

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ МИКРОГЕМОДИНАМИКИ ТКАНЕЙ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ

А.И. Крупаткин¹, В.Г. Голубев¹, Д.Е. Панов¹, М.В. Меркулов¹, В.В. Юлов¹, В.В. Сидоров²

¹Центральный научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова,

²Научно-производственное предприятие «Лазма», Москва

С помощью лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) кожи пальцев кисти в красном и инфракрасном диапазонах излучения и вейвлет-анализа осцилляций микрососудистого кровотока обследованы 28 здоровых лиц и 46 больных с денервационными синдромами. Предложены формулы расчета показателей локального объемного общего (ООК), нутритивного (ОНК) и шунтового (ОШК) микрососудистого кровотока кожи, сопротивления притоку и оттоку крови, микрососудистого давления. Показана достоверная положительная корреляция между данными термографии и ОНК и ООК в красном канале излучения. Продемонстрированы преимущества объемных ЛДФ-параметров перед традиционно используемым показателем микроциркуляции при нарушениях кожной иннервации. Выявлено снижение ООК при застарелых полных анатомических перерывах срединного нерва и внутрисвязочной невrome с дефицитом ОНК в обоих случаях. Соотношение значений ООК в красном и инфракрасном каналах записи ЛДФ-грамм позволяет оценить распределение кровотока кожи по вертикали. Предложенный методологический подход дает возможность выявить причины нарушений нутритивного кровотока и определить направления его коррекции. Преимуществом использования ЛДФ-показателей для оценки объемной микрогемодинамики у травматолого-ортопедических больных является уникальное сочетание неинвазивности исследования, безвредности, возможности динамического контроля и высокой информативности.

Twenty eight volunteers and 46 patients (18 with old complete anatomic rupture of n. medianus (CARN), 14 with intratranal neuroma after failed primary suture, 14 with partial anatomic nerve lesion (PANL)) were examined using laser doppler flowmetry (LDF) of fingers skin in red (R) and infrared (IR) diaposons and wavelet-analysis of oscillations of microvascular blood flow. Formulae for calculation of indicis of local volumetric total (VTBF), nutritious (NVBF), shunting (VSBF) microvascular cutaneous blood flow, resistance to blood inflow and outflow, microvascular pressure were suggested. Reliable positive correlation of temperature with NVBF and VTBF in red diapason was shown. The advantages of volumetric LDF parameters in old CARN were demonstrated. In old CARN and in intratranal neuroma the decrease of VTBF with deficit of NVBF was noted. Correlation between VTBF in red and infrared diaposons enabled to assess the distribution of cutaneous blood flow in vertical plane. This methods allows to detect the causes of nutritious blood flow disturbance and to choose the correction technique. The advantages of LDF-indicis are its uninvassiveness, innocuity, possibilities to perform dynamic control and obtain information.

Исследование микроциркуляции тканей опорно-двигательной системы — одно из важнейших направлений травматологии и ортопедии. Именно микрососудистому руслу принадлежит главенствующая роль в обеспечении трофики и жизнедеятельности тканей и от его состояния зависят активность саногенеза и в большой степени — исходы лечения травм и заболеваний. Из неинвазивных методов оценки микроциркуляции в последние годы все более широкое применение в клинике находит лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ). Ежегодно в русскоязычной литературе публикуется более 100, а в мировой — более 500 работ, выполненных с применением этого метода.

ЛДФ основана на оптическом зондировании тканей и анализе сигнала, отраженного от движущихся клеток крови, преимущественно эритроцитов, в пределах зондируемой зоны (обычно 1–2 мм³); показатели ЛДФ выражают в условных перфузионных единицах (п.е.). В коже границы ЛДФ-зондирования сосудистого русла ограничены по глубине подсосочковым сплетением, а именно малыми (терминальными) артериолами на входе и собирательными венулами на выходе. Схема микрососудистой единицы кожи ладонной поверхности пальцев представлена на рис 1. Характеристикой тканевого кровотока служит индекс, или показатель, микроциркуляции — ПМ (в п.е.), отражающий сред-

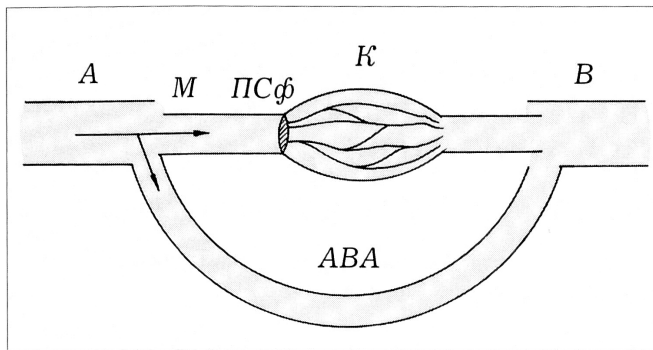


Рис. 1. Схема микроциркуляторного русла кожи ладонной поверхности пальцев.

А — артериола, М — метартериола, ПСф — прекапиллярный сфинктер, К — капиллярное русло, В — вены, АВА — артериоловеноулярный анастомоз. Стрелками указаны направления тока крови.

ний уровень перфузии зондируемой зоны. Величина ПМ определяется усредненной линейной скоростью кровотока и концентрацией эритроцитов в исследуемом объеме ткани [1, 7]. В экспериментах *in vitro* на полимерных трубках разного диаметра установлено, что ПМ зависит преимущественно от скорости движения клеток крови и в меньшей степени от их числа [5].

Основным недостатком изучения тканевой перфузии с помощью ПМ является непостоянство его линейной корреляции и неточность с параметрами объемного кровотока, измеренными другими методами, в частности методом меченых микросфер. В эксперименте на скелетных мышцах крыс было показано, что оценка сосудистого сопротивления — R (в мм рт. ст./п.е.) по формуле: $R = P_{ср.}/ПМ$ (где $P_{ср.}$ — среднее артериальное давление) может не отражать истинных изменений R [7]. Соответственно, физиологически некорректно использовать и показатель кожной сосудистой проводимости — КСП (в п.е./мм рт. ст.): $КСП = ПМ/P_{ср.}$ [13]. Другой недостаток ПМ состоит в том, что он характеризует общую микрососудистую перфузию, а не только ее трансапиллярный нутритивный компонент. Это ограничивает использование ЛДФ и затрудняет трактовку ее показателей у травматолого-ортопедических больных.

Кровоток в микроциркуляторном русле нестабилен и вариабелен. Колебания потока эритроцитов, измеряемые с помощью ЛДФ, называются флаксмоциями, флоумоциями или осцилляциями. Благодаря спектральному компьютерному амплитудно-частотному анализу стало возможным определить вклад отдельных регуляторных механизмов в общую ЛДФ-грамму. Каждая ритмическая компонента при этом характеризуется частотой — F (в Гц или колебаниях в минуту) и амплитудой — A (в п.е.) [1, 12]. Частота более инертна, чем амплитуда, при внешней модуляции. Происхождение сверхнизкочастотных ритмов (0,095–0,02 Гц) уточняется, их амплитуду предположительно связывают с секреторной активностью эндотелия по вы-

работке вазодилататоров (оксида азота) [8]. Нейрогенные ритмы (0,02–0,06 Гц) определяются симпатическими адренергическими влияниями на миоциты артериол и (особенно при исследовании более глубоких слоев кожи) артериоловеноулярных анастомозов [2, 6, 12], миогенные ритмы (0,06–0,15 Гц) — внутренней активностью миоцитов прекапиллярных сфинктеров и прекапиллярных метартериол [12]. Ранее показана возможность изолированной оценки нейрогенного и миогенного тонуса, величины которых обратно пропорциональны амплитудам нейрогенных и миогенных ритмов в соответствующих микрососудах [2, 3]. Дыхательные и кардиоритмы синхронизированы по частоте с дыханием и ритмом сердца соответственно [12]. Дыхательные ритмы (0,15–0,4 Гц) связывают с дыхательной модуляцией давления оттока крови на веноулярном уровне и с респираторными влияниями на вегетативное обеспечение деятельности сердца [12]; не исключены и влияния холинергических процессов непосредственно в исследуемых микрососудах [11]. Кардиоритмы (0,8–2 Гц) в микрососудистом кровотоке присутствуют не только в приносящем звене, но и в самих капиллярах. Их амплитуда отражает перфузионное давление притока крови в микрососуды, обусловленное в основном сердечным выбросом и перепадами систолического и диастолического давления, а также влиянием посткапиллярного сопротивления.

Целью нашей работы было исследовать возможности ЛДФ с использованием вейвлет-анализа осцилляций микрососудистого кровотока для оценки его объемных параметров, а также нутритивного и шунтового компонентов в норме и при денервационных синдромах. В отличие от примененного ранее метода Фурье [3], вейвлет-анализ позволяет более точно оценить усредненную максимальную амплитуду низкочастотных осцилляций [9]. Подобных исследований в доступной литературе мы не обнаружили.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Обследованы 28 здоровых лиц в возрасте от 16 до 60 лет (12 испытуемых — до 40 лет, 16 — старше 40 лет) и 46 пациентов с денервационными синдромами в возрасте от 19 до 38 лет без сопутствующих соматических заболеваний. Среди пациентов было 18 больных с застарелым (1–6 мес) полным анатомическим перерывом срединного нерва, 14 — с внутривольной невромой после неудачного первичного шва нерва с восстановлением чувствительности не более 3 баллов без спонтанных болевых феноменов, 14 — с частичным повреждением срединного нерва, не требующим оперативного восстановления. Диагноз полного анатомического перерыва срединного нерва и внутривольной невромы был подтвержден на операции, причем при перерыве нерва его проксимальный и дистальный отрезки находились на расстоянии не менее 1 см друг от друга.

ЛДФ проводили на двухканальном аппарате ЛАКК-01 (Россия, НПП «Лазма») с компьютерным расчетом ритмов флуксуций при помощи амплитудно-частотного вейвлет-анализа (программная версия 2.2.0.502, НПП «Лазма»). Тестировали богатую истинными шунтами (артериоловеноулярными анастомозами) кожу ладонной поверхности концевой фаланги II пальца и сравнительно бедную такими анастомозами кожу тыла дистальной трети средней фаланги II пальца кисти (автономная зона иннервации срединного нерва), а также аналогичные зоны V пальца (автономная зона иннервации локтевого нерва) в условиях температуры окружающей среды 20–21°C после 30-минутного отдыха испытуемого. ЛДФ-грамму записывали в течение 5 мин в красном (длина волны 0,63 мкм, толщина зондирования около 1 мм) и инфракрасном (длина волны 1,15 мкм, толщина зондирования около 1,8 мм) диапазонах лазерного излучения. Определяли (в п.е.) ПМ, σ — среднее квадратическое отклонение амплитуды колебаний кровотока во всех частотных диапазонах от среднего арифметического значения ПМ (в приведенных ниже формулах обозначено как σ), усредненные максимальные амплитуды эндотелиального (Аэ), нейрогенного (Ан), миогенного (Ам), дыхательного (Ад) ритмов и кардиоритма (Ак). Среднее артериальное давление — $P_{ср}$. (в мм рт. ст.) рассчитывали по формуле:

$$P_{ср} = P_d + 1/3 (P_c - P_d),$$

где P_d — диастолическое артериальное давление (в мм рт. ст.), P_c — систолическое артериальное давление (в мм рт. ст.).

Для изучения корреляции результатов ЛДФ с данными других методов оценки кровообращения сравнивали показатели ЛДФ и компьютерной термографии одной и той же зоны — кожи тыла дистальной трети средней фаланги II пальца кисти в контрольной группе. Температуру кожи — T (°C) исследуемой зоны определяли по стандартной методике с помощью инфракрасной компьютерной термографии (термограф АГА-780 с компьютерной приставкой для обработки термоизображений ТС-800, Швеция).

Результаты подвергали статистической обработке с использованием критерия Стьюдента и коэффициента ранговой корреляции (r) Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методология расчета объемных параметров микрососудистого кровотока

Пакет формул для вычисления объемных параметров микрососудистого кровотока предложен А.И. Крупаткиным. Для перевода величины ПМ в показатель общего объемного кровотока (ООК) необходим расчетный коэффициент (K), который отражал бы объемные параметры микрогемодинамики: $ООК = ПМ \times K$. Для расчета величины K целесообразно использовать основной закон гемодинамики:

$$Q = \Delta P / R,$$

где ΔP — разница давления в начале и в конце системы, R — сопротивление кровотоку.

Исходя из физиологической природы осцилляций тканевого кровотока, величину давления притока крови отражает амплитуда кардиоритма (A_k), давления оттока — амплитуда дыхательного ритма (A_d). Показатель давления крови в микрососудах (ПДК) рассчитывается по формуле:

$$ПДК = A_k / A_d.$$

Сопротивление на входе в исследуемом микрососудистом русле определяется нейрогенным и миогенным тонусом артериол. Величина нейрогенного тонуса обратно пропорциональна амплитуде нейрогенного ритма (A_n) [2, 3], миогенный компонент общего периферического сопротивления на уровне резистивных сосудов обратно пропорционален величине $P_{ср}$. Сопротивление оттока обратно пропорционально A_d . Тем самым:

$$K = (A_k \times A_n \times A_d) / (A_d \times P_{ср} \times \sigma) = (A_k \times A_n) / (P_{ср} \times \sigma).$$

В свою очередь:

$$ООК = (ПМ \times A_k \times A_n) / (P_{ср} \times \sigma) \text{ п.е./мм рт. ст.}$$

Включение в формулу σ обусловлено необходимостью нормировать амплитуды ритмов по средней общей колеблемости потока эритроцитов.

Предложенный ранее [2] показатель шунтирования (ПШ) рассчитывается по формуле:

$$ПШ = A_n / A_m.$$

ПШ отражает относительную долю шунтового кровотока (как по истинным артериоловеноулярным анастомозам, так и функционального в тех зонах кожи, где нет истинных артериоловеноулярных анастомозов) в общей локальной микрогемодинамике. Исходя из этого, показатель объемного нутритивного кровотока — ОНК (п.е./мм рт. ст.) может быть определен по формуле:

$$ОНК = ООК / ПШ.$$

Показатель объемного шунтового внекапиллярного кровотока — ОШК (п.е./мм рт. ст.) вычисляется как:

$$ОШК = ООК - ОНК.$$

Исходя из основного закона гемодинамики и формулы для ООК, общее сопротивление кровотоку микрососудистого русла можно представить как:

$$R = (\sigma \times P_{ср}) / (A_d \times A_n \times ПМ) \text{ мм рт. ст./п.е.}$$

Соответственно, объемное выражение сопротивления оттоку крови — СОК (мм рт. ст./п.е.) будет:

$$СОК = (\sigma \times P_{ср}) / (A_d \times ПМ).$$

В свою очередь объемное выражение сопротивления за счет нейрогенного тонуса — НТ (мм рт. ст./п.е.) артериол на входе в систему микроциркуляции и артериоловенозных анастомозов:

$$НТ = (\sigma \times P_{ср}) / (A_n \times ПМ).$$

Объемное выражение сопротивления за счет миогенного тонуса — МТ (мм рт. ст./п.е.) метартериол и прекапиллярных сфинктеров на входе в нутритивное русло:

$$MT = (\sigma \times P_{ср.}) / (A_m \times ПМ).$$

МТ служит ключевым параметром, определяющим циркуляторный компонент трофики тканей, так как от него зависит перфузия нутритивного компонента микрососудистого русла. Результирующая величина МТ обуславливается в основном соотношением НТ, СОК, а также зависит от эндотелиальной и локальной метаболической активности, отчасти от величины ПДК. Вычисление этих показателей с помощью вейвлет-анализа и предложенной математической модели позволяет определить природу изменений МТ в каждом конкретном случае.

Объемные параметры микрогемодинамики пальцев кисти здорового человека

Результаты исследования микроциркуляции кожи II и V пальцев кисти у здоровых испытуемых представлены в табл. 1 и на рис 2 (а, б). Различия между данными красного и инфракрасного каналов обусловлены относительным доминированием в ИК-сигнале вклада от движущихся клеток крови по более крупным сосудам. Это связано, во-первых, с большей толщиной зондирования кожи и преобладанием вклада от глубже расположенных артериоловенулярных анастомозов, более крупных артериол и венул. Подтверждением тому служит достоверно более низкое значение ПШ на тыльной поверхности II пальца по сравнению с ладонной поверхностью у здоровых лиц только в инфракрасном канале (см. табл. 1). Во-вторых, в инфракрасном канале не исключен вклад от потока как эритроцитов, так и более крупных по диаметру лейкоцитов.

Показатели ООК кожи на тыльной поверхности были достоверно ниже, чем на ладонной, что

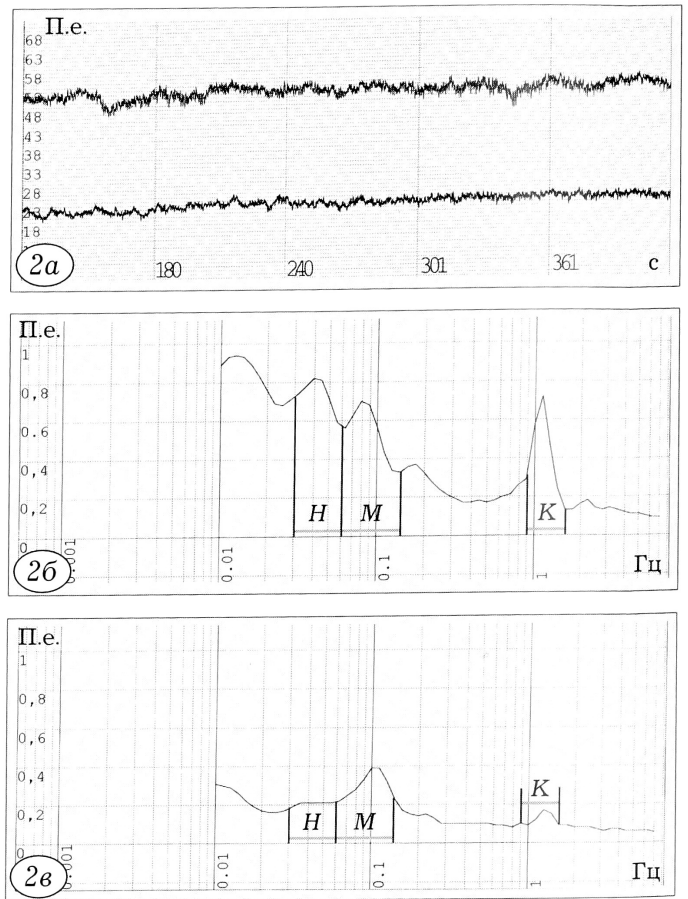


Рис. 2. Примеры записи ЛДФ-грамм и результатов амплитудно-частотного вейвлет-анализа осцилляций тканевого кровотока.

а — исходная запись кровотока микрососудистого русла кожи в красном (внизу) и инфракрасном (вверху) каналах ЛДФ. По горизонтали — время записи (в с), по вертикали — амплитуда показателя микроциркуляции (в п.е.). Отчетливо видны колебания (осцилляции) кровотока; б — амплитудно-частотный спектр осцилляций кровотока здорового человека. По горизонтали — частота колебаний (в Гц), по вертикали — амплитуда (в п.е.). Выделены нейрогенный (Н), миогенный (М) и кардиальный (К) ритмы; в — амплитудно-частотный спектр осцилляций при полном анатомическом перерыве срединного нерва: снижены амплитуды нейрогенного и кардиального ритмов.

Табл. 1. Объемные показатели микрогемодинамики кожи пальцев у здоровых лиц по данным ЛДФ (M±m)

Исследуемая зона	Канал ЛДФ	ПМ, п.е.	ООК	ОНК	ОШК	ПШ
			п.е./мм рт. ст.			
II палец, ладонная поверхность (n=28)	I	16,3±2,1	0,0257±0,003	0,0198±0,001	0,0059±0,0001	1,29±0,1
	II	44,7±4,2	0,75±0,006	0,05±0,005	0,025±0,003	1,5±0,1
II палец, тыльная поверхность (n=28)	I	8,5±1,9*	0,0156±0,005*	0,013±0,002*	0,0026±0,001*	1,2±0,1
	II	18,7±2,6*	0,038±0,009*	0,034±0,004*	0,004±0,0003*	1,11±0,06*
V палец, ладонная поверхность (n=28)	I	16,8±3	0,024±0,04	0,0163±0,002	0,0077±0,0002	1,47±0,3
	II	46,1±4,9	0,078±0,01	0,047±0,004	0,031±0,002	1,64±0,09
V палец, тыльная поверхность (n=28)	I	8±2*	0,009±0,002*	0,0086±0,0004*•	0,0004±0,0001*•	1,05±0,1
	II	17,8±2,2*	0,04±0,008*	0,03±0,004*	0,01±0,001*•	1,3±0,2

Примечание. I — красный канал, II — инфракрасный канал. * Достоверное различие (p<0,05) с аналогичным показателем ладонной поверхности в одноименном канале. • Достоверное различие с аналогичным показателем II пальца в одноименном канале.

связано преимущественно с более высоким ладонным шунтовым кровотоком (соотношение между средними значениями ладонного и тыльного ОШК достигало 2,26 на II пальце и 19,2 на V пальце в красном канале и соответственно 5,25 и 1,4 в инфракрасном канале). ОНК тыла V пальца был достоверно меньше ОНК тыла II пальца. Это соответствует имеющимся данным о сниженной оксигенации кожи тыла V пальца по сравнению со II [8]. На ладонной поверхности достоверных различий между ОНК II и V пальцев не выявлено, однако у 2/3 испытуемых на V пальце он был ниже. Эти гемодинамические особенности согласуются с меньшей функциональной активностью, нейросенсорной обеспеченностью кожи и более низким уровнем метаболизма тканей V пальца кисти.

У лиц старше 40 лет обнаружено достоверное повышение показателя СОК ладонной поверхности пальцев кисти в красном канале (на 43% по сравнению с группой моложе 40 лет, $p < 0,05$), что служило ведущей причиной роста МТ (на 63%, $p < 0,05$) и снижения ОНК (на 39%, $p < 0,05$). Столь выраженных достоверных различий НТ и амплитуды эндотелиального ритма не определялось. Таким образом, возрастные нарушения активности венозного оттока являются основным фактором, препятствующим полноценному капиллярному кровотоку в исследуемой области. ОШК на ладонной поверхности II пальца в красном канале у здоровых испытуемых моложе 40 лет был достоверно ниже, чем в группе старше 40 лет ($0,0016 \pm 0,0005$ и $0,009 \pm 0,0002$ п.е./мм рт. ст. соответственно, $p < 0,05$), что связано с повышением МТ и шунтирования кровотока с возрастом.

Соотношение объемных показателей ЛДФ с данными компьютерной термографии

У здоровых испытуемых температура тыла II пальца составляла $30,1 \pm 1,2^\circ\text{C}$. Сравнительная оценка объемных показателей ЛДФ и данных компьютерной термографии выявила положительную корреляционную связь температуры кожи как с ООК ($r = 0,64$, $p < 0,001$), так и с ОНК ($r = 0,76$, $p < 0,001$) в красном канале ЛДФ. Это соответствует представлениям об интегральном вкладе в формирование температуры поверхностных слоев

кожи кровотока не только по нутритивным, но и по более крупным сосудам [4]. В то же время выраженной корреляции ПМ с термографическими показателями мы не отметили ($r < 0,5$). Seifalian и соавт. [10] также не выявили тесной взаимосвязи между ПМ и температурой кожи.

Объемные параметры микрогемодинамики пальцев кисти при нарушениях иннервации

Как следует из табл. 2, ПМ не всегда позволяет достоверно оценить объемный тканевой кровоток — например, при застарелых полных анатомических перерывах срединного нерва и внутривольной невrome в красном канале он не отличался от контрольных величин. Однако ООК в этих случаях был достоверно снижен на фоне денервационной гиперчувствительности сосудов к циркулирующим вазоконстрикторам (катехоламинам). Обращает на себя внимание дефицит ОНК при последствиях травм нервов, что соответствует ранее приведенным нами данным о гипоксии тканей в зоне иннервации при застарелых повреждениях нервов [2]. Сопротивление притоку и оттоку крови при полном анатомическом перерыве срединного нерва было достоверно повышено (рис. 3). При внутривольной невrome прослеживалась тенденция к нормализации НТ, что подтверждает данные о ранней активации тонких маломиелинизированных волокон и трофической обеспеченности уже в начальные сроки регенерации [2]. Важнейшим фактором, поддерживающим высокие величины МТ при денервационных синдромах, является высокое сопротивление венозному оттоку (см. рис. 3).

Представляет интерес соотношение между величинами ООК в инфракрасном и красном каналах, отражающее относительную долю кровотока по глубже расположенным, преимущественно нутритивным сосудам подсосочкового сплетения. В контрольной группе на тыле V пальца этот показатель был в 1,8 раза выше, чем на тыле II пальца ($p < 0,05$), тогда как по ладонной поверхности различия оказались недостоверными. При полном анатомическом перерыве срединного нерва соотношение значений ООК в инфракрасном и красном каналах было в 1,45 раза выше, чем в контроле ($p < 0,05$), что свидетельствовало о перераспре-

Табл. 2. Объемные показатели микроциркуляции ладонной поверхности II пальца кисти в красном канале ЛДФ при нарушениях иннервации у лиц моложе 40 лет ($M \pm m$)

Нарушение иннервации	ПМ, п.е.	ООК	ОНК	ОШК	ППШ
		п.е./мм рт. ст.			
ПАПН ($n=18$)	$11,5 \pm 3$	$0,012 \pm 0,004^*$	$0,012 \pm 0,004^*$	—	$0,9 \pm 0,1$
Неврома ($n=14$)	$11 \pm 2,7$	$0,0155 \pm 0,003^*$	$0,0134 \pm 0,003^*$	$0,0021 \pm 0,0001$	$1,15 \pm 0,1$
ЧАПН ($n=14$)	15 ± 3	$0,022 \pm 0,004$	$0,017 \pm 0,001^*$	$0,005 \pm 0,0002^*$	$1,3 \pm 0,3$
Контроль ($n=12$)	$17,1 \pm 2,5$	$0,0236 \pm 0,002$	$0,022 \pm 0,001$	$0,0016 \pm 0,0002$	$1,07 \pm 0,3$

Обозначения: ПАПН — полный анатомический перерыв срединного нерва; ЧАПН — частичное анатомическое повреждение срединного нерва.

* Достоверное различие ($p < 0,05$) с контролем.

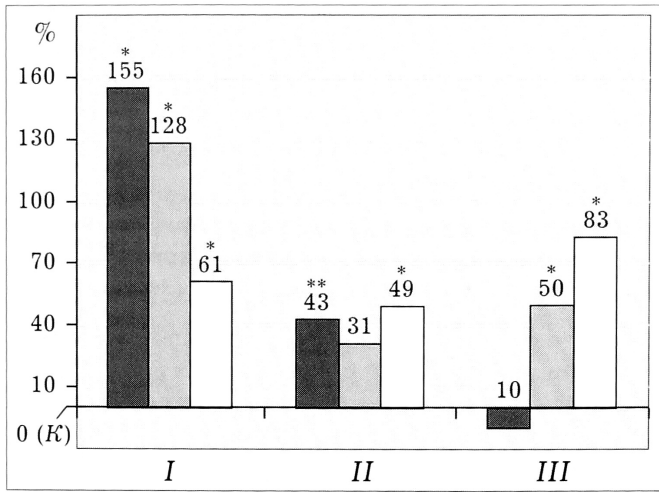


Рис. 3. Изменение (в % к контролю) сопротивления притоку и оттоку крови микрососудистого русла кожи ладонной поверхности II пальца кисти при застарелых денервационных синдромах (по данным красного канала ЛДФ).

■ — нейрогенный тонус артериол и артериоловеноулярных анастомозов, ▒ — миогенный тонус метартериол и прекапиллярных сфинктеров, □ — сопротивление оттоку крови; 0 (К) — контроль (здоровые испытуемые), I — полный анатомический перерыв срединного нерва, II — внутривольная неврома, III — частичное анатомическое повреждение срединного нерва (* $p < 0,05$, ** $p < 0,1$ по отношению к контролю).

деления кровотока по глубине с дефицитом поверхностного, в том числе нутритивного, компонента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные с помощью вейвлет-анализа осцилляций кровотока кожного микрососудистого русла новые ЛДФ-показатели позволяют оценить локальный общий объемный кровоток, его нутритивный и шунтовой компоненты, сопротивление притоку и оттоку крови, давление в микрососудах. Ни один из других современных подходов к изучению периферического кровообращения в клинике не обеспечивает возможности столь многогранной оценки микроциркуляции тканей. Выявлена достоверная положительная корреляция между данными термографии и показателями ОНК и ООК в красном канале записи ЛДФ-граммы. У здоровых испытуемых ООК кожи ладонной поверхности пальцев, богатой артериоловеноулярными анастомозами, оказался выше, чем кожи тыльной поверхности, преимущественно за счет шунтового компонента, а ОНК тыла V пальца — ниже, чем

II пальца. С возрастом происходит снижение нутритивного компонента на фоне выраженного ухудшения венозного оттока. Показано преимущество объемных ЛДФ-параметров перед традиционно используемым показателем микроциркуляции при денервационных синдромах. Выявлено снижение ООК при застарелых полных анатомических перерывах срединного нерва и внутривольной невrome с дефицитом ОНК в обоих случаях. Соотношение значений ООК в красном и инфракрасном каналах записи ЛДФ-граммы позволяет оценить распределение кровотока кожи по вертикали. Предложенный методологический подход дает возможность выяснить причины нарушений нутритивного кровотока и определить направления его коррекции. Преимуществом использования ЛДФ-показателей для оценки объемной микрогемодинамики у травматолого-ортопедических больных является уникальное сочетание неинвазивности исследования, безвредности, возможности динамического контроля и высокой информативности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.И., Мач Э.С., Литвин Ф.Б. и др. Метод лазерной доплеровской флоуметрии: Пособие для врачей. — М., 2001. — С. 22.
2. Крупаткин А.И. Клиническая нейроангиофизиология конечностей (периваскулярная иннервация и нервная трофика). — М., 2003.
3. Крупаткин А.И. // Физиология человека. — 2004. — N 1. — С. 3-6.
4. Лучаков Ю.И., Морозов Г.Б., Румянцев Г.В. // Рос. физиол. журн. — 2001. — Т. 87, N 7. — С. 1003-1007.
5. Clark M.G., Clark A.D.H., Rattigan S. // Microvasc. Res. — 2000. — Vol. 60, N 3. — P. 294-301.
6. Kastrup J., Buhlow J., Lassen N.A. // Int. J. Microcirc. Clin. Exp. — 1989. — Vol. 8. — P. 205-215.
7. Kuznetsova L.V., Tomasek N., Sigurdsson G.H. et al. // Am. J. Physiol. — 1998. — Vol. 274. — P. H1248-H1254.
8. Kvandal P., Stefanovska A., Veber M. et al. // Microvasc. Res. — 2003. — Vol. 65. — P. 160-171.
9. Kvernmo H.D., Stefanovska A., Bracic M. et al. // Ibid. — 1998. — Vol. 56. — P. 173-182.
10. Seifalian A.M., Stansby G., Jackson A. et al. // Eur. J. Vasc. Surg. — 1994. — Vol. 8. — N 1. — P. 65-69.
11. Silverman D.C., Stout R.G. // Microvasc. Res. — 2002. — Vol. 63. — P. 196-208.
12. Stefanovska A., Bracic M. // Contemporary Physics. — 1999. — Vol. 40, N 1. — P. 31-55.
13. Williams S.A., Tooke J.E. // Int. J. Microcirc. Clin. Exp. — 1992. — Vol. 11. — P. 109-116.