

КРУПАТКИН А. И.¹, СИДОРОВ В. В.²,
КУЧЕРИК А. О.³, ТРОИЦКИЙ Д. П.³

Современные возможности анализа поведения микроциркуляции крови как нелинейной динамической системы

¹ Центральный НИИ травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова, Москва

² ООО НПП «ЛАЗМА»

³ Владимирский государственный университет

e-mail: arch2003@mail.ru

Реферат

Предложена методология анализа поведения микроциркуляции крови как нелинейной динамической системы с помощью компьютерной обработки записей лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Оценивались фрактальная размерность с помощью показателя Хаусдорфа (D_0) и показателя Херста (R/S), относительная энтропия ЛДФ-сигнала (H_0) и энтропия-информация (Hi), фазовый портрет и его количественная характеристика с помощью фрактальной размерности (D_0) и корреляционной размерности (D_2), в том числе нормированной по энергии колебательного процесса ($D_{2\text{норм}}$). Применение вышеуказанных параметров у 20 здоровых лиц и 44 больных при дистрофии кожи (денервационный нейродистрофический синдром), регенерации (реиннервация ткани) и вегетативной дистонии выявило наибольшую эффективность использования показателей, отражающих динамику поведения кровотока (R/S, H_0 , H_1 , D_2 , $D_{2\text{норм}}$).

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, хаос, фрактал, энтропия.

Krupatkin A. I.¹, Sidorov V. V.², Kucherik A. O.³, Troitsky D. P.³ Modern possibilities to analyse the behavior of microhemocirculation as nonlinear dynamic system

¹ Central Institute of Traumatology and Orthopedics by name of N. N. Priorov, Moscow

² SPF «Lazma»

³ Vladimir State University

e-mail: arch2003@mail.ru

Abstract

The methodology was proposed to analyse the behavior of microhemocirculation as nonlinear dynamic system with the use of computer processing of laser Doppler flowmetry records. The following indices have been estimated: fractal dimension in terms of Hausdorf index (D_0) and Herst index (R/S), relative entropy (H_0) and entropy–information (H_1), phase image and its quantitative description with fractal dimension (D_0) and correlative dimension (D_2) including value of D_2 , normalized by energy of oscillatory process ($D_{2\text{norm}}$). The use of these indices at 20 healthy persons and 44 patients with skin dystrophy after denervation, during regeneration process (skin reinnervation) and with autonomic vascular distony revealed that indices reflecting the dynamics of behavior (R/S, H_0 , H_1 , D_2 , $D_{2\text{norm}}$) were more effective.

Keywords: nonlinear dynamic system, chaos, fractal, entropy.

Введение

Движение крови в микрососудах представляет собой не строго фиксированный стационарный процесс, а сложную динамическую колебательную систему. Благодаря развитию методов спектрального анализа колебаний кровотока по частоте и амплитуде, в частности вейвлет-анализа записей лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), выделяют целый ряд частотных диапазонов, в каждом из которых проявляется активность со стороны определенных регуляторных механизмов.

Однако, наряду с ритмическими колебательными процессами, осуществляемыми с определенной частотой, процесс изменения перфузии ткани кровью содержит хаотический компонент, состояние которого может описываться с помощью другого

методологического подхода — количественных параметров методов теории информации, нелинейной динамики и фрактальной геометрии.

Если проводить регистрацию ЛДФ-грамм в отдельные интервалы времени, то их вид может не совпадать, так как динамическое состояние микроциркуляции постоянно изменяется в зависимости от физиологической потребности биоткани. Поэтому зарегистрированные данные зависят от предыдущего состояния биоткани или от начальных условий процесса. Изменчивость перфузии при анализе ЛДФ-грамм может характеризоваться как состояния «хаоса» [3], так как имеет место непредсказуемость изменения перфузии из-за существенной зависимости от состояния биоткани до начала регистрации

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

ЛДФ-граммы. В настоящее время нелинейные процессы в микрогемодиализном русле систематически не изучены. В литературе имеются лишь единичные работы по данной тематике [4, 7, 8].

Цель исследования

Цель данной статьи — обоснование методологии оценки нелинейно-динамических процессов в микрогемодиализном русле и их клинико-физиологического применения.

Материалы и методы исследования

Обследования проводились у 44 испытуемых в возрасте от 24 до 57 лет, контрольную группу составили 20 практически здоровых лиц аналогичного возраста без сопутствующих заболеваний, в том числе сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем.

I группа — 24 больных в сроки 2 недели – 1 год (IA – 2 недели – 2 мес., IB – 6 мес. – 1 год) после резаных травм нижней трети предплечья и полного анатомического перерыва срединного нерва, в том числе интраневральных симпатических и сенсорных немиелинизированных волокон. Результаты исследования иннервации до операции с помощью стимуляционной электронейромиографии (ЭНМГ) были отрицательными, что свидетельствовало об отсутствии соматических миелинизированных моторных и сенсорных волокон в зонах иннервации.

II группа — те же пациенты в динамике после микрохирургического шва нервов. В соответствии с данными ЭНМГ в процессе регенерации нервов доимпульсная стадия (IIA) сменялась стадией импульсной реиннервации тканей (IIB) с появлением М-ответов и/или сенсорных потенциалов. У всех включенных в группу больных отмечались хорошие исходы восстановления иннервации в отдаленные сроки после шва.

III группа — 20 пациентов с синдромом вегетативной дистонии и явлениями спазма (IIIA) или дилатации (IIIB) кожных резистивных сосудов кисти.

Лазерную доплеровскую флоуметрию (ЛДФ) со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока проводили на аппарате ЛАКК-02 (НПП «Лазма», Россия) согласно описанной ранее методике [3]. Исследования осуществлялись при комнатной температуре 22 °С в положении сидя после 30-минутного отдыха. Записи проводили в коже ладонной поверхности дистальной фаланги II-го пальца кисти (зона иннервации срединного нерва). Эта зона гладкой кожи верхней конечности богата артериоло-венулярными анастомозами (АВА), исключительно зависимыми от симпатической вазомоторной иннервации. Измерения проводили в течение 300 секунд с помощью зонда диаметром 3 мм в красном (КР) канале лазерного излучения (длина волны — 0,63 мкм, толщина зондирования около 0,8 мм). Для анализа выделялись фрагменты записей длительностью 300 сек. Перед анализом ЛДФ-грамм проводили их выравнивание параллельно изолинии для устранения погрешностей при анализе колебательного процесса. Оценивали показатель

микроциркуляции (ПМ, перфузионные единицы, п. е.), характеризующий общую (капиллярную и внекапиллярную) усредненную стационарную перфузию микрососудов за время исследования. Величина ПМ пропорциональна количеству эритроцитов и их средней линейной скорости в зондируемом объеме. Колебательную составляющую общей перфузии исследовали по среднему квадратичному отклонению колебаний кровотока (σ , п. е.), коэффициент вариации (K_v) по формуле $K_v = \sigma / \text{ПМ}$. С помощью вейвлет-анализа (программа 2.2.0.507, НПП «Лазма», Россия) определяли амплитуды колебаний кровотока (A , п. е.) активного тонус-формирующего диапазона частот (эндотелиального NO-зависимого 0,0095–0,02 Гц, нейрогенного симпатического 0,02–0,046 Гц; сенсорного пептидергического в низкочастотной области миогенного диапазона 0,047–0,069 Гц; собственно миогенного или вазомоций 0,07–0,15 Гц) и амплитуды колебаний в пассивных частотных диапазонах (кардиального или сердечного — 0,8–1,6 Гц, дыхательного — 0,2–0,4 Гц).

Статистическую обработку проводили с помощью программы Biostat 4.03, для сравнения двух выборок использовали критерий Манна–Уитни.

Результаты исследования и их обсуждение

Методология оценки нелинейной динамики поведения микроциркуляции крови

В настоящее время для получения числовых параметров при анализе ЛДФ-грамм используется теория случайных процессов, которая дает результаты во временном интервале регистрации. В данной работе ориентирами при выборе математического аппарата для анализа ЛДФ-грамм служили следующие обстоятельства. Во-первых, изменение перфузии — это процесс, который может быть интерпретирован как «детерминированный хаос», т. е. анализируемый процесс имеет свойство существенной зависимости от начальных условий [1]. Другой критерий оценки хаотического процесса — это наличие статистической связи между зарегистрированными значениями перфузии, которая определяется временем корреляции τ автокорреляционной функции ЛДФ-граммы. На рис. 1 приведена характерная автокорреляционная функция ЛДФ-граммы.

По оси абсцисс (X) откладывается время в секундах, по оси ординат (Y) — значения автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция имеет аperiодический, затухающий вид, что указывает на хаотический детерминированный характер колебаний. Чем меньше время корреляции, тем быстрее происходит «забывание» предыдущих значений, т. е. процесс является более «хаотичным». Случай $\tau=0$ соответствует белому шуму. При анализе ЛДФ-сигналов установлено, что время корреляции может составлять $\tau \approx 40\text{--}50$ с.

Для оценки микроциркуляции крови как нелинейного динамического процесса, использованы методы расчета фрактальной размерности, определение энтропии, а также анализ фазового портрета.

Фрактальный анализ. Слово «фрактал» происходит от латинских слов *fractus* — «дробный» и

frangere – «ломать», характеризует «изломанность», нерегулярность процесса. Фрактал соответствует моментальному снимку исследуемого процесса. Особое значение фрактального анализа временных рядов состоит в том, что он учитывает поведение системы не только в период измерений, но и учитывает его предысторию и в определенных случаях позволяет предсказать дальнейшее поведение, опираясь на измеренные значения. Фрактальность процесса описывает иррегулярность или изрезанность, присущую ЛДФ-грамме. Фрактальность оценивается величиной фрактальной размерности, которая служит индикатором количества факторов, влияющих на систему микроциркуляции крови.

В данной работе проводилось определение фрактальной размерности ЛДФ-грамм двумя способами:

1) методом Хаусдорфа с применением алгоритма Минковского [1, стр.144];

2) методом нормированного размаха (R/S-анализ), по показателю Херста, [5].

Метод Хаусдорфа. При фрактальной размерности (D_0) менее 1,4 на систему влияет один или несколько факторов, изменяющих систему в одном направлении. В случае, если размерность около 1,5, то факторы, действующие на систему, разнонаправлены, но компенсируют друг друга. Поведение системы в таком случае является стохастическим и хорошо описывается обычными статистическими методами. Если фрактальная размерность значительно более 1,6, система неустойчива и готова перейти в новое состояние. На рис. 2 (а, б) показаны примеры ЛДФ-грамм с разными фрактальными размерностями, параметр D_0 .

Большее значение фрактальной размерности $D_0 = 1,63$ для ЛДФ-граммы, представленной на рис. 2, б, по сравнению с ЛДФ-граммой на рис. 2, а, $D_0 = 1,29$, обусловлено значительной иррегулярностью перфузии микрокровотока: фрагмент ЛДФ-граммы от начала записи до времени 140 с и последующий участок до окончания регистрации имеют существенные отличия. Осцилляции микрокровотока, представленные на рис. 2, а, представляют собой более регулярный процесс по сравнению с рис. 2, б. Система регуляции микроциркуляторного русла второго испытуемого не стабильная, возможно чередование регуляции указанных фрагментов ЛДФ-грамм или перестройка регуляции микрокровотока на другое состояние.

Показатель Херста. Дополнительно для сравнения фрактальных свойств ЛДФ-грамм применяется показатель Херста — (R/S). Если размерность Хаусдорфа определяет структуру ЛДФ-граммы, то показатель Херста дает понятие об изменении динамики перфузии во времени. Для ЛДФ-грамм, где перфузия изменяется в виде регулярно повторяющихся в течение времени регистрации осцилляций микрокровотока, показатель Херста R/S меньше 1. Чем более регулярен процесс, тем меньше значение показателя. При значениях больше 1 в структуре ЛДФ-граммы присутствует значительная нерегулярность, переход на другое состояние регуляции.

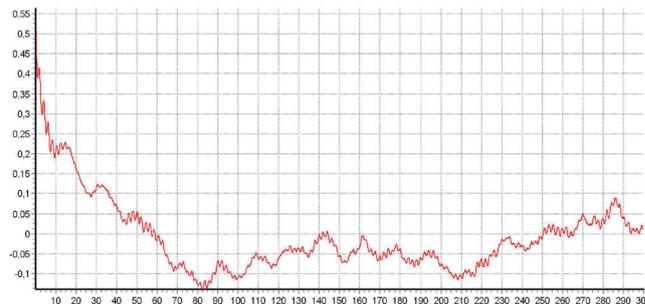
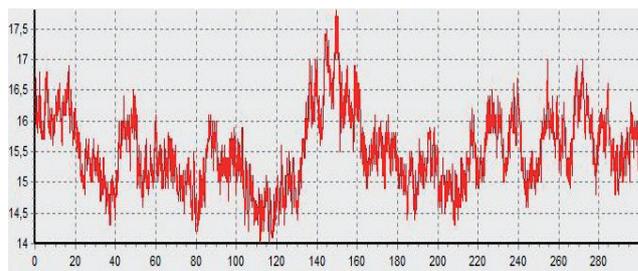
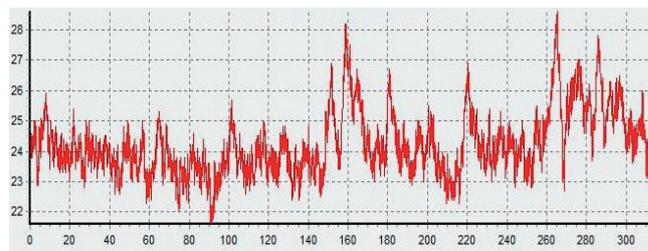


Рис. 1. Пример автокорреляционной функции ЛДФ-граммы



а



б

Рис. 2. а — пример ЛДФ-граммы испытуемого А. $D_0 = 1,29$; б — пример ЛДФ-граммы испытуемого Б. $D_0 = 1,63$

Для ЛДФ-грамм на рис.2, а — $R/S=0,53$, а на рис. 2, б — $R/S=1,19$. Эти данные являются дополнительным подтверждением более значительных изменений динамики кровотока у второго испытуемого.

Энтропия. Энтропия является базисным понятием теории информации, а также мерой неопределенности поведения системы. В определенном смысле энтропия — мера рассеяния, и в этом отношении она подобна дисперсии. Это соответствует определению энтропии как числа микросостояний на данное макросостояние.

При анализе ЛДФ-грамм энтропия 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. При постоянном уровне энергии системы, что соответствует равномерному распределению вероятностей нахождения регистрируемого процесса в одном из возможных состояний, количественно энтропия пропорциональна логарифму числа способов

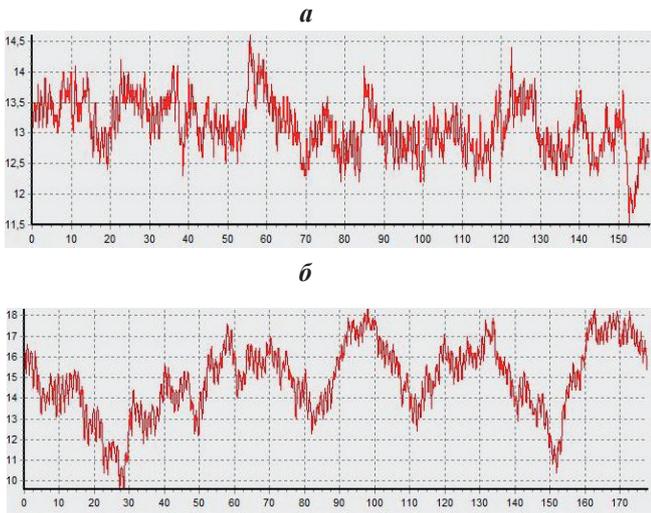


Рис. 3. Пример ЛДФ-граммы 52 летней женщины, $E_0=3,4$; $N_i=0,2$ (а); Пример ЛДФ-граммы 50 летней женщины, $E_0=7,8$; $N_i=0,12$ (б)

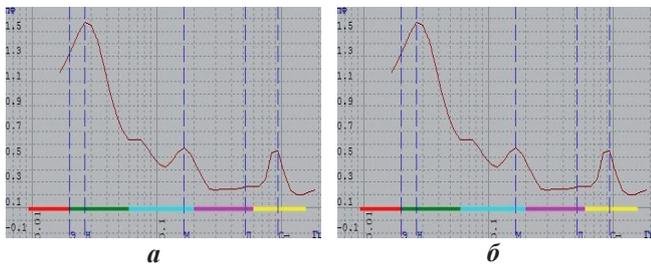


Рис. 4. Амплитудно-частотные спектры осцилляций микрокровотока в ЛДФ-граммах: а и б — значения, соответствующие приведенным на рис. 3, а, б

существования процесса микроциркуляции (закон Больцмана). Чем их больше, тем выше энтропия. Эти формулировки строго утверждают, что энтропия — функция состояния системы.

В нашем случае энтропия сигнала H_x определяется по формуле Шеннона, что позволяет учесть неравномерность:

$$H_x = -\sum_x P(x) \ln P(x)$$

где x — исследуемый сигнал;

$P(x)$ — распределение вероятностей.

Относительная энтропия (H_0) состояния микроциркуляторного русла вычисляется путем нормировки H_x на $\ln r$, где r — число отсчетов по оси времени ЛДФ-граммы.

Энтропия-информация (H_i) есть характеристика максимума вероятности состояния системы, которая нормирована по отношению к энергии и к числу элементов системы. Ее определяли путем нормировки относительной энтропии на относительную «энергию» микроциркуляторного русла E_0 . Чем ниже величина H_i , тем меньше вклад информационного компонента в величину H_0 . С другой стороны, именно энтропия, нормированная по энергии колебательного процесса, позволяет оценивать хаотический компонент поведения системы и процесс самоорганизации в идентичных, не зависящих от энергии условиях. Относительная энергия E_0 определялась

отношением энергии, сообщаемой эритроцитам в результате работы активных и пассивных механизмов регуляции микрокровотока: $Q_1 = \sigma T$ (где σ — среднее колебание микрокровотока, определяется по формуле вычисления среднего квадратического отклонения; T — время регистрации ЛДФ-граммы), к работе стационарного микрокровотока $Q_2 = MT$ (где M — среднее арифметическое значение перфузии):

$$E_0 = (\sigma/M)100 \%$$

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 [3], то более интенсивная работа активных механизмов проявляется, как правило, только для одного из механизмов: либо эндотелиального, либо нейрогенного, либо миогенного. Это обстоятельство отражается при регистрации ЛДФ-граммы в виде более упорядоченной структуры колебаний перфузии, увеличением параметра σ , а значит, приводит к уменьшению энтропии. Увеличение стационарного микрокровотока M относительно нормы является следствием вазодилатации артериолярного звена в микроциркуляторном русле, что проявляется в ЛДФ-грамме увеличением амплитуд сердечного ритма. Поэтому нормировка σ/M позволяет параметр E_0 соотносить с перераспределением энергии в пользу активных механизмов регуляции в микроциркуляторном русле.

На рис. 3, а, б приведены примеры ЛДФ-граммы двух испытуемых женщин — 52 лет и 50 лет с разной энтропией.

Из приведенных на рис. 3 и 4 примеров видно, что при активации нейрогенной регуляции (рис.3, б и рис. 4, б) ЛДФ-грамма имеет более упорядоченный вид, параметр E_0 выше и H_i ниже.

Фазовый портрет. Корреляционная размерность. Понятия «фрактал» и «фрактальная размерность» применяются для анализа статических состояний ЛДФ-грамм, т. е. при этом не оценивается временная связь значений перфузии в микроциркуляторном русле. Для анализа временных связей используется подход, при котором микроциркуляторное русло рассматривается как динамическая система. В соответствии с теорией математического «хаоса», микроциркуляторное русло кровообращения представляет собой нелинейную динамическую систему, которая характеризуется сильной чувствительностью поведения к начальным условиям.

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.

Фазовый портрет микроциркуляторного русла может быть построен по данным ЛДФ-граммы в соответствии с теоремой Танкенса [6]. Координаты точек фазового портрета представляют собой значения временного ряда ЛДФ-граммы $PM(t_1)$, $PM(t_2)$, $PM(t_3)$, ..., $PM(t_k)$. Используется метод временной задержки. Например, одна фазовая точка имеет координаты по одной координатной оси $PM(t_1)$, а по другой – $PM(t_1 + \tau)$, отстоящую по оси времени на время задержки τ , равную времени первого пересечения нуля автокорреляционной функции, показанной на рис. 1.

На рис. 5 приведены фазовые портреты, построенные по ЛДФ-граммам 24-летнего (а) и 57-летнего испытуемого (б).

Временной сдвиг τ , 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, $PM(k)$ и $PM(k + \tau)$ — это значения перфузии, связанные между собой причинно-следственными обстоятельствами, обусловленными физиологической потребностью биоткани. Совокупность точек фазового портрета представляет собой корреляционную связь между разными значениями перфузии. Из приведенных на рис. 6 двух фазовых портретов визуально видны отличия. Для количественной оценки фазовых портретов применяется корреляционный интеграл $C(r)$, $C(r) = r^{D_2}$, где r — расстояние между парами фазовых точек; D_2 — является корреляционной размерностью фазового портрета. Для приведенных на рис. 5 фазовых портретов корреляционная размерность для портрета а) = 1,54; б) = 1,42, причем величины E_0 были сходными в обоих случаях. То есть при одном и том же расстоянии между парами фазовых точек i корреляционный интеграл больше (больше число таких пар, плотность фазовых точек в фазовом пространстве выше) для молодого 24-летнего испытуемого, чем для 58-летнего мужчины. Это значит, что причинно-следственное изменение перфузии в микроциркуляторном русле у молодого человека более разнообразно («хаотично»), чем у мужчины в возрасте.

В публикациях, посвященных применению теории «хаоса», фазовым портретом называют «аттрактор» от английского «attract» — «привлекать», «притягивать» — множество состояний точек фазового пространства динамической системы, к которому она стремится с течением времени. Фазовый портрет микроциркуляторного русла — это странный аттрактор, наименование «странный» принадлежит аттрактору, у которого прогнозирование фазовых траекторий невозможно из-за существенной зависимости от начальных условий.

При характеристике неопределенности (энтропии) и хаотического поведения системы (фазового портрета) необходимо учитывать, что на исходные

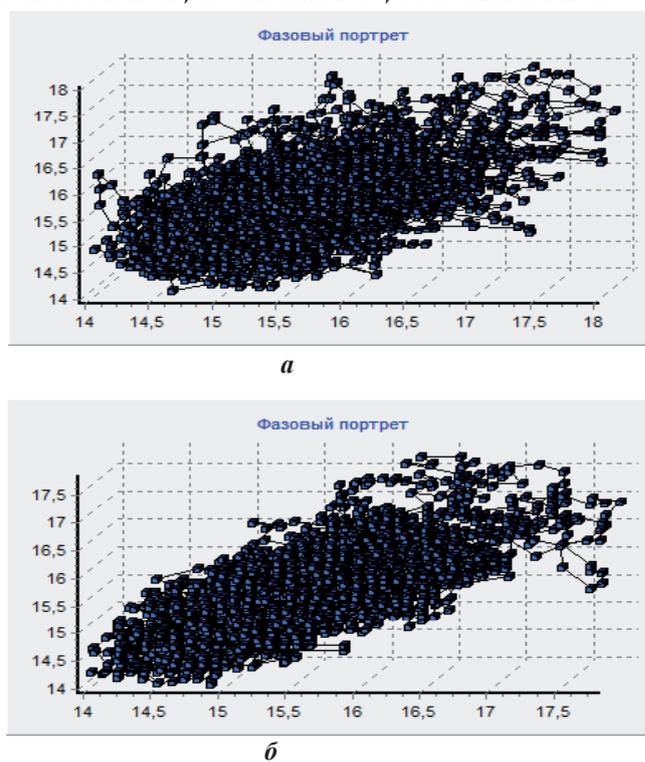


Рис.5. Примеры фазовых портретов ЛДФ-грамм испытуемых 24 лет (а) и 57 лет (б)

значения энтропии и корреляционной размерности влияют как величина энергии колебательного процесса, так и собственно хаотическое поведение. Величины H_0 и D_2 отражают оба этих компонента. Для сравнительной оценки хаоса у разных испытуемых или пациентов целесообразно использовать нормирование величины H_0 и D_2 по энергии колебательного процесса — использовать показатели H_1 и $D_{2норм}$. Это позволяет оценивать хаотический компонент поведения системы и процесс самоорганизации (при снижении хаоса) в идентичных, не зависящих от энергии условиях.

Клинические аспекты анализа поведения микроциркуляции крови как нелинейной динамической системы

Результаты исследования нелинейных показателей в группах испытуемых представлены в табл. 1.

Группы, сформированные в данной работе, отражают разные клинико-физиологические функциональные состояния микроциркуляторно-тканевых систем — дистрофические изменения, связанные с денервацией как компонент нейроциркуляторного синдрома (I), состояние регенерации нерва и процесс восстановления иннервации ткани (II), дисрегуляторную патологию, связанную с синдромом вегетативной дистонии (III). Для каждого из вышеперечисленных состояний характерны свои особенности нелинейной динамики поведения кровотока. Проведение исследований в одной и той же зоне кожи (дистальная фаланга II-го пальца кисти) и в одном и том же временном промежутке (запись в течение 300 сек) позволила провести достоверный сравнительный анализ изучаемых показателей.

Группа		E_o	D_o	R/S	H_o	H_i	D_2	$D_{2\text{норм}}$
I	2 нед. – 2 мес.	4,88±0,3*	1,36±0,3	1,19±0,5*	0,63±0,03*	0,136±0,008	1,3±0,06*	0,27±0,07
	6 мес. – 1 год	12,4±2,5*	1,32±0,3	0,79±0,3*	0,79±0,02	0,063±0,03*	1,47±0,05*	0,12±0,05*
II	A	14,9±6,3*	1,26±0,25	0,86±0,2*	0,84±0,02	0,083±0,03*	1,55±0,08	0,1±0,03*
	B	10,3±1,9*	1,44±0,4*	1,39±0,5*	0,9±0,03	0,089±0,02*	1,51±0,05	0,15±0,04*
III	A	24,1±4,2*	1,3±0,28	0,59±0,2	0,89±0,03	0,045±0,03*	1,62±0,04	0,067±0,02*
	B	8,3±1,4*	1,24±0,2	1,38±0,3*	0,88±0,02	0,1±0,02*	1,62±0,03	0,19±0,03*
Контроль		5,76±0,6	1,33±0,4	0,66±0,2	0,84±0,05	0,155±0,01	1,56±0,04	0,27±0,04

* — p менее 0,05 по отношению к контролю.

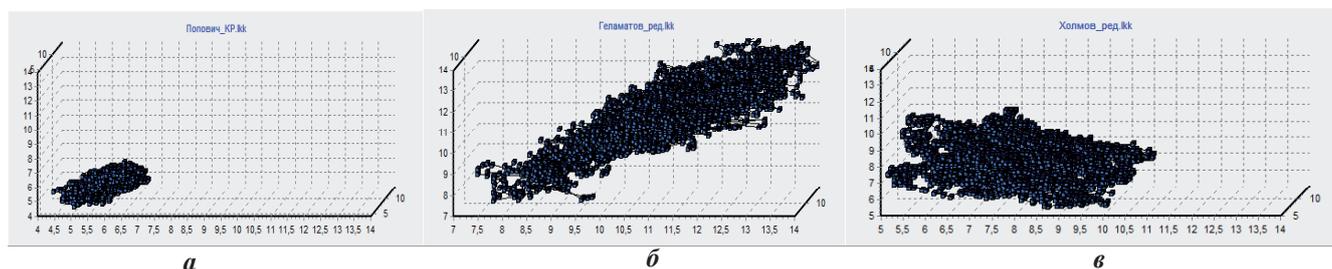


Рис. 6. Примеры фазовых портретов: а) — кожный нейродистрофический синдром, 1 мес. после полного перерыва срединного нерва, $D_2=1,34$, $D_{2\text{норм}}=0,21$; б) — микроциркуляция в зоне иннервации срединного нерва, регенерация срединного нерва – 2 мес. после шва нерва, $D_2=1,48$, $D_{2\text{норм}}=0,16$; в) — синдром вегетативной дистонии, периферический ангиоспазм сосудов пальцев кисти, $D_2=1,61$, $D_{2\text{норм}}=0,06$

Наиболее грубые дистрофические сдвиги были характерны в сроки 2 недели – 2 мес. после повреждения нерва. Характерны дефицит энергии колебательного процесса (E_o) с уменьшением активности регуляторных систем. Возрастание показателя R/S-сигнала свидетельствует о нерегулярности кровотока и неустойчивости системы регуляции микроциркуляции. Показатели хаоса (H_i сигнала, $D_{2\text{норм}}$ фазового портрета) не изменены, но в отдельных случаях увеличены на фоне грубого дефицита информационно-регуляторных факторов и энергии колебательного процесса (рис. 6). В условиях длительной денервации ткани в ней происходят компенсаторно-приспособительные изменения, в том числе прораствание тонких немиелинизированных нервных волокон из соседних зон сохраненной иннервации и связанная с этим определенная активация регуляции микрогемодициркуляции, прирост величины E_o . Поэтому нелинейные показатели в сроки 6 мес. – 1 год изменены в меньшей степени. Сохраняется увеличение фрактальной размерности R/S-сигнала, хотя динамика перфузии носит более регулярный и повторяемый характер (R/S-сигнала менее 1); за счет увеличения напряженности регуляции и прироста энергии колебательного процесса отмечается снижение хаоса в системе (по величине H_i -сигнала и $D_{2\text{норм}}$ фазового портрета).

Процесс регенерации нерва вносит существенные коррективы в макроскопические показатели

поведения кровотока. Хотя отмечается возрастание величины E_o , но ее прирост, особенно на доимпульсной стадии (IA), неоднороден и вариабелен у разных больных, что, вероятно, определяется индивидуальными особенностями регенераторного процесса и приращением регуляции в системе. За счет относительно высоких значений E_o характерно снижение хаотического поведения (H_i и $D_{2\text{норм}}$ фазового портрета) на обеих стадиях регенерации в целом по группе. Следует отметить, что у отдельных пациентов с высокими показателями E_o , превышавшими контрольные значения в 2 раза и более, величины D_2 фазового портрета были повышенными. В то же время нормализации фрактальной динамики во II группе (по величине R/S-сигнала) не происходило, что свидетельствует о сохранении элементов неустойчивости системы в условиях неполной реиннервации. Различия с приводимыми ранее величинами E_o , соответствующие коэффициенту вариации в группах I и II [2], связаны с включением в предыдущую работу только данных по грубой денервации в сроки 2 недели – 2мес.; различия с приводимыми ранее величинами H_o [2] связаны с использованием при расчете энтропии значений \ln , а не \log , как в предыдущей работе.

При синдроме вегетативной дистонии изменения нелинейных показателей отмечались как в IIIA группе с периферическим вазоспазмом, так и в IIIB группе с увеличением пульсового кровенаполнения. Различиями служили снижение хаотического пове-

дения кровотока в обеих группах, особенно в группе ША (по величине H_1 и $D_{2\text{норм}}$ фазового портрета, рис. 6), и увеличение фрактальной динамики, нерегулярности поведения сигнала в группе ШБ (по величине R/S-сигнала).

Таким образом, исследование показателей нелинейной динамики поведения кровотока в микрогемоциркуляторном русле служит существенным дополнением к имеющемуся арсеналу диагностических средств. Поскольку оцениваются параметры колебательного процесса, то их анализ помогает понять состояние макроскопических характеристик поведения тех модулирующих факторов, которые влияют на кровотоки в микроциркуляторном русле. Имеется

возможность оценить как сложность структуры ЛДФ-сигнала (показатель D_0), так и характеристики динамики поведения кровотока — повторяемость или нерегулярность процесса (показатель Херста), неопределенность или детерминизм поведения (относительная энтропия сигнала), выраженность хаоса поведения (корреляционная размерность D_2 фазового портрета). Наиболее информативными и чутко отражающими как патологические, так и саногенетические изменения являются показатели динамики поведения кровотока. Для обоснованного сравнения разных клинических групп величины энтропии и корреляционной размерности целесообразно нормировать по энергии колебательного процесса.

Литература

1. Кроновер, Р. Фракталы и хаос в динамических системах / Р. Кроновер ; пер. с англ. — М. : Техносфера, 2006.
2. Крупаткин, А. И. Исследование информационных процессов в микрососудистых сетях с помощью вейвлет-анализа колебательных структур кровотока / А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров, И. А. Кутепов // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. — 2009. — № 3. — С. 21–31.
3. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови : руководство для врачей / под ред. А. И. Крупаткина, В. В. Сидорова. — М. : Медицина, 2005. — 256 с.
4. Танканаг, А. В. Исследование возрастных особенностей колебаний периферического кровотока кожи человека методами нелинейной динамики / А. В. Танканаг, И. В. Тихонова, Н. К. Чемерис // Рос. физиол. журн. — 2008. — Т. 94. — № 3. — С. 260–266.
5. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер ; пер. с англ. — М. : Мир, 1991. — 254 с.
6. Шустер, Г. Детерминированный хаос. Введение / Г. Шустер ; пер. с англ. — М. : Мир, 1988. — 240 с.
7. Carr, R. T. Nonlinear dynamics in microvascular blood flow / R. T. Carr, M. Lacoïn // Ann. Biomed. Eng. — 2000. — Vol. 28. — № 6. — P. 641–652.
8. Griffith, T. M. Integration of non-linear cellular mechanisms regulating microvascular perfusion / T. M. Griffith, D. H. Edwards // Proc. Inst. Mech. Eng. — 1999. — Vol. 213. — № 5. — P. 369–383.