

УДК 616.137-004.6-007.271.379-008.64
DOI: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-39-45

Н. Н. СТРЕЛЬЦОВА, А. П. ВАСИЛЬЕВ

Особенности нелинейных динамических процессов микроциркуляции крови у пациентов с облитерирующим атеросклерозом нижних конечностей и сахарным диабетом 2-го типа

Тюменский кардиологический научный центр, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, г. Томск, Россия
625026, Россия, г. Тюмень, ул. Мельникайте, д. 111
E-mail: vaschram@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 01.04.24 г.; принята к печати 14.06.24 г.

Резюме

Цель. Изучить характер сдвигов параметров нелинейной динамики микроциркуляции крови (МЦК) у пациентов с облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей (ОААНК) и сопутствующим сахарным диабетом (СД). **Материалы и методы.** Исследовано 60 пациентов с ОААНК мужского пола, медианный возраст 63,0 [59,0; 68,0] года, которые были разделены на 2 равнозначные по возрасту и основным клинико-анамнестическим данным группы: 1-я – пациенты без СД (n=45) и 2-я – с сопутствующим СД (n=15). Оценка нелинейных динамических процессов МЦК кожи стопы пораженной конечности осуществляли методом лазерной доплеровской флоуметрии. Исследование включало определение фрактальной размерности (D_0 , R/S), энтропии (H_0 , H_i) и анализ фазового портрета (D_2 , D_{2H}). **Результаты.** Анализ нелинейно-динамических процессов МЦК показал статистически значимое снижение у больных ОААНК с сопутствующим СД по сравнению с группой пациентов без СД медианных значений параметров фрактальной размерности (D_0 , R/S) на 30 % и показателей энтропии (H_i) на 33 %. Это свидетельствует об уменьшении количества факторов, участвующих в координации деятельности микрососудистой системы, росте ее функциональной ригидности, ограничении ситуационной лабильности и уменьшении хаотичности поведения. **Заключение.** Изучение параметров нелинейной динамики позволяет получить дополнительные данные, имеющие важное клиническое значение для оценки патофизиологических особенностей заболевания. Полученные результаты указывают на сокращение резерва адаптивных возможностей регуляции МЦК при сочетании ОААНК с СД и ассоциируются с ухудшением прогноза заболевания.

Ключевые слова: облитерирующий атеросклероз артерий нижних конечностей, сахарный диабет, микроциркуляция, лазерная доплеровская флоуметрия, нелинейная динамика

Для цитирования: Стрельцова Н. Н., Васильев А. П. Особенности нелинейных динамических процессов микроциркуляции крови у пациентов с облитерирующим атеросклерозом нижних конечностей и сахарным диабетом 2-го типа. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2024;23(4):39–45. Doi: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-39-45.

UDC 616.137-004.6-007.271.379-008.64
DOI: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-39-45

NINA N. STRELTSOVA, ALEXANDER P. VASILIEV

Features of nonlinear dynamic processes of blood microcirculation in patients with obliterating atherosclerosis of lower limbs and diabetes mellitus 2 types

Tyumen Cardiology Research Center, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia
111, Melnikaite str., Tyumen, Russia, 625026
E-mail: vaschram@rambler.ru

Received 01.04.24; accepted 14.06.24

Summary

Aim. To study the nature of shifts in the nonlinear dynamics parameters of blood microcirculation (BMC) in patients with obliterating atherosclerosis of the arteries of the lower limbs (OAALL) and concomitant diabetes mellitus (DM). **Materials and Methods.** Sixty male patients with OAALL, median age 63.0 [59.0; 68.0] years, who were divided into 2 groups equal in age and basic clinical and anamnestic data, were studied: 1 – patients without DM (n=45) and 2 – with concomitant DM (n=15). Nonlinear dynamic processes of BMC of the foot skin of the affected limb were assessed by laser Doppler flowmetry. The study included determination of fractal dimension (D_0 , R/S), entropy (H_0 , H_i) and phase portrait analysis (D_2 , D_{2H}). **Results.** The analysis of nonlinear-dynamic processes of BMC has shown a statistically significant decrease of median values of fractal dimension parameters (D_0 , R/S) by 30 % and entropy indices (H_i) by 33 % in OAALL patients with concomitant DM in comparison with the group of patients without DM. This indicates a decrease in the number of factors involved in the

coordination of microvascular system activity, growth of its functional rigidity, limitation of situational lability and reduction of chaotic behavior. **Conclusion.** The study of nonlinear dynamics parameters provides additional data of important clinical significance for the assessment of pathophysiology of the disease. The results obtained indicate a reduction in the reserve of adaptive regulation of BMC in the combination of OAALL with DM and are associated with a worse prognosis of the disease.

Keywords: *obliterating atherosclerosis of the arteries of the lower limbs, diabetes mellitus, microcirculation, laser Doppler flowmetry, nonlinear dynamics*

For citation: *Streletsova N. N., Vasiliev A. P. Features of nonlinear dynamic processes of blood microcirculation in patients with obliterating atherosclerosis of lower limbs and diabetes mellitus 2 types. Regional hemodynamics and microcirculation. 2024;23(4):39–45. Doi: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-39-45.*

Введение

Получение информации о функциональном состоянии системы микроциркуляции крови (МЦК), как важнейшем элементе поддержания гомеостаза организма, всегда остается актуальным. Среди методов исследования периферической гемодинамики большую распространенность в условиях клиники получил неинвазивный метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), основанный на анализе амплитудно-частотных характеристик отраженного от эритроцитов микрососудистого русла пучка лазерного излучения. Данный метод позволяет получить представление об особенностях функционирования различных звеньев микрососудистого русла, резервных возможностях гемоперфузии тканей и др. Вместе с тем необходимо отметить, что фундаментальной особенностью функционирования микрогемодинамики является ее временная вариабельность, характеризующаяся изменением тканевой гемоперфузии и, как следствие, низкой воспроизводимостью. Данное обстоятельство является отражением сложной многоуровневой и многоконтурной регуляции МЦК, направленной на удовлетворение метаболических и гемодинамических запросов организма. На периферический кровоток оказывают влияние соматическая и вегетативная нервная система, гуморальные факторы, дыхательные и пульсовые колебания, газовый состав крови и др. Кроме того, на деятельности микрогемодициркуляции сказываются факторы, определенные изменением условий окружающей среды. Это обуславливает постоянное присутствие переходных компенсаторно-адаптивных процессов. Понятно, что каждый раз регистрируемая даже при идентичных условиях микроциркуляторная картина будет уникальна.

Таким образом, МЦК представляет собой сложную динамическую, саморегулирующуюся систему, параметры которой строго хаотичны [1–3]. Анализ данной системы, отличающейся нелинейной динамикой колебательных процессов, с целью выявления универсальных свойств, характеризующих систему в целом, возможен с привлечением аппарата теории детерминированного хаоса [4]. В условиях выраженной вариабельности функционирования микрососудистого русла, оценка его с применением методов нелинейной динамики может дать более полное представление о физиологических процессах. Изучение таких фундаментальных свойств биологической системы, как фрактальная размерность, являющаяся показателем сложности процесса, по величине которого можно предсказывать поведение системы, энтропия, отражающая уровень информационной неопределенности, фазовый портрет, показывающий выражен-

ность хаотизации системы, позволят определить нестандартность микрокровотока, глубже понять характер его поведения, выраженность патофизиологических процессов и прогнозировать их исход [5, 6]. Исследование нелинейно-динамического поведения МЦК у больных с облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей (ОААНК), проведенное нами ранее [7], выявило статистически значимое по сравнению с группой здоровых лиц уменьшение энергии колебательных процессов, фрактальной размерности, корреляционной размерности фазового портрета на фоне спастико-атонических нарушений микрососудов. Полученные данные, отражающие снижение сложности ЛДФ-сигнала, можно трактовать как ограничение хаотизации микрокровотока. Нам представляется ценным получение информации о поведении микрогемодициркуляции как нелинейно-динамической системы у больных ОААНК с сопутствующим сахарным диабетом 2-го типа (СД) значительно утяжеляющим течение и ухудшающим прогноз заболевания [8, 9]. Подтверждением клинических исследований может служить факт более выраженных нарушений микрососудистого русла при сочетании ОААНК с СД [10].

Цель исследования – изучить характер сдвигов параметров нелинейной динамики МЦК у пациентов с ОААНК и сопутствующим СД.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в Тюменском кардиологическом научном центре. Обследовано 60 пациентов мужского пола с ангиографически подтвержденным ОААНК (медианный возраст 63,0 [59,0; 68,0] года), с синдромом перемежающейся хромоты ПБ стадии (по А. Б. Покровскому) и лодыжечно-плечевым индексом (ЛПИ) < 0,85. Из исследования исключались пациенты с заболеваниями крови, сложными нарушениями ритма (фибрилляция предсердий, частая экстрасистолия) и сердечной недостаточностью выше II функционального класса (NYHA). У 53,7 % выявлена ишемическая болезнь сердца (ИБС) и более 90 % исследуемых страдали артериальной гипертензией 1–2-й степени. Все пациенты были разделены на 2 группы: 1-я – пациенты не страдающие СД (n=45) и 2-я – с сопутствующим СД (n=15) без клинических проявлений микроангиопатии. Группы были равнозначны по возрасту и основным клинико-анамнестическим данным (табл. 1).

Базовая терапия заключалась в приеме аспирина, статинов, гипотензивных препаратов. Помимо общеклинических исследований, включавших также ангиографию нижних конечностей, оценку лодыжечно-плечевого индекса, проводилась ЛДФ кожи тыльной поверхности стопы пораженной ко-

Таблица 1

Сравнительные параметры у пациентов с ОААНК 1-й и 2-й групп

Table 1

Comparative parameters in patients with OAALL of groups 1 and 2

Параметр	Пациенты 1-й группы (n=45)	Пациенты 2-й группы (n=15)	p
АГ, %	93,3	90,9	0,78
ИБС, %	64,4	22,7	0,61
Курение, %	66,7	63,6	0,85
Возраст, лет	63,0 [59,0; 67,5]	66,0 [66,0; 69,0]	0,30
САД, мм рт. ст.	130,0 [120,0; 140,0]	125,0 [115,0; 130,0]	0,64
ДАД, мм рт. ст.	80,0 [75,0; 90,0]	75,0 [70,0; 82,5]	0,12
Глюкоза натощак, ммоль/л	5,6 [5,1; 5,9]	6,8 [6,4; 10,5]	<0,001
ЛПИ, ед.	0,62 [0,5; 0,72]	0,58 [0,47; 0,8]	0,77
Длительность клинических проявлений ОААНК, лет	4,0 [2,0; 7,0]	5,0 [3,0; 6,0]	0,46

Примечание: здесь и далее результаты представлены в виде медианы и интерквартильного размаха (25-й и 75-й процентиля). Различия считали статистически значимыми при двустороннем уровне значимости $p \leq 0,05$. АГ – артериальная гипертензия; ДАД – диастолическое артериальное давление; ОААНК – облитерирующий атеросклероз артерий нижних конечностей; ИБС – ишемическая болезнь сердца; ЛПИ – лодыжечно-плечевой индекс; САД – систолическое артериальное давление.

нечности. Исследование МЦК осуществлялось на аппарате «ЛАКК-М» (НПП «Лазма», Россия) в положении пациента лежа на спине, после 15-минутного периода адаптации, при температуре в помещении $+23 \pm 2$ °C. За 3-е суток до ЛДФ препараты с сосудорасширяющим действием отменяли. Оценка МЦК как нелинейно-динамического процесса основывалась на интерпретации колебаний гемоперфузии (ПМ) в рамках проявления «детерминированного хаоса». Количественная оценка параметров нелинейной динамики включала изучение фрактальности (fraktus – дробность), величины энтропии, как меры неопределенности, и составление фазового портрета [1]. Фрактальный анализ, характеризующий нерегулярность процесса, оценивали по величине фрактальной размерности (D_0) с использованием метода Хаусдорфа по величине показателя Херста (R/S). Если размерность Хаусдорфа (D_0) служит для определения сложности структуры ЛДФ-граммы, то показатель R/S дает представление о динамичности процесса. Энтропия (H_0) является количественной мерой неопределенности и свидетельствует о хаосе в системе регуляции кровотока микрососудистого русла. H_1 – представляет собой величину энтропии, нормированную по отношению к величине (E_0), связанной с перераспределением энергетических затрат в микроциркуляторном русле, сообщаемых эритроцитам при функционировании активных и пассивных факторов регуляции микроциркуляции. Чем ниже показатель H_1 , тем меньше вклад информационного компонента в величину H_0 . Количественной оценкой фазового портрета, отражающего динамические связи системы, является корреляционная размерность (D_2). Нормирование ее по E_0 (D_{2H}) позволяет оценить хаотический компонент поведения системы в независимых от энергии условиях. Матема-

тический расчет всех количественных показателей нелинейной динамики выполнен с помощью программного обеспечения, прилагаемого к аппарату ЛАКК-М, с использованием описанных математических формул [2, 4].

Результаты исследования обработаны с использованием пакета прикладных программ IBM SPSS Statistics 26 (USA). Для определения вида распределения переменных применяли критерий Шапиро-Уилка. Поскольку распределение полученных параметров отличалось от нормального, для оценки их различий использовали критерий Вилкоксона для парных сравнений. Количественные показатели представлены в виде медианы и интерквартильного размаха – 25-й и 75-й процентиля, качественные параметры показаны в %. Для сопоставления качественных переменных использовался критерий χ^2 . Различия считали статистически значимыми при двустороннем уровне значимости $p \leq 0,05$. Исследование выполнено в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики, правилами Good Clinical Practice, и принципами Хельсинкской декларации ВМА и одобрено Комитетом по биометрической этике Тюменского кардиологического научного центра (протокол № 128 от 21.02.2018 г.). Все пациенты до начала исследования подписали информированное согласие.

Результаты исследования и их обсуждение

Как было показано нами в предыдущих исследованиях [11], МЦК кожи пораженной конечности у пациентов с ОААНК отличалась выраженными функциональными нарушениями спастико-атонического характера. На фоне депрессии механизмов активного контроля гемодинамики установлено увеличение тонуса сосудов прекапиллярного

Таблица 2

Показатели нелинейной динамики у пациентов с ОААНК 1 и 2 групп

Table 2

Indicators of nonlinear dynamics in patients with OAALL of groups 1 and 2

Показатель	Пациенты 1 группа (n=45)	Пациенты 2 группа (n=15)	p
Do	1,26 [1,21; 1,32]	1,19 [1,17; 1,24]	0,022
R/S	0,90 [0,65; 1,18]	0,63 [0,38; 0,88]	0,043
Ho	0,29 [0,26; 0,33]	0,31 [0,26; 0,35]	0,27
Hi	0,03 [0,03; 0,05]	0,02 [0,02; 0,04]	0,046
D ₂	1,29 [1,20; 1,41]	1,37 [1,22; 1,46]	0,36
D _{2h}	0,13 [0,10; 0,17]	0,11 [0,09; 0,19]	0,56
Eo	12,5 [9,9; 16,2]	14,5 [9,4; 18,9]	0,51

Примечание: Do – размерность Хаусдорфа; D₂ – корреляционная размерность; D_{2h} – корреляционная размерность, нормированная по энергии колебаний кровотока; Ho – относительная энтропия; Hi – энтропия-информация; Eo – относительная энергия; R/S – нормированный размах.

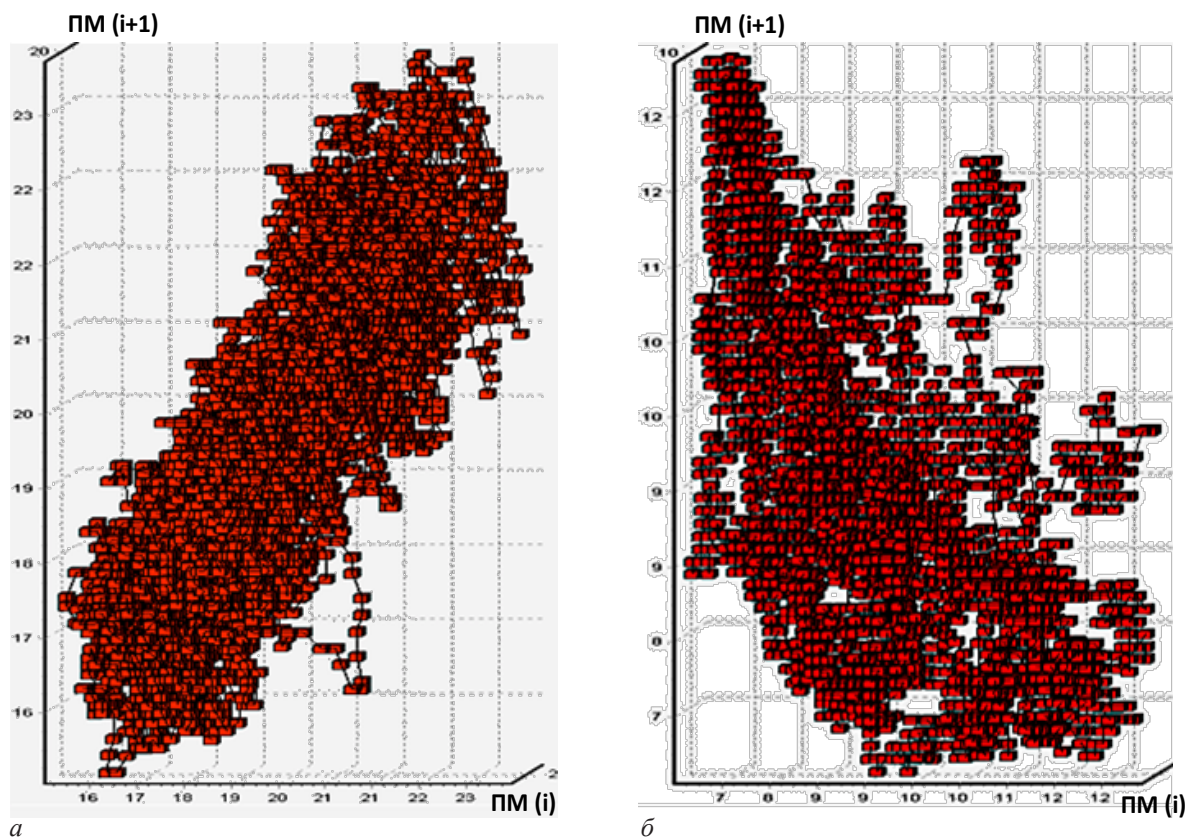
сегмента, ограничение нутритивного кровотока, усиление артериоловеноулярного шунтирования крови с развитием венозного полнокровия. У пациентов с сопутствующим СД наблюдались более выраженные статистически значимые сдвиги, охватывающие практически все сегменты микрососудистого русла [10]. Выраженные нарушения параметров амплитудно-частотных ритмических колебаний микрокровотока при спектральном анализе ЛДФ у пациентов с ОААНК с сопутствующим СД, обнаруженные в предыдущих исследованиях, нашли отражение в исследовании параметров нелинейной динамики (табл. 2).

Наибольшие сдвиги показателей у пациентов 2-й группы по сравнению с пациентами 1-й группы выявлены при изучении фрактальности, которая включала фрактальную размерность (Do) и индекс Херста (R/S). Фрактальная размерность отражает нерегулярность, изменчивость процесса и служит индикатором количества факторов, оказывающих влияние на систему МЦК. Индекс Херста, как дополнительный метод оценки фрактальности, дает представление об изменении динамики перфузии во времени. Хотя в обеих рассматриваемых группах пациентов показатель R/S оставался менее 1, что указывает на регулярный повторяемый характер динамики гемоперфузии, у пациентов с сочетанием перемежающейся хромоты с СД наблюдалось еще большее статистически значимое снижение показателей фрактальной размерности (Do, R/S). Этот факт свидетельствует о росте ригидности системы, ее повышенной устойчивости к действию факторов регуляции и ограничению их количества [2, 12]. Уменьшение сложности организации системы, упрощение механизмов контроля ее функционирования сопровождается уменьшением адаптивного потенциала микрососудистого русла [1, 13]. На фоне снижения параметров фрактальной динамики отмечается уменьшение величины нормированных показателей хаотического поведения системы (Hi). Поскольку любая биологическая система способна подстраиваться,

в соответствии с постоянно меняющимися условиями ее существования, полагают, что хаос, способствуя повышению степени свободы, обеспечивает оперативное переключение режима функционирования [14]. Одной из важных характеристик динамической системы является оценка ее фазового портрета, т.е. движение точки, определяющей состояние системы в некоторый момент времени. Совокупность точек фазового портрета представляет собой корреляционную связь между разной величиной перфузии. Другими словами, фазовый портрет определяет взаимосвязь показателя гемоперфузии со скоростью ее изменения [1]. Величина корреляционной размерности (D₂) микроциркуляции крови как мера сложности процесса подвержена выраженной индивидуальной вариабельности. Вместе с тем во 2-й группе пациентов наблюдалась некоторая тенденция к увеличению этого параметра, не достигшая, однако, уровня статистической значимости. Подобную ориентацию корреляционной размерности у больных ОААНК с СД можно объяснить наличием у них диабетической нейропатии различной степени выраженности, сопровождающейся частичной блокадой симпатической регуляции МЦК [10]. Неоднозначное влияние симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы на изучаемые параметры хорошо известно [15].

Анализ МЦК как динамической системы предполагает использование временных связей. При этом состояние изучаемой системы во времени оценивается по движению т.н. фазовой точки по траектории в фазовом пространстве. Это позволяет графически отобразить поведение системы [16]. Таким образом, графическое изображение нелинейных физиологических процессов – фазовый портрет – дает общую картину поведения системы [16].

На рисунке показаны фазовые портреты пациентов с ОААНК (А) и ОААНК с СД (Б), построенные по ЛДФ-граммам. У пациента А фазовый портрет представлен равномерной плотностью фазовых точек в центре фазового пространства без разброса по периферии. Это свидетельствует о достаточной



Примеры фазовых портретов ЛДФ-грамм пациентов с ОААНК (а) и ОААНК с СД (б). Ось абсцисс – амплитуда предыдущей точки величины ПМ (i, перфузионных единиц). Ось ординат – амплитуда последующей точки величины ПМ (i+1, перфузионных единиц). Нелинейные показатели. а: $D_0 - 1,25$; $R/S - 1,59$; $H_0 - 0,041$; $D_2 - 1,61$; $D_{2h} - 0,173$. б: $D_0 - 1,35$; $R/S - 0,49$; $H_0 - 0,025$; $D_2 - 1,43$; $D_{2h} - 0,101$. ЛДФ – лазерная доплеровская флоуметрия; ОААНК – облитерирующий атеросклероз артерий нижних конечностей; ПМ – показатель микроциркуляции в начальной (i) и последующей (i+1) точке исследуемого ряда; СД – сахарный диабет

Examples of phase portraits of LDF grams of patients with OAALL (a) and OAALL with DM (b). The abscissa axis is the amplitude of the previous point of the IM value (i, perf. units). The ordinate axis is the amplitude of the subsequent point of the PM value (i+1, perf. units). Nonlinear indicators. a: $D_0 - 1,25$; $R/S - 1,59$; $H_0 - 0,041$; $D_2 - 1,61$; $D_{2h} - 0,173$. б: $D_0 - 1,35$; $R/S - 0,49$; $H_0 - 0,025$; $D_2 - 1,43$; $D_{2h} - 0,101$. LDF – laser Doppler flowmetry; OAALL – obliterating atherosclerosis of the arteries of the lower extremities; PM – microcirculation indicator at the initial (i) and subsequent (i+1) points of the series under study; DM – diabetes mellitus

сложности построения системы, высоком разнообразии поведения и степени хаотизации тканевой гемоперфузии. Фазовый портрет пациента Б отличается уменьшением плотности фазовых точек в центре и некоторым смещением циклического облака на периферию фазового пространства. Это указывает на то, что изменение перфузии в данном случае менее разнообразно (менее хаотично), чем у пациента А. Особенности графических изображений фазовых портретов представленных пациентов подтверждаются сдвигами показателей нелинейной динамики. Более низкие значения корреляционной размерности (D_2) и корреляционной размерности, нормированной по уровню свободной энергии (D_{2h}), величины энтропии (H_0) и показателя Херста при сочетании ОААНК с СД у пациента Б свидетельствуют об упрощении системы, уменьшении хаотического компонента в ее функционировании и ограничении процесса саморегуляции [17].

Таким образом, СД вносит существенные изменения в нелинейно-динамические процессы МЦК у пациентов с ОААНК, характеризующиеся упрощением ее регуляции, снижением хаотизации и повышением функциональной ригидности. Подобные сдвиги

указывают на уменьшение адаптивного потенциала системы и ухудшение прогноза заболевания [6].

Заключение

В отличие от пациентов 1-й группы, у пациентов с ОААНК и сопутствующим СД поражение микрососудистого русла усугубляется развитием диабетической микроангиопатии, усиливающей несостоятельность МЦК и накладывающей отпечаток на течение заболевания и его прогноз. Негативное влияние СД на периферический кровоток хорошо известно, в том числе и у пациентов с перемежающейся хромотой. В то же время анализ поведения параметров нелинейной динамики МЦК, проведенный в настоящей работе, позволил получить ценную дополнительную информацию, расширяющую наши представления в области изучаемой патологии. Было показано, что сочетание СД с ОААНК сопровождается снижением значений фрактальной размерности, свидетельствующим об ограничении количества факторов, оказывающих влияние на тканевую гемоперфузию, делаая МЦК более ригидной и функционально менее лабильной. Снижение при этом сложности структуры ЛДФ-сигнала и уменьшение выраженности

хаотизации системы указывают на ограничение ее компенсаторно-адаптивного потенциала.

Изучение нелинейной природы физиологических систем является перспективным, интенсивно развивающимся направлением, позволяющим получить принципиально новую, дополнительную информацию.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare that they have no conflict of interest.

Литература / References

1. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: Колебания, информация, нелинейность : руководство для врачей. – М.: Либроком, 2013. – 496 С. [Krupatkin AI, Sidorov VV. Functional diagnostics of mikrotsirkulyatorno-tissue systems: Fluctuations, information, nonlinearity : guide for doctors. Moscow, Librokom, 2013:496. (In Russ.)].
2. Кроновер Р. Фракталы и хаос в динамических системах: перевод с англ. – М.: Техносфера, 2006. – 120 С. [Kronover R. Fractals and chaos in dynamic systems: translation from English. Moscow, Technosphere, 2006:120. (In Russ.)].
3. Goldberg EL, Rigney DR, West BD. Chaos and fractals in human physiology. In the world of science. 1990;(4):25-32.
4. Безручко Б.П., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Путь в синергетику: Экскурс в десяти лекциях. – М.: Ленанд, 2015. – 304 С. [Bezruchko BP, Koronovskij AA, Trubeckov DI, Hramov AE. Way to synergetics: Insight in 10 lectures. Moscow, Lenand, 2015:304. (In Russ.)].
5. Танканга А.В., Тихонова И.В., Чемерис Н.К. Нелинейный анализ изменений динамики периферического кровотока кожи человека в процессе старения // Вестн. новых мед. технол. – 2006. – Т. 3, № 13. – С. 96–98. [Tankanag AV, Tikhonova IV, Chemeris NK. Nonlinear analysis of changing in dynamics of cutaneous blood flow during the aging process in human. J New Med Technol. 2006;13(3):96-98. (In Russ.)].
6. Liao TE, Lo LW, Lin YJ, Chang SL, Hu YF, Chung FP, Chao TF, Liao JN, Yang HW, Lo MT, Chen SA. Nonlinear Heart Rate Dynamics Before and After Paroxysmal Atrial Fibrillation Events. Acta Cardiol Sin. 2022;38(5):594-600. Doi: 10.6515/ACS.202209_38(5).20220328A.
7. Стрельцова Н.Н., Васильев А.П. Особенности нелинейных динамических процессов и их взаимосвязь с показателями микроциркуляции у больных облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Лазерная мед. – 2022. – Т. 2, № 26. – С. 15–20. [Streltsova NN, Vasiliev AP. Non-linear dynamic processes and their correlation with indicators of microcirculation in patients with obliterating atherosclerosis of the lower extremities arteries according to laser doppler flowmetry. Laser Med. 2022;26(2):15-20. (In Russ.)]. Doi: 10.37895/2071-8004-2022-26-2-15-20.
8. Куликова А.Н. Облитерирующий атеросклероз артерий нижних конечностей на фоне сахарного диабета II типа (этиопатогенез, клиника, диагностика, хирургическое и медикаментозное лечение, профилактика): автореф. дис. ... д.м.н. – Саратов, 2009. – 38 С. [Kulikova AN. Obliterating atherosclerosis of lower limb arteries associated with type II diabetes mellitus (etiopathogenesis, clinical picture, diagnostics, surgical and drug treatment, prevention): abstract of abstract of thesis. ... MD. Saratov, 2009:38. (In Russ.)].
9. Национальные рекомендации по диагностике и лечению заболеваний артерий нижних конечностей. – М., 2019. – 89 С. [National recommendations for the diagnosis and treatment of lower limb arteries diseases. Moscow, 2019:89. (In Russ.)].
10. Стрельцова Н.Н., Васильев А.П., Тодосийчук В.В. Микрогемодинамика кожи у больных облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей с сахарным диабетом II типа // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2019. – Т. 2, № 18. – С. 28–34. [Streltsova NN, Vasiliev AP, Todosiichuk VV. Skin microhemodynamics in patients with obliterating atherosclerosis of lower extremities arteries and diabetes mellitus type 2. Regional hemodynamics and microcirculation. 2019;18(2):28-34. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2019-18-2-28-34.
11. Васильев А.П. Стрельцова Н.Н., Саламова Л.А. Функциональное состояние микрогемодинамики кожи у больных облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионарное кровообращение и микроциркуляция – 2017. – Т. 4, № 16. – С. 35–41. [Vasiliev AP, Streltsova NN, Salamova LA. Functionality of skin microhemocirculation in patients with obliterating atherosclerosis of lower extremity arteries as per laser doppler flowmetry. Regional hemodynamics and microcirculation. 2017;16(4):35-41. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-35-41.
12. Зуева М.В. Нелинейные фракталы: приложения в физиологии и офтальмологии. Обзор // Офтальмология. – 2014. – Т. 1, № 11. – С. 4–11. [Zueva MV. Nonlinear fractals: applications in physiology and ophthalmology. Ophthalmol Russ. 2014;11(1):4-11. (In Russ.)]. Doi: 10.18008/1816-5095-2014-1-4-11.
13. Xiong LI, Garfinkel A. Are physiological oscillations physiological? J Physiol. 2023. Doi: 10.1113/JP285015.
14. Судаков К.В. Функциональные системы. – М.: РАМН, 2011. – 319 С. [Sudakov KV. Functional systems. Moscow, RAMS, 2011:319. (In Russ.)].
15. Эйдукайтис А., Варонецкас Г., Жемайтите Д. Изменение хаотичности сердечного ритма у здоровых испытуемых в ходе функциональных проб и различных стадий сна // Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием и III школы-семинара «Медленные колебательные процессы в организме человека: теоретические и прикладные аспекты нелинейной динамики в физиологии и медицине». – Новокузнецк, 2007. – С. 68–74. [Eidukaitis A, Varonetskaskas G, Zemaityte D. Changes in the randomness of heart rhythm in healthy subjects during functional tests and different stages of sleep. Materials of the V All-Russian Symposium with international participation and the III school-seminar «Slow oscillatory processes in the human body: theoretical and applied aspects of nonlinear dynamics in physiology and medicine». Novokuznetsk, 2007:68-74. (In Russ.)].
16. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: Техносфера, 2006. – 120 С. [Kronover RM. Fractals and chaos in dynamic systems. Moscow: Technosphere, 2006:120. (In Russ.)].
17. Современные возможности анализа поведения микроциркуляции крови как нелинейной динамической системы / Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Кучерик А.О., Троицкий Д.П. // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2010. – Т. 9, № 1. – С. 61–67. [Krupatkin AI, Sidorov VV, Kucherik AO, Troitsky DP. Modern possibilities to analyse the behavior of microhemocirculation as nonlinear dynamic system. Regional blood circulation and microcirculation. 2010;9(1):61-67. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2010-9-1-61-67.

Информация об авторах

Стрельцова Нина Николаевна – научный сотрудник отделения артериальной гипертензии и коронарной недостаточности научного отдела клинической кардиологии Тюменского кардиологического научного центра, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, г. Томск, Россия, e-mail: sss@infarkta.net, ORCID: 0000-0001-8675-9103.

Васильев Александр Петрович – д-р мед. наук, главный научный сотрудник отделения артериальной гипертензии и коронарной недостаточности научного отдела клинической кардиологии Тюменского кардиологического научного центра, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, г. Томск, Россия, e-mail: vaschram@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-4931-5383.

Authors information

Streltsova Nina N. – Scientific Researcher, Department of Arterial Hypertension and Coronary Insufficiency, Scientific Division of Clinical Cardiology, Tyumen Cardiology Research Center, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, e-mail: sss@infarkta.net ORCID: 0000-0001-8675-9103.

Vasiliev Alexander P. – MD, Head Scientist, Department of Arterial Hypertension and Coronary Insufficiency, Scientific Division of Clinical Cardiology, Tyumen Cardiology Research Center, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, e-mail: vaschram@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-4931-5383.