

Коровкина А.Н.¹, Коровкин В.В.²**Оценка нелинейных динамических процессов в микрогемодиализаторном русле тканей пародонта методом лазерной доплеровской флоуметрии**

Korovkina A.N., Korovkin V.V.

Assessment of non-linear dynamic processes in the microhemocirculatory flow in the paradontal tissues using laser Doppler flowmetry technique¹ ООО «Институт управления медицинскими рисками и оптимизации страхования» («МЕДИС») филиал, г. Калининград² ООО «Линия улыбки», г. Калининград

Цель исследования: оценка эффективности метода лазерной доплеровской флоуметрии в диагностике заболеваний пародонта на основании нелинейных динамических процессов и их клиническое применение. *Материал и методы исследования.* Проведено обследование у 62 пациентов в возрасте 18–36 лет. Контрольную группу составили 20 практически здоровых лиц без сопутствующих заболеваний с интактным пародонтом. I группа – 20 больных хроническим катаральным гингивитом легкой степени; II группа – 22 больных хроническим генерализованным пародонтитом легкой степени. Лазерную доплеровскую флоуметрию (ЛДФ) со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока проводили аппаратом ЛАКК-02 (НПП «ЛАЗМА», Россия). Оценивали относительную энергию колебаний кровотока E_0 с помощью спектрального анализа записей ЛДФ (программа 2.2.509 – НПП «ЛАЗМА», Россия) и производили оценку нелинейных динамических параметров микроциркуляции тканей пародонта. *Результаты и их обсуждение.* Исследование показателей нелинейной динамики позволило оценить параметры колебательного процесса, провести его анализ, понять состояние макроскопических характеристик поведения модулирующих факторов, как в норме, так и в патологических условиях. *Заключение.* Изменение нелинейных параметров микроциркуляторного русла тканей пародонта при наличии воспалительного процесса (I и II группы исследования) характеризовалось уменьшением хаотичности поведения системы микроциркуляции и ее упорядоченности на основании числовых параметров хаотичности (H_1, D_2, H, D_2) и устойчивости ЛДФ-сигнала (D_0). *Ключевые слова:* микроциркуляция, пародонт, нелинейная динамика, лазерная доплеровская флоуметрия.

Purpose. To assess the effectiveness of laser Doppler flowmetry for the diagnostics of periodontal diseases when applying nonlinear dynamic processes in clinical practice. *Material and methods.* 62 patients aged 18–36 years were taken into the study. The control group consisted of 20 healthy individuals who had intact periodontium and no co-morbidities. Group I – 20 patients with chronic catarrhal mild gingivitis; Group II – 22 patients with chronic generalized mild periodontitis. Laser Doppler flowmetry (LDF) with the spectral wavelet analysis of the blood flow oscillations was performed with the apparatus LACC-02 (SPE «LAZMA», Russia). Relative energy fluctuations of blood flow E_0 were assessed using the spectral analysis of LDF recordings (programme 2.2.509-SPE «LAZMA», Russia). The researchers also assessed nonlinear dynamic parameters of microcirculation in the periodontal tissue. *Results and discussion.* While studying characteristics of nonlinear dynamics, the researchers could assess oscillatory process parameters; they could also analyze them and thus, understand macroscopic characteristics of modulating factor behavior, both in the normal state and in the pathological one. *Conclusion.* Changes in microcirculation nonlinear parameters in the periodontal tissue under inflammation (groups I and II) are characterized by the decrease of chaotic behavior of the microcirculation system and its order on the base of randomness numerical parameters (H_1, D_2, H, D_2) as well as by the sustainability of LDF signal (D_0). *Key words:* microcirculation, periodontium, nonlinear dynamics, laser Doppler flowmetry.

Введение

Система микроциркуляции является основным звеном, обеспечивающим метаболический гомеостаз в органах и тканях. В последнее время при изучении патогенеза заболеваний пародонта все большее внимание уделяется состоянию микроциркуляции, которая играет ключевую роль в трофическом обеспечении тканей [9].

Центральным звеном в развитии микроциркуляторных нарушений является расстройство капиллярного кровотока, обычно начинающееся со снижения его интенсивности, и дальнейшая степень сосудистых изменений коррелирует с длительностью патологического процесса в тканях пародонта. Изменения микрососудов при катаральном гингивите в большей мере выражено в области маргинальной части десны. Капилляры в этой зоне расширены, кровоток в них существенно замедлен и перегружены кровью, особенно в венолярном звене, за счет нарушения венозного оттока. Ткани пародонта сильно отечны; капиллярскопический фон мутный; вокруг капилляров имеются диффузные очаги диапедезных кровотечений, что свидетельствует о резком нарушении

проницаемости гистогематического барьера. В поверхностных слоях слизистой оболочки видны расширенные капиллярные петли с неровными контурами, в которых замедлен кровоток. Местами определяется пристеночное стояние лейкоцитов, особенно отчетливо выявляемое в посткапиллярных венулах, проницаемость стенки которых сильно увеличена. В глубоких слоях слизистой оболочки, несмотря на мутность капиллярскопического фона, определяются артериолы, просвет которых увеличен за счет снижения тонуса их стенки, и резко расширенные венулы, переполненные кровью. В отдельных венулах наблюдается зернистый кровоток и выраженное пристеночное стояние лейкоцитов [1–3, 10].

При начальной стадии пародонтита преобладает спазм микрососудов артериального звена, приводящий к сопутствующему компенсаторно-приспособительному уменьшению диаметра микрососудов в других отделах русла. На этом фоне венолярные и переходные отделы капилляров сильно расширены и слегка извиты, имеют неравномерный калибр на протяжении и переполнены кровью. Соотношение между диаметром артериальных

и венулярных звеньев капилляров смещено в сторону преобладания венозного компонента над артериальным. Структурная деформация микрососудов из-за расстройств механизма, регуляции их тонуса и резкого нарушения проницаемости гистогематического барьера в микроциркуляторном русле приводит к появлению застойных очагов с резко расширенными капиллярами в большей степени в маргинальной части десны, чем в области прикрепленной [1, 3, 14–16]. Функциональные изменения кровоснабжения и трофики пародонта рассматриваются как инициальный фактор в патогенезе пародонтита.

Задача клинического исследования микроциркуляции при различных патологических состояниях заключается в оценке динамики и функциональных особенностей микроциркуляции в живом организме. При заболеваниях пародонта исследование микроциркуляции приобретает первостепенное значение, так как важно проследить динамику микроциркуляции в процессе лечения.

В настоящее время наряду с непосредственным визуальным наблюдением за состоянием микрососудов (капилляроскопия) при изучении микроциркуляции перспективным методом оценки функционального состояния микроциркуляторной системы выступает лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ). В основе метода ЛДФ лежит использование излучения гелий–неонового лазера малой мощности, которое, проникая в поверхностные слои тканей, отражается от движущихся объектов (эритроцитов в микрососудах), при этом частота отраженного сигнала изменяется (эффект Доплера). Графическая регистрация выходного сигнала формируется в виде доплерограммы (ЛДФ-граммы) [5, 7].

Учитывая тот факт, что движение крови в микрососудах представляет собой не строго фиксированный стационарный процесс, а сложную динамическую колебательную систему, при регистрации ЛДФ-грамм в отдельные интервалы времени их вид и параметры могут не совпадать, так как динамическое состояние микрокровотока постоянно изменяется в зависимости от физиологической потребности биоткани [5, 8].

В последнее время широкий интерес находит оценка поведения системы микроциркуляции как «динамической системы», и в частности анализ ее «хаотической составляющей». Исследование динамики микроциркуляции как состояния «хаоса» включает: спектральный амплитудно-частотный анализ колебательных процессов в микроциркуляторном русле и анализ нелинейной динамики микроциркуляции [5, 6].

Для оценки нелинейного динамического процесса используется комплекс нелинейных показателей, оценивающих фрактальную размерность, энтропию и анализ фазового портрета поведения системы микроциркуляции.

Фрактальный анализ позволяет охарактеризовать «изломанность», нерегулярность процесса. Фрактал соответствует моментальному снимку исследуемого процесса, связан с формой аттрактора. Фрактальность процесса характеризует иррегулярность или изрезанность, присущую ЛДФ-грамме. Фрактальность оценивается величиной фрактальной размерности, которая служит индикатором количества факторов, влияющих

на систему микроциркуляции. В настоящее время предлагается определение фрактальной размерности ЛДФ-грамм методом Хаусдорфа с применением алгоритма Минковского (D_0) и способом нормированного размаха (R/S-анализ), по показателю Херста [11, 12].

Энтропия (H_0) позволяет оценить «хаос» регуляции в системе микроциркуляции в зависимости от физиологического состояния биоткани. Организация движения микрокровотока в микроциркуляторном русле определяется регуляторными механизмами, и энтропия есть мера разнообразия регуляции. Энтропия-информация (H_i) есть характеристика максимума вероятности состояния системы, которая нормирована по отношению к энергии и к числу элементов системы. Она определяется путем нормировки относительной энтропии на относительную «энергию» микроциркуляторного русла E_0 . Относительная энергия E_0 определяется отношением энергии, сообщаемой эритроцитам в результате работы активных и пассивных механизмов регуляции микрокровотока. Параметру E_0 имеется определенное физиологическое объяснение. Изменение величины E_0 относительно значения E_0 в норме связано с перераспределением энергетических затрат в микроциркуляторном русле. Если в норме регистрируются осцилляции микрокровотока во всех активных диапазонах с известным распределением амплитуд [8], то более интенсивная работа активных механизмов проявляется, как правило, только для одного из механизмов. Поэтому параметр E_0 позволяет соотносить перераспределение энергии в пользу активных механизмов регуляции в микроциркуляторном русле.

Для характеристики динамической системы определяют ее фазовое пространство. Точка в фазовом пространстве (фазовая точка) представляет собой состояние системы в некоторый момент времени. Изменению состояния системы во времени отвечает движение фазовой точки по траектории в фазовом пространстве, которая называется фазовой траекторией. Если множество фазовых траекторий изобразить в фазовом пространстве, то возникает общая картина поведения системы. Такую картину называют фазовым портретом, он позволяет проиллюстрировать динамику системы. Синонимом фазового портрета является «аттрактор» (происходит от английского слова «attract» – привлекать, притягивать) – множество состояний точек фазового пространства динамической системы, к которому она стремится с течением времени. Фазовый портрет микроциркуляторного русла – это странный аттрактор; название «странный» принадлежит аттрактору, у которого прогнозирование фазовых траекторий невозможно из-за зависимости от начальных условий [4].

Фазовый портрет микроциркуляторного русла строится согласно теореме Такенса [13] по значениям временного ряда ЛДФ-граммы $PM(t_1) \dots PM(t_n)$. Используется метод повременной задержки. Временной сдвиг, примененный для построения фазового портрета, представляет собой время, в течение которого в системе микроциркуляции имеется связь, зависимость между регуляторными механизмами; это время причинно-следственной связи при управлении микрокровотоком. Координаты, по которым фиксируется каждая точка в фазовой плоскости, –

это значения перфузии, связанные между собой причинно-следственными обстоятельствами, обусловленные физиологической потребностью биоткани. Расстояние между парами фазовых точек, является корреляционной размерностью (D_2) фазового портрета. Чем больше число таких пар, тем плотность фазовых точек в фазовом пространстве выше и изменения перфузии в микроциркуляторном русле будет более сложное, разнообразное, хаотичное. С учетом влияния энергетического фактора на значение (D_2) целесообразно рассчитывать также его величину, нормированную по E_0 ($D_2 H$). Это позволяет оценивать хаотический компонент поведения системы и процесс самоорганизации (при снижении хаоса) в идентичных, не зависящих от энергии условиях [1]. Пример фазового портрета ЛДФ-гаммы представлен на рис. 1.

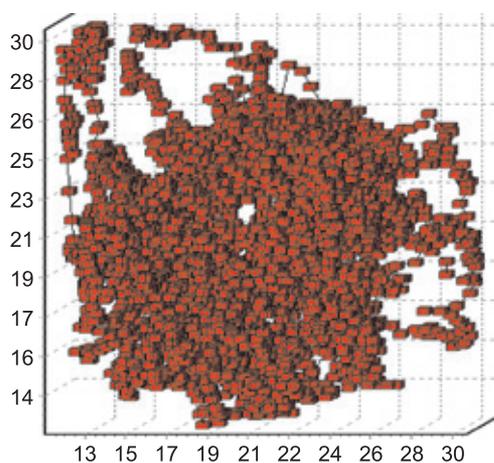


Рис. 1. Пример фазового портрета ЛДФ-гаммы

В настоящее время нелинейные процессы в микроциркуляторном русле тканей пародонта представляют большой практический интерес, так как продолжается поиск универсальных интегративных свойств сложных систем, к которым относится система микроциркуляции, для создания условий их оптимального функционирования.

Цель исследования: оценка эффективности метода ЛДФ в диагностике заболеваний пародонта на основании нелинейных динамических процессов и их клиническое применение.

Материалы и методы исследования

Обследование проведено у 62 пациентов в возрасте 18–36 лет. Контрольную группу составили 20 практически здоровых лиц без сопутствующих заболеваний с интактным пародонтом. I группа – 20 больных хроническим катаральным гингивитом легкой степени; II группа – 22 больных хроническим генерализованным пародонтизом легкой степени.

Лазерную доплеровскую флоуметрию (ЛДФ) со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока проводили аппаратом ЛАКК-02 (НПП «ЛАЗМА», Россия). Регистрацию ЛДФ проводили в областях согласно индексу Грина-Вермильона. Измерения производили в течение 300 с с помощью зонда диаметром 3 мм в красном (КР) канале лазерного излучения (длина волны – 0,63 мкм). Для анализа выделяли фрагменты записей длительностью 300 с. Оценивали относительную энергию колебаний кровотока E_0 с помощью спектрального анализа записей ЛДФ (программа 2.2.509 – НПП «ЛАЗМА», Россия) производили оценку нелинейных динамических параметров микроциркуляции тканей пародонта, используя методы расчета фрактальной размерности (D_0 , R/S), относительной энтропии и энтропии-информации (H_0 , H_1), а также анализ фазового портрета и его количественных характеристик фрактальной размерности (D_2), нормированной по энергии колебательного процесса ($D_2 H$).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования нелинейных показателей в группах испытуемых представлены в табл. 1. Группы, сформированные в данной работе, отражают разные клинко-физиологические функциональные состояния микроциркуляторной системы тканей пародонта как в норме, так и при наличии патологических изменений при хроническом катаральном гингивите: артериальная гиперемия и венозный застой; венозная гиперемия с переходным застойно-ишемическим состоянием при хроническом генерализованном пародонтизе легкой степени. Для каждого из вышеперечисленных состояний характерны свои особенности нелинейной динамики поведения кровотока. Проведение исследований в одной и той же зоне исследования и в одном и том же временном промежутке позволило провести статистически значимый сравнительный анализ изучаемых показателей.

Наибольшие сдвиги показателей нелинейной динамики поведения системы кровотока были характерны у II группы исследования. В этой группе определяли избыток энергии колебательного процесса E_0 ($52,02 \pm 7,8$) по сравнению с контрольной группой в 2 раза, что свидетельствовало о включении активных механизмов компенсации венозной гиперемии и локальных очагов ишемии. На фоне избытка энергии колебательного процесса происходит снижение хаотического поведения (H_1 , $D_2 H$) фазового портрета и выраженность хаоса поведения фазового портрета. Возрастание показателя $R/S > 1$ по сравнению с контрольной группой свидетельствовало о нерегулярности и неустойчивости системы регуляции микроциркуляции и относительном

Таблица 1

Показатели нелинейной динамики у здоровых испытуемых и при патологических условиях

Группа	E_0	D_0	R/S	H_0	H_1	D_2	$D_2 H$
I	$29,35 \pm 4,4^*$	$1,23 \pm 0,18^*$	$0,68 \pm 0,10^*$	$0,36 \pm 0,05^*$	$0,012 \pm 0,001^*$	$1,38 \pm 0,2^*$	$0,047 \pm 0,007^*$
II	$52,02 \pm 7,8^*$	$1,10 \pm 0,16^*$	$1,18 \pm 0,17^*$	$0,38 \pm 0,05^*$	$0,007 \pm 0,001^*$	$1,41 \pm 0,21^*$	$0,027 \pm 0,004^*$
Контроль	$20,45 \pm 3,0$	$1,26 \pm 0,18$	$0,62 \pm 0,09$	$0,38 \pm 0,05$	$0,019 \pm 0,002$	$1,60 \pm 0,24$	$0,078 \pm 0,011$

Примечание. * – значимость отличий ($p < 0,05$) по сравнению с данными контрольной группы.

снижении устойчивости структуры ЛДФ-сигнала (D_0). В I группе исследуемых отмечали прирост величины E_0 , что было связано с увеличением активности компенсаторных механизмов, направленных на разгрузку веноулярного русла при сохраняющейся регулярности осцилляций кровотока $R \setminus S < 1$, что также отражало сохраняющуюся относительную устойчивость системы микроциркуляции ($D_0 < 1,4$). Несмотря на устойчивость системы, показатели хаоса сигнала ($H_i, D_2 H$) и выраженность хаоса поведения фазового портрета сохраняли тенденцию к снижению.

Корреляционная размерность фазового портрета (D_2) в обеих группах имела устойчивую тенденцию к снижению, это характеризовало изменение перфузии микроциркуляторного русла в сторону упрощения, снижения разнообразия и физиологической хаотичности. Относительная энтропия (H_0) ЛДФ-сигнала в I и II группах сохранялась в пределах нормы, что свидетельствовало о том, что исследуемая система микроциркуляции сохраняла условия нелинейной динамической системы.

Заключение

Таким образом, на основании полученных результатов, в ходе проводимого исследования нами подтверждена значимость метода лазерной доплеровской флоуметрии с оценкой регистрируемых данных методом нелинейной динамики в выявлении нарушении микроциркуляции тканей пародонта, а именно расстройств системы микроциркуляции как при выраженности клинических симптомов, так и при их отсутствии. Эти нарушения характеризовались изменением нелинейных параметров микроциркуляторного русла тканей пародонта при наличии воспалительного процесса (I и II группы исследования) в сторону уменьшения хаотичности поведения системы микроциркуляции и ее упорядоченности на основании числовых параметров хаотичности ($H_i, D_2 H, D_2$) и устойчивости ЛДФ-сигнала (D_0).

Литература

1. Барер Г.М. и др. Болезни пародонта. Клиника, диагностика и лечение: учебное пособие. М.: ВУНМЦ, 1996. 86 с.
2. Гемонов В.В. Пародонтит / Под ред. Л.А. Дмитриевой. М.: МЕДпресс-информ, 2007. С. 18–38.
3. Грудянов А.И. и др. Этиология и патогенез воспалительных заболеваний пародонта. М.: Медицинское информационное агентство, 2010. – 96 с.
4. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: Колебания, информация, нелинейность: Рук. для врачей. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. С. 496.
5. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови: Рук. для врачей. М.: Медицина, 2005. С. 75.
6. Крупаткин А.И. Динамический колебательный контур регуляции капиллярной гемодинамики // Физиол. человека. 2007. Т. 33. № 5. С. 93–101.
7. Крупаткин А.И. и др. Исследование информационных процессов в микрососудистых сетях с помощью вейвлет-анализа колебательных структур кровотока / Регионар. кровообр. и микроциркул. 2009. Т. 8. № 3. С. 21–31.
8. Крупаткин А.И. и др. Современные возможности анализа поведения микроциркуляции крови как нелинейной динамической системы / Регионар. кровообр. и микроциркул. 2010. Т. 9. № 1. С. 61–67.
9. Кречина Е.К., Козлов В.И., Маслова В.В. Микроциркуляция в тканях пародонта. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007. С. 26.
10. Мюллер Х.П. Пародонтология. Львов: ГалДент, 2004. 256 с.
11. Федер Е. и др. Фракталы. М.: Мир, 1991. С. 254.
12. Кроновер Р. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Техносфера, 2006. С. 12.
13. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. М.: Мир, 1988. 240 с.
14. Kerdvongbundit V. et al. Microcirculation and micromorphology of healthy and inflamed gingival // J. Odontology. 2003. Vol. 91. № 1. P. 19–25.
15. Offenbacher S. Periodontal diseases: Pathogenesis // Ann Periodontal (World Workshop in Periodontics). 1996. № 1. P. 821.
16. Pejci A. Periodontitis as a Risk Factor for General Disorders // Acta Facult. Med. Naiss. 2006. Vol. 23. № 1. P. 59–65.

Поступила в редакцию 03.09.2014 г.

Для контактов: Коровкина Анна Николаевна
E-mail: shirokova@yandex.ru