

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАРУШЕНИЙ СИСТЕМЫ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

Игорь Викторович Бархатов\*

Областная клиническая больница №3, г. Челябинск

### Реферат

Вопросы профилактики и лечения различных нарушений микроциркуляции составляют одну из важнейших проблем медицинской практики. Трудности изучения микроциркуляции обусловлены очень малыми размерами микрососудов и сильной разветвленностью внутриорганных сосудистых сетей. В настоящее время в нашей стране в клиническую практику активно входят различные методы исследования микроциркуляции крови человека с использованием лазерной доплеровской флоуметрии. В обзоре рассмотрены основные методы лазерной доплеровской флоуметрии в диагностике различных нарушений в системе микроциркуляции крови. Данный метод основан на определении перфузии ткани кровью путём измерения доплеровского сдвига частот, возникающего при зондировании ткани лазерным излучением, с последующей регистрацией излучения, отражённого от подвижных и неподвижных компонентов ткани. Ритмическая характеристика колебательных процессов в системе микроциркуляции имеет большую значимость, особенно в ранней диагностике, при многих нозологических формах. Потеря в лазерной доплеровской флоуграмме тех или иных колебаний трактуется как «спектральное сужение» и служит диагностическим критерием нарушения механизмов регуляции микроциркуляции, которые напрямую связаны с расстройствами кровотока и нарушением трофики в тканях. Применение амплитудно-частотного анализа колебаний кровотока позволяет неинвазивно оценить влияние различных компонентов тонуса микрососудов. При этом рассчитывается показатель нейрогенного и миогенного тонуса и показатель шунтирования. При амплитудно-частотном анализе полученного при лазерной доплеровской флоуметрии спектра используются нормированные показатели, определяющие максимальную амплитуду колебаний кровотока в разных диапазонах, а также их соотношения в виде индекса эффективности микроциркуляции. Среди различных форм расстройств микроциркуляции различаются гиперемическая, спастическая, спастико-атоническая, структурно-дегенеративная, застойная и статическая формы. Каждая из этих форм микроциркуляторных расстройств характеризуется определённым соотношением структурно-функциональных и гемореологических изменений в микрососудах, а также нарушениями барьерной функции. В статье описаны принципы нарушений микроциркуляции.

**Ключевые слова:** микроциркуляция, нарушения микроциркуляции, лазерная доплеровская флоуметрия.

**LASER DOPPLER FLOWMETRY FOR HUMAN BLOOD MICROCIRCULATION ASSESSMENT** I.V. Barhatov. *Regional Clinical Hospital №3, Chelyabinsk, Russia.* The prevention and treatment of various microcirculation disorders are one of the most important problems of medical practice. The difficulties of studying the microcirculation are related to the blood vessels small size and extensive branching within organ tissues. At present, various methods of microcirculation assessment using the laser Doppler flowmetry are applied in active clinical practice in our country. The review covers the main methods of laser Doppler flowmetry used for the diagnosis of various microcirculation disorders. The method is based on the determination of tissue blood perfusion by measuring the Doppler frequency shift while tissue is illuminated by a laser beam, followed by the registration of the reflected radiation from moving and stationary tissue components. Microcirculatory oscillation rhythm plays an important role, especially in early diagnosis of many diseases. The loss of certain types of oscillations at laser Doppler flowmetry is interpreted as «spectral narrowing» and serves as a diagnostic criterion for microcirculation deregulation, which is directly related to decreased blood perfusion and tissue hypotrophy. The use of amplitude-frequency analysis of blood flow oscillations can non-invasively evaluate the impact of the various components of microvascular tone, allowing to calculate an index of neurogenic and myogenic tone and bypass index. The amplitude-frequency analysis of the laser Doppler flowmetry spectrum uses normalized parameters determining the maximum amplitude of the blood flow oscillation in different bands, as well as their ratio – microcirculation effectiveness index. Hyperemic, spastic, spastic-atonic, structural and degenerative, congestive and static forms of various microcirculation disorders are marked out. Each of these microcirculatory disorders is characterized by a certain ratio of structural and functional changes and changes in blood velocity, as well as impaired barrier function. The main principles of the microcirculatory disorders are described. **Keywords:** microcirculation, impaired microcirculation, laser Doppler flowmetry.

Система микроциркуляции представляет собой наименьшую функциональную единицу сосудистой системы, где микрососуды прямо окружают тканевые клетки, которые они снабжают нутриентами и от которых удаляют продукты метаболизма. Данная область системы кровоснабжения включает артериолы, кровеносные капилляры, вены, а также лимфатические капилляры и интерстициальное пространство [7, 24]. Гемодинамика в системе микроциркуляции, особенно в её капиллярном

звене, определяется как внутренними силами кровообращения, так и метаболическими потребностями кровоснабжаемых тканей [7, 9]. Особую роль в периферической гемодинамике играют артериовенозные анастомозы, возникающие на уровне сосудов микроциркуляторного русла между артериолами и венами и создающие обходные пути движения крови в обход основной массы капилляров. Создавая «короткие» пути, артериовенозные анастомозы вместе с «предпочтительными каналами» обеспечивают условия для параллельного включения основной массы капилляров в периферический кровоток.

Это имеет особое адаптационное значение не только при интенсификации тканевого кровотока в метаболически активных зонах, но и для его сохранности при тех или иных нарушениях. Функциональное участие микроциркуляторного русла в обменных процессах определяется диаметром и числом одновременно включённых в кровоток микрососудов, то есть теми структурными параметрами, от которых зависят суммарная площадь обменных микрососудов и перепад давления на «входе» и «выходе» системы микроциркуляции [9].

Система микроциркуляции — одна из тех важных систем, в которых различные болезни проявляются на ранних стадиях. При этом нарушения микроциркуляции могут быть не только вторичными, но и являться первопричиной многих заболеваний, определяя в дальнейшем их исход. Большое количество заболеваний неразрывно связано с теми или иными нарушениями отдельных звеньев микроциркуляции, а именно атеросклероз, артериальная гипертензия, эндотоксемия и сепсис, диабетическая нефропатия, венозная недостаточность и многие другие [24]. Мониторинг микроциркуляторной функции в клинике весьма ограничен как из-за небольшого числа существующих безопасных методов исследования, так и вследствие сложности интерпретации получаемых данных.

Метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) основывается на определении перфузии ткани кровью путём измерения доплеровского сдвига частот, возникающего при зондировании ткани лазерным излучением (гелий-неоновым,  $\lambda=632,8$  нм), с последующей регистрацией излучения, отражённого от подвижных и неподвижных компонентов ткани [6, 11, 12, 28, 32, 33, 36]. Получаемый при ЛДФ сигнал характеризует кровоток в микрососудах в объёме до  $1,5 \text{ мм}^3$  ткани [13, 14]. Слой зондирования может содержать в зависимости от типа ткани следующие звенья микроциркуляторного русла: артериолы, терминальные артериолы, капилляры, посткапиллярные вены, вены и артериовеноулярные анастомозы [1, 9, 27, 31, 35].

Применение ЛДФ позволяет получать основные показатели микроциркуляции (ПМ) —  $M$ ,  $\sigma$  и  $K_v$ .

$M$  — среднее арифметическое значение ПМ, измеряемое в перфузионных единицах. Изменение  $M$  (увеличение или уменьшение) характеризует соответственно повышение или снижение перфузии. Увеличение показателя  $M$  может быть связано как с ослаблением артериального сосудистого тонуса (которое ведёт к увеличению объёма крови в артериолах), так и с явлениями застоя крови в веноулярном звене (что сопровождается повышением концентрации эритроцитов в исследуемом объёме ткани и ростом величины  $M$ , которая пропорциональна числу эритроцитов) [9, 13].

$\sigma$  («флак»,  $\text{flax}$ ) — среднее квадратическое отклонение амплитуды колебаний кровотока

от среднего арифметического значения  $M$ . Характеризует временную изменчивость перфузии, отражая среднюю модуляцию кровотока во всех частотных диапазонах. Чем больше величина  $\sigma$ , тем более глубокая модуляция микрокровотока происходит. Повышение данного показателя может быть связано как с более интенсивным функционированием механизмов активного контроля микроциркуляции, так и с повышением сердечных и дыхательных ритмов, а снижение величины  $\sigma$  обычно свидетельствует об угнетении активных вазомоторных механизмов модуляции тканевого кровотока или преобладании в регуляции тонических симпатических влияний [11, 14, 25]. Повышение перфузии при ослаблении сосудистого тонуса приводит к увеличению  $M$  в результате увеличения объёма кровотока в артериолах и вместе с тем может привести к увеличению  $\sigma$  из-за повышения амплитуды сердечного ритма, который привносится из артерий большим количеством эритроцитов, поступающих в артериолы. Также при явлениях застоя крови в венах увеличивается число эритроцитов в веноулярном звене, что в случае снижения перфузионного давления приводит к увеличению амплитуды дыхательного ритма и, как следствие, к росту показателей  $M$  и  $\sigma$ . В свете этого при анализе расчётных параметров соотношение между перфузией ткани и величиной её изменчивости («флаксом») оценивается коэффициентом вариации:  $K_v = \sigma/M \times 100\%$ .

Увеличение показателя  $K_v$  отражает улучшение состояния микроциркуляции, так как это увеличение связано с повышением  $\sigma$  в результате активации эндотелиальной секреции, нейрогенного и миогенного механизмов контроля при практически не изменяющейся величине  $M$  [11, 13]. Расчётные параметры  $M$ ,  $\sigma$ ,  $K_v$  дают общую оценку состояния микроциркуляции крови.

Более детальный анализ функционирования микроциркуляторного русла проводится на втором этапе обработки доплерограмм базального кровотока при исследовании структуры ритмов колебаний перфузии крови. На данном этапе осуществляется анализ амплитудно-частотного спектра колебаний перфузии, и по величинам амплитуд колебаний микрокровотока в конкретных частотных диапазонах оценивают состояние функционирования определённых механизмов контроля перфузии [8, 14].

Ритмическая характеристика колебательных процессов в системе микроциркуляции имеет большую значимость, особенно в ранней диагностике, при многих нозологических формах [16]. Так, потеря или напротив появление в доплерограмме тех или иных колебаний напрямую связано с определёнными симптомами расстройства кровотока и нарушением трофики тканей [3, 9, 28].

Метод ЛДФ с применением амплитудно-частотного анализа колебаний кровотока позволяет неинвазивно оценить влияние миогенных, нейрогенных и эндотелиальных компонентов тону-

са микрососудов. При этом рассчитывается показатель нейрогенного тонуса прекапиллярных резистивных сосудов, миогенный тонус метартериол и прекапиллярных сфинктеров и показатель шунтирования [14, 15, 18].

Среди звеньев регуляции микрокровотока выделяют «активные» и «пассивные» механизмы. К «пассивным» механизмам относят внешние факторы, находящиеся вне микроциркуляторного русла: пульсовая волна, приходящая со стороны терминальных артерий (кардиальный ритм на «входе» в микроциркуляторное русло), и присасывающее действие «дыхательного насоса» (венулярный ритм на «выходе» из микроциркуляторного русла) со стороны вен. «Активные» факторы непосредственно воздействуют на сосуды микроциркуляторного русла путём периодического изменения сопротивления сосудов потоку крови посредством вазомоций и создают поперечные колебания кровотока [9, 30, 37]. Эти факторы регуляции модулируют поток крови со стороны сосудистой стенки и реализуются через её мышечную составляющую, поэтому их и называют тонус-формирующими [14, 17, 30]. Вазомоции осуществляются не только за счёт синхронизированных спонтанных осцилляций гладкомышечных элементов сосудистой стенки (миогенный ритм), но и за счёт их модуляции со стороны как симпатической нервной регуляции (нейрогенный ритм), так и эндотелий-зависимой регуляции (эндотелиальный ритм) [34]. Увеличение амплитуды «активных» звеньев (эндотелиального, нейрогенного и миогенного) свидетельствует об усилении модуляции кровотока со стороны данного механизма регуляции и расценивается как снижение тонуса [14]. В результате чередования сокращения и расслабления гладкомышечного аппарата сосудистой стенки («активные» факторы) происходит модулирование периодического изменения объема крови («пассивные» факторы), что в конечном итоге и формирует оптимальные гемодинамические параметры для транскапиллярного обмена [30].

Наиболее значимыми в диагностическом плане и часто используемыми являются следующие показатели [25, 26, 28, 38–40]:

- 1) медленные (низкочастотные) волны флаксмоции, зона LF-ритма — диапазон частот 0,05–0,2 Гц, 3–12 колебаний в минуту;
- 2) быстрые (высокочастотные) волны колебаний, зона HF-ритма — диапазон частот 0,2–0,4 Гц, 12–24 колебания в минуту;
- 3) пульсовые волны флаксмоции, зона CF-ритма — диапазон частот 0,8–1,5 Гц, 48–120 колебаний в минуту.

Кроме того, можно оценить вклад эндотелиальных NO-зависимых колебаний (диапазон частот 0,0095–0,02 Гц) и нейрогенных симпатических (диапазон частот 0,02–0,05 Гц) компонентов тонуса сосудов [5, 19, 20, 23, 29].

На сегодняшний день зоной интереса в исследовании ЛДФ-метрии становится частотный анализ ритмических колебаний тканевого

кровотока в оценке регуляторных механизмов микроциркуляции крови [9]. Выпадение тех или иных ритмических составляющих флаксмоций трактуется как «спектральное сужение» ЛДФ-граммы, которое может служить диагностическим критерием нарушений механизмов регуляции микроциркуляции. Качественный анализ ЛДФ-грамм свидетельствует о том, что спектральное сужение соответствует прогрессированию облитерирующего поражения артериальных сосудов [9]. Практически при амплитудно-частотном анализе полученного ЛДФ-спектра используют нормированные показатели, определяющие максимальную амплитуду колебаний кровотока в разных диапазонах, а также их соотношения в виде индекса эффективности микроциркуляции (ИЭМ) [2, 22, 29].

ИЭМ определяет соотношение между активными и пассивными механизмами регуляции кровотока в системе микроциркуляции крови, отражает поступление кислорода и питательных веществ в ткани.

Вычисляют ИЭМ по формуле: 
$$\text{ИЭМ} = \frac{A_{\text{max}} \cdot \text{LF}}{A_{\text{max}} \cdot \text{CF} + A_{\text{max}} \cdot \text{HF}},$$

где  $A_{\text{max}}$  — максимальная амплитуда; LF — низкочастотные колебания кровотока (вазомоции); CF — пульсовые волны; HF — высокочастотные колебания кровотока.

Одни из ранних признаков нарушения микроциркуляции — локальный спазм приносящих артериальных сосудов, застойные явления в посткапиллярных веноулярных сосудах и снижение интенсивности кровотока в нутритивном звене капиллярного русла [10]. При прекращении активной вазомоции в той части капиллярного русла, в которой сопротивление кровотоку выше, объёмный кровоток сокращается, и в ней появляются признаки стаза (а в самих тканях преобладающим становится анаэробный метаболизм). Потеря вазомоции ведёт к так называемому шунтированию кровотока, в результате которого большая часть крови, поступающей в микроциркуляторное русло, движется по меньшей части капилляров, как бы «обкрадывая» в метаболическом плане соседние области микрорегиона. При развитии патологического процесса, связанного с объёмным дефицитом капиллярного кровотока, страдают тонкие механизмы, регулирующие транскапиллярный массоперенос и объёмные процессы в тканях.

Финалом микроциркуляторных расстройств становится стаз. Он характеризуется полной блокадой кровотока и резким нарушением барьерной функции микрососудов, сопровождаемой трансмуральной миграцией лейкоцитов и нередко диapedезными кровоизлияниями. Распространённость стаза в микроциркуляторном русле зависит от тяжести процесса. Наиболее ранним нутритивное звено микроциркуляторного русла. Магистральные артериоловеноулярные сообщения и артериовенозные анастомозы более устойчивы к расстройствам микроциркуляции и проявляют тенденцию к сохранению кровотока

даже в условиях распространения стаза на значительную часть микроциркуляторного русла [10].

Различные функциональные и патологические состояния приводят к изменению миогенной активности артериол и прекапилляров — распределительного звена микроциркуляторного русла, что выражается в сужении или расширении их просвета, изменении артериовенулярного соотношения (по их диаметрам) и, как следствие, в уменьшении или увеличении количества функционирующих капилляров. Структурные изменения микрососудов отмечаются в условиях значительных функциональных нагрузок и при патологических нарушениях в организме. К этой группе признаков относятся неравномерность диаметра микрососудов, значительное расширение венул, появление извитости капилляров (в виде клубочков, спиралей и т.п.), а в норме эти признаки отсутствуют. От состояния барьерной функции микрососудов непосредственно зависит проницаемость их стенки. При её увеличении появляется помутнение окружающего фона, а также пристеночная адгезия лейкоцитов, что ведёт к заметному локальному сужению просвета микрососуда и последующему диапедезу эритроцитов [10].

В системе кровообращения микроциркуляторное русло служит связующим звеном между артериальными и венозными сосудами, поэтому состояние капиллярного кровотока зависит от большого числа факторов, действующих на тканевом уровне. Непосредственно патофизиологические механизмы нарушений микроциркуляции могут развиваться по типу [10]:

- нарушения притока крови (в результате как его усиления при артериальной гиперемии, так и ослабления притока при артериальной ишемии);
- нарушения оттока, сопровождающегося, как правило, венозным застоем;
- первичной патологии капилляров.

При различных типах гемодинамических расстройств в патофизиологический механизм вовлекаются нарушения проницаемости стенки микрососудов и гемореологические сдвиги, приводя к нарастающей гипоксии и ишемии тканей [10].

Микроциркуляторные расстройства не всегда проявляются в условиях покоя. Для определения состояния механизмов регуляции тканевого кровотока, выявления скрытых нарушений микрогемодинамики и адаптационных резервов системы микроциркуляции необходимо выполнение функциональных проб, которые подразделяются на констрикторные и дилататорные. К констрикторным относятся дыхательная, с венозной окклюзией и постуральная пробы, а к дилататорным — тепловая, электростимуляционная и проба с артериальной окклюзией [30].

Р.В. Горенков и соавт. (2006) описали несколько типов микроциркуляции периферического кровообращения, исследованных методом ЛДФ [4]:

1) нормоциркуляторный гемодинамический тип микроциркуляции — доплерограммы у здоровых людей без признаков нарушения периферического кровообращения;

2) гиперемический гемодинамический тип микроциркуляции — наблюдается при увеличении притока крови в микроциркуляторное русло и сопровождается увеличением ПМ; амплитуда LF не меняется или снижается, амплитуда CF не меняется или увеличивается, при дыхательной пробе отмечается увеличение степени снижения ПМ (если нет венозного застоя), реакция на артериальную окклюзию гиперреактивная, уровень биологического нуля не изменяется, резерв капиллярного кровотока и время полувосстановления снижены;

3) спастический гемодинамический тип микроциркуляции — при снижении притока крови в микроциркуляторное русло за счёт спазма резистивных сосудов; отмечается снижение ПМ, амплитуда LF не меняется или увеличивается, амплитуда CF снижается, при дыхательной пробе степень снижения ПМ не изменяется или увеличивается (при низких значениях ПМ может снижаться), реакция на артериальную окклюзию ареактивная, резерв капиллярного кровотока и время полувосстановления увеличиваются;

4) стазический гемодинамический тип микроциркуляции — выявляется при наличии замедления и стаза крови в компонентах микроциркуляторного русла; сопровождается снижением ПМ и амплитуды LF и CF, снижением реакции ПМ на проведение дыхательной пробы, ареактивным типом ответа на артериальную окклюзию, снижением резерва капиллярного кровотока при нормальном или сниженном времени полувосстановления;

5) застойный гемодинамический тип микроциркуляции — выявляется при признаках застоя крови в венулах; сопровождается нормальными или сниженными значениями ПМ и амплитуды LF, наличием дыхательных ритмов HF, ареактивным или парадоксальным типом реакции на артериальную окклюзию, снижением показателей резерва капиллярного кровотока и времени полувосстановления.

Кроме представленных «чистых» гемодинамических типов микроциркуляции существуют смешанные (с признаками нескольких типов) и переходные (пограничные типы). Однако эти три типа микрогемодинамики (гиперемический, спастический и нормоциркуляторный) достаточно наглядно и чётко проявляют себя. Физиологические различия между ними заключаются с исходном уровне перфузии, наличии резерва капиллярного кровотока и ответных реакциях на функциональные нагрузки (окклюзионный тест) [4].

Наряду с этим К.М. Морозов и соавт. (2007) описали четыре варианта состояния микроциркуляции [21].

1) Нормоциркуляторный вариант — сопровождается стабильно сниженными показателями ак-

Таблица 1

Характеристика различных форм нарушений микроциркуляции

Гиперемическая форма					
Для данной формы характерно усиление притока крови в микроциркуляторное русло. Отличается значительным повышением количества функционирующих капилляров, увеличением извитости, расширением микрососудов и повышением проницаемости сосудистой стенки. Такая форма нарушений микроциркуляции обычно наблюдается при острых воспалительных процессах.					
ЛДФ-грамма		Амплитудно-частотный спектр			
ПМ	СКО	LF	HF	CF	ИЭМ
Выше нормы	Снижено: менее 0,4 п.е.	Снижен до 0,5–0,7 п.е.	Может быть повышен: 0,4–0,6 п.е.	Повышен до 0,5 п.е.	Снижен до 1,0–1,5
Спастическая форма					
Для данной формы характерно уменьшение притока крови в микроциркуляторное русло. Отличается резким спазмом артериол, снижением количества функционирующих капилляров, замедлением кровотока и усилением агрегации тромбоцитов. Наиболее типичные изменения возникают при различных окклюзионных поражениях сосудов.					
ЛДФ-грамма		Амплитудно-частотный спектр			
ПМ	СКО	LF	HF	CF	ИЭМ
Ниже нормы: менее 4,5 п.е.	Снижено: 0,1–0,4 п.е.	Подавлен, амплитуда вазомоторных волн снижена	Повышен до 0,4–0,6 п.е.	Возрастает по сравнению с нормой на 10–15%	Снижен до 1,5–1,7
Застойная форма					
Для данной формы характерно резкое затруднение оттока крови из микроциркуляторного русла. Отличается венозной гиперемией и венозным застоем, сосуды венулярного звена извиты и имеют неравномерный диаметр на своём протяжении, возможны реологические сдвиги, отмечается повышение проницаемости стенки микрососуда.					
ЛДФ-грамма		Амплитудно-частотный спектр			
ПМ	СКО	LF	HF	CF	ИЭМ
Несколько ниже нормы: менее 5 п.е.	Снижено: менее 0,4 п.е.	Ритм регулярный, амплитуда вазомоторных волн снижена до 0,4–0,6 п.е.	Повышен: более 0,5 п.е.	Повышен до 0,5 п.е.	Снижен до 0,9–1,1
Спастико-атоническая форма					
Для данной формы характерны уменьшение притока и затруднение оттока крови в микроциркуляторном русле. Отличается выраженным нарушением артериовенулярных соотношений диаметров микрососудов, расширением и повышением извитости венул. На фоне спазма сосудов прекапиллярного звена наблюдаются расширенные вены с признаками застойных явлений, появляются признаки реологических нарушений и расстройства барьерной функции микрососудов.					
ЛДФ-грамма		Амплитудно-частотный спектр			
ПМ	СКО	LF	HF	CF	ИЭМ
Ниже нормы: менее 5 п.е.	Снижено: 0,1–0,3 п.е.	Ритм подавлен, амплитуда вазомоторных волн снижена	Усилен: более 0,5 п.е.	Возрастает по сравнению с нормой на 15–20%	Снижен до 1,0–1,1
Стазическая форма					
Для этой формы характерно резкое снижение кровотока в капиллярном звене микроциркуляторного русла с повышенной агрегацией эритроцитов. Характеризуется наличием реологических сдвигов и нарушением барьерной функции микрососудов, микроциркуляция резко ослаблена, определяются очаговые стазы. При данной форме развиваются наибольшие расстройства микроциркуляции.					
ЛДФ-грамма		Амплитудно-частотный спектр			
ПМ	СКО	LF	HF	CF	ИЭМ
Очень низкий: менее 4 п.е.	Снижено: менее 0,4 п.е.	Ритм практически отсутствует	Повышен до 0,5–0,6 п.е.	Повышен до 0,5 п.е.	Резко понижен: менее 1,0

Примечание: ПМ — показатель микроциркуляции; СКО — среднее квадратическое отклонение; ИЭМ — индекс эффективности микроциркуляции; LF — низкочастотные колебания кровотока (вазомоции); HF — высокочастотные колебания, обусловленные изменением давления в венозном отделе сосудистого русла, связанные с дыхательными экскурсиями; CF — пульсовые волны, обусловлены перепадами внутрисосудистого давления и синхронизированы с кардиоритмом; п.е. — перфузионные единицы.



тивных и пассивных характеристик микроциркуляции (снижение не более чем на 20% исхода) с нормальной перфузией, среднее квадратичное отклонение стремится к единице, коэффициент вариации — к 18.

2) Вазоспастический вариант — сопровождается сниженными активными и неизменёнными пассивными характеристиками микроциркуляции со снижением перфузии, а среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации снижены.

3) Дилатационный вариант — характеризуется снижением всех показателей активности микроциркуляции более 20% и уменьшением перфузии.

4) Застойный вариант — сопровождается практически полным отсутствием всех характеристик активности микроциркуляции и значительным (практически до нулевой отметки) уменьшением перфузии при снижении среднего квадратичного отклонения и практически нормальном коэффициенте вариации.

Каждая из форм микроциркуляторных расстройств характеризуется определённым соотношением структурно-функциональных и гемореологических изменений в микрососудах, а также нарушениями барьерной функции [10]. Характеристика различных форм нарушения микроциркуляции, разработанная В.И. Козловым и соавт. (2007) по данным ЛДФ, представлена в табл. 1.

На сегодняшний день разработана классификация, позволяющая оценивать нарушения системы микроциркуляции по следующим принципам [9, 10]:

1) по этиологии: воспалительные, аллергические, циркуляторные, инфекционные, токсические;

2) по типу расстройств:

– циркуляторные: гиперемические, спастические, спастико-атонические, застойные, стазические;

– структурные: дистрофические, диспластические;

3) по генезу: первичные и вторичные;

4) по характеру течения: острые и хронические

5) по локализации: системные и регионарные;

6) по степени нарушений (1–4-я степени):

– 1-я степень — лёгкая, характеризуется компенсированными изменениями в системе микроциркуляции;

– 2-я степень — средней тяжести, характеризуется субкомпенсированными структурными и гемореологическими сдвигами, а также снижением уровня микроциркуляции на 20–25%;

– 3-я степень — тяжёлая, характерны декомпенсированные изменения в системе микроциркуляции и ослабление тканевого кровотока на 25–40%;

– 4-я степень — очень тяжёлая, характерны угнетение тканевого кровотока и ослабление микроциркуляции более чем на 40%.

## ВЫВОДЫ

1. Метод лазерной доплеровской флоуметрии позволяет неинвазивно оценивать состояние системы микроциркуляции крови.

2. Разработаны критерии, позволяющие всесторонне оценить состояние микроциркуляции и механизмов её регуляции с использованием оборудования отечественного производства.

3. На сегодняшний день данный метод находит широкое применение в различных областях теоретической и практической медицины. Однако поскольку лазерная доплеровская флоуметрия является достаточно новым диагностическим методом, реализующим новые диагностические технологии, полноценных статистических данных об изменениях микроциркуляции при широком спектре патологических состояний пока ещё не накоплено. Это затрудняет применение метода при непосредственном решении практических задач, но открывает широкие возможности для дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аминова Г.Г. Морфологические основы регуляции кровотока в микроциркуляторном русле // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2003. — №4. — С. 80–84.
2. Анютин Р.Г., Ивкина С.В., Апраксин М.А. Нормативные значения параметров микроциркуляции крови в слизистой оболочке полости носа и ротоглотки по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2008. — №3. — С. 23–27.
3. Брискин Б.С., Эктон П.В., Клименко Ю.Ф. Лазерная доплеровская флоуметрия в диагностике обострений хронического панкреатита // Анн. хир. гепатол. — 2007. — №2. — С. 79–84.
4. Горенков Р.В., Рогаткин Д.А., Карпов В.И. и др. Практическое руководство по применению прибора «Спектротест» в типовых задачах различных областей медицины. — М.: НПП «Циклон-тест», 2007. — 66 с.
5. Кирилина Т.В., Красников Г.В., Танканга А.В. и др. Пространственная синхронизация колебаний кровотока в системе микроциркуляции кожи человека // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2009. — №3. — С. 32–36.
6. Козлов В.И., Соколов В.Г. Исследование колебаний кровотока в системе микроциркуляции. Материалы Второго Всероссийского симпозиума «Применение лазерной доплеровской флоуметрии в медицинской практике». — М., 1998. — С. 8–13.
7. Козлов В.И. Гистофизиология системы микроциркуляции // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2003. — №3. — С. 79–85.
8. Козлов В.И., Азизов Г.А., Ибрагим Р.Х. и др. Индивидуально-типологические особенности микроциркуляции у человека // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2005. — №1. — С. 77–78.
9. Козлов В.И. Система микроциркуляции крови: клинико-морфологические аспекты изучения // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2006. — №1. — С. 84–101.
10. Козлов В.И., Гурова О.А., Литвин Ф.Б. и др. Расстройства тканевого кровотока, их патогенез и классификация // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2007. — №1. — С. 75–76.
11. Кречина Е.К., Козлов В.И., Маслова В.В. Микроциркуляция в тканях десны пародонта. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007. — 80 с.

12. Крупаткин А.И. Новые возможности оценки иннервации микрососудов кожи с помощью спектрального анализа колебаний микрогемодинамики // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2004. — №4. — С. 52–59.
13. Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Меркулов М.В. и др. Функциональная оценка периваскулярной иннервации конечностей с помощью лазерной доплеровской флоуметрии: пособие для врачей. — М.: Медицина, 2004. — 26 с.
14. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия. — М.: Медицина, 2005. — 256 с.
15. Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Федорович А.А. и др. Колебательный контур регуляции числа функционирующих капилляров // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2006. — №3. — С. 54–57.
16. Крупаткин А.И. Лазерная доплеровская флоуметрия: международный опыт и распространённые ошибки // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2007. — №1. — С. 90–92.
17. Крупаткин А.И. Динамический колебательный контур регуляции капиллярной гемодинамики // Физиол. человека. — 2007. — №5. — С. 95–103.
18. Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Баранов В.В. Колебательный контур регуляции линейной скорости капиллярного кровотока // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2007. — №3. — С. 52–58.
19. Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Кутепов И.А. Исследование информационных процессов в микрососудистых сетях с помощью вейвлет-анализа колебательных структур кровотока // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2009. — №3. — С. 21–31.
20. Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Кучерик А.О., Троцкий Д.П. Современные возможности анализа поведения микроциркуляции крови как нелинейной динамической системы // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2010. — №1. — С. 61–67.
21. Морозов К.М., Гирина М.Б., Самуилова Д.Ш. и др. Некоторые аспекты патогенеза и расстройств микроциркуляции при развитии критической ишемии // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2007. — №1. — С. 107–110.
22. Неймарк А.И., Кондратьева Ю.С., Неймарк Б.А. Лазерная доплеровская флоуметрия при заболеваниях мочеполовой системы. — М.: Практическая медицина, 2011. — 104 с.
23. Подтаев С.Ю., Попов А.В., Морозов М.К., Фрик П.Г. Исследование микроциркуляции крови с помощью вейвлет-анализа колебаний температуры кожи // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2009. — №3. — С. 14–20.
24. Поленов С.А. Основы микроциркуляции // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2008. — №1. — С. 5–19.
25. Сабанцева Е.Г. Патофизиологическая характеристика расстройств микроциркуляции при воспалительно-деструктивных заболеваниях слизистой оболочки рта // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2006. — №1. — С. 30–36.
26. Седов В.М., Смирнов Д.А. Микроциркуляторный кровоток к кишечной стенке при острой кишечной непроходимости // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2002. — №2. — С. 50–56.
27. Селезнёв С.А., Назаренко Г.И., Зайцев В.С. Клинические аспекты микрогемодикуляции. — Л.: Медицина, 1985. — 208 с.
28. Тимебулатов В.М., Уразбахтин И.М., Фаязов Р.Р. и др. Применение лазерной доплеровской флоуметрии в эндоскопии и эндохирургии при неотложных заболеваниях органов брюшной полости. — М.: МЕДпресс-информ, 2006. — 112 с.
29. Тихомирова И.А., Муравьев А.В., Петроченко Е.П. и др. Оценка гемореологического статуса и состояния микроциркуляции здоровых лиц и пациентов с артериальной гипертензией // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2009. — №3. — С. 37–42.
30. Федорович А.А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионарн. кровообр. и микроцирк. — 2010. — №1. — С. 49–60.
31. Чернух А.М., Александров П.Н., Алексеев О.В. Микроциркуляция. — М.: Медицина, 1984. — 432 с.
32. Bergstrand S., Lindberg L.G., Ek A.C. et al. Blood flow measurement at different depths using photoplethysmography and laser Doppler techniques // Skin. Res. Technol. — 2009. — Vol. 15. — P. 139–147.
33. Choi C.M., Bennett R.G. Laser Dopplers to determine cutaneous blood flow // Dermatol. Surg. — 2003. — Vol. 29. — P. 272–280.
34. Funk W., Intaglietta M. Spontaneous arteriolar vasomotion // Prog. Appl. Microcirc. — 1983. — Vol. 3. — P. 66–82.
35. Hoff D.A., Gregersen H., Hatlebakk J.G. Mucosal blood flow measurements using laser Doppler perfusion monitoring // W. J. Gastroenterol. — 2009. — Vol. 15. — P. 198–203.
36. Humeau A., Steenbergen W., Nilsson H., Stromberg T. Laser Doppler perfusion monitoring and imaging: novel approaches // Med. Biol. Eng. Comput. — 2007. — Vol. 45. — P. 421–435.
37. Kastrup J., Bulow J., Lassen N.A. Vasomotion in human skin before and after local heating recorder with laser Doppler flowmetry // Int. J. Micircirc. — 1989. — Vol. 8. — P. 205–215.
38. Oberg P.A. Tissue motion — a disturbance in the laser-Doppler blood flow signal // Technol. Health Care. — 1999. — Vol. 7. — P. 185–192.
39. Rossi M., Ricco R., Carpi A. Spectral analysis of skin laser Doppler blood perfusion signal during cutaneous hyperemia in response to acetylcholine iontophoresis and ischemia in normal subjects // Clin. Hemorheol. Microcirc. — 2004. — Vol. 31. — P. 303–310.
40. Sergueef N., Nelson K.E., Glonek T. The effect of light exercise upon blood flow velocity determined by laser-Doppler flowmetry // J. Med. Eng. Technol. — 2004. — Vol. 28. — P. 143–150.