

## Визуализация симметрии региональных зон дентина зуба моляра человека в поляризованном свете

© В.М. Золотарев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБУ Консультативно-диагностический центр с поликлиникой,  
197110 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: vm-zolotarev@mail.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023 г.

В окончательной редакции 20.10.2023 г.

Принята к публикации 29.11.2023 г.

В области региональных зон коронки дентина зуба моляра человека визуальным оптическим поляризационным методом изучена симметрия микроструктуры дентина. Показано, что дентинные трубочки в окрестности бугорков моляра организованы в виде пучков, которые зачастую обладают осевой симметрией. Оси симметрии пучков совпадают с соответствующими рогами пульпы и ориентированы в направлении центра бугорков коронки зуба. В пределах ростовых зон, формирующих бугорки, визуально обнаружены своеобразные оптические эффекты наподобие коноскопических фигур в виде „мальтийского креста“. Характер таких фигур свидетельствует об упорядоченном строении ростовых зон, сформированных из оптически анизотропных трубочек вокруг единого центра. Полученные оптическим методом данные хорошо коррелируют и информационно дополняют методы диффузии, основанные на окрашивании дентинных трубочек. Показано, что визуальный поляризационный оптический метод может быть использован для изучения разных типов организации микроструктуры дентинных трубочек.

**Ключевые слова:** симметрия, скрещенные поляризаторы, оптическая анизотропия, дентинные трубочки, ростовые зоны.

DOI: 10.61011/OS.2024.02.57780.5298-23

### Введение

Последние открытия, касающиеся механизма каскадной регуляции развития коренных зубов, формируют научную базу для понимания путей и механизмов эволюции формы и размера зуба у всех млекопитающих. Процесс роста зуба не только на генетическом, но и на функциональном (влияние типа пищи) уровне определяет жестко заданное в онтогенезе соотношение активатора и ингибитора, взаимодействие которых управляет этапами формирования и дифференциации эпителиальных и мезенхимальных ростовых клеток [1]. Таким образом, эволюция вида млекопитающего детерминирована в пределах заранее заданного диапазона разрешенных онтогенезом вариантов. Эти теоретические научные открытия недавно получили практическое подтверждение, которые показали принципиальную возможность замены утраченного зуба на его аналог, выращенный в пробирке [2]. В результате этих открытий все более активно обсуждаются возможности создания биоинженерных конструкторов — зубов с применением биоинженерных клеточных матриц (скэффолдов), которые вводятся с целью регенерации костей [3].

Терапия полной замены зубов считается привлекательной концепцией регенеративной терапии следующего поколения как формы биоинженерной замены органов. Для регенерации всего зуба разработан новый ме-

тод трехмерных манипуляций с клетками, получивший название „метод зачатков органов“ [2]. Этот метод имитирует многоклеточные условия сборки и эпителиально-мезенхимальные взаимодействия в органогенезе. Биоинженерный зубной зачаток создает структурно правильный зуб *in vitro*, который успешно прорезывается и развивается при пересадке в ротовую полость. Такая биоинженерная единица (структурный блок) состоит из сформировавшегося зуба, периодонтальной связки и альвеолярной кости и эта единица зуба была пересажена во взрослую челюстную кость путем интеграции кости [4]. Биоинженерные зубы также могли выполнять физиологические функции зубов, такие как жевание, функцию периодонтальной связки и реакцию на вредные раздражители.

В настоящее время ожидается, что регенеративная терапия зубов для восстановления тканей зуба и замены всего зуба станет новой терапевтической концепцией с полным восстановлением физиологических функций зуба. Вместе с тем практика формирования зуба с заранее заданными свойствами требует подготовительных исследований, что необходимо для управления механизмами его дентогенеза. Важными этапами изучения свойств искусственно выращиваемого зуба, характеризующих его качество, являются элементы симметрии и асимметрии зубных рядов, а также и отдельных составляющих такого ряда [5].

Исследования морфологических деталей внешнего вида коронки моляра показывают, что приводимые ниже фотоснимки (patterns) в скрещенных поляризаторах носят эвристический характер, позволяя анализировать вопросы развития и эволюции зуба [1] и, в частности, устанавливать соотношение между свойствами коронки моляра и его корней [6]. Незначительные вариации деталей формы коронки и количества корней зубов являются признаками, наиболее подверженными эволюционным изменениям. Коронка зуба также широко используется в качестве инструмента для установления принципов развития, связывающих генотип с фенотипом [7]. Таким образом, дополнительную информацию о свойствах и особенностях развития зуба может дать изучение особенностей элементов симметрии при формировании зуба [5].

Симметрия свойственна в целом природе [7–9], а у живых организмов она связана с приспособлением их к окружающему миру, с их жизнестойкостью [10–12]. Понятие симметрии и роль эволюции зуба в литературе рассмотрены на морфологическом уровне применительно к строению формы коронки моляра [5]. Существуют разные точки зрения на развитие и формирование типов зубов в процессе эволюции зуба из простой конической формы [5–7]. Свойства дентинных трубочек, на основе которых формируется зуб, подробно исследованы разными физическими методами [11–17], однако особенности взаимной организации дентинных трубочек, которые непосредственно участвуют в процессе роста дентина и тем самым определяют форму того или иного зуба с позиций симметрии, пока не рассмотрены. Цель настоящей работы — продемонстрировать с помощью оптического метода различия в симметрии ростовых центров, обусловленные особенностями структурной организации дентинных трубочек, формирующих коронку зуба моляра человека.

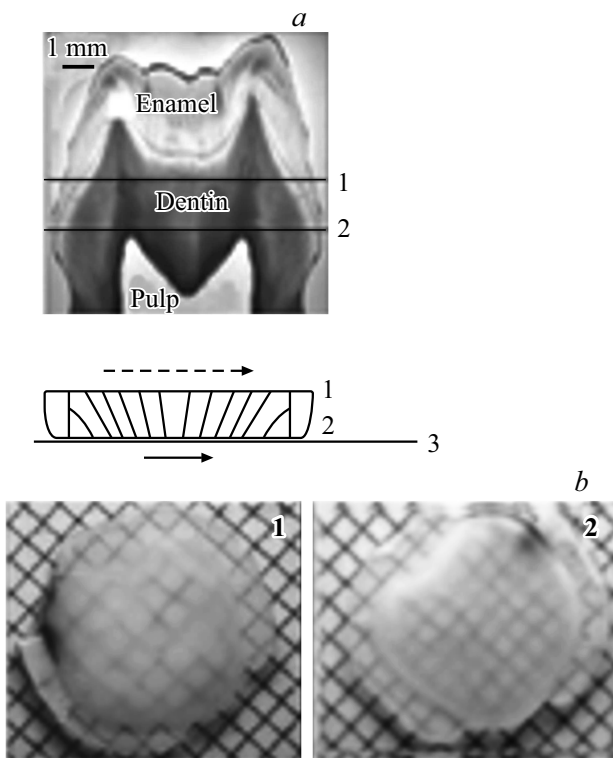
## Физические свойства и структура дентина

Структура дентина имеет сложное многоуровневое иерархическое строение и образовано микро- и наноструктурами из перитубулярного дентина (PTD), из которого сформированы непосредственно дентинные трубочки, и межтрубочатого дентина (ITD), который заполняет пространство между трубочками. Перитубулярный дентин представляет относительно плотную минерализованную ткань, окружающую каналцы коронкового дентина зуба. Он состоит в основном из нанокристаллов апатита вместе с небольшим количеством коллагена. Организация нанокристаллов PTD похожа на структуру прилежащего межтрубочатого дентина. Последний содержит относительно большое количество коллагена, а нанокристаллы апатита тесно связаны с коллагеновой матрицей. Считается, что граница между PTD и ITD однородна по структуре [18]. Дентинные трубочки

имеют S-образный ход от пульпы до дентино-эмалевого соединения (ДЭС). На своем протяжении к периферии они могут контактировать между собой за счет тонких боковых ответвлений. У дентино-эмалевого соединения дентинные трубочки заканчиваются Y-образным раздвоением [13–15]. Количество трубочек на единицу площади составляет около  $54000 \text{ mm}^{-2}$  во внутреннем дентине,  $30000 \text{ mm}^{-2}$  в среднем дентине и  $8000 \text{ mm}^{-2}$  во внешнем дентине. Диаметр трубочек составляет около  $1.9 \mu\text{m}$  во внутреннем дентине,  $1.4 \mu\text{m}$  в среднем дентине и  $1.2 \mu\text{m}$  в наружном дентине [19]. В полости многих трубочек находятся ростовые клетки в виде одонтобластных отростков, отвечающих за рост дентина. Эти клетки занимают большую часть пространства внутри трубочек и таким образом регулируют по системе микроотверстий движение трансудата — жидкости, находящейся в пульпе зуба. В трубочках присутствуют также нервные клетки, которые отвечают за реакцию на внешние раздражители. Одонтобластный отросток на протяжении  $50\text{--}160 \mu\text{m}$  сопровождается пучок нервных волокон, расположенных в вогнутостях поверхности отростка [20,21]. За чувствительность дентина отвечают нервные волокна типа А-бета и А-дельта, их окончания расположены в области пульпы-дентина зуба. Предложено несколько гипотез передачи раздражителей через дентин. К ним относятся прямая стимуляция нервов, дентинные рецепторы, гипотезы ионной диффузии и гидродинамическая гипотеза. Наиболее распространенным способом активации нервов, связанной с чувствительностью дентина, считается гидродинамический механизм [22–24]. Обильные поры и трещины в PTD свидетельствуют о том, что PTD не определяет прочность механической конструкции дентина. Основная роль PTD — транспортировка пульпарной жидкости через каналцы для поддержки жизнеспособности дентина в качестве биоткани [22].

Единство биологической основы дентина, характерное для млекопитающих, позволило распространить на животных модельное изучение ряда свойств зуба в режимах *in vitro* и *in vivo* и сопоставить их со свойствами зуба человека [25–27]. В частности, в ряде работ отмечается, что по ряду показателей (форма, размеры коронки) моляры зуба человека могут быть сопоставлены с коренными зубами свиньи (большой размер, толстая эмаль, форма коронки). Однако по сравнению с зубами человека коренные зубы свиней развиваются значительно быстрее. В силу различия свойств региональных зон зуба моляра исследования зачастую проводятся специально в области определенного бугорка на большом количестве подопытных объектов [20,25–27]. Поэтому зубы домашних свиней представляют собой удобную модельную биосистему для решения практических задач одонтологии, а также для изучения процесса биоминерализации зуба человека [28–31].

Особенности биологического материала — дентина, из которого формируется зуб, связаны с анизотропией дентина, что обусловлено свойствами самих трубочек. Анизотропия трубочек и их структурная организация



**Рис. 1.** (а) Вертикальное сечение зуба моляра, показывающее плоскости 1–2 шлифа (вверху), и схема, показывающая ход дентинных канальцев и контакт плоскости 2 шлифа с тест-объектом 3 (внизу); стрелками показано изменение размеров визуального изображения при наложении плоскости 2 шлифа на тест-объект; сплошная стрелка обозначает размер изображения тест-объекта без шлифа, штриховая стрелка обозначает размер изображения тест-объекта, находящегося в контакте со шлифом. (б) Фото: 1 — плоскость шлифа 2 в контакте с тест-объектом, 2 — плоскость шлифа 1 в контакте с тест-объектом.

приводят к анизотропии целого ряда свойств зуба: проницаемости и чувствительности [16,32], а также оптических [33–40], механических [41,42] и электрических свойств [43,44]. Дентинные трубочки можно уподобить одноосным кристаллам, по свойствам близким гидроксипатиту (ГАП). Кристаллы ГАП имеют гексагональный тип сингонии, оптически одноосные, отрицательные. Оптическая ось ГАП совпадает с кристаллографической осью (с), которая направлена вдоль наибольшего размера — оси длинника кристалла.

Нанокристаллы ГАП, входящего в структуру перитубулярного дентина человека, имеют среднюю длину  $36 \pm 2$  nm, ширину  $26 \pm 1$  nm и толщину  $9.8 \pm 0.7$  nm. Они состоят из пластинок со средним отношением ширины к толщине 2.61, каждая из которых представляет собой уплощенную шестиугольную призму. Длинник нанокристалла ГАП ориентирован вдоль оси дентинной трубочки. Упорядоченность укладки отдельных нанокристаллов ГАП внутри трубочки определяет оптические свойства трубочек в виде совокупности одноосных нанокристаллов. Оптическая ось ГАП

направлена вдоль оси трубочек. Среднее значение показателя преломления дентина  $n^1 = 1.50 \pm 0.02$  [45], двулучепреломление  $\Delta n = n_e - n_o = 0.005$ . Природные кристаллы имеют небольшой дихроизм, придающий кристаллам желтоватую окраску. Поскольку относительный показатель преломления трубочек  $n = n_{\text{ГДР}}/n_{\text{РГД}} = (1.45-1.5)/1.59 < 1$ , при освещении торцов дентинных трубочек под скользящим углом падения свет будет распространяться вдоль трубочек в условиях полного внутреннего отражения. Шлиф, вырезанный из коронки моляра (сечение, перпендикулярное оси зуба), по свойствам подобен волоконно-оптическому фокусирующему конусу, изготовленному из стеклянных волокон. Пластика в виде шлифа, сформированная из пучка дентинных трубочек, работает в качестве концентратора света. Такая система имеет малую угловую апертуру, которая передает с разным увеличением/уменьшением изображение тест-объекта (рис. 1). Тест-объект представляет клетчатую бумагу с размером клетки  $1 \times 1$  mm.

На увеличительные свойства в разных участках шлифа зуба влияют особенности наклона трубочек в региональных зонах шлифа [34,39–42]. При освещении шлифа неполяризованным светом интенсивный фон, связанный с рассеянием, является помехой для визуального изучения локальных неоднородностей. Для уменьшения фона при изучении оптических свойств анизотропных дисперсных систем, какими являются трубочки, полезно использовать поляризованный свет. Взаимодействие поляризованного света с упорядоченными структурными зонами шлифа в виде конусовидных фигур позволяет экспериментально визуализировать особенности симметрии для региональных зон шлифа. Это дает дополнительные сведения для изучения формирования формы коронки зуба и проясняет способность шлифа зуба увеличивать/уменьшать элементы оптического изображения [36].

## Подготовка образцов

Объектами исследования являлись 36 интактных зубов — вторые и третьи моляры верхней и нижней челюсти, удаленные у пациентов по ортодонтическим показаниям. Средний размер коронки второго моляра  $9.4 \pm 0.2$  и  $10.2 \pm 0.2$  mm для верхней и нижней челюстей соответственно. Средний размер коронки третьего моляра практически не отличался от размера второго моляра. Образцы зубов не имели кариозных и некариозных дефектов. Образцы были изготовлены для двух сечений, когда плоскость шлифа перпендикулярна (горизонтальное сечение) и параллельна (вертикальное сечение) оси зуба. После удаления и фиксации в 40%-растворе формалина из образцов готовили шлифы в виде плоскопараллельных пластинок толщиной  $\sim 1000 \mu\text{m}$  [35,36]. Часть образцов моляров готовилась путем ориентации вертикального сечения шлифа, проходящего через вер-

шины бугров зуба (мезио-окклюзо-дистального). Шлифы зубов, указанные в статье, подготовлены доктором медицинских наук В.Н. Грисимовым.

## Обоснование поляризационного метода

При упорядоченной укладке анизотропных дентинных трубочек вокруг центра в окрестности локальных региональных зон такие участки зуба будут обладать осевой симметрией. Наличие общего центра у системы упорядоченных волноводов, какой является пучок дентинных трубочек, можно визуализировать с помощью оптического метода на основе скрещенных поляризаторов. При прохождении линейно поляризованного света вдоль оси пучка сдвиг фаз при прохождении света через пучок будет зависеть от наклона трубочек относительно оси пучка. Свет при прохождении пучка с осевой симметрией расположения трубочек будет периодически гаситься поляризатором (анализатором) и в результате можно будет визуализировать систему концентрических светлых и темных колец, пересеченных темным крестом. Диаметр колец зависит от толщины шлифа и структуры укладки трубочек в пучке, что отражается в деталях симметрии-асимметрии визуализированных картин.

Подробное описание и схема экспериментальной установки на основе скрещенных поляризаторов изложены в работе [27]. Для исследований используются тонкие шлифы в боксе с влажной средой, который помещается между поляризатором и анализатором. Оптимальная ориентация шлифа устанавливается визуально таким образом, чтобы вектор поляризации падающего света совпадал с плоскостью, проходящей через ось конуса в зоне бугра и вертикалью, восстановленной в центре конуса. Воспроизводимость визуальных наблюдений конкретных образцов шлифа достигается путем фиксации положения шлифа относительно вектора  $E$  поляризованного света на выходе поляризатора. С этой целью на шлифе ставится метка (например, сколы на образце), положение которой достаточно установить в пределах  $\pm 2^\circ$ .

Воспроизводимость фото для разных образцов шлифов зависит от индивидуальных особенностей строения зуба того или иного пациента и определяется строением микроструктуры дентинных трубочек в региональных участках коронки конкретного зуба. При сопоставлении фото для 36 образцов моляров было отмечено, что для небольшого количества образцов ( $\sim 7\%$ ) в соответствующих региональных зонах, размер которых составляет  $\sim 1-1.5$  mm, характерные типичные картины изображений (крестики и концентрические кольца) практически вообще не наблюдались. Это свидетельствует о пространственно неупорядоченном и непрямолинейном (извилистом) ходе дентинных трубочек в этих зонах. Для  $\sim 75\%$  образцов в региональных локальных зонах шлифов наблюдались типичные изображения: для второго моляра 4(3) крестика и для третьего моляра 5(4) крестика. Для отдельных образцов крестики имели об-

рамления в виде концентрических колец, контрастность такой картины снижалась по мере удаления от центра перекрестия. Поскольку природа происхождения типичного визуализированного изображения в виде крестиков определяется микроструктурой дентинных трубочек, это дает основания для сравнения этих структур при изучении разных зубов. Например, в работах [27,36-38] сопоставлены фото локальных зон моляров и премоляров. Для визуализации фото шлифа коронки зуба необходимо изготовление тонких шлифов, что ограничивает область применения оптического поляризационного метода. Специфика метода скрещенных поляризаторов связана с сильным ослаблением света, проходящего через шлиф, особенно когда строение образца однородно. В этом случае контраст наблюдаемого изображения заметно снижается. Накладываются также ограничения на исследование старых зубов, поскольку шлифы таких зубов обычно имеют низкую прозрачность и сильно рассеивают свет, что снижает контраст наблюдаемой картины. Вместе с тем высокая чувствительность этого метода, позволяющая на основе анализа нарушения симметрии изображений изучать особенности роста зуба, делает поляризационный метод важным дополнением к другим методам исследования.

## Метод диффузии

Для определения проницаемости шлифов используются ионы красителей, которые под внешним гидравлическим давлением диффундируют внутри дентинных канальцев [32,46-48]. Проницаемость трубочек — это способность транспортировки пульпарной жидкости, которая участвует в биогенезисе зуба. Проницаемость дентина в первую очередь зависит от толщины дентина внутри шлифа (т.е. длины канальцев) и диаметра канальцев. Поскольку каналы короче, многочисленнее и имеют больший диаметр ближе к пульпе, глубинный дентин является менее эффективным пульповым барьером по сравнению с поверхностным дентином.

Региональные различия в проницаемости дентина наблюдаются на периферии с высокими значениями вблизи дентино-эмалевого слоя (ДЭС) и низкими в центре шлифа коронки. Гидравлическая проводимость дентина в радиальном направлении от центра шлифа уменьшается по мере удаления от пульпы и увеличения толщины дентина. Проницаемость дентина может варьировать в 3-10 раз в пределах нескольких миллиметров в разных региональных зонах зуба [46-48].

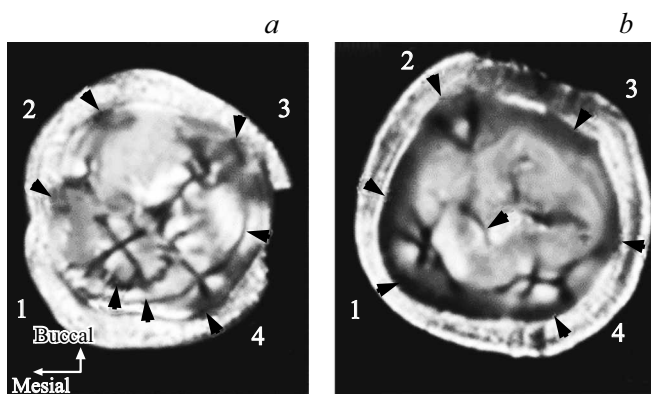
Изображения типов фигур (patterns) при специальном окрашивании шлифов наблюдались довольно давно, но единой классификации таких зон пока не предложено. В виде примера можно указать на общее разделение таких структур в виде локальных текстурных и глобальных особенностей [46]. Поэтому для дальнейшего изучения региональных (локальных) свойств зуба важным является выявление особенностей структурной организации

трубочек. В связи с этим актуально применение разных методов, которые в информационном плане дополняют друг друга.

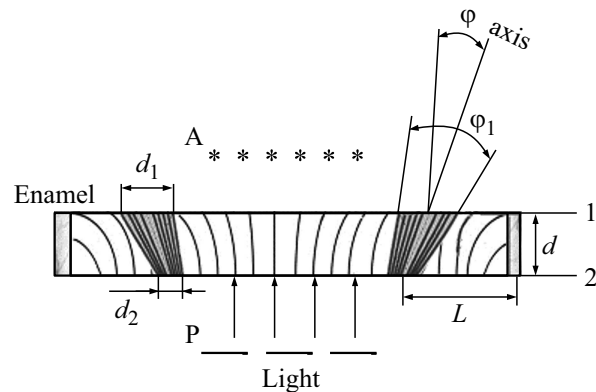
## Результаты

Визуальные наблюдения структуры шлифа коронки зуба при помощи скрещенных поляризаторов позволяют получить дополнительную информацию о свойствах объекта. Особенности региональной структуры шлифа коронки моляра в полной мере отвечают свойствам patterns, что позволяет сопоставлять его с подобными структурами, получаемыми другими методами. В качестве примера можно сравнить patterns, полученные двумя разными методами: оптическим (в скрещенных поляризаторах) (рис. 2) и диффузии ионов (рис. 6) [16,32,46–48].

Типы фигур, получаемых визуальным оптическим поляризационным методом, демонстрируют элементы симметрии фигур преимущественно в виде деформированных крестиков. Форма крестиков отображает особенности структуры региональных зон шлифа. Размеры крестиков коррелируют с высотой бугорков зуба. Эти данные хорошо дополняют patterns, полученные методом диффузии и отображающие проницаемость дентинных трубочек для окрашенной жидкости в разных зонах шлифа. При схематическом изображении расположения дентинных трубочек принято структурную организацию трубочек представлять в виде совокупности трубочек с симметричным расположением относительно центра пучка. В работе [49] показано, что большинство трубочек не отходят под прямым углом от ДЭС. Трубочки всегда существенно меняют свою ориентацию вблизи ДЭС как



**Рис. 2.** Фото (patterns) шлифа, полученное на пропускание в скрещенных поляризаторах для двух вторых моляров (*a, b*), вырезанных поперек оси зуба (горизонтальное сечение). Схема получения фотоснимков показана на рис. 3. Обозначения: mesial — мезиальная поверхность, buccal — вестибулярная (щечная) поверхность, 1–4 — области бугорков (ростовые зоны моляра). Стрелками указаны „темные“ линии и „затемненные“ зоны в окрестности бугорков. „Темные“ линии характерны для рисунка *a*, тогда как „затемненные“ зоны более типичны для рисунка *b*.

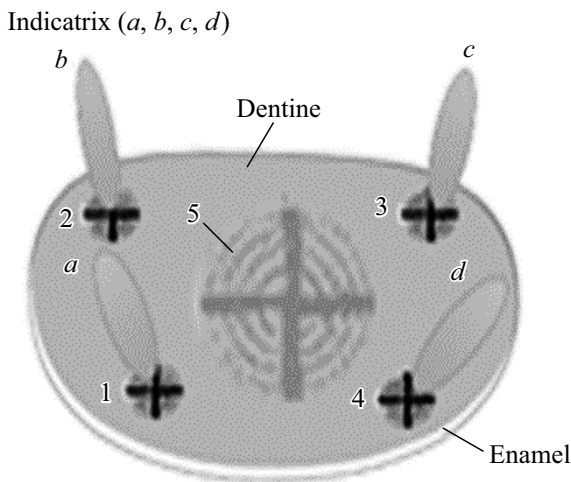


**Рис. 3.** Схема эксперимента и структура осесимметричной укладки дентинных трубочек для горизонтального сечения шлифа в области бугорков коронки зуба моляра: 1 и 2 — плоскости шлифа (рис. 1),  $d$  — толщина шлифа,  $L$  — расстояние между осью пучка дентинных трубочек и внешней границей эмали,  $\varphi$  — угол наклона оси пучка из трубочек,  $\varphi_1$  — угол створа пучка,  $d_1$  — диаметр пучка в области бугорка для плоскости 1,  $d_2$  — диаметр пучка в области бугорка для плоскости 2. Стрелками и звездочками обозначены положения Е-векторов поляризации при освещении шлифа. P — поляризатор, A — анализатор. Направление падения света со стороны P, наблюдение ведется со стороны A.

на щечных, так и на язычных сторонах премоляров и моляров. Трубочки также имеют тенденцию скручиваться в этой зоне. При этом трубочки для зубов нижней челюсти имеют наклон относительно нормали в направлении к ДЭС со средним углом  $42^\circ$ , тогда для верхних зубов трубочки показывают угол наклона  $32^\circ$  [49]. Свойства трубочек и их размер связаны с проницаемостью для жидкости и чувствительностью дентина. Наибольшие структурные различия наблюдаются в области коронки моляра, где дентин проницаем сильнее, чем в области корня зуба. Поэтому при визуальном сравнении свойств дентина, полученных при использовании поляризационного оптического метода и другими методами, целесообразно выделять ориентацию вектора E поляризации светового пучка.

### Сечение шлифа перпендикулярно оси зуба (вектор E поляризатора параллелен плоскости шлифа)

При освещении шлифа моляра рассматриваемой ориентации в параллельном пучке света с использованием скрещенных поляризаторов изредка удается наблюдать в центре шлифа отдельные детали в виде фрагментов большого „мальтийского креста“ [36]. Однако более яркие и характерные фигуры типа „мальтийского креста“ меньшего размера намного чаще можно наблюдать для моляра не в центре шлифа, а у границы ДЭС. Здесь находятся осветленные зоны, которые контрастируют с более темным фоном для центра шлифа [36–38].



**Рис. 4.** Модель шлифа моляра с регулярной укладкой трубочек относительно оси пучка из дентинных трубочек в зоне бугорков (1–4) и в центре шлифа (5). Показаны индикатрисы яркости (*a, b, c, d*) соответственно в каждой зоне для бугорков (1–4). Индикатриса яркости в центре намного слабее и не представлена. Схема освещения шлифа поляризованным светом показана на рис. 3.

**Светлые зоны** На фото шлифа зуба (рис. 2) видны светлые зоны роста в области бугорков зуба моляра, которые зачастую обрамлены сравнительно узкими темными линиями. Светлые зоны обусловлены совокупностью изолированных дентинных трубочек, организованных в виде конуса с осью, направленной из пульпы зуба и проходящей через вершину бугорка зуба (рис. 3).

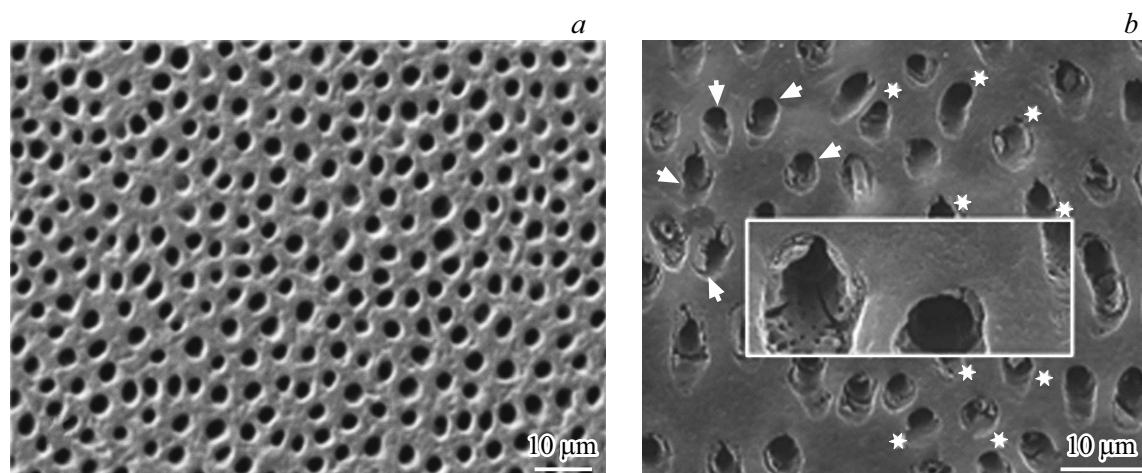
Яркость зон с фигурами в виде крестов заметно отличается от общего желто-зеленого фона и обычно наиболее интенсивна в области бугорков (рис. 2, *a*). Световые пучки, распространяющиеся вдоль трубочек, для этих ярких небольших зон имеет малую апертуру, а оси этих зон составляют угол  $\sim 25^\circ$  с нормалью к поверхности шлифа. Яркость отдельной зоны сильно растёт, если наблюдать вдоль оси пучка. Для отдельных объектов изредка в центре шлифа можно заметить фигуру с низким контрастом в виде элементов „мальтийского креста“ большего, чем размеры аналогичных фигур в области ярких региональных зон, которые расположены в области бугорков моляра (рис. 4). Первые визуальные наблюдения в скрещенных поляризаторах [36] позволили впервые наблюдать в центре шлифа фрагменты мало контрастного большого ( $\sim 4\text{--}6\text{ мм}$ ) „мальтийского креста“ внутри квадрантов 2, 3 с рядом концентрических светлых и темных колец, что говорит об одноосной симметрии трубочек в центре шлифа моляра. Такие образцы с фрагментами большого „мальтийского креста“ в центре шлифа изредка встречались при наших исследованиях. Тем не менее все эти данные показывают на наличие элементов симметрии при формировании пучка трубочек в центре шлифа.

Особенности наблюдаемых фигур (симметрия–асимметрия) для шлифа коронки зуба связаны с нарушением системной ориентации трубочек в региональных ростовых зонах, формирующих бугорки зуба. Некоторые трубочки имеют S-образную конфигурацию и в разных участках коронки отличаются изгибом. Изгиб трубочек в области центра коронки (фиссура) принято изображать в виде стохастических изогнутых ветвей, расходящихся от центра. В отличие от такой укладки, характерной для центра зуба, в области бугров моляров трубочки располагаются системно внутри относительно узкого конического пучка. Такая укладка трубочек позволяет наблюдать фигуры с элементами симметрии (рис. 2). На диаграмме для модели шлифа зуба (рис. 4) показано, что оси, соответствующие пучкам трубочек из разных ростовых зон второго моляра, сходятся в области пульпы зуба [27]. Разный наклон трубочек в центральной части зуба и в окрестности ростовых зон бугров моляра приводит к оптическим эффектам, связанным с деформацией фигур в виде крестов (рис. 2). В частности, различия регионального (локального) наклона трубочек по отношению к плоскости шлифа приводят к неравномерности свойств увеличения элементов тестового изображения (рис. 1) [32,37–40].

Области различий структурной организации трубочек в отдельных частях коронки зуба широко наблюдались и ранее с помощью сканирующей электронной микроскопии [19,50–52]. В этих работах основное внимание сосредоточивалось на численных характеристиках дентина (диаметр трубочек, плотность на единицу площади, зависимость трубочек от расстояния до пульпы и др.). Между тем в ряде работ [25,53] содержатся сведения, которые указывают на специфические признаки структурной организации. Например, для локальной области шлифа зуба стрелками на рис. 5, *b* показана связь ориентировки трубочек с эллиптическим сечением в зависимости от их азимута [25].

На рис. 5, *b* можно заметить, что вокруг условного центра ( $\sim 15\ \mu\text{м}$ ), обозначенного стрелками, видны чередующиеся концентрические последовательности трубочек с явными признаками организации [25]. Такая системность структуры трубочек указывает на наличие центра внутри такой композиции.

**„Темные“ линии и „затемненные“ зоны** Для процесса формирования зуба существенное значение имеют так называемые „темные“ линии и „затемненные“ зоны, которые указаны стрелками на patterns (рис. 2). Темные линии и затемненные зоны по преимуществу группируются между ДЭС и основной ростовой зоной в центре бугорка. Протяженные темные линии формируются близко расположенными пучками малого диаметра ( $\sim 100\text{--}350\ \mu\text{м}$ ), состоящими из дентинных трубочек с углом конуса  $\varphi_1 \leq 1^\circ$  (таблица). Эти узкие пучки образованы системой практически параллельных анизот-



**Рис. 5.** Снимки дентина, метод электронной сканирующей микроскопии [25]. (а) Поверхность дентина зуба человека после шлифовки и механической полировки, дополнительно полирована ионным пучком (FIB) [50]. (б) Полированная поверхность дентина резца быка в окрестности зоны роста. Стрелки показывают ограниченную область, которая представляет локальную зону, вокруг которой формируется упорядоченная структура, симметричная относительно условного центра (локальной зоны), образованная отдельными дентинными трубочками. Положение центра локальной зоны, имеющей форму эллипса, определяется точкой пересечения его осей. Звездочками показаны трубочки, концентрирующиеся вокруг центра локальной зоны. Выделенный прямоугольный фрагмент с увеличением  $3\times$  по сравнению с основным снимком показывает наличие мелких отверстий внутри РТД в отличие от ИТД.

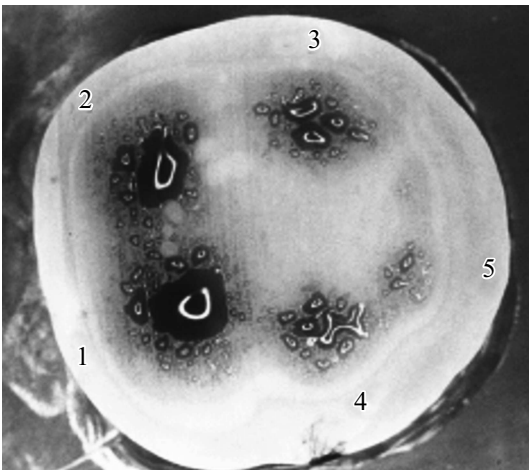
Морфометрические характеристики шлифа коронки моляра человека по данным оптических, диффузии ионов [32] и электрометрических измерений [43–44]

Номера бугорков	Площадь зоны роста/площадь сечения шлифа, arb.units		Наибольший линейный размер основной зоны роста/сечения шлифа, arb. units			Диаметр внутреннего (разомкнутого) кольца/диаметр основной зоны роста, arb. units	Толщина внутреннего (разомкнутого) кольца, $\mu\text{m}$	Параметры ростовых зон в окрестности бугорка		
	Методы исследования		Методы исследования			Диффузия ионов		Оптический	Диффузия ионов	
	Оптический	Диффузии ионов	Оптический	Диффузии ионов	Электрометрический	Мелкие/Крупные зоны	Основная зона роста	Число крупных зон	Число крупных и мелких зон	Диаметр мелкой зоны $\mu\text{m}$
1	0.045	0.025–0.048	0.24	0.16	$\sim 0.18$	$\geq 0.50/0.45$	$\sim 80$	1	$1-\geq 10$	$\sim 350$
2	0.026	0.016–0.025	0.16	0.14	$\sim 0.16$	$\geq 0.50/0.45$	$\sim 41$	1	$1-\geq 10$	$\sim 350$
3	0.020	0.015–0.020	0.14	0.10	$\sim 0.14$	$\geq 0.50/0.40$	$\sim 20$	2	$3-\sim 11$	$\sim 200$
4	0.010	0.010–0.018	0.10	0.08	$\sim 0.14$	$\geq 0.50/0.41$	$\leq 15$	2	$1-\sim 12$	$\sim 200$
5	–	$\leq 0.01$	–	$\leq 0.1$	–	$\geq 0.50/0.45$	$\leq 8$	–	$0-\sim 4$	$\sim 100$

*Примечание.* В качестве примера в таблице для двух индивидуальных образцов приведены ориентировочные параметры, вычисленные на основе оптических и электрометрических измерений [43–44] для второго моляра и диффузии ионов (для третьего моляра) [32]. Для метода диффузии ионов оценка параметров 3–5 зон моляра, которые сформированы рядом отдельных более мелких зон, проводилась путем усреднения размеров этих малых зон. Оценка площади зон роста (arb. units) для метода диффузии ионов дана для двух предельных случаев: наименьшая площадь соответствует области основной зоны — локальной зоны с максимальным почернением (рис. 6), а наибольшая площадь соответствует области, включающей соседствующие с зоной максимального почернения локальные округлые зоны небольших размеров.

тропных трубочек, при прохождении которых луч  $S_0$  гасится анализатором. При малых размерах изображения фигура в виде „мальтийского креста“ вместе с системой колец не может сформироваться из-за ограниченных размеров оптического пучка. Можно сопоставить полученные данные с гидростатическим методом диффузии

ионов красителей patterns (рис. 6) [16,32]. Из этого сопоставления следует, что узкие сомкнутые между собой пучки трубочек, наблюдаемые в виде темных линий и затемненных зон, представляют маленькие локальные ростовые зоны, расположенные вокруг основных ростовых зон, формирующих бугорки зуба.



**Рис. 6.** Горизонтальный срез коронки моляра (patterns) [32]. Жидкость с темно-синим красителем помещали в пульповую камеру под давлением. Темные участки дентина в области бугорков (над рогами пульпы) гораздо более проницаемы, чем поверхностный (неокрашенный) дентин в центре шлифа. Белые неокрашенные (разомкнутые) кольца находятся в центре бугорков (темная область), где дентин непроницаем для красителя. Обозначения: (1–5) — области бугорков (ростовые зоны) шлифа третьего моляра.

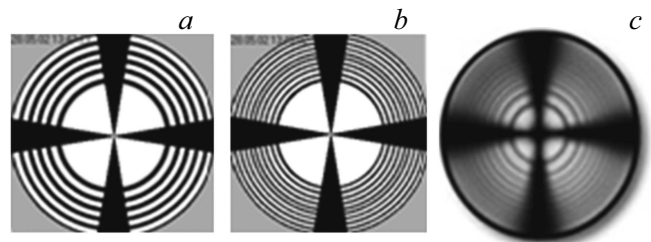
Функциональное назначение мелких региональных ростовых зон заключается в корректировании рельефа формирования отдельного бугорка зуба. Таким образом, полученный оптическим методом patterns (рис. 2) коронки зуба можно вполне сопоставить с patterns (рис. 6), полученным гидростатическим методом диффузии, где региональные основные и локальные ростовые зоны хорошо видны. Анализ полученных на основе оптических измерений разной толщины темных линий в окрестности бугорков позволяет независимым способом оценить усредненный размер мелких ростовых зон, который составляет  $\geq 100 \mu\text{m}$ , что согласуется с данными для метода диффузии (таблица). Таким образом, оба метода дополняют друг друга и способствуют изучению формирования зуба млекопитающих [7], тем самым показывая перспективность этих методов для исследования формы и латерального роста бугорков зуба.

**Зоны с „мальтийским крестом“** Региональные области шлифа, где наблюдаются фигуры типа „мальтийского креста“, образуются зонами в виде конуса с регулярной укладкой анизотропных трубочек. Если такие анизотропные трубочки линейны и образуют пучок в виде конуса, свет при прохождении такого конуса через скрещенные поляризаторы будет иметь осевую симметрию [36–38]. С учетом анизотропии пучок трубочек будет характеризоваться на выходе разностью фаз  $\delta$  для двух ортогональных лучей: обыкновенного  $S_o$  и необыкновенного  $S_e$ . Разность фаз  $\delta$  для этих лучей, уложенных в виде конуса, будет следовать правилу

радиальной симметрии. Существенно, что лучи, выходящие из отдельных линейных трубочек на разном расстоянии от оси  $\rho$  и азимутом  $\alpha = 0-360^\circ$ , будут эллиптически поляризованы. Сдвиг фазы  $\delta$  для линейных трубочек будет зависеть от параметров  $d, \varphi, \rho, n, \Delta n$  и  $\alpha$  [27,38]. От этих параметров будет зависеть число отражений  $N$  луча внутри трубочек. Если трубочки имеют нелинейную форму, например, S-образный вид, и могут скручиваться вдоль оси, то на значение величины фазы  $\delta$  будут дополнительно влиять параметры:  $\beta$  — параметр скручивания трубочки и  $\rho$  — радиус конуса ( $\rho_{\text{max}} = d_1/2$ ).

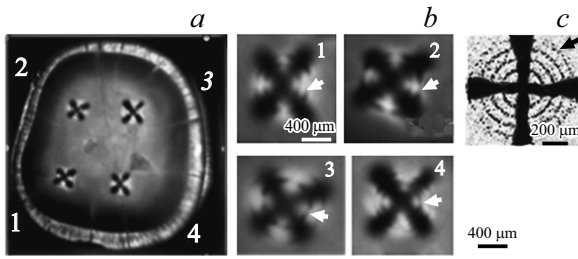
Для пучка линейных трубочек при расчете фазы  $\delta$  использованы следующие параметры:  $d$  — толщина шлифа,  $d_n$  — наружный диаметр трубочек,  $n = n_{\text{ТД}}/n_{\text{РТД}}$  — относительный показатель преломления дентина,  $\varphi(\rho)$  — угол наклона трубочек в пучке,  $\varphi_1$  — угол створа конуса и параметр  $\beta = 0$  (рис. 7). Для соответствующих расчетов разработано программное обеспечение, которое позволяет продемонстрировать влияние некоторых параметров дентина, организованных в виде осесимметричного конуса из трубочек, ось которого расположена под небольшим углом к падающему пучку света [38]. Для типовых условий:  $\mathbf{E}$  — вектор поляризатора перпендикулярен оси конуса, тогда на входе трубочек будет распространяться только один луч  $S_o$ , который на выходе из конуса будет гаситься анализатором. В центре вычисленной картины будет наблюдаться крест, перекрестие которого совпадает с осью конуса.

Форма креста несколько отличается от типичного „мальтийского креста“, которая наблюдается в эксперименте при исследовании толстых одноосных монокристаллов. Это связано с тем, что условия гашения света для системы параметров трубочек, принятых для расчета, соблюдаются только в непосредственной близости



**Рис. 7.** Расчет (a, b): вид интерференционной картины (patterns) для моделирования шлифа моляра, вырезанного поперек оси зуба (горизонтальное сечение, рис. 3), монохроматический свет,  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ , поляризаторы Р и А скрещены [38], внутренний диаметр трубочек  $d_n = 0.1$  (a),  $1.5 \mu\text{m}$  (b), наружный диаметр трубочек  $d_n = 3.5 \mu\text{m}$ , толщина шлифа  $d = 1000 \mu\text{m}$ ,  $\varphi = 10^\circ$ ,  $\varphi_1 = 10^\circ$ ; темные кольца демонстрируют области разности фаз  $\delta = 2\pi + \pi$  и т.д на выходе из трубочек; фигуры в виде крестов и темные зоны — области гашения лучей. (c) Эксперимент: классическая коноскопическая картина в сходящемся пучке света для одноосного кристалла (толщина 1 см), вырезанного перпендикулярно оптической оси.





**Рис. 8.** Эксперимент: (а) фото (patterns) шлифа второго моляра, вырезанного поперек оси зуба, полученное на пропускание в скрещенных поляризаторах (ростовые зоны 1–4); (б) увеличенные изображения ростовых зон 1–4, стрелками показаны интерференционные кольца, обрамляющие центральную часть крестов; заметны разрывы освещенности колец в центральной части квадрантов. Отсутствие колец по мере удаления от центра указывает, что регулярная осесимметричная укладка трубочек для ростовых зон 1–4 сохраняется преимущественно ближе к перекрестию (ось пучка трубочек) и различна для разных зон. (с) Для сравнения приведена локальная зона зуба премоляра [38] с регулярной осесимметричной укладкой линейных трубочек.

сти для главных направлений **E**-векторов поляризатора и анализатора. Другая характерная особенность расчетной картины — появление темных и светлых колец, которые крест пересекает в центре. Появление колец обусловлено тем, что разность фаз  $\delta$  зависит от соотношения  $\rho$  и азимута  $\alpha = 0-360^\circ$ . Первому от центра темному кольцу соответствует разность фаз  $\delta = 2\pi + \pi$  и т.д. Следует отметить, что все наблюдаемые детали описанной картины характерны для осесимметричной укладки пучка линейных трубочек в виде конуса. Если углы наклона трубочек в пучке носят стохастический характер, то можно увидеть только изображение креста в центре пучка, а кольца наблюдаться не будут.

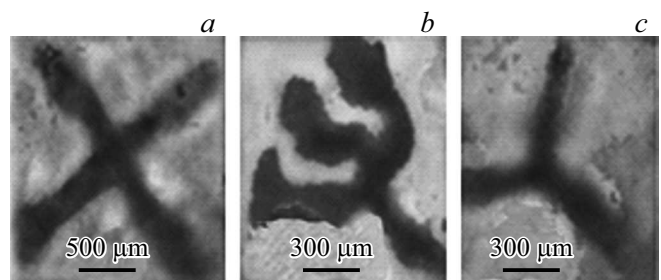
Наличие колец в эксперименте указывает на упорядоченное расположение трубочек вокруг оси конуса (рис. 8). Наиболее контрастные фигуры в виде крестов наблюдаются для двух положений скрещенных поляризаторов, когда направление **E**-вектора падающего света образует перпендикуляр с направлением оси усеченного конуса.

Появление колец patterns вблизи центра фигуры креста и их отсутствие при удалении от центра связано с нарушением осесимметричной укладки анизотропных трубочек (рис. 8, а, б). Нерегулярность укладки трубочек изменяет системность функции  $\delta(\rho, \alpha)$ , при этом можно заметить, что величина нарушений зависит от расстояния  $\rho$  по мере удаления от оси конуса. Из patterns (рис. 8, а, б) видно, что отклонение фазы  $\delta$  при всех значениях  $\rho$  наибольшее для азимутов  $\alpha$ , соответствующих положению диагоналей внутри каждого из четырех квадрантов. Это указывает, что первичный пучок из поляризатора **P** после прохождения внутри трубочек деполаризуется наиболее сильно для данного направления  $\alpha$ . Иными словами, в данном направлении будут

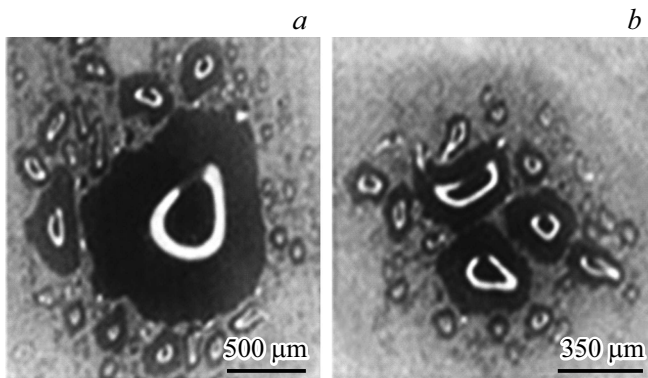
распространяться два луча  $S_o$  и  $S_e$ . Эта особенность неравномерности распределения освещенности внутри контура колец демонстрирует различие между расчетом рис. 7 с учетом сделанных приближений и patterns рис. 8. Можно заметить, что периодичность колец patterns может не сохраняться для соседних квадрантов (рис. 8, б). Это связано с флуктуациями фазы  $\delta(\rho, \alpha)$  в результате нерегулярности линейных размеров трубочек в окрестности того или иного квадранта или локальным разворотом S-трубочек в данном квадранте.

Концентрические кольца для исследованной партии шлифов наблюдались только в одном или в двух-трех квадрантах у отдельных образцов шлифов, что свидетельствует о системной укладке дентинных трубочек в окрестности этих квадрантов. Следует также отметить, что встречались образцы, для которых в области региональных зон наблюдались фигуры, отличные от крестов (напоминают буквы V или X, не замкнутые восьмерки, трехлучевые звезды) [36–38]. Фигуры в виде буквы V (например, ростовая зона у patterns 3, рис. 2, б), буквы X (например, у patterns ростовая зона 4, рис. 2, а) и не замкнутой восьмерки образуются при сильной асимметрии в изображении „мальтийского креста“ для двух соседних квадрантов (V) или двух противоположных квадрантов (X, не замкнутая восьмерка).

Наличие соседних локальных ростовых зон, имеющих одну симметрию, может приводить к слиянию этих зон, что проявляется в виде сочлененных центров, образующих крестики (patterns, рис. 2). Например, на периферии в районе зон роста 1 и 2 (рис. 2, б) можно часто заметить объединение двух фигур, напоминающих деформированные кресты. Деформация формы крестика может быть обусловлена особенностями укладки изогну-



**Рис. 9.** Эксперимент. Типичные patterns фрагментов шлифа разных образцов второго моляра, полученные в скрещенных поляризаторах. Фрагменты характеризуют региональные зоны роста, отличающиеся укладкой трубочек: (а) крестик, трубочки имеют линейную форму, укладка трубочек относительно центра носит упорядоченный характер; (б) трезубец, часть трубочек (см. верхний левый угол) на периферии зоны роста закручены вдоль оси пучка, это трубочки, скрученные или изогнутые в форме буквы S; (с) трехлучевая звезда, зона роста образована из трех независимых локальных участков роста (например, зона роста 3 на рис. 6 и 10, б), в этом случае пучки трубочек каждого из трех участков имеют свои отличающиеся поляризационные параметры, взаимно ориентированные под углом  $120^\circ$ .



**Рис. 10.** Ростовые зоны 1 (a) и 3 (b) горизонтального шлифа третьего моляра (patterns) (рис. 6). Интересно отметить, что области разрыва для неокрашенных разомкнутых колец ориентированы в одном направлении и соответствуют ростовым зонам дентина, непроницаемым для красителя.

тых трубочек. Например, наблюдаемая картина может быть связана с появлением S-трубочек, закрученных вдоль оси, причем, как можно судить по patterns рис. 2, a и 9, b, угол закручивания плавно увеличивается по мере удаления от центра фигуры. Скручивание S-трубочек приводит к ослаблению контраста колец внутри каждого из четырех квадрантов.

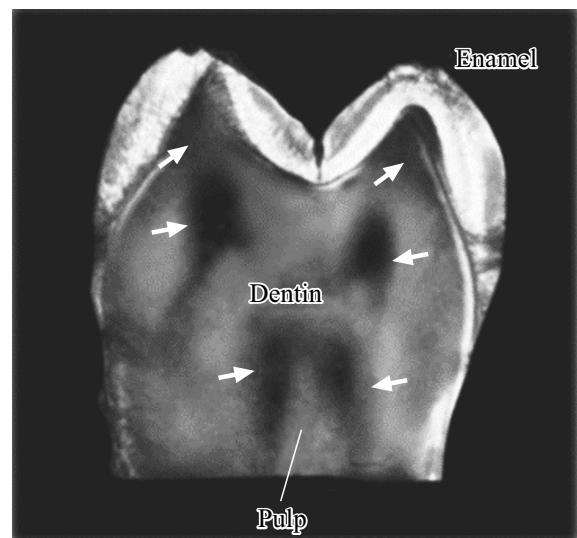
Более сложные для интерпретации фигуры (рис. 9) образуются, например, когда наблюдается фигура в виде трехлучевой звезды.

Этот случай можно объяснить, исходя из предположения, что поблизости имеются три взаимозависимые локальные зоны роста (например, зона роста 3 на рис. 6), у которых имеется общий регулирующий центр, расположенный в окрестности бугорка зуба. Для образования трехлучевой звезды следует учитывать, что трубочки имеют S-образный вид и способны закручиваться [13–15]. В каждой из отдельных трех ростовых зон формируется однородный по структуре пучок трубочек, который развернут по отношению к соседней зоне на  $120^\circ$ . При этом для каждого из пучков на выходе имеем только лучи  $S_0$ , которые гасятся анализатором. Такая синхронная связь локальных ростовых зон в окрестности одного бугорка согласуется с гипотезой об индукционном взаимодействии ростовых дентинных клеток — одонтобластов, которые могут управляться через специализированные нервные клетки, расположенные внутри трубочек [20–24].

Разные размеры локальных ростовых зон в окрестности бугорков моляра, полученных с помощью метода диффузии ионов, показаны на рис.10 [16,32].

Морфометрические оценки характеристик этих ростовых зон шлифа обобщены для трех независимых методов измерений (таблица). Из анализа таблицы видна хорошая корреляция оценок размеров ростовых зон, полученных сопоставляемыми методами. Вместе с тем для метода диффузии видны дополнительные существен-

ные детали в виде разомкнутых светлых колец, которые отсутствуют в patterns для оптического метода (сравни рис. 2 и 6, 10). Наличие разомкнутых светлых колец в центре ростовых зон (рис. 6) показывает на отсутствие тока пульпарной жидкости внутри этой зоны. Размеры диаметров малых ростовых зон находятся в интервале  $\sim 100\text{--}350\ \mu\text{m}$  (таблица), что согласно оценочному расчету соответствует 400-5000 трубочек внутри малых ростовых зон. Разрывы прозрачных колец имеют одинаковую ориентацию. Положение центра зоны, полученное из данных гидростатического метода диффузии ионов красителей (рис. 10), совпадает с центром ростовой зоны для patterns, полученных оптическим методом, и соответствует положению перекрестия в конкретной зоне (рис. 2). Область прозрачных колец в центре ростовой зоны не может наблюдаться визуально, поскольку оптические свойства трубочек в этой области практически не отличаются от периферийных трубочек зоны роста. Совпадение перечисленных свойств сопоставляемых зон (рис. 2 и 10) позволяет предположить, что внутри площадки, ограниченной разомкнутым прозрачным кольцом, находятся дентинные трубочки, которые закупорены нервными окончаниями. Относительный усредненный диаметр разомкнутого кольца для всех зон роста остается постоянным (таблица). Толщина разомкнутых прозрачных колец меняется незначительно для всех бугорков и составляет  $\approx 10\text{--}80\ \mu\text{m}$ , что позволяет оценить количество трубочек, которые могут располагаться внутри прозрачного кольца в пределе  $\approx 2\text{--}16$ . Наличие таких специализированных трубочек в центре ростовой зоны логично связать с нервными клетками, которые управляют ростом дентинных трубочек.

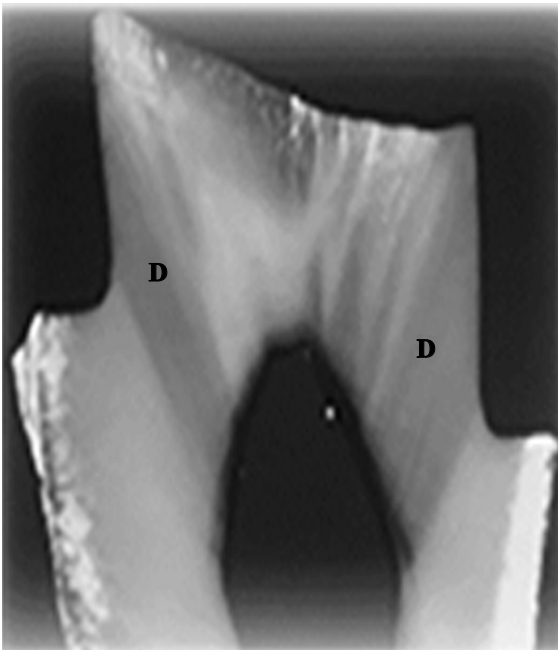


**Рис. 11.** Фото (patterns) шлифа второго моляра, вырезанного вдоль оси зуба (вертикальное сечение), полученное в скрещенных поляризаторах. Стрелками обозначены темные фрагменты удлиненной формы, идущие из пульпы в направлении центральной части бугорков зуба.

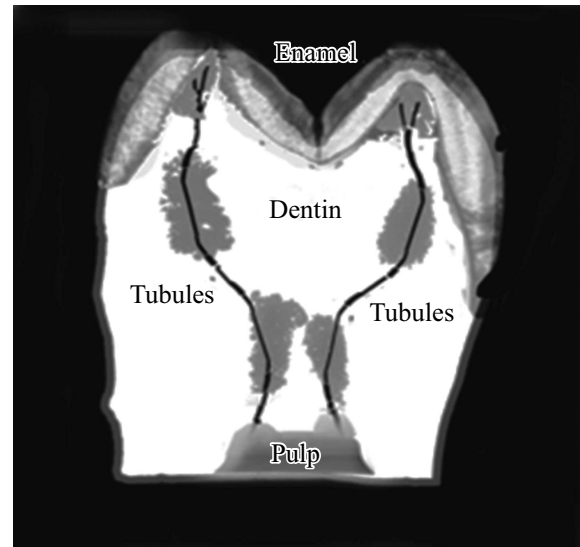
чек и формируют форму рельефа коронки в окрестности локального бугорка.

**Сечение шлифа параллельно оси зуба (вектор  $E$  поляризатора перпендикулярен плоскости шлифа и оси зуба)** Оптическую схему наблюдения шлифа моляра для выбранной ориентации в режиме пропускания можно сравнить со способом исследования волокон в иммерсионной среде. Анизотропные волокна (дентинные трубочки РТД) находятся в иммерсионной среде, какой является межтрубчатый дентин (ИТД), заполняющий промежутки между трубочками. Поскольку показатели преломления РТД и ИТД близки между собой, то такая композитная система хорошо пропускает световой пучок и относительно слабо рассеивает свет.

Таким образом, использование скрещенных поляризаторов при исследовании шлифа, вырезанного параллельно оси зуба, позволяет наблюдать контрастную картину в виде светлых и темных фрагментов (рис. 11). Сравнение этих данных с экспериментом для ионной диффузии ионов (рис. 12) показывает на различия в контрасте наблюдаемых областей дентина и специфику организации пучков трубочек. Прерывистость темных фрагментов (рис. 11) связана с конфигурацией S-пучков, состоящих из совокупности анизотропных трубочек, которые изгибаются в направлении от пульпы до вер-



**Рис. 12.** Шлифованный срез моляра (мезио-окклюзо-дистального) зуба на третьем моляре. Темно-синий краситель помещали в пульповую камеру под давлением после препарирования зуба [13]. Темные участки проникновения красителя (D) показывают, что дентинные каналцы аксиальных стенок намного более проницаемы, чем граничащие с пульпой. Темный овальный участок в нижней части рисунка — область пульпы, которая хорошо проницаема для красителя.



**Рис. 13.** Схема шлифа моляра, моделирующая patterns на рис. 11. Слева и справа от центральной оси зуба проведены сплошные темные кривые (tubules), которые изображают изогнутые S-пучки, состоящие из анизотропных трубочек. На схеме выделены непрозрачные участки шлифа, которые коррелируют с областями изгиба S-пучков анизотропных трубочек (рис. 11). Темные участки в окрестности S-пучков соответствуют направлениям, перпендикулярным вектору  $E$ .

шины отдельных бугорков зуба. Сравнение направления таких S-пучков, которые имеют темный оттенок из-за окрашивания в процессе диффузии красителя (D, рис. 12), показывает, что пучок в левой части коронки однороден вдоль оси, тогда как широкий пучок (D) справа дополнен рядом узких изогнутых (S-пучков), разделенных светлыми промежутками.

Когда направление вектора  $E$  перпендикулярно выделенному участку S-пучка, то при прохождении поляризованного света через этот участок пучка направление вектора  $E$  не будет изменяться. Таким образом, прошедший через толщу S-пучка луч  $S_0$  будет погашен анализатором, что приводит к образованию на фото темных участков.

В противоположность рассмотренному примеру для участка перегиба S-пучка вектор  $E$  падающего света будет составлять острый угол с осью пучка. В результате возникнут два луча  $S_0$  и  $S_e$ , свет, прошедший через этот участок, приобретет разность фаз  $\delta$  и будет эллиптически поляризован. В результате такой свет, прошедший через толщу трубочки, будет только частично погашен анализатором. На модельной схеме (рис. 13) показаны особенности изгиба двух S-пучков, сформированных из анизотропных трубочек.

На рис. 13 показаны области перегиба двух S-пучков. Вдоль этих пучков формируются темные области и участки со светлым фоном, который совпадает по интенсивности с фоном от рассеяния дентина. Оба S-пучка сохраняют шаг изгиба в направлении от пульпы

в область бугорков зуба. Симметрия организации S-пучков вдоль их оси хорошо согласуется с patterns на рис. 2 для горизонтального сечения зуба. Светлые зоны в других зонах зуба обусловлены совокупностью S-пучков с неупорядоченной структурой.

Чередование светлых и темных фрагментов, расположенных вдоль оси S-пучков, позволяет для шлифа, вырезанного перпендикулярно оси зуба, независимо оценить линейные размеры темных участков, формирующих ростовые зоны бугорков зуба. Размеры этих участков коррелируют с основными значениями шага изогнутых пучков и их диаметров, которые можно оценить для другого шлифа, вырезанного перпендикулярно оси зуба. Кроме того, можно изучить шаг закручивания S-трубочек на разном удалении от пульпы зуба и сравнить параметры соседних пучков. Для разных зубов, исходя из особенностей симметрии ростовых зон в области бугорков, можно patterns на рис. 2, *a, b* сопоставить с рис. 11. Из этого сравнения следует, что для разных горизонтальных сечений в области коронки зуба patterns могут отличаться в деталях.

Проведенные исследования показывают, что структура дентина в окрестности отдельных бугорков зубов моляров человека формируется совокупностью дентинных трубочек, так называемых зон роста, которые характеризуются осесимметричной укладкой трубочек. Признаки асимметрии в укладке трубочек указывают на изменения формы того или иного бугорка, что позволяет изучать закономерности формирования много корневых зубов человека. Наличие симметрии структуры дентина в зоне отдельных бугорков моляра дает основание для предположения о связи такой структуры со строением первичных конических зубов. Исходя из этого следует допустить, что наличие асимметрии в зоне отдельных бугорков моляра связано с процессами фило- и онтогенеза, в результате которых проявляется взаимообусловленность строения формы коронки и корня зуба и является универсальным для всех зубов класса млекопитающих [6,11]. Таким образом, использование скрещенных поляризаторов снижает рассеяние от нерегулярных структур дентина и позволяет изучать упорядоченные структуры, которые демонстрируют особенности симметрии, обусловленные типом укладки трубочек. Предложенный подход исследования структуры дентина может способствовать получению дополнительной информации, касающейся генезиса формирования региональных зон коронки зуба.

## Список литературы

- [1] K.D. Kavanagh, A.R. Evans, J. Jernvall. *Nature*, **449**, 427 (2007).
- [2] Takashi Tsuji et al. *Nature Methods*, **4**, 227 (2007).
- [3] S.E. Duailibi, M.T. Duailibi, P.C. Yelick. *J. Dent. Res.*, **87** (8), 745 (2008). DOI: 10.1177/154405910808700811
- [4] M. Oshima, T. Tsuji. *Adv. Exp. Med. Biol.*, **881**, 255 (2015). DOI: 10.1007/978-3-319-22345-2\_14
- [5] А.И. Постолаки. *Успехи современного естествознания*, (3), 461 (2015).
- [6] Г.Г. Манашев. *Успехи современного естествознания*, (4), 28 (2002).
- [7] M.S. Otaetal. *J. Oral. Biosci.*, **51**, 193 (2009). DOI: 10.1016/S1349-0079(09)80003-0
- [8] Дж. Эллиот, П. Добер. *Симметрия в физике* (Наука, М., 1975).
- [9] А.С. Компонеец. *Симметрия в микро- и макром мире* (Наука, М., 1978).
- [10] Н.Ф. Овчинников. *Симметрия — закономерность природы и принцип познания* (Наука, М., 1978).
- [11] С.А. Ястребова, В.Е. Сергеева. *Эволюция зубочелюстной системы* (Изд-во Чувашского ун-та, 2010), 75 с.
- [12] С.В. Петухов. *Биомеханика, бионика и симметрия* (Наука, М., 1981).
- [13] K. Luukko, P. Kettunen, I. Fristad, E. Berggreen. *Structure and Functions of the Dentin-Pulp Complex*. In: *Cohen's Pathways of the Pulp* (Elsevier Inc., 2011). P. 452–503. DOI: 10.1016/B978-0-323-06489-7.00012-6
- [14] L.W. Boushell, J.R. Sturdevant. In: *Sturdevant's Art and Science of Operative Dentistry* (Elsevier Inc., St. Louis, Missouri, 2019). P. 1–39.
- [15] D. Arola, S. Gao, H. Zhang, R. Masri. *Dent. Clin. North. Am.*, **61** (4), 651 (2017). DOI: 10.1016/j.cden.2017.05.001
- [16] Farid Bin Che Ghazali. *Malays. J. Med. Sci.*, **10** (1), 27 (2003).
- [17] L. Tjäderhane, M.R. Carrilho, L.Breschi, F. R. Tay, D.H. Pashley. *Endodontic Topics*, **20** (1), 3 (2012). DOI: 10.1111/j.1601-1546.2012.00269.x
- [18] S. Weiner, A. Veis, E. Beniash, T. Arad, J. W.Dillon, B. Sabsay, F. Siddiqui. *J. Struct. Biol.*, **126** (1), 27 (1999). DOI: 10.1006/jsbi.1999.4096
- [19] Chia-Yi Chu, Tien-Chun Kuo, Shu-Fang Chang, Yow-Chyun Shyu, Chun-Pin Lin. *J. Dent. Sci.*, **5** (1), 14 (2010).
- [20] K. Tsukada. *Arch. Oral Biol.*, **32**, 87 (1987). Doi:10.1016/0003-9969(87)90050-1
- [21] M. R. Byers. *J. Comp. Neurol.*, **191** (3), 413 (1980). DOI: 10.1002/cne.901910307.doi: 10.1002/cne.901910307
- [22] D.G. Gillam. *J. West Soc. Periodon., Periodon. Abstr.*, **43** (2), 53 (1995).
- [23] M. Närhi, E. Jyväsjärvi, A. Virtanen, T. Huopaniemi, D. Ngassapa, T. Hirvonen. *Proc. Finn. Dent. Soc.*, **88** (Suppl. 1), 507 (1992).
- [24] M. Närhi. *Dent. Clin. North. Am.*, **34**(3), 439 (1990).
- [25] B.A. Gotliv, A. Veis. *Cells Tissues Organs.*, **189** (1-4), 12 (2009). DOI: 10.1159/000151726
- [26] K. Forssell-Ahlberg, M. Brännström, L. Edwal. *Acta Odontol. Scand.*, **33** (5), 243 (1975). DOI: 10.3109/00016357509004629
- [27] V.M. Zolotarev. *Acta Sci. Otolaryng.*, **5**(2), 3(2023).
- [28] S.S. Sova, L. Tjäderhane, P.A. Heikkilä, J. Jernvall. *Front. Physiol.*, **9** (71), 1 (2018). DOI: 10.3389/fphys.2018.00071
- [29] F.M. Lopes, R.A. Markarian, C.L. Sendyk, C.P. Duarte, V.E. Arana-Chavez. *Arch. Oral Biol.*, **51**(7), 548 (2006). DOI: 10.1016/j.archoralbio.2006.01.009
- [30] A.J. Ortiz-Ruiz, J.D. Teruel-Fernández, L.A. Alcolea-Rubio et. al. *Ann. Anat.*, **218**, 7 (2018). DOI: 10.1016/j.aanat.2017.12.012
- [31] J.D. Teruel, A. Alcolea, A. Hernández, A.J. Ruiz. *Arch. Oral Biol.*, **60** (5), 768 (2015). DOI: 10.1016/j.archoralbio.2015.01.014

- [32] D.H. Pashley, H.J. Andringa, G.D. Derkson, M.E. Derkson, S.R. Kalathoor. *Arch. Oral Biol.*, **32**, 519 (1987). DOI: 10.1016/s0003-9969(87)80014-6
- [33] R.E. Walton, W.C. Outhwaite, D.F. Pashley. *J. Dent. Res.*, **55** (4), 639 (1976). DOI: 10.1177/00220345760550041601
- [34] Г.Б. Альтшулер, В.Н. Грисимов. *ДАН СССР*, **310** (5), 1245 (1990).
- [35] В.Н. Грисимов. *Опт. и спектр.*, **77** (2), 272 (1994).
- [36] В.М. Золотарев, В.Н. Грисимов. *Опт. и спектр.*, **90** (5), 836 (2001).
- [37] В.М. Золотарев. *Оптический журнал*, **69** (3), 10 (2002).
- [38] В.М. Золотарев. *Опт. и спектр.*, **97** (4), 696 (2004).
- [39] A. Kienle, F.K. Forster, R. Hibst. *Opt. Lett.*, **29**, 2617 (2004). DOI: 10.1364/ol.29.002617
- [40] A. Kienle, R. Michels, R. Hibst. *J. Dent. Res.*, **85** (10), 955 (2006). DOI: 10.1177/154405910608501017
- [41] Т.С. Аргунова, Ж.В. Гудкина, М.Ю. Гуткин и др. *ЖТФ*, **90** (9), 1449 (2020). DOI: 10.61011/OS.2024.02.57780.5298-23
- [42] S. Seyedkavoosi, I. Sevostianov. *Rev. Adv. Mater. Tech.*, **1**, 1 (2019). DOI: 10.17586/2687-0568-2019-1-1-1-26
- [43] В.М. Золотарев, Г.Г. Иванова, М.К. Касумова, Т.Ш. Мчедлидзе, Э.П. Тихонов, М.А. Чибисова. *Инст. стоматологии*, **2** (31), 74 (2006).
- [44] Э.П. Тихонов. *Вестник Метрологической акад.*, **11**, 14 (2003).
- [45] X.J. Wang, T.E. Milner, J.F. deBoer, Y. Zhang, D.H. Pashley, J.S. Nelson. *Appl. Opt.*, **38**, 2092 (1999). DOI: 10.1364/ao.38.002092
- [46] D.H. Pashley, M.J. Livingston, J.D. Greenhill. *Arch. Oral Biol.*, **23** (9), 807 (1978). Doi:10.1016/0003-9969(78)90159-0
- [47] D.H. Pashley. *Arch. Oral Biol.*, **39**(Suppl), 573 (1994). DOI: 10.1016/0003-9969(94)90191-0
- [48] W.R. Hume. *J. Oral Rehabil.*, **21**(4), 469 (1994). DOI: 10.1111/j.1365-2842.1994.tb01161.x
- [49] P. Zaslansky, S. Zabler, P. Fratz. *Dental Materials*, **26**(1), 1 (2010). DOI: 10.1016/j.dental.2009.09.007
- [50] Shiyong Xu, M. Stranick, Deon Hines, Ke Du, Long Pan. *Sci. Rep.*, **12**(1), 2369 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-06271-y
- [51] R. Garberoglio, M. Brännström. *Arch. Oral Biol.*, **21**(6), 355 (1976). DOI: 10.1016/s0003-9969(76)80003-9
- [52] I.A. Mjör, I. Nordahl. *Arch. Oral Biol.*, **41**(5), 401 (1996). DOI:10.1016/0003-9969(96)00008-8
- [53] D.A. Sumikawa, G.W. Marshall, L. Gee et. al. *Pediat. Dentistry*, **21** (7), 439 (1999).