

ОБОСНОВАНИЕ ТЕРМИНА «ГЕМОМИКРОЦИРКУЛЯЦИЯ» ПРИ ОПИСАНИИ КРОВОТОКА ПУЛЬПЫ ЗУБА В НОРМЕ, ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ В ОТВЕТ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛОМБИРОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗВИТИЕ ПАТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

И.О. Походенько-Чудакова*, Г.Г. Чистякова

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

BACKGROUNDING OF USING TERM «HEMOMICROCIRCULATION» WHEN DESCRIBING BLOOD FLOW IN THE TOOTH PULP IN HEALTHY STATE, ITS CHANGES AS A REACTION TO COMPOSITE FILLING MATERIALS AS WELL AS IN THE DEVELOPMENT OF PATHOLOGICAL PROCESSES

I.O. Pohodenko-Chudakova*, G.G. Chistyakova

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

E-mail: ip-c@yandex.ru

Аннотация

Цель работы – на основании анализа научной литературы обосновать применение термина «гемомикроциркуляция» в описании кровотока пульпы зуба, как в норме, так и при его функциональных изменениях в ответ на использование композиционных пломбировочных материалов, а также при развитии необратимых процессов в пульпе.

Материалы и методы. Проанализировали источники информации за последние 10 лет, и основополагающие учебники, руководства, монографии без учета срока давности. Анализ осуществляли при помощи описательного метода.

Результаты. Кровоснабжение пульпы обильное. Сосуды входят в полость зуба через апикальное отверстие, а также ряд дополнительных отверстий, локализующихся на разных уровнях корня. Последние представлены 2-3 крупными и 1-3 мелкими артериолами. Кроме того, гемодинамику пульпы обеспечивают 1-2 вены. В пульпе зуба присутствуют структуры, контролирующие кровоток. К ним относятся прекапиллярные сфинктеры, артериолярные дуги, венулярные дуги, ряд анастомозов (венуло-венулярные, артериоло-венулярные, артериоло-артериолярные, связывающие сосуды различных каналов корня зуба). Следует подчеркнуть, что отток жидкости из пульпы кроме артериол и венул обеспечивают и лимфатические сосуды. Лимфатические капилляры располагаются в периферическом и промежуточном слое. Их диаметр составляет 15-50 мкм.

Заключение. Результаты анализа являются обоснованием для использования термина «гемомикроциркуляция» при описании кровотока пульпы зуба в норме, а также при развитии воспаления.

Ключевые слова: гемодинамика; микроциркуляция; кровоток; пульпа зуба; артериолы; вены; капилляры.

Abstract

Purpose. After analyzing available domestic and foreign literature, to justify the application of term «hemomicrocirculation» in the description of blood flow in the tooth pulp both in normal state and in functional changes after using composite filling materials as well as in irreversible processes in the pulp.

Material and methods. The authors have analyzed information sources for the last 10 years as well as basic manuals and monographs without any time-limitation period. The descriptive method was used for the analysis.

Results. Blood supply in the pulp is abundant. Blood vessels enter the pulp through the apical port as well as through several additional root apertures which are localized at different root levels. The latter are 2-3 large arterioles and 1-3 small arterioles. In addition, 1-2 venules support pulp hemodynamics too. In the tooth pulp, there are structures that regulate blood flow. They are precapillary sphincters, arteriolar and venular arches, several anastomoses (venulo-venular, arteriolo-venular, arteriolo-arteriolar anastomoses which connect vessels in various root canals). Lymphatic vessels are involved in the fluid outflow from the pulp too. Lymphatic capillaries are located in the peripheral and intermediate layers. Their diameter is 15-50 microns.

Conclusion. The analysis performed justifies the application of term «hemomicrocirculation» for describing blood flow in the tooth pulp both in healthy state and in inflammatory processes.

Key words: hemodynamics, microcirculation, blood flow, tooth pulp, arterioles, venules, capillaries.

Ссылка для цитирования: Походенько-Чудакова И.О., Чистякова Г.Г. Обоснование термина «гемомикроциркуляция» при описании кровотока пульпы зуба в норме, его изменений в ответ на использование композиционных пломбировочных материалов и развитие патологического процесса. Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2021; 1: 44-50.

Введение. На современном этапе при определении влияния патологических процессов (кариес и его осложнения, заболевания периодонта) и тех или иных пломбирочных материалов на пульпу зуба и ее жизнеспособность все чаще используют исследование кровотока [1-3]. При этом, как правило, используют следующие термины: гемодинамика, интенсивность кровотока, микроциркуляция и т. д. В тоже время следует подчеркнуть, что указанные определения не являются синонимичными, а использование их как синонимов в отдельных ситуациях ведет к «подмене понятий» и формированию противоречивых мнений.

Гемодинамика представляет собой раздел науки, исследующий законы движения крови по сосудистой системе на основе принципов гидродинамики для определения причин и механизмов движения указанной биологической жидкости в сердечно-сосудистой системе [4, 5]. Она также является частью биофизики кровообращения, рассматривающей все физические процессы, происходящие в системе кровообращения, в том числе гидродинамических явлений (взаимозависимостью между давлением, трением, вязкостью, сопротивлением и скоростью кровотока). Перечисленные показатели являются важнейшими характеристиками функционального состояния сердечно-сосудистой системы, исследование которых имеет как диагностическое значение, так и позволяет оценить эффективность примененных лечебных мероприятий [4, 6].

С давних времен и до настоящего момента показателем работы системы кровообращения принято считать сердечный выброс (СВ, Q) – объемную скорость кровотока [7, 8].

Оценка жизнеспособности пульпы с помощью теплового [1] или электрического тестирования [9, 10] ее чувствительности является сомнительной из-за ее субъективности, так как в действительности жизнеспособность ткани пульпы зависит от кровоснабжения, а не от нервной реакции [11, 12]. В связи с чем, методы оценки функционирования тканей челюстно-лицевой области, в том числе и полости рта связанные с определением наполнения их кислородом, являются наиболее объективным и информативными [13].

В тоже время в регуляции кровотока в пульпе принимают участие несколько систем. В-первых, вазоконстрикторная симпатическая адренергическая, во-вторых, вазодилататорная бета-адренергическая, в-третьих, вазодилататорная симпатическая холинергическая, в-четвертых, вазодилататорная антидромная, в-пятых, вазодилататорная аксон-рефлекс. Вопрос контроля парасимпатической нервной системы вазодилататор-

ной реакции сосудов пульпы на сегодня окончательно не решен [14].

Цель работы – на основании анализа научной литературы обосновать применение термина «гемомикроциркуляция» в описании кровотока пульпы зуба, как в норме, так и при его функциональных изменениях в ответ на использование композиционных пломбирочных материалов, а также при развитии необратимых процессов в пульпе.

Объекты и методы. Проанализировали источники информации как периодические за последние 10 лет, так и базовые учебники, руководства, монографии без учета срока давности. Анализ осуществляли при помощи описательного метода.

Результаты. Непосредственный обмен веществ между кровью и интерстициальной жидкостью в пульпе зуба осуществляется на уровне микроциркуляторного русла (МР). Фактически микроциркуляция в пульпарной камере начинается с деления артериол. Условно принято считать, что микроциркуляторное русло представлено сосудами, диаметр которых может составлять менее, чем 200 мкм. К ним относятся артериолы, метартериолы, основной канал, истинные капилляры, венулы, артериоловенулярные анастомозы. Современное понимание микроциркуляция предусматривает три основные составляющие: 1) движение крови по МР; 2) движение лимфы в начальных отделах лимфатической системы; 3) циркуляцию интерстициальной жидкости [15, 16].

Источники специальной литературы указывают на то, что пульпа обильно васкуляризирована [17]. На верхней челюсти кровоснабжение осуществляется из внутренней верхнечелюстной артерии (a. maxillaris interna) и верхнезадними альвеолярными артериями (aa. alveolaris superior et posterior). Трофика пульпы зубов верхней челюсти происходит через дентальные ветви верхней и задней альвеолярных артерий (rami dentalis aa. alveolaris superior et posterior), а зубов нижней челюсти – через ветви нижней альвеолярной артерии (rami dentalis a. alveolaris inferior). Сосуды проникают в пульпу через апикальное и дополнительные отверстия корня зуба. При этом они представлены: крупными артериолами (2-3) с диаметром 50-150 мкм; мелкими артериолами (1-3, в отдельных наблюдениях может быть 3-4); венулами (1-2), выходящими через дополнительные отверстия. В стенках артериол гладкие миоциты формируют 2 циркулярных слоя [18, 19].

В совокупности все перечисленные сосудистые структуры объединены в единую сеть [20, 21], которая и призвана обеспечивать гемомикроциркуляцию в пульпе.

Основной отличительной особенностью указанного сосудистого русла является малая толщи-

на их стенок по отношению к просвету [22]. Типичные артерии в пульпе отсутствуют, а имеющиеся артериальные сосуды как по структуре, так и размерам соответствуют артериолам [19]. Изложенное дает основание рассматривать кровеносное русло пульпы как единую микроциркуляторную систему зубодесневого комплекса. Составляющими элементами данной системы следует считать: артериолы, прекапиллярные артериолы (метаартериолы), капиллярное сплетение, посткапиллярные венулы, собирательные венулы, а также крупные венулы [12, 18]. В тоже время в большинстве наблюдений отмечено, что артериолы, локализованные в корне зуба, образуют U-образные петли, участвующие в регуляции кровотока [23, 24].

Следующая особенность кровообращения пульпы зуба - давление в пульповой камере 20-30 мм рт. ст. Этот показатель превышает таковые имеющие место у других органов и тканей человека.

Скорость кровотока также представляет собой одну из отличительных характеристик. Ее показатель в сосудах пульпы выше при сравнительном сопоставлении, чем у других органов. Например, в артериолах он составляет 0.3-1.0 мм/с, в венулах — 0.15 мм/с, а в капиллярах — 0.08 мм/с.

В пульпе зуба имеют место структуры коррегирующие кровоток: прекапиллярные сфинктеры, артериолярные дуги, венулярные дуги, венуло-венулярные, артериоло-венулярные, артериоло-артериолярные анастомозы, а также анастомозы, которые связывают сосуды различных корневых каналов [23, 25].

Прекапиллярные сфинктеры - последние короткие отделы прекапиллярных артериол. Их сужение или расширение определяет число функционирующих капилляров, а, следовательно, площадь их обменной поверхности. Сфинктеры функционируют по системе шлюзов. Если есть потребность в усилении кровотока, то они открываются, а если нет - происходит их вазоконстрикция. Это и является особенностью регионарного кровотока в пульпе зуба, которая заключена в жестких стенках пульпарной камеры. Однако при функциональных нарушениях кровоснабжение пульпы зуба не обесточивается, и регуляция кровотока осуществляется посредством артерио-венозных анастомозов, осуществляющих шунтирующую функцию [17].

В слое одонтобластов, как и непосредственно под ним находится сосудистое сплетение, состоящее из мелких сосудов и капилляров, анастомозирующих друг с другом [17, 26]. В коронковой пульпе моляров также имеются анастомозы. Их формируют сосуды, проникающие туда из корневой пульпы каналов зуба. Кроме указанных, в пульпе моляров присутствуют артериоловенулярные ана-

стомозы, при участии которых происходит прямое шунтирование кровотока [23]. В состоянии покоя большая часть анастомозов не функционирует. Однако ситуация начинает резко изменяться при развитии воспаления — функция анастомозов и ее активность быстро нарастает с развитием процесса. Это объясняется тем, что при перепадах давления в пульповой камере кровь «сбрасывается» из артериального русла в венозное. Капилляры переходят в венулы, выходящие из апекса. Они локализируются ближе к центру пульпы, а артериолы, напротив, оказываются расположенными по периферии. Число капилляров определяется количеством клеток в каждом конкретном участке, для которых они реализуют трофическую функцию. Капилляры, осуществляющие доставку питательных веществ для клеток, функционируют в соответствии с законом гидростатического и осмотического давления [27]. Питательные вещества направляются из кровеносного русла в клетку, а продукты распада (шлаки), скапливаются у нее внутри. Это стимулирует обмен жидкости между клеткой и капилляром за счет увеличения проницаемости. [28].

Кровообращение в сосудах диаметром до 100 мкм, обеспечивающих процессы обмена веществ между кровью и другими тканями организма, именуют микроциркуляцией [1, 29]. При этом микрососудистое русло обладает хорошими как адаптационным, так и компенсаторным потенциалами [23]. Ее морфологическую основу составляют: множество каналов, по которым осуществляется приток крови в отдельные сегменты; активное развитие в них капиллярной сети; присутствие артериовенулярных анастомозов [30]. Последние призваны обеспечивать прямое шунтирование тока крови. Они отходят от артериол под углом прямым углом до их перехода в капиллярную сеть имеют вид небольших сосудов, продолжающихся в венулы, диаметр которых составляет примерно 10 мкм. Большее число анастомозов располагается в корневой пульпе. Как было отмечено выше, их функциональная активность усиливается при раздражении пульпы, когда кроме выравнивания давления в пульповой камере, они способны «отводить» кровоток от участка поражения воспаления, где нарушается микроциркуляция и может возникать тромбоз, с последующим кровоизлиянием. При развитии пульпита, увеличение проницаемости сосудов микроциркуляторного русла ведет к отеку. Отек, в свою очередь негативно влияет на вены и лимфатические сосуды, сдавливая их и тем самым нарушая отток жидкости. Следствием указанных процессов могут быть некроз и гибель пульпы [24].

Кроме того, в оттоке жидкости из пульпы зуба участвуют и лимфатические сосуды [24, 31]. Лим-

фатические капилляры пульпы в начале имеют вид «мешкообразных» расширений, диаметр которых находится в пределах 15-50 мкм. Они находятся в периферическом и промежуточном слоях пульпы. Для них характерна тонкая эпителиальная выстилка с широкими межклеточными «щелями», размер которых составляет более 1,0 мкм. Следующая особенность – отсутствие базальной мембраны на значительном протяжении. При этом эндотелиальные клетки «отдают» длинные выросты по направлению к окружающим структурам. В цитоплазме эндотелиоцитов расположено большое число микропиноцитозных пузырьков. Капилляры окружает тонкая сеть ретикулярных волокон [19]. Во время развития воспаления лимфатический отток интенсифицируется. Это проявляется увеличением лимфатических капилляров, расширением «щелей» между эндотелиальными клетками и уменьшением числа микропиноцитозных пузырьков [30].

Функционирование и регуляция микрососудистого русла пульпы зуба осуществляется следующим образом. Через апикальное отверстие корня и его добавочные каналы в полость входят толстые пучки нервных волокон, как миелиновых, так и безмиелиновых. Их число варьирует в пределах от 200-700 до 1000-2000. Безмиелиновые волокна преобладают их доля составляет 60-80% [22].

Нервные волокна располагаются вместе с артериолами на всем их протяжении, что и составляет основу сосудисто-нервного пучка зуба. В корневой пульпе абсолютное большинство нервных волокон присутствует в виде пучков, направляющихся вверх. Они, достигая уровня коронки, расходятся веерообразно к периферии пульпы, формируя пучки, для которых характерна сравнительно прямая направленность и постепенное истончение в сторону дентина [32]. По периферии пульпы, а именно, во внутренних участках промежуточного слоя, основная часть волокон утрачивает миелиновую оболочку, ветвится и сплетается друг с другом. При этом одно волокно образует не меньше чем 8 терминальных ответвлений. Описанная сеть нервных окончаний представляет собой субдонтостическое нервное сплетение. От него отходят волокна, которые направляются к периферическим отделам пульпы, где они соприкасаются с одонтобластами. Часть из них завершаются терминальными ветвлениями на уровне границы пульпы и предентина (10%), а другая часть проникает в дентинные трубочки [22].

Следует подчеркнуть, что артериолы получают более интенсивную вазомоторную иннервацию, чем вены. К вазомоторным нервам относят немиелинизированные нервные окончания. Для иннервации артериол пульпы характерно глубокое

проникновение нервных окончаний в стенку сосуда. Это позволяет обеспечивать эффективную регуляцию кровотока как при физиологических, так и при развитии патологических процессов и играет ведущую роль в обеспечении жизнеспособности рассматриваемой структурной единицы, а, следовательно, и зуба в целом [23].

В сосудистой стенке подавляющего числа артериол и отдельных венул гладкие миоциты пребывают в состоянии постоянного частичного сокращения, что, как было доказано в эксперименте, определяет тонус сосудов пульпы зуба [33]. При этом сократительная активность мышечных клеток и скорость кровотока определяется многими факторами (гормонами, нейромедиаторами, а также локальными регуляторными молекулами). На артериолах пульпы располагается внушительное число терминальных нервных волокон. Симпатические адренергические нервные терминалы продуцируют норадреналин, который связывается с альфа- и бета-адренорецепторами гладких миоцитов. Активация альфа-адренорецепторов обеспечивает сужение просвета сосудов и, напротив, возбуждение бета-адренорецепторов влечет за собой расширение сосудов. Нейропептид Y, дислоцирующийся вместе с норадреналином, также оказывается способным обеспечивать сужение сосудов пульпы. В тоже время холинергические нервные волокна продуцируют ацетилхолин. Он и располагающийся совместно в нервных волокнах вазоактивный интестинальный полипептид, вызывают расширение сосудов. Чувствительные безмиелиновые нервные окончания в ответ на раздражение высвобождают вещество P и пептид, связанный с кальцитониновым геном, которые способны вызвать расширение сосудов пульпы зуба – сенсорную вазодилатацию, а также увеличить их проницаемость [18, 34].

Под понятием сосудистый тонус, как правило, понимают постоянное напряжение стенок кровеносных сосудов, способное противостоять растяжению последних под воздействием давления крови. Сосудистому тонусу принадлежит основная роль в регуляции регионарного кровотока, так как именно он определяет размер радиуса сосудов. На показатель сосудистого тонуса влияет уровень активности отдельных гладкомышечных клеток того или иного региона сосудистой сети. Гладкая мускулатура сосудистой стенки способна сохранять активное напряжение в течение длительного времени. При этом в абсолютном большинстве сосудов присутствует некоторое количество гладкомышечных клеток пейсмекеров, спонтанно деполяризующихся и возбуждающих прилежащие клетки. В тоже время сокращения клеток пейсмекеров находится вне зависимости от иннервации сосу-

да и имеет место даже при его денервации. Поэтому даже пребывая в состоянии покоя, сосудистая стенка всегда будет испытывать некоторое напряжение - миогенный базальный тонус. Напряжение большинства сосудов в покое определяет не только базальный тонус. Непосредственное отношение к этому имеет сокращение гладкомышечных клеток под воздействием сосудосуживающих им пульсов, поступающих по системе симпатических нервных волокон. Это состояние сосудов именуют тонусом покоя [15, 24].

Сосудодвигательные волокна обильно иннервируют мелкие артерии и артериолы. Степень сокращения мышц сосудов определяет частота импульсов в эфферентных сосудодвигательных нервах. При отсутствии тонической импульсации по сосудосуживающим нервам, вазодилатация ограничивается базальным миогенным тонусом сосудов. Исходя из изложенного очевидно, что результирующий сосудистый тонус может быть изменен по отношению к тонусу покоя как в сторону вазоконстрикции, так и в сторону вазодилатации. Гуморальную регуляцию процесса представляет множество биологически активных веществ, способных путем воздействия на специфические рецепторы мембран эндотелиоцитов и гладких миоцитов оказывать влияние на сосудистый тонус и проницаемость стенки сосуда. Эффект воздействия катехоламинов на миоциты сосудистой стенки находится в прямой зависимости от количества и соотношения в ней альфа- и бета-адренорецепторов. Возбуждение альфа-адренорецепторов вызывает вазоконстрикцию, а бета-адренорецепторов - вазодилатацию. Норадреналин действует преимущественно на альфа-адренорецепторы, а адреналин - на альфа- и бета-адренорецепторы. При этом следует помнить, что в большинстве сосудов присутствуют оба типа рецепторов. В ситуации преобладания альфа-адренорецепторов, адреналин вызывает их вазоконстрикцию, а при преобладании бета-адренорецепторов происходит дилатация. В физиологических концентрациях адреналин вызывает вазодилатацию, а в высоких способен вызвать вазоконстрикцию [15, 22].

На тонус сосудов пульпы также способны оказывать воздействие нейтральные механизмы, опосредованные следующими биологически активными веществами: способствующий расширению - оксид азота (NO); способствующие сужению - эндотелины, вырабатываемые эндотелием. Одонтобласты коронковой части выделяют оксид азота и, таким образом, принимают участие в паракринной регуляции гемодинамики пульпы зуба [35]. При развитии воспалительного процесса, выделяются простагландины и брадикинин, вызыва-

ющие расширение сосудов, увеличение их проницаемости и в последующем ведущие к повышению гидростатического давления в пульпе зуба [30].

Из изложенного очевидно, что иннервация и кровоснабжение оказывают определяющее влияние на регуляцию и интенсивность обмена веществ в пульпе зуба, что и является основой для обеспечивающей способности купировать асептические и инфекционные очаги, инкапсулировать патологические участки и образовывать дентинные мостики, представляющие собой демаркационную линию на границе здоровой и пораженной ткани. Следует подчеркнуть, что уровень васкуляризации пульпы обеспечивает высокую поглотительную способность клеток эндотелия сосудов, представляющих один из резервных механизмов тканевой защиты, являющийся весьма значимым в условиях развития и течения воспалительной реакции [36].

Заключение. Изложенный материал убедительно свидетельствует, что сосудистая сеть пульпы (артериолы, вены, лимфатические сосуды), обеспечивающая трофику и интенсивность метаболизма всех тканей зуба, представляет собой единую стройно регулируемую микросистему, паракринной функционирующую в замкнутом пространстве, имеющую определенные отличительные признаки от других сосудистых систем органов и тканей человека, что и является объективным обоснованием для использования термина «гемомикроциркуляция» в описании кровотока пульпы зуба в норме, при его изменениях обусловленных использованием композиционных пломбирочных материалов, а также при развитии патологических процессов.

Литература

1. Оформить список литературы согласно требованиям журнала. Зеленым выделено в качестве примера.
2. Смирнова А. В., Кузьмина Д. А. Оценка состояния микроциркуляции тканей пародонта и пульпы зубов при локализованном пародонтите травматического характера // *Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого*. — 2016. — № 6 (97). [Smirnova A.V., Kuz'mina D.A. Assessment of microcirculation in the periodontal tissue and dental pulp in localized periodontitis of traumatic origin // *Bulletin of the Novgorod State University*. — 2016. — № 6 (97). In Russian].
3. Дмитриенко Н.Ю., Саран Л.Р., Кириенкова Е.А. Оценка микроциркуляции в пульпе постоянных зубов с несформированными корнями с помощью ультразвуковой доплерографии после лечения методом прямого покрытия биоактивными материалами // *Региональное кровообращение и микроциркуляция*. — 2018. — Т. 17. — № 2. [Dmitrienko N.D., Sarap L.R., Kirienkova E.A. Evaluation of microcirculation in the pulp of immature permanent teeth by ultrasound Doppler after direct pulp capping with bioactive materials. // *Regional Blood Circulation and Microcirculation (Reg. Blood Circulat. and Microcirculat)*. — 2018. — V. 17. — № 2. In Russian]. doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-2-26-29.
4. Hoseinifar R. et al. Histological Evaluation of Human Pulp Response to Direct Pulp Capping with MTA, CEM Cement, and

- Biodentine // *Journal of Dentistry*. — 2020. — V. 21. — №. 3. — P. 177. doi: 10.30476/DENTJODS.2019.81796.0.
5. Физиология человека и животных: учебник. Под ред. Д.Л. Теплового. Астрахань: АГУ, Издательский дом «Астраханский университет». — 2017. P. 336. [Human and animal physiology: textbook. Editor Teply D.E. Astrakhan: ASU, Publishing House «Astrakhan University». — 2017. P. 336. In Russian].
6. Мельник С.Н., Мельник В.В. Особенности показателей сердечно-сосудистой системы студентов с различными типами саморегуляции кровообращения // Проблемы здоровья и экологии. — 2019. — Т. 60. — № 2. — С. 80–85. [Melnik S.N., Melnik V.V. The features of the indices of cardiovascular system of students with different types of self-regulation of blood circulation // *Health and Ecology Issues (Health and Ecol. Iss.)*. — 2019. — V. 60. — № 2. — P. 80–85. In Russian].
7. Lusha X., Hester L.R. Cardiovascular responses to exercise. *Morgan & Claypool Life Sciences*; 2017. 135 p.
8. Михневич К.Г. Мощность кровотока // Медицина неотложных состояний. — 2014. — Т. 62. — № 7. — С. 134–137. [Mikhnevich K.G. Circulation capacity // *Emergency Medicine (Emergen. Med.)*. 2014; 62(7): 134–7. In Russian].
9. Хомяков Г.К. Индекс эффективности кровообращения как метод контроля оптимизации физической нагрузки // Ученые записки ун-та П.Ф. Лесгафта. — 2017. — Т. 147. — № 5. — С. 182–184. [Homyakov G.K. Index of efficiency of blood circulation as a method of control for optimization of physical load // *Uchenye Zapiski Universiteta im. P.F. Lesgafta (Uch. Zapiski Univer. im. P.F. Lesgafta)*. 2017; 147(5): 182–4. In Russian].
10. Макеева И.М., Волков А.Г., Прикул В.Ф., Дикопова Н.Ж., Аракелян М.Г., Макеева М.К., Ручкин Д.Н. Эффективность электроодонтодиагностики с помощью различных видов тока // Стоматология. — 2018. — Т. 97. — № 6. — С. 34–37. [Makeeva I.M., Volkov A.G., Prikuls V.F., Dikopova N.Zh., Arakelyan M.K., Ruchkin D.N. The efficacy of electroodontodiagnosis by means of various types of current. // *Stomatologiya (Stomatology)*. 2018; 97(6): 34–7. In Russian]. doi: 10.17116/stomat20189706134
11. Иващенко В.А., Кириш К.Д., Адамчик М.В. Эффективность лечения острого очагового пульпита консервативным методом разработанной стоматологической лечебной прокладкой // Здоровье и образование в XXI веке. — 2018. — Т. 20. — № 1. — С. 50–54. [Ivashchenko V.A., Kirsh K.D., Adamchik M.V. Efficiency of treatment of acute focal pulpitis by a conservative method developed by a dental treatment pad // *Health and Education Millennium (Health and Edu. Millen.)*. 2018; 20(1): 50–4. In Russian]. doi: 10.26787.nydha-2226-7425-2018-20-1
12. Bruno K. F. et al. Oxygen saturation in the dental pulp of permanent teeth: a critical review // *Journal of endodontics*. — 2014. — Т. 40. — №. 8. — С. 1054–1057.
13. Lambert P. et al. Reference values for pulp oxygen saturation as a diagnostic tool in endodontics: a systematic review and meta-analysis // *Restorative Dentistry & Endodontics*. — 2020. — Т. 45. — №. 4. doi: 10.5395/rde.2020.45.e48
14. Рубникович С.П. Лазерно-оптическая диагностика болезней пародонта и обоснование методов их лечения // Стоматолог. — 2012. — Т. 4. — № 1. — С. 15–19. [Rubnikovich S.P. Laser-optical diagnostics of periodontal diseases and justification of their treatment methods // *Dentist (Dent.)*. 2012; 1(4): 15–9. In Russian].
15. Rechenberg D. K., Galicia J. C., Peters O. A. Biological markers for pulp inflammation: a systematic review // *PloS one*. — 2016. — Т. 11. — №. 11. — С. e0167289. doi: 10.1371/journal.pone.0167289
16. Козлов В.И. Современные клиничко-морфологические аспекты изучения // Вестник РУНД. — 2011. — № 3. [Kozlov V.I. The system of microcirculation: clinical and morphological aspects of investigation // *RUDN Journal of Medicine (RUDN J. of Med.)*. 2011; 3: 17–20. In Russian].
17. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: ко-лебания, информация, нелинейность. М.: ЛИБРОКОМ, 2013. [Krupatkin A.I., Sidorov V.V. Functional diagnostics of the state of microcirculatory and tissue systems: fluctuations, information, nonlinearity. Moscow: LIBROCOM. 2013. In Russian].
18. Сирак С.В., Вафиади М.Ю., Неминушчая Е.Г., Копылова И.А. Морфологические особенности кровоснабжения и иннервации пульпы зуба при кариесе эмали и дентина // Медицинский вестник Северного Кавказа (Мед. вестник Северного Кавказа). — 2018. — Т. 13. — № 1.1. — С. 93–96. [Sirak S.V., Vafiadi M.Yu., Neminushchaya E.G., Kopylova I.A. Morphological features of blood supply and innervation of the tooth pulp with caries of enamel and dentin // *Medical News of the North Caucasus (Med. News of the North Caucasus)*. 2018; 13(1.1): 93–6. In Russian]. doi: 10.14300/mnnc.2018.13026
19. Ярош А.И., Шерстенникова А.К. Гемодинамика пульпы // Материалы VII Международ. студ. науч. конф. «Студенческий научный форум». — 2015. — Режим доступа: <http://scienceforum.ru/2015/article/2015008611> ><http://scienceforum.ru/2015/article/2015008611> . — Дата доступа: 20.11.2020. [Jarosh A.I., Sherstennikova A.K. Hemodynamics of the pulp. Available at: <http://scienceforum.ru/2015/article/2015008611> (accessed 20.11.2020). In Russian].
20. Быков В.Л. Частная гистология (краткий обзорный курс): учебник для студентов мед. ВУЗов, интернов, клинических ординаторов, аспирантов и врачей различных специальностей. СПб.: СОТИС. — 2016. — 304 с. [Bykov V.L. Private histology (short overview course): textbook for students of med. Universities, interns, clinical residents, postgraduates and doctors of various specialties]. St. Petersburg: SOTIS, 2016; 304. In Russian].
21. Franca C. M. et al. 3D-imaging of whole neuronal and vascular networks of the human dental pulp via CLARITY and light sheet microscopy // *Scientific reports*. — 2019. — Т. 9. — №. 1. — С. 1–10. doi: 10.1038/s41598-019-47221-5
22. Al-Hassiny A. et al. Vascularity and Angiogenic Signaling in the Dentine-Pulp Complex of Immature and Mature Permanent Teeth // *European endodontic journal*. — 2019. — Т. 4. — №. 2. — С. 80–85. doi: 10.14744/ej.2019.26349
23. Быков В.Л. Гистология и эмбриональное развитие органов полости рта человека. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2014. 624 с. [Bykov V.L. Histology and embryonic development of organs of oral cavity of man. Moscow: GEOTAR-Media. 2014; 624. In Russian].
24. Орехова Л.Ю., Кучумова Е.Д., Стюф Я.В. Кровоснабжение пульпы зуба. Методы исследования состояния пульпы зуба. Часть 2 // Пародонтология. — 2007. — Т. 42. — № 1. — С. 55–60. [Orekhova L.Yu., Kuchumova E.D., Stuf Ya.V. Blood supply of dental pulp. Methods of research of a condition of dental pulp. Part 2 // *Parodontologiya*. 2007; 42(1): 55–60. In Russian].
25. Сирак А.Г., Щетинин Е.В., Сирак С.В., Вафиади М.Ю., Адамчик А.А., Кобылкина Т.Л. Патологические и гистологические изменения в сосудистой сети пульпы зуба при ее девитализации // Российский стоматологический журнал (Рос. стом. журн.). — 2016. — Т. 20. — № 6. — С. 305–308. [Sirak A.G., Shchetinin E.V., Sirak S.V., Vafiadi M.Yu., Adamchik A.A., Kobylkina T.L. Pathophysiological and histological changes in the vasculature of the dental pulp devitalization. // *Russian Journal of Dentistry (Rus. J. Dent.)*. 2016; 20(6): 305–8. In Russian]. doi: 10.18821/1728–2802.2016; 20(6): 305–308
26. Iijima T., Zhang J. Q. Three dimensional wall structure and the innervation of dental pulp blood vessels // *Microscopy research and technique*. — 2002. — Т. 56. — №. 1. — С. 32–41.
27. Самусев Р.П. Основы клинической морфологии зубов: учеб. пособие. М.: Изд-во «Мир и образование», 2004. 32 с. [Samusev R.P. Fundamentals of clinical morphology of teeth: textbook. Moscow: Mir i obrazovanie publishing house. 2004; 32. In Russian].
28. Шауцукова Л.З. Взаимодействие гидростатического и осмотического давления в процессе транскапиллярного обмена //

Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Естественные науки (Извест. Высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки). — 2004. — Т. 128, № 4. — С. 91–93. [Shaucikova L.Z. Interaction of hydrostatic and osmotic pressure in the process of transcapillary exchange // *Science Journal Bulletin of Higher Education Institutes North Caucasus Region (Sci. J. Bull. of Higher Edu. Instit. North Cucasus Reg.)*. 2004; 128(4): 91-3. In Russian].

29. Morotomi T., Washio A., Kitamura C. Current and future options for dental pulp therapy // *Japanese Dental Science Review*. — 2019. — Т. 55. — №. 1. — С. 5-11. doi: 10.1016/j.jdsr.2018.09.001

30. Подтаев С.Ю., Мизева И.А., Смирнова Е.Н. Диагностика функционального состояния системы микроциркуляции на основе термометрии высокого разрешения // *Вестник Пермского научного центра (Вестн. Перм. науч. центр.)*. — 2012. — № 3-4. — С. 11–20. [Podtaev S.Yu., Mizeva I.A., Smirnova E.N. Diagnostics of the functional state of microcirculatory system based on high-resolution thermometry // *Perm Federal Research Centre Journal (Perm Federal Res. Centre J.)*. 2012; 3-4: 11-20. In Russian].

31. Иванов Е.В., Митронин А.В. Глава 12. Воспаление пульпы зуба. *Терапевтическая стоматология: национальное руководство*. Под ред. Л.А. Дмитриевой, Ю.М. Максимовского. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. 888 с. [Ivanov E.V., Mitronin A.V. Inflammation of the tooth pulp. *Therapeutic dentistry: national guidelines*. Eds. L.A. Dmitrievoy, Ju.M. Maksimovskij. Moscow: GEOTAR-Media. 2015; 888. In Russian].

32. Адамчик А.А., Камышникова И.О., Зорина В.В., Хромцова И.В., Соловьева Ж.В., Таиров В.В., Северина Т.В., Кириш К.Д. *Эндодонтия: учеб.-метод. пособие*. Краснодар КубГМУ. 2017. 62 с. [Adamchik A.A., Kamyshnikova I.O., Zorina V.V., Hromcova I.V., Solov'eva Zh.V., Tairov V.V., Severina T.V., Kirsh K.D. *Endodontics: educat. and method. guide*. Krasnodar: KSMU. 2017; 62. In Russian].

33. Henry M. A., Luo S., Levinson S. R. Unmyelinated nerve fibers in the human dental pulp express markers for myelinated fibers and show sodium channel accumulations // *BMC neuroscience*. — 2012. — Т. 13. — №. 1. — С. 1-12. doi: 10.1186/1471-2202-13-29.

34. Cuoghi O. A. et al. Pulp analysis of teeth submitted to different types of forces: a histological study in rats // *Journal of Applied Oral Science*. — 2018. — Т. 26. doi: 10.1590/1678-7757-2017-0626

35. Hossain M. Z. et al. The role of transient receptor potential (TRP) channels in the transduction of dental pain // *International journal of molecular sciences*. — 2019. — Т. 20. — №. 3. — С. 526. doi: 10.3390/ijms20030526

36. Ермак Е.Ю., Олесова В.Н., Париков В.В., Ермак Ю.М., Кириченко А.К., Индюков В.В. Исследование морфологической картины пульпы зубов и периодонта при применении донора оксида азота и блокатора NO-синтазы при эмоциональном стрессе // *Сибирский научный медицинский журнал (Сибир. науч. мед. журн.)* — 2012. — Т. 27, № 1. — С. 146–150. [Ermak E.Yu., Olesova V.N., Parilov V.V., Ermak Yu.M., Kirchenko A.K., Indyukov V.V. Experimental prevention of stress changes of tooth pulp tissues and periodontium with nitric oxide donor molecules // *The Siberian Scientific Medical Journal (Sibir. Sci. Med. J.)* 2012; 27(1): 146-50. In Russian].

37. Арутюнов А.В., Сирак С.В. Оценка защитных возможностей пульпы зубов при пародонтите // *Российский стоматологический журнал (Рос. стом. журн.)*. — 2015. — Т. 19, № 5. — С. 8–10. [Arutyunov A.V., Sirak S.V. Evaluation of the protective capabilities of the pulp of teeth with periodontitis // *Russian Journal of Dentistry (Rus. J. Dent.)*. 2015; 19(5): 8-10. In Russian].