гизону. Здесь и на рис. 3, 5, 6: ув. микроскопа 4 (об.) × 5 (окр.), проекционное ув. 1,6; общее ув. 32.

Рис. 3. Микрофотография гистопрепарата через 7 сут после имплантации пластины. Частичное замещение дырчатого дефекта (края указаны стрелками) челюсти незрелой грануляционно-фиброзной тканью и незрелыми краевыми костными регенератами; ложе ПУ-пластины — слева. Окраска гематоксилином и пикрофуксином по ван Гизону.

Рис. 4. Микрофотография гистопрепарата через 14 сут после имплантации пластины. Частичное закрытие дырчатого дефекта челюсти костным регенератом под имплантированной ПУ-пластиной; кортекс края дефекта указан стрелкой. Окраска гематоксилином и пикрофуксином по ван Гизону. Здесь и на рис. 7, 11: ув. микроскопа 10 (об.) × 5 (окр.), проекционное ув. 1,6; общее ув. 80.

Рис. 5. Микрофотография гистопрепарата через 30 сут после имплантации пластины. Созревающий фиброзно-костный регенерат частично перекрывает дырчатый дефект челюсти, края дефекта обозначены стрелками, ложе титановой пластины слева. Окраска гематоксилином и эозином.

Рис. 6. Микрофотография гистопрепарата через 30 сут после имплантации пластины. Частичное, идущее с краев (указано стрелками) заполнение дефекта костными регенератами из зрелой костной ткани, ложе ПУ-пластины слева. Окраска гематоксилином и пикрофуксином по ван Гизону.

Рис. 7. Микрофотография гистопрепарата через 7 сут после имплантации шурупа. На медиальной поверхности некротизированного кортекса (указано синей стрелкой) нижней челюсти незрелый костный регенерат, который прилежит к тонкой соединительнотканной капсуле (указано красной стрелкой) титанового шурупа. Окраска гематоксилином и пикрофуксином по ван Гизону.

Рис. 8. Микрофотография гистопрепарата через 7 сут после имплантации шурупа. Капсула из незрелой соединительной ткани, прилежащей к ПУ-шурупу; стрелкой указаны гранулы ПУ. Окраска гематоксилином и пикрофуксином по ван Гизону. Здесь и на рис. 9, 10: ув. микроскопа 20 (об.) × 5 (окр.), проекционное ув. 1,6; общее ув. 160.

Рис. 9. Микрофотография гистопрепарата через 14 сут после имплантации шурупа. Капсула ПУ-шурупа построена из незрелой фиброзной ткани. Окраска гематоксилином и эозином.

К ст. В. А. Маланчука и соавт.

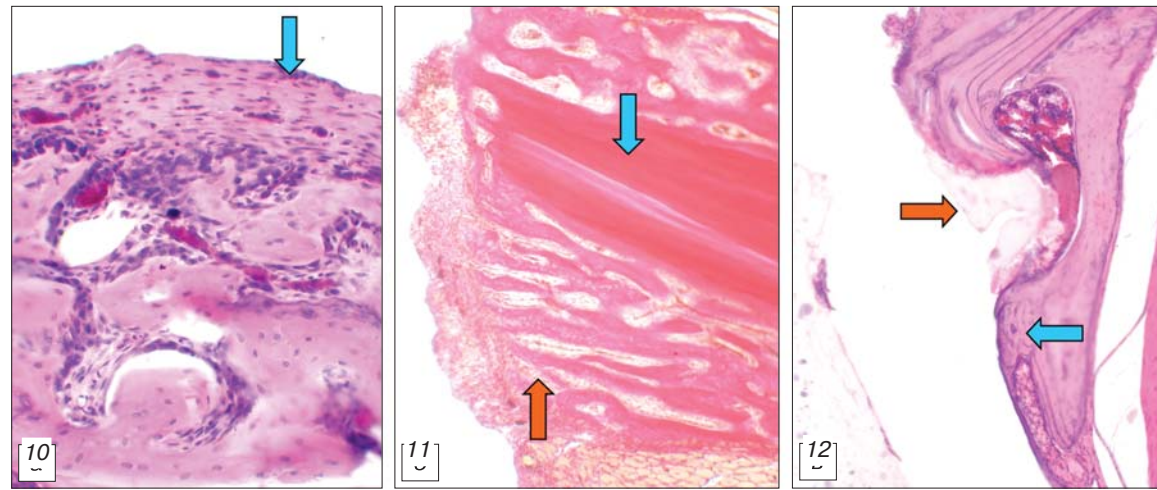


Рис. 10. Микрофотография гистопрепарата через 30 сут после имплантации шурупа. Признаки активного остеогенеза в участках костного регенерата, прилежащего к фиброзной капсуле титанового шурупа (указано стрелкой). Окраска гематоксилином и эозином.

Рис. 11. Микрофотография гистопрепарата через 30 сут после имплантации ПУ-шурупа. На обеих поверхностях кортекса нижней челюсти (указано синей стрелкой) располагаются высокие компактизирующиеся периостальные регенераты, кое-где с активным остеогенезом (указано красной стрелкой). Окраска гематоксилином и пикрофуксином по ван Гизону.

Рис. 12. Микрофотография гистопрепарата через 90 сут после имплантации шурупа. Участок зрелой костной ткани (указано синей стрелкой), прилежащий непосредственно к поверхности ПУ-шурупа (его фрагменты указаны красной стрелкой). Окраска гематоксилином и эозином. Ув. микроскопа 10 (об.) × 4 (окр.), проекционное ув. 1,6; общее ув. 64.

К ст. А. И. Неробеева и соавт.

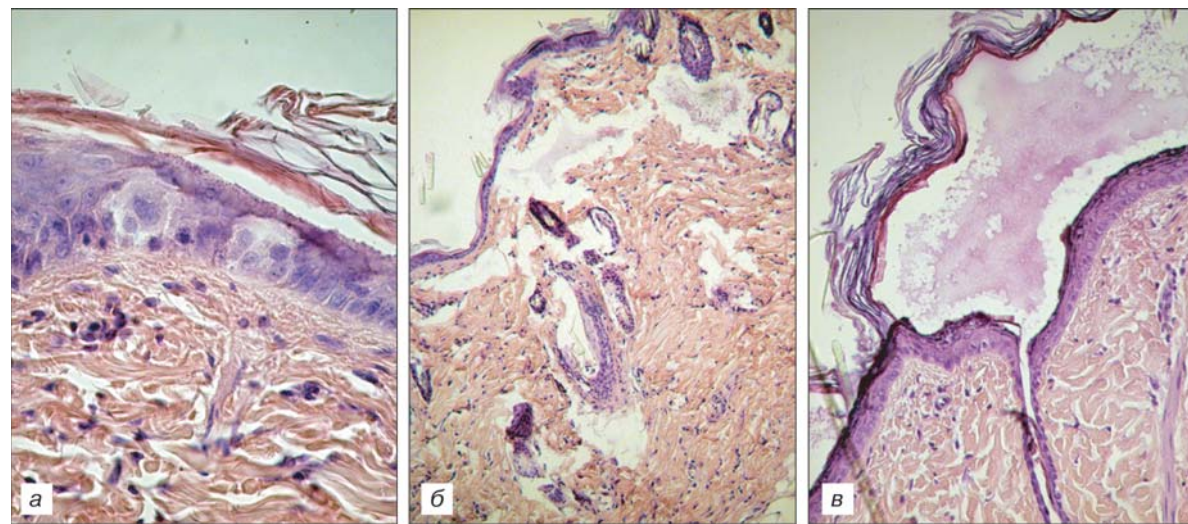


Рис. 1. Гистологическая картина изменений в коже на 3-и сутки после процедуры: а — при мощности 2 Вт, б — 3 Вт, в — 4 Вт.

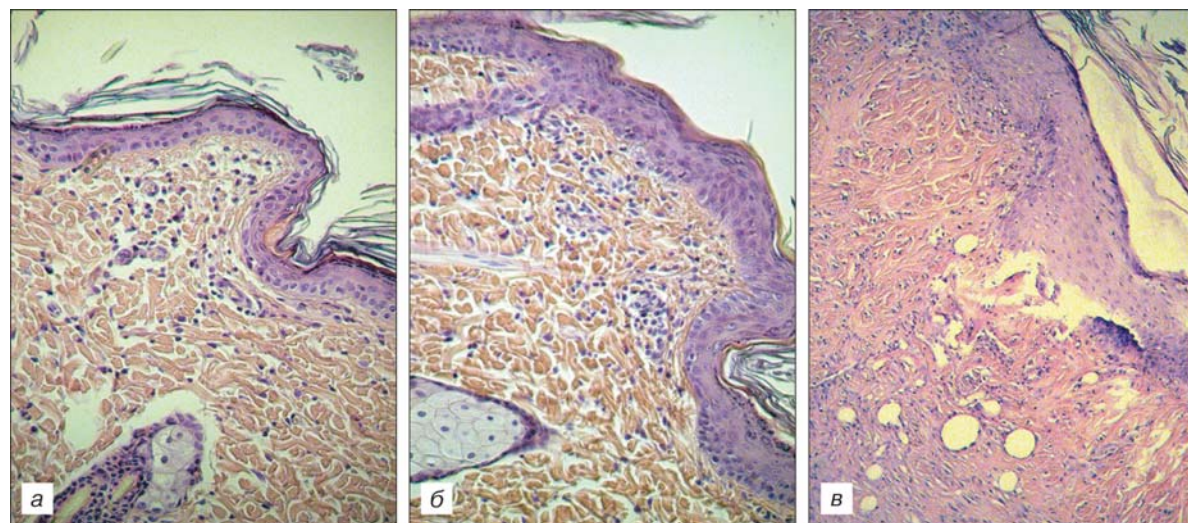


Рис. 2. Морфологические изменения в коже на 30-е сутки после RF-воздействия: а — при мощности 2 Вт, б — 3 Вт, в — 4 Вт.

К ст. А. И. Неробеева и соавт.

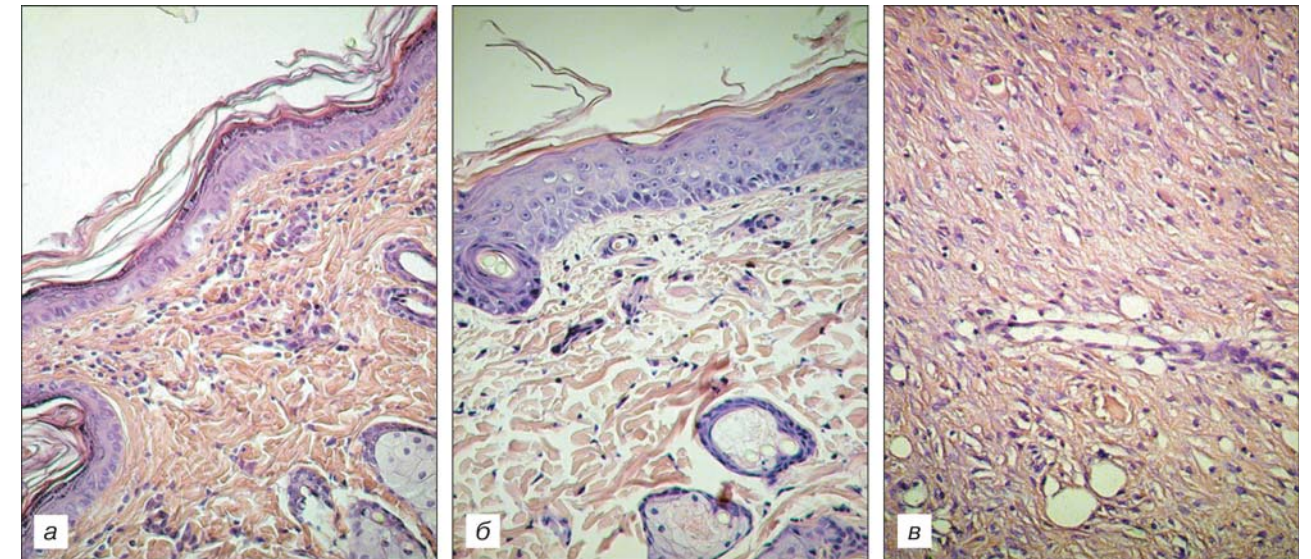


Рис. 3. Морфологические изменения в коже на 90-е сутки: а — при мощности 2 Вт, б — 3 Вт, в — 4 Вт.

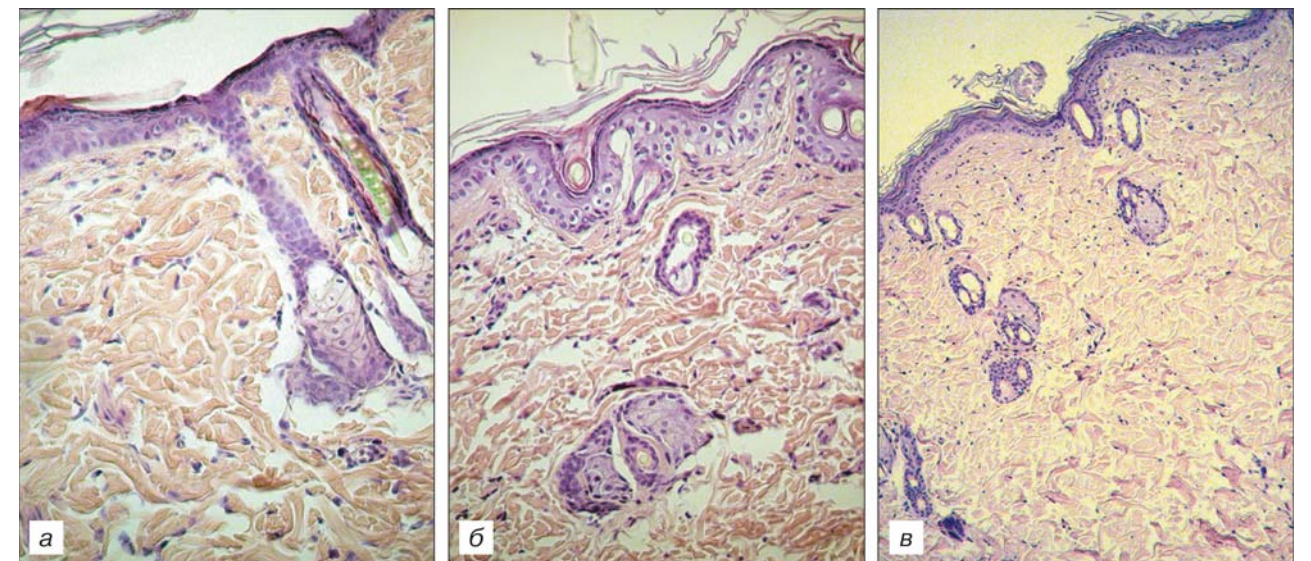


Рис. 4. Гистологическая картина на 180-е сутки после RF-воздействия: а — при мощности 2 Вт, б — 3 Вт, в — 4 Вт.

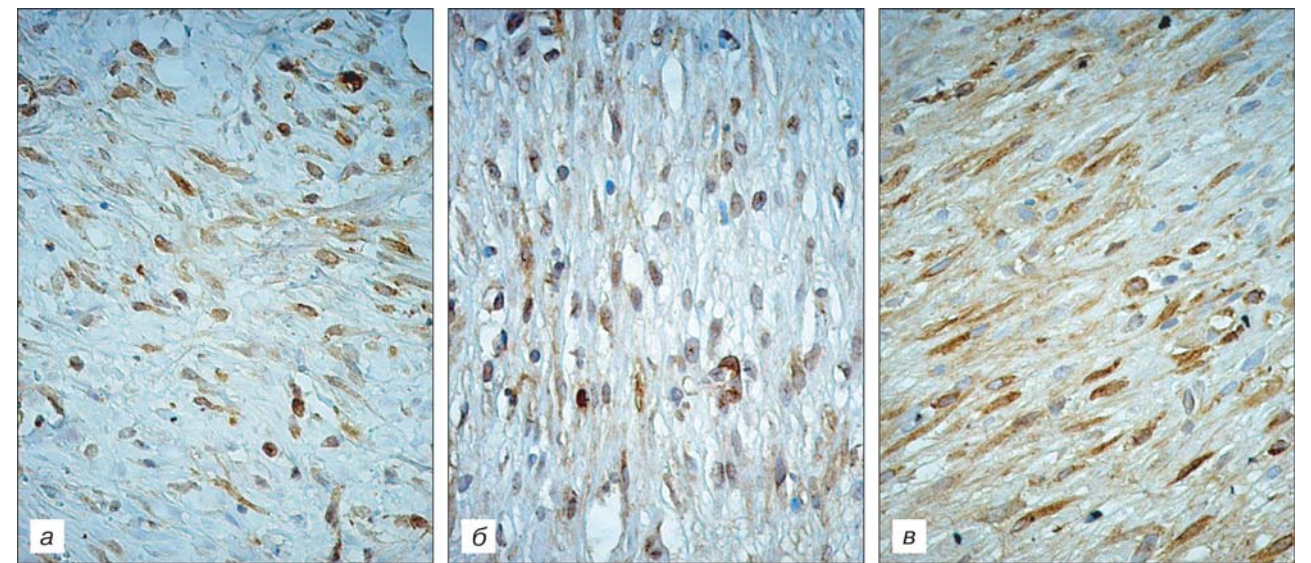


Рис. 5. Экспрессия в ткани маркеров Ki-67 (а), PCNA (моноклональных антител к ядерным антигенам клеточной пролиферации) (б) и SAM (гладкомышечного актина) (в).