

Функциональная диагностика

Национальное руководство

Главные редакторы
академик РАЕН Н.Ф. Берестень
академик РАН В.А. Сандриков
профессор С.И. Федорова



Москва
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА
«ГЭОТАР-Медиа»
2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений	7
Вступление	9
Участники издания	11
Методология создания и программа обеспечения качества Национального руководства «Функциональная диагностика»	16
Глава 1. Организация службы функциональной диагностики	19
1.1. История создания службы функциональной диагностики в России	19
1.2. Состояние службы функциональной диагностики в России	26
1.3. Организация кабинетов/отделений функциональной диагностики	27
1.4. Правила выполнения и оформления функционально-диагностических исследований	29
1.5. Нормативная база службы функциональной диагностики, см. @+	30
1.6. Штатное расписание и оснащение службы функциональной диагностики, см. @+	30
1.7. Общие требования безопасности при проведении исследований в функциональной диагностике	41
1.8. Функциональная диагностика и обязательное медицинское страхование	45
Глава 2. Клиническая электрокардиология	47
2.1. Электрокардиография	47
2.2. Холтеровское мониторирование электрокардиограммы	103
2.3. Анализ variability сердечного (синусового) ритма	113
2.4. Бифункциональное мониторирование электрокардиограммы и артериального давления	121
2.5. Особенности электрокардиографии в педиатрии	130
2.6. Электрокардиограмма при функционировании имплантированных антиаритмических устройств	144
2.7. Электрокардиограмма при синкопальных состояниях	165
2.8. Ортогональная электрокардиограмма	171
2.9. Поверхностное многоканальное электрокардиографическое картирование	181
2.10. Электрокардиограмма у спортсменов, см. @+	193
2.11. Другие методы в электрокардиологии	193
2.12. Фонокардиография, см. @+	205
2.13. Дистанционный анализ электрокардиограммы	205
2.14. Технические факторы в электрокардиографии	207
Глава 3. Эхокардиография	211
3.1. Основы эхокардиографии	211
3.2. Частная эхокардиография	284
3.3. Кардиотокография	364
Глава 4. Ультразвуковое исследование магистральных и периферических сосудов	368
4.1. Ультразвуковые методы исследования сосудов	368
Глава 5. Суточное мониторирование артериального давления	446
Глава 6. Методы определения упругоэластических свойств артерий	464
6.1. Методы определения механических свойств магистральных артерий	464
Глава 7. Методы исследования кровенаполнения, периферического кровотока и микроциркуляции	478
7.1. Плетизмография	478
7.2. Лазерная доплеровская флоуметрия	488
7.3. Инфракрасная термография (тепловидение)	499
Глава 8. Нагрузочные тесты в функциональной диагностике	503
8.1. Нагрузочные электрокардиографические тесты для диагностики и оценки тяжести ишемической болезни сердца	503
8.2. Кардиореспираторный нагрузочный тест	513

8.3. Нагрузочные тесты для оценки артериальной недостаточности нижних конечностей	536
8.4. Функциональные исследования у спортсменов и физически активных лиц	542
Глава 9. Методы оценки вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы	553
9.1. Специальные тесты для обследования пациентов с синкопальными состояниями	553
9.2. Тесты для оценки функционального состояния вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы	557
Глава 10. Функциональная диагностика состояния внешнего дыхания	566
10.1. Основы физиологии и патофизиологии внешнего дыхания. Обструктивный и рестриктивный синдромы. Основы механики дыхания и легочного газообмена	566
10.2. Спирометрия	574
10.3. Бронходилатационные и бронхоконстрикторные пробы у детей	596
10.4. Общая плетизмография	602
10.5. Определение эластических свойств легких	608
10.6. Импульсная осциллометрия	609
10.7. Диффузион-тест	617
10.8. Методы вымывания инертных газов	623
10.9. Капнометрия	626
10.10. Газовый состав крови. Диагностика дыхательной недостаточности	630
10.11. Пульсоксиметрия	638
10.12. Особенности исследования функции внешнего дыхания у детей	639
10.13. Диагностическое оборудование для исследования функции внешнего дыхания	640
Глава 11. Функциональная диагностика состояния центральной и периферической нервной системы (клиническая нейрофизиология)	646
11.1. Электроэнцефалография	646
11.2. Вызванные потенциалы	676
11.3. Диагностика центральной нервной системы с применением направленного транскраниального воздействия магнитного поля	685
11.4. Электромиографические методы исследования	699
11.5. Стимуляционная электронейромиография	716
11.6. Поверхностная электромиография	728
11.7. Методы оценки сенсорных волокон периферических нервов	731
11.8. Мультимодальный интраоперационный нейрофизиологический мониторинг	738
11.9. Эхоэнцефалография	742
11.10. Реоэнцефалография	745
11.11. Нейросонография	746
Глава 12. Полифункциональное мониторирование систем организма человека	761
12.1. Сомнографические исследования	761
12.2. Полифункциональные исследования носимыми аппаратами	771

Глава 7

Методы исследования кровенаполнения, периферического кровотока и микроциркуляции

7.1. ПЛЕТИЗМОГРАФИЯ

Плетизмография в приложении к сосудистой системе объединяет методы регистрации динамики кровенаполнения органов и тканей. Классический вариант плетизмографии — механическая, которая прямо регистрирует изменение объема участка конечности с помощью кольцевого датчика напряжения (тензодатчика). В настоящее время для этой цели чаще используются косвенные методы.

В зависимости от используемого физического принципа современную плетизмографию подразделяют на пневмо-, фото- и электроплетизмографию.

Пневмоплетизмография (воздушная плетизмография) регистрирует изменение давления в герметичном воздушном контуре (манжете) при изменении объема участка тела в связи с изменением его кровенаполнения. Основное клиническое применение пневмоплетизмографии — диагностика тромбоза глубоких вен нижних конечностей (окклюзионная пневмоплетизмография).

В отличие от пневмоплетизмографии, непосредственно регистрирующей изменения объема частей тела по изменению давления в манжете, фото- и электроплетизмография регистрируют эти изменения объема косвенно по изменению светопрозрачности или электрического импеданса соответственно.

Фотоплетизмография в основном используется для оценки состоятельности клапанного аппарата вен нижних конечностей (венозная фотоплетизмография) при ХВН и для измерения ППИ при поражении артерий нижних конечностей у больных сахарным диабетом и пожилых пациентов с жесткими артериями из-за их кальцификации.

Электроплетизмография (реография, реоплетизмография, реовазография, РЭГ, реогепатография и реография других органов) используется в клинической практике все реже. Реография как метод оценки насосной функции сердца в настоящее время практически не используется, так как заменена намного более информативной и точной эходоплерокардиографией. Электроплетизмография конечностей (реовазография) и органов (реогепатография и т.д.), кроме РЭГ, также практически вытеснена из клинической практики ультразвуковой доплерографией и дуплексным сканированием.

Для плетизмографических исследований специальной подготовки пациента не требуется. Противопоказания — только невозможность наложения датчиков и неадекватность пациента.

7.1.1. Окклюзионная пневмоплетизмография

В.П. Куликов, Д.В. Кузнецова

Окклюзионная пневмоплетизмография позволяет выявить нарушение венозного оттока по скорости опорожнения конечности после временной окклюзии вен. Для этого используются две пневмоманжеты (рис. 7.1): одна из них — измерительная, накладывается на голень и регистрирует изменение давления в манжете в ответ на изменение объема голени, другая — блокирующая (окклю-

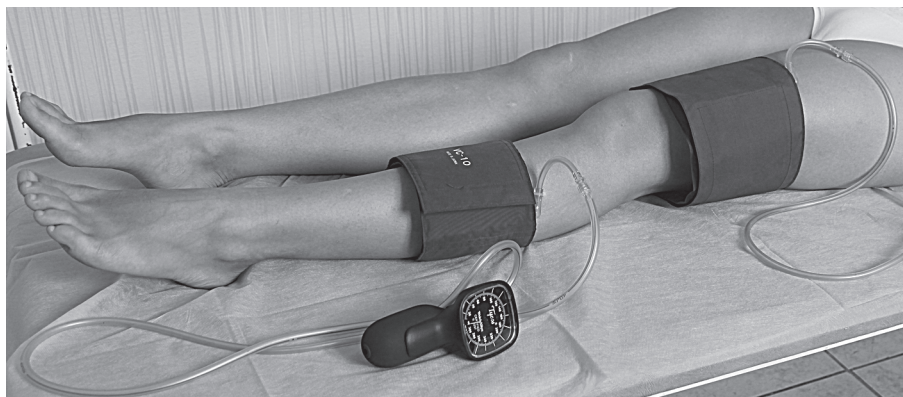


Рис. 7.1. Оклюзионная пневмоплетизмография. Расположение измерительной манжеты (на голени) и блокирующей (окклюзионной) манжеты (на бедре)

зионная), накладывается на бедро. При нагнетании воздуха в окклюзионную пневмоманжету венозный отток прекращается, объем крови в голени и давление в измерительной пневмоманжете нарастают. При стравливании воздуха из окклюзионной пневмоманжеты венозная система конечности опорожняется, объем голени и давление в манжете уменьшаются. Тромботическая обструкция вен приводит к замедлению венозного оттока и восстановления объема голени после прекращения пережатия вен бедра.

ПОКАЗАНИЯ

Пневмоплетизмография используется в качестве дополнительного метода исследования для оценки степени нарушения проходимости вен нижней конечности при установленном флеботромбозе по данным дуплексного сканирования, а также самостоятельно для скрининга тромбоза глубоких вен и хронического заболевания вен или для мониторинга функции венозного оттока при лечении хронического заболевания вен [4, 8]. В частности, метод показан для оценки реканализации вен, восстановления венозной функции и оценки эффективности проводимой терапии у пациентов с тромбозом глубоких вен.

Пневмоплетизмография рекомендуется в качестве лучшей практики для инструментального исследования пациентов с установленным диагнозом «хроническое заболевание вен» клинической стадии C3–C6 по классификации CEAP, если дуплексное сканирование не обеспечивает точной патофизиологической характеристики хронического заболевания вен [5]. В этой ситуации пневмоплетизмография помогает устано-

вить основную патогенетическую форму хронического заболевания вен по CEAP (рефлюкс, обструкция, рефлюкс и обструкция) путем подтверждения или исключения обструкции.

МЕТОДИКА

При окклюзионной пневмоплетизмографии измерительную манжету помещают на среднюю треть голени, в ней создают давление 15 мм рт.ст. Для ограничения оттока венозной крови от исследуемой конечности используют блокирующую (окклюзионную) пневматическую манжету на бедре (см. рис. 7.1). После регистрации данных в покое в блокирующей манжете создают давление 60 мм рт.ст. и по истечении 90 с воздух из окклюзионной манжеты резко стравливают.

Результаты исследования представляют в виде плетизмограммы (рис. 7.2), отображающей изменение объема крови в голени при нагнетании и стравливании воздуха в блокирующей манжете. При нагнетании воздуха в манжету кривая плетизмограммы поднимается, что свидетельствует об увеличении венозного кровенаполнения голени и характеризует венозную емкость (VC — Venous Capacitance). После стравливания воздуха из манжеты кривая возвращается к исходному (базовому) уровню, что свидетельствует о восстановлении кровенаполнения голени. Оценивают венозный отток за первые 3 с после декомпрессии (MVO — Maximum Venous Outflow) и венозное опорожнение как процент максимального венозного оттока за 3 с по отношению к венозной емкости ($MVO/VC \times 100\%$).

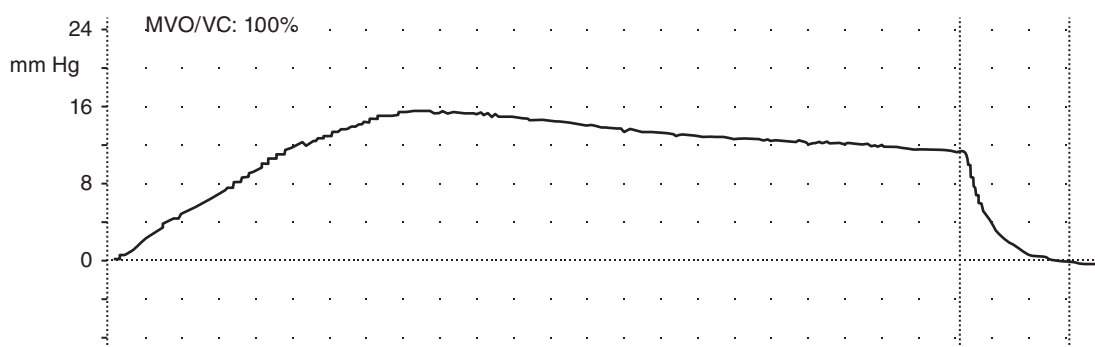


Рис. 7.2. Оклюзионная пневмоплетизмограмма в норме. VC — венозная емкость; MVO — максимальный венозный отток за 3 с

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

При отсутствии препятствия в глубоких венах и нормальном венозном оттоке кривая плетизмограммы резко снижается после освобождения бедра от компрессии, возвращаясь к базовой линии в течение 3 с (100% венозное опорожнение за 3 с). У пациентов с обструкцией глубоких вен спуск кривой с пикового значения, соответствующего венозной емкости, более постепенный и составляет менее 100% венозного опорожнения (рис. 7.3). Чем медленнее венозное опорожнение после декомпрессии бедра, тем больше выражена обструкция глубоких вен нижних конечностей.

Окклюзионная пневмоплетизмография позволяет быстро и неинвазивно оценить степень проходимости глубоких вен нижних конечностей. По данным мета-анализа 78 исследований, средние значения чувствительности и специфичности пневмоплетизмографии в диагностике тромбоза глубоких вен составляют 85% (79–90%) и 91% (81–95%) соответственно. Метод более эффективен для диагностики проксимальных тромбозов глубоких вен по сравнению с дистальными тромбозами.

7.1.2. Венозная фотоплетизмография

В.П. Куликов, Д.В. Кузнецова

Венозная фотоплетизмография применяется в основном для оценки состоятельности клапанного аппарата вен нижних конечностей. В вертикальном положении пациента с помощью фотоплетизмографии регистрируют опорожнение вен нижней конечности при ритмичном сокращении мышц, участвующих в сгибании/разгибании стопы, и последующее за расслаблением этих мышц восстановление исходного объема крови (время возвратного кровенаполнения).

В покое в вертикальном положении вены служат резервуаром крови. При сокращении мышц ног происходит компрессия глубоких вен и продвижение крови по направлению к сердцу, в результате чего объем крови в нижних конечностях уменьшается. После прекращения мышечных сокращений заполнение кровью опорожненных вен конечности в вертикальном положении при состоятельных венозных клапанах будет происходить медленно снизу в основ-

ном за счет притока крови из поверхностных вен [1, 8]. При несостоятельности венозных клапанов кровь в указанных условиях будет заполнять вены конечности ретроградно и быстрее, чем в норме, а время возвратного кровенаполнения уменьшится.

В отличие от дуплексного сканирования, которое оценивает наличие венозного рефлюкса локально, в каждом месте положения ультразвукового датчика фотоплетизмография дает интегративную оценку венозного рефлюкса в конечности, что в целом характеризует функцию венозного оттока и венозную недостаточность.

Учитывая, что тромбоз вен обязательно повреждает их клапаны, укорочение времени возвратного кровенаполнения используется для скрининга тромбоза глубоких вен.

ПОКАЗАНИЯ

Венозная фотоплетизмография рекомендуется преимущественно в качестве вспомогательного метода исследования в сочетании с дуплексным сканированием: пациентам с хроническим заболеванием вен клинической стадии С2 по классификации СЕАР (простое варикозное расширение вен) для суммарной оценки нарушения венозной функции (венозной недостаточности) при регистрации венозного рефлюкса; пациентам с подозрением на хроническое заболевание вен, у которых дуплексное сканирование не выявило венозный рефлюкс или обструкцию; пациентам с хроническим заболеванием вен (класс С3–С6 по СЕАР), если дуплексное сканирование не дает окончательной информации о патофизиологии нарушений венозного оттока [5]. При этом нужно иметь в виду, что фотоплетизмография обладает высокой чувствительностью преимущественно при клапанной недостаточности глубоких, но не поверхностных вен конечности.

Укорочение времени возвратного кровенаполнения менее 20 с по данным фотоплетизмографии используется в качестве скрининга обструкции вен нижних конечностей при тромбозе глубоких вен с чувствительностью 100%, но низкой специфичностью — около 50%.

Венозная фотоплетизмография применяется для оценки функции мышечного насоса, количественной оценки глобального венозного рефлюкса и скрининга венозной обструкции после хирургических операций на венах нижних конечностей.

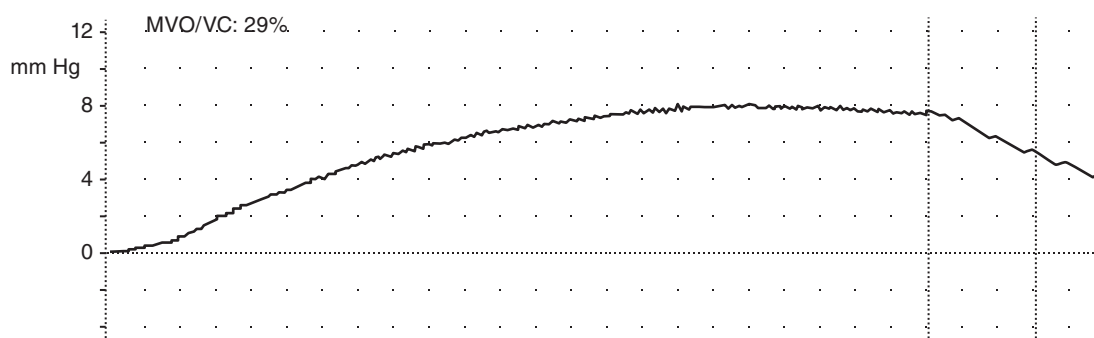


Рис. 7.3. Окклюзионная пневмоплетизмограмма при тромбозе глубоких вен. Снижение венозного опорожнения за 3 с (MVO/VC) до 29%

МЕТОДИКА

Пациент находится в положении стоя или сидя без опоры на нижние конечности. Инфракрасный датчик фиксируют на кожу в проекции задней большеберцовой вены на участке до 10 см выше медиальной лодыжки (рис. 7.4). Датчик нельзя накладывать на область гиперпигментации, дерматосклероза, язв или варикозного расширения вен. После регистрации исходного уровня кровенаполнения пациент, находящийся в положении сидя, проводит пять сгибаний/разгибаний в голеностопном суставе, выполняя примерно одно движение (сгибание или разгибание) в 1 с. Аналогично выполняют упражнения по активации мышечного насоса и из положения стоя, выполняя 10 подъемов/опусканий на пальцы стопы с частотой одно движение в 1 с. Затем следует период покоя, во время которого фотоплетизмограф регистрирует показатели восстановления исходного уровня кровенаполнения с расчетом времени возвратного кровенаполнения (рис. 7.5).



Рис. 7.4. Расположение датчика при венозной фотоплетизмографии из положения сидя (1)

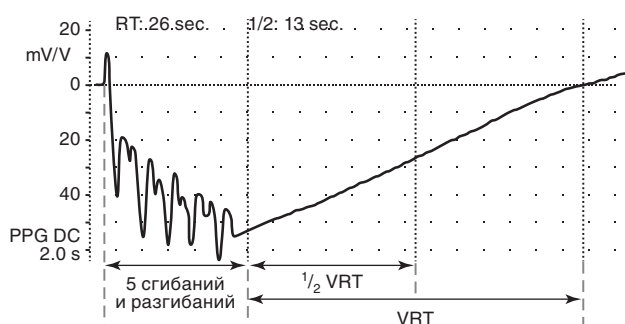


Рис. 7.5. Венозная фотоплетизмограмма в норме. RT (Refilling Time); VRT (Venous Refilling Time) — время возвратного кровенаполнения (ВБК), которое составило 26 с; 1/2VRT — время половины возвратного кровенаполнения (1/2ВБК), которое составило 13 с

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Если клапанный аппарат вен нижних конечностей функционирует, то заполнение вен будет происходить относительно медленно снизу через нормальный венозный дренаж, о чем свидетельствует возвращение кривой к базовой линии за 20–60 с. Время возвратного кровенаполнения менее 20 с свидетельствует о клапанной несостоятельности вен нижней конечности (рис. 7.6).

Степень снижения времени возвратного кровенаполнения как интегрального показателя венозного рефлюкса и клапанной некомпетентности связана с выраженностью нарушений. Снижение времени возвратного кровенаполнения менее 15 с свидетельствует о высоком риске развития венозной язвы. По нашим данным, при первичной варикозной болезни значение времени возвратного кровенаполнения соответствует клиническому классу венозной недостаточности по СЕАР [Ме (25, 75%)]: C1 — 28 (22, 33) с; C2 — 20 (19, 31) с; C3 — 15 (13, 18) с; C4 — 14 (10, 16) с и C5, C6 — 8 (7, 10) с.

Венозная фотоплетизмография дает наиболее точные сведения для диагностики рефлюкса по глубоким венам (чувствительность — 79%, специфичность — 70%), но не по поверхностным венам. Для дифференцировки рефлюкса в системе поверхностных или глубоких вен повторно выполняют тест с наложением жгута на бедро для ограничения рефлюкса в поверхностных венах. Нормализация времени возвратного кровенаполнения при использовании жгута подразумевает наличие рефлюкса по поверхностным венам.

Показатель времени возвратного кровенаполнения в значительной степени зависит от работы мышечного насоса голени, и при недостаточной амплитуде движений в голеностопном суставе (артрозе, анкилозе, неврологических проблемах) время возвратного кровенаполнения может снижаться, что ошибочно может быть расценено как рефлюкс.

Венозная фотоплетизмография с оценкой времени возвратного кровенаполнения применяется также для скрининга хронических заболеваний вен и динамического контроля за эффективностью лечения [6].

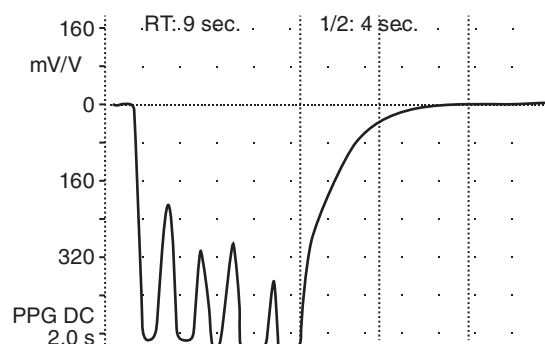


Рис. 7.6. Венозная фотоплетизмограмма при клапанной недостаточности вен нижней конечности. RT (Refilling Time) или VRT (Venous Refilling Time) — время возвратного кровенаполнения (ВБК), которое составило 9 с; 1/2VRT — время половины возвратного кровенаполнения (1/2ВБК), которое составило 4 с

7.1.3. Фотоплетизмография с измерением пальце-плечевого индекса

В.П. Куликов

ППИ представляет собой отношение систолического АД, измеренного на большом пальце стопы, к систолическому АД, измеренному на плече, что отражает состояние перфузии дистальных отделов нижней конечности. ППИ дает информацию, аналогичную ЛПИ, но применяется при невозможности корректного измерения ЛПИ из-за несжимаемости кальцинированных артерий голени у больных сахарным диабетом, с хронической почечной недостаточностью и у пожилых пациентов. Для того чтобы исключить влияние кальцификации артерий на результаты измерения АД в нижней конечности, его измеряют фотоплетизмографически в мелких артериях пальца стопы, которые не подвергаются кальцификации и сохраняют эластичность.

ПОКАЗАНИЯ

Пальце-плечевой индекс должен измеряться для выявления заболеваний периферических артерий у больных, при подозрении на заболевания периферических артерий и невозможности измерения ЛПИ вследствие некомпессируемости артерий, обычно при сахарном диабете и пожилом возрасте (класс рекомендаций I, уровень доказательности B).

Определение ППИ рекомендуется у больных без признаков атеросклероза, но с высоким риском его развития и ЛПИ более 1,30 (уровень доказательности C).

ППИ рекомендуется в качестве диагностического критерия критической ишемии конечности (уровень доказательности B), прогностического маркера заживления ран стопы (уровень доказательности B) и прогностического маркера для сердечно-сосудистой заболеваемости и смертности, уровень доказательности которого еще предстоит установить [7].

У больных с перемежающейся хромотой при ЛПИ на границе нормального значения (0,91 или 1,30) или выше нормального значения (>1,30) должны быть

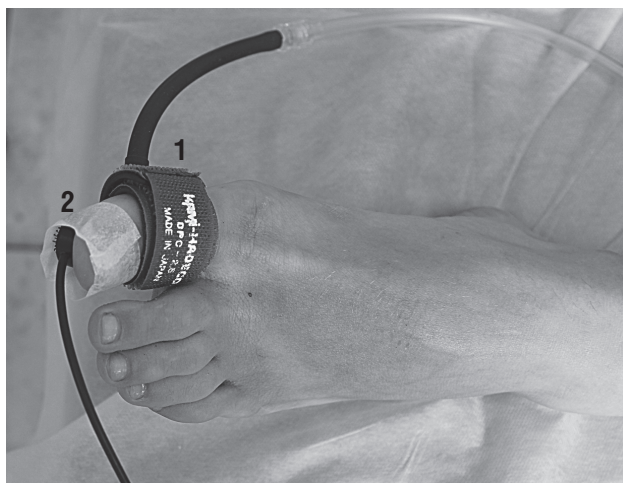


Рис. 7.7. Положение манжеты (1) и фотоплетизмографического датчика (2) при измерении пальцевого давления

применены альтернативные ЛПИ диагностические тесты — ППИ, сегментарное измерение АД, дуплексное УЗИ [2].

Диагноз критической ишемии конечности следует подтвердить результатами определения ЛПИ, ППИ или чрескожного напряжения кислорода [2].

МЕТОДИКА

Пальцевое САД измеряют с помощью специальной пневматической манжеты, наложенной на проксимальную фалангу I пальца, и фотоплетизмографического датчика кровотока, расположенного дистальнее (рис. 7.7).

САД на плече измеряют доплерографически. Как правило, измерение пальцевого САД проводят после регистрации ЛПИ, поэтому дополнительного измерения плечевого САД не требуется.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

САД, измеренное на уровне пальцев стопы, в норме ниже, чем САД на уровне плечевой и берцовых артерий. Поэтому в норме ЛПИ превышает 0,9, а ППИ должен быть больше 0,7. При стеноокклюзирующих поражениях артерий нижних конечностей перфузионное давление падает и значение ППИ уменьшается. ППИ у пациентов с перемежающейся хромотой составляет около 0,5, а у пациентов с болью в покое или язвой — около 0,2.

ППИ менее 0,7 — основание для постановки диагноза заболевания периферических артерий [3].

Измерение ППИ имеет чувствительность от 90 до 100%, а специфичность — от 65 до 100% для обнаружения стеноокклюзирующих поражений артерий нижних конечностей.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ

Альтернативными методами оценки перфузии нижних конечностей и диагностики их поражения выступают измерение транскутанного напряжения кислорода и ЛДФ. Измерение транскутанного напряжения кислорода и ЛДФ необходимо для подтверждения диагноза критической ишемии конечности в тех случаях, когда определение ЛПИ и ППИ невозможно или заведомо неинформативно (класс рекомендаций IА, уровень доказательности C).

Список литературы

1. Куликов В.П. Основы ультразвукового исследования сосудов. М.: Видар-М, 2015. 392 с.
2. Национальные рекомендации по ведению пациентов с заболеваниями артерий нижних конечностей (Российский согласительный документ) // Ангиология и сосудистая хирургия. 2013. Т. 19. № 2. Приложение. 68 с.
3. Рекомендации Европейского общества кардиологов по диагностике и лечению заболеваний периферических артерий // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2012. Т. 8. № 4. Приложение. 76 с.
4. Российские клинические рекомендации по диагностике и лечению хронических заболеваний вен // Флебология. 2013. № 2. С. 6–47.
5. Cloviczki P., Comerota A.J., Dalsing C. et al. The care of patients with varicose veins and associated chronic venous diseases: Clinical practice guidelines of the Society for Vascular Surgery and the American Venous Forum // J. Vasc. Surg. 2011. Vol. 53. P. 2–48.

6. Darvall K.A., Sam R.C., Bate G.R. et al. Photo-plethysmographic venous refilling times following ultrasound guided foam sclerotherapy for symptomatic superficial venous reflux: relationship with clinical outcomes // Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. 2010. Vol. 40. P. 267–272.

7. Høyer C., Sandermann J., Petersen L.J. The toe-brachial index in the diagnosis of peripheral arterial disease // J. Vasc. Surg. 2013. Vol. 58. P. 231–238.

8. LEE, NICOLAIDES, Venous hemodynamic changes in lower limb venous disease: the UIP consensus according to scientific evidence // International Angiology. 2016. June; 35 (3). P. 236–352.

7.1.4. Реовазография (электроплетизмография)

Л.Б. Иванов, П.В. Стружков

Реовазография (РВГ) — частный случай реографии, метода регистрации кровенаполнения тканей, основанного на исследовании их электрического сопротивления. РВГ относится к плетизмографическим методам и используется для регистрации кровенаполнения конечностей. Для обозначения метода РВГ часто используется термин «электроплетизмография». В России принят термин «РВГ». Реография (РЭГ, реогепатография и т.д.) может применяться для регистрации кровенаполнения отдельных органов. Из них широко применяется в клинической практике только РЭГ, но постепенно вытесняется более диагностически информативными транскраниальной доплерографией (ТКДГ) и транскраниальным дуплексным сканированием (ТКДС). Тетраполярная грудная реография применялась для динамического наблюдения за величиной ударного объема левого желудочка, но практически вытеснена из клинической практики высокоинформативной ЭхоКГ.

В последние годы в связи с широким внедрением в клиническую практику ультразвуковых методов исследования — эхокардиографии и ультразвуковой доплерографии диагностическое значение реографических методик значительно уменьшилось. Однако ряд неоспоримых преимуществ реографии, таких как простота выполнения, дешевизна, относительная доступность автоматизированной обработки реографического сигнала, не позволяют исключить этот метод из диагностического процесса.

При реографическом исследовании через участок тела человека пропускается переменный ток высокой частоты (от 40 до 100 кГц) и малой силы (до 10 мА), не оказывающий повреждающего действия на ткани. Живые ткани организма являются хорошими проводниками электрического тока. Электропроводность (величина, обратная сопротивлению) различных тканей неодинакова и зависит от особенностей строения ткани. Наименьшим сопротивлением (наибольшей электропроводностью) обладают жидкие среды организма и среди них кровь и спинномозговая жидкость. При прохождении пульсовой волны через исследуемую область, заключенную между измерительными электродами, в межэлектродном пространстве увеличивается количество электропроводящего раствора (крови), что приводит к уменьшению сопротивления на величину ΔR (ΔZ).

КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РЕОГРАММЫ

Реограмма имеет восходящую часть — анакроту, соответствующую систолическому притоку крови в исследуемый участок (период, когда приток превышает отток) и нисходящую часть — катакроту, соответствующую диастолическому периоду, когда отток крови превышает приток. На катакrote выделяется инцизура (I). На реограмме выделяют три основные волны (зубца) — систолическую (C), диастолическую (D), пресистолическую (P) и инцизуру (I) (рис. 7.8).

Систолическая волна возникает в момент притока систолического объема крови в артериальное русло исследуемого участка. При увеличении жесткости артерий или сосудистого тонуса может регистрироваться вторая систолическая волна, которая является результатом отражения пульсовой волны от бифуркации аорты [2, 3]. Диастолическая волна возникает в результате отражения от самого периферического отдела артериального дерева, мельчайших артерий и артериол. Косвенно этот показатель отражает венозный отток.

Основные показатели, которые рассчитываются при анализе реограммы, представлены на рис. 7.9.

Амплитуда систолической волны (A2 — максимальное значение амплитуды волны) отражает величину пульсового кровенаполнения сосудов исследуемого региона. Амплитуда A1 — высота реограммы в точке максимума первой производной. В этой точке разделяются периоды быстрого и медленного напол-

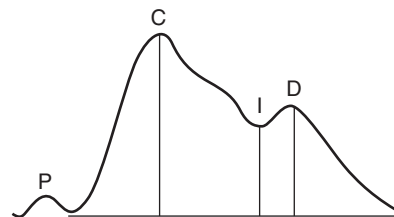


Рис. 7.8. Основные компоненты (волны) реограммы: систолическая (C), диастолическая (D), пресистолическая (P) и инцизура (I)

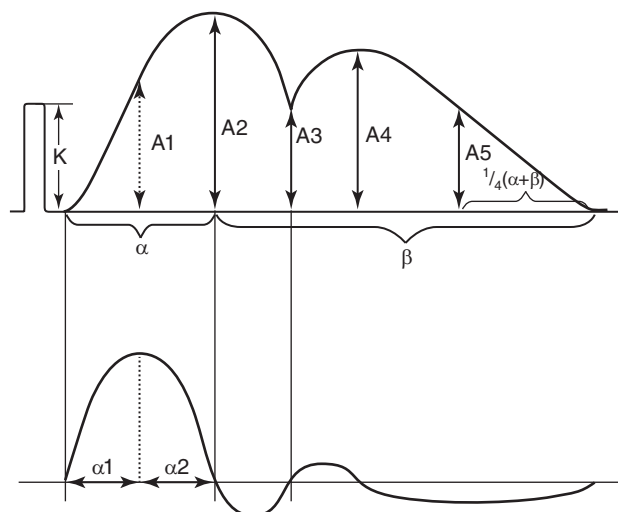


Рис. 7.9. Реограммы с основными амплитудными и временными показателями (верхняя кривая) и ее первая производная (нижняя кривая)

нения. Амплитуда A_3 на уровне инцизуры зависит от ригидности (тонуса) артериальной стенки, периферического сопротивления сосудов, адекватности объема регионарной фракции сердечного выброса и просвета артерий [3]. Амплитуда диастолической волны (A_4) в молодом возрасте в условиях высокой эластичности артериального русла представляет собой преимущественно волну отражения от дистальных разветвлений артериального дерева, мельчайших артерий и артериол. Характер венозного оттока может быть оценен по амплитуде диастолической волны на уровне 4/5 кардиоцикла [2] — амплитуда A_5 . Рассчитывается показатель — индекс венозного оттока ($ИВО = A_5:A_2$), выраженный в процентах.

Время распространения пульсовой волны ($Q-a$), измеряется от начала зубца Q на ЭКГ до начала реографической кривой. Разделив расстояние от сердца до места регистрации реограммы на время распространения пульсовой волны, получим величину скорости распространения пульсовой волны, которая зависит от эластических свойств сосудистой стенки.

Продолжительность периода быстрого наполнения (α_1) измеряется от начала реограммы до максимального пика первой производной, она зависит от тонуса сосудистого русла на уровне крупных артерий (артерий распределения), а также от объема регионарной фракции сердечного выброса и скорости выброса. Период медленного наполнения (α_2) измеряется от максимального пика первой производной до вершины основной реограммы. Он зависит в основном от тонуса мелких артерий. Период максимального кровенаполнения (α) — длительность анакроды, это сумма периодов быстрого и медленного наполнения. Измеряется от начала пульсовой волны до максимальной амплитуды систолической волны. Длительность катакроды (β) измеряется от вершины реограммы до начала следующей волны и характеризует длительность фазы оттока крови. Сумма $\alpha + \beta = T$ составляет длительность сердечного цикла.

Скорость быстрого наполнения ($V_{\text{быстр.}} = A_1/\alpha_1$) отражает скорость наполнения крупных артерий, зависит от их тонуса и насосной функции сердца. Скорость медленного наполнения [$V_{\text{медл.}} = (A_2 - A_1)/\alpha_2$] зависит от тонуса мелких артерий.

Дикротический индекс (ДКИ) — отношение A_3/A_2 , выраженное в процентах, используют для оценки тонуса мелких артерий и артериол. В норме показатель составляет 40–70%, он увеличивается при повышении тонуса артерий малого диаметра и артериол. Диастолический индекс (ДИ), или систоло-диастолический показатель (СДП), — отношение A_4/A_2 (%), косвенно свидетельствующее о состоянии венозного оттока. Реографический коэффициент ($РК = \alpha/\alpha + \beta$) отражает тонус сосудистой стенки. Для большинства сосудистых областей этот показатель в норме не превышает 15–17%. При повышении тонуса сосудов этот показатель увеличивается (в результате возрастания α), и наоборот.

Реограммы могут быть разделены на следующие функциональные типы: нормотонический, гипертонический, гипотонический и дистонический (рис. 7.10) [3].

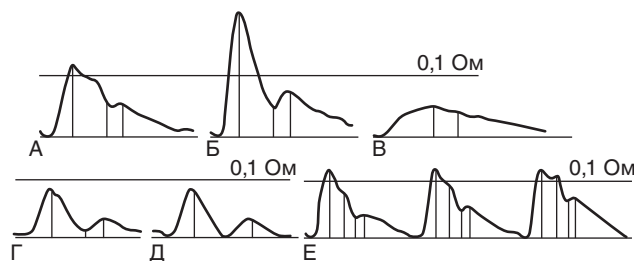


Рис. 7.10. Типы реограмм в зависимости от преобладающего тонуса: нормотонический (А), гипотонический (Б), гипертонический (В), дистонический вид сочетания гипотонической конфигурации и низкой амплитуды (Г, Д), дистонической в виде неустойчивости сосудистого тонуса (Е) [3]

МЕТОДИКА

Для регистрации РВГ обычно используют ленточные электроды шириной 5–10 мм. Для улучшения контакта электрода с кожей применяются токопроводящие гели. Обычно используется биполярная система отведений, когда один и тот же электрод является одновременно как токовым, так и измерительным. С каждой конечности, как правило, снимают по два отведения на двух уровнях: для верхних конечностей — предплечье и кисть, для нижних — голень и стопа. Электроды на конечности накладывают в строго определенных местах согласно анатомическим ориентирам (рис. 7.11, 7.12). Проксимальный электрод для голени накладывают ниже коленной чашечки на уровне верхнего края бугристости большой берцовой кости, дистальный электрод для голени накладывают в нижней части голени непосредственно над внутренней и наружной лодыжками (чуть выше мыщелков большеберцовой кости на уровне наименьшего диаметра голени на этом участке). Проксимальный электрод для стопы размещают на том же месте, что и дистальный электрод для голени, а дистальный электрод — на уровне плюснеосновных суставов или на основании большого пальца стопы.

Для наложения проксимального электрода (1 на рис. 7.12) для предплечья следует попросить пациента согнуть руку в локтевом суставе под углом 90° , и после этого наложить электрод так, чтобы проксимальный край электрода упирался в сухожилие двугла-

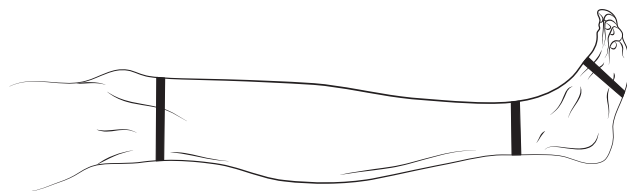


Рис. 7.11. Схема наложения ленточных электродов на нижнюю конечность [3]



Рис. 7.12. Схема наложения электродов на верхнюю конечность [3]: 1 — проксимальный электрод, накладываемый на уровень нижнего края локтевой ямки; 2 — неправильное положение дистального электрода; 3 — правильное положение дистального электрода для предплечья — на уровне лучезапястного сустава

вой мышцы. После фиксации электрода лентой руку необходимо выпрямить. Дистальный электрод для предплечья (он же является проксимальным электродом для кисти) (3 на рис. 7.12) накладывают непосредственно на лучезапястный сустав, при этом положение мышечки лучевой и плечевой костей будут препятствовать его смещению вверх. Дистальный электрод для кисти накладывают поперек всей кисти на уровне пястно-основных суставов II–V пальцев или у основания III пальца. Реографию пальца регистрируют обычно с II или III пальца, при этом проксимальный электрод накладывают у основания пальца, а дистальный — на уровне сустава между средней и концевой фалангами [3].

После наложения к электродам подключают входные кабели реографа и непосредственно перед записью кривых оценивают значение импеданса. Это необходимо для контроля над правильностью наложения электродов. Важно знать, что в норме асимметрии импеданса симметричных участков конечностей должна быть не более 10% минимального значения, а импеданс дистальных участков должен быть выше, чем проксимальных.

Функциональные пробы

Проба с локальной физической нагрузкой. Проба основана на эффекте артериальной гиперемии, возникающей в работающих мышцах. Увеличение кровотока прямо пропорционально величине и интенсивности физической работы. Регистрируется исходная реографическая кривая, далее пациенту предлагается совершить работу в виде сгибания-разгибания конечности в голеностопном или лучезапястном суставе в течение примерно 1 мин.

У здоровых после выполнения физической нагрузки отмечается увеличение амплитуды систолической волны, при этом длительность анакроты существенно не меняется. В то же время у лиц с облитерирующими заболеваниями сосудов конечностей после нагрузки амплитуда систолической волны не меняется или даже уменьшается на 50–60% (происходит еще большая ишемизация конечности), а длительность анакроты увеличивается на 30–60%.

Проба реактивной гиперемии. Проба основана на реакции увеличения кровотока после ишемического воздействия. Регистрируется исходная реографическая кривая, далее пациенту накладывают манжету тонометра на среднюю или нижнюю треть бедра или соответственно на плечо и нагнетают воздух в манжету до исчезновения пульсации артерий голени либо предплечья (достижения уровня давления выше систолического). Давление в манжете стравливают через 2 мин и сразу регистрируют реовазограмму. Далее в течение 5 мин продолжают регистрировать кривые или в непрерывном режиме, или с минимальными возможными интервалами.

После снятия манжеты наблюдается постепенное увеличение амплитуды волн. Оценку прироста осуществляют по комплексам, имеющим максимальную амплитуду. Дополнительного прироста не происходит. Восстановление амплитуды до исходного уровня увеличивается до 2 мин. При отсутствии органических изменений сосудистой стенки амплитуда восстанавливается до исходной величины через 20–40 с, а через

1–1,5 мин достигает максимума, превосходя исходную амплитуду на 30–40%.

Холодовая проба у пациентов с подозрением на болезнь Рейно. Регистрируется исходная реографическая кривая пальцев кисти, далее кисть охлаждают струей холодной воды (10–12 °С) в течение 1–2 мин. Сразу после прекращения термического воздействия начинают регистрировать реограмму в непрерывном режиме или с минимально короткими интервалами (1 раз в 1–2 мин) до восстановления исходной амплитуды реографической волны с обязательным указанием времени, которое прошло с момента прекращения холодового воздействия.

Вследствие охлаждения происходит рефлекторный ангиоспазм артерий, сопровождающийся уменьшением их пульсового кровенаполнения и, следовательно, уменьшением амплитуды реографической кривой, которая у здоровых лиц восстанавливается через 5–8 мин, а при болезни Рейно — не ранее чем через 15–30 мин. Также следует отметить, что у здоровых лиц снижение пульсового кровенаполнения конечности в результате холодового воздействия менее выражено, в то время как при болезни Рейно оно значительно, вплоть до полного исчезновения реографических волн.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Начинают анализ с измерения амплитуд систолической волны и расчета реографического индекса (РИ). Полученные величины сравнивают с должными значениями (нормы приведены в табл. 7.1, 7.2), делают заключение о величине пульсового кровенаполнения (достаточное, снижено, повышено) и оценивают степень нарушений.

Амплитуда систолической волны увеличивается по направлению от проксимальных участков конечностей к дистальным, то есть реографический индекс кривых, зарегистрированных со стоп и кистей, выше, чем РИ голени и предплечий соответственно.

Тонус сосудов оценивают отдельно для правой и левой конечности по показателям времени пульсового кровенаполнения (α) и его составляющих (α_1 и α_2), а также по величине дикротического индекса. Нормативы этих показателей приведены в табл. 7.1, 7.2.

О венозном оттоке судят по длительности катакроты, величине диастолического индекса и индекса венозного оттока. Увеличение этих показателей происходит при нарушениях венозного оттока. О нарушениях венозного оттока свидетельствуют также дополнительные волны на нисходящей части кривой, а также низкая скорость убывания амплитуды диастолической волны. Если в разных комплексах одного и того же отведения диастолическая волна имеет разную форму и амплитуду, это может свидетельствовать о неустойчивом венозном оттоке.

Список литературы

1. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней: Руководство для врачей. М.: Медпресс, 2004. 488 с.
2. Иванов Л.Б., Макаров В.А. Лекции по клинической реографии. М.: Научно-медицинская фирма «МБН», 2000. 319 с.

Таблица 7.1. Нормальные значения показателей реовазограммы нижних конечностей (возрастная группа 20–90 лет) [3]

Показатель	Участок	Иванов Л.Б., Макаров В.А., 2000 [3]	Максимова Т.В., 1970	Корушко О.В., 1983
РИ	Голень	0,7–0,9	0,6–0,73	0,59–0,98*
	Стопа	1,1–1,4	1,0–1,4	
ДКИ, %	Голень	30–50	30–50	
	Стопа	25–50	28–46	
α , с	Голень	0,09–0,13	0,11–0,13	
	Стопа	0,09–0,13	0,09–0,13	
КА, %	Голень	≤ 15		
	Стопа	≤ 15		

Примечание. РИ — реографический индекс, ДКИ — дикротический индекс, α — длительность анакроты, КА — коэффициент асимметрии.

Таблица 7.2. Количественные показатели реограммы верхних и нижних конечностей у здоровых детей

Место исследования	Показатели реограммы*		
	α	β	Реографический индекс
Справа	$\frac{0,07-0,10}{0,08 \pm 0,002}$	$\frac{0,43-0,63}{0,56 \pm 0,02}$	$\frac{0,8-1,5}{1,1 \pm 0,07}$
Предплечье слева	$\frac{0,07-0,10}{0,08 \pm 0,002}$	$\frac{0,43-0,63}{0,56 \pm 0,02}$	$\frac{0,8-1,5}{1,1 \pm 0,06}$
Справа	$\frac{0,10-0,15}{0,13 \pm 0,004}$	$\frac{0,40-0,60}{0,50 \pm 0,02}$	$\frac{0,7-1,4}{1,04 \pm 0,07}$
Голень слева	$\frac{0,10-0,15}{0,13 \pm 0,005}$	$\frac{0,40-0,60}{0,50 \pm 0,02}$	$\frac{0,7-1,4}{1,03 \pm 0,07}$

* В числителе приведены пределы колебаний, в знаменателе — $M \pm m$.

7.1.5. Биоимпедансный анализ состава тела человека

Д.В. Николаев, С.П. Щелькалина

Биоимпедансный анализ состава тела человека — сравнительно новая диагностическая технология, позволяющая на основе данных антропометрических параметров и электрической проводимости тканей организма количественно оценить состав тела (липидную, белковую, водную фракции) и скорость обменных процессов в момент исследования. Показатели гидратации и скорости метаболических процессов подвержены относительно быстрым динамическим изменениям, часто вследствие различных нагрузочных воздействий: физической активности, изменения положения тела, приема лекарственных средств и т.д. Такие изменения могут быть зафиксированы при повторных исследованиях или мониторинговании.

Оборудование для биоимпедансных измерений включает: биоимпедансный анализатор, подключенный к персональному компьютеру со специализированным программным обеспечением; кушетку шириной не менее 85–90 см; ростомер; весы [1–4]. На рис. 7.13 изображены момент исследования и рекомендуемое расположение электродов.

Подготовка к биоимпедансному обследованию включает:

- воздержание от принятия пищи не менее 3 ч;
- воздержание от принятия алкоголя не менее 2 сут;
- температурную адаптацию перед обследованием в течение 30–40 мин в жаркое и холодное время года.

Не допускается проводить обследование у пациентов:

- с имплантированным кардиостимулятором;
- во влажной одежде.

Биоимпедансные оценки гидратации дают возможность достаточно надежно ($r^2 = 0,79-0,95$) [1], определять содержание общей, внеклеточной и внутриклеточной жидкости в организме в целом, при отеках различной этиологии и в его регионах — руках, ногах, туловище. На рис. 7.14 изображен фрагмент окна визуализации программы ABC01-0454 с набором регионарных (вверху) и интегральных (внизу) параметров. Исследование содержания внеклеточной жидкости в регионах тела позволяет количественно оценивать как местные отеки, в частности посттравматические, так и процессы централизации и децентрализации кровообращения при пищеварительных процессах, под действием физических нагрузок и

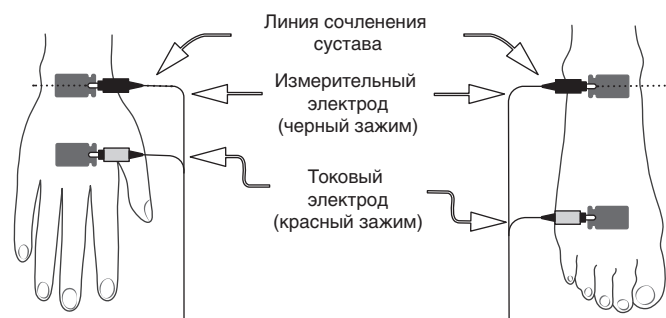
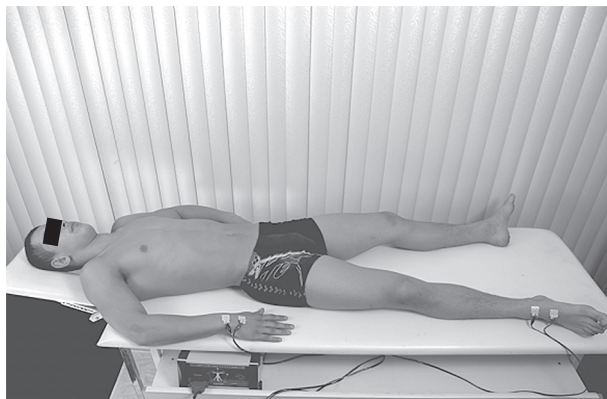


Рис. 7.13. Поза пациента во время исследования (слева) и локализация электродов (справа)

Регионы	Акт.сопр.		Фаз.угол (град.) 50 кГц	БЖМ (кг)		ЖМ (кг)		Объем дин.(л)	Объем (л)	Объемы жидкостей (л)		
	5 кГц	50 кГц								ECW	TBW	ICW
Пр.рука	208.3	180.9	6.1	6.36	-2.17	1.67	6.74	8.03	7.64	1.63	19.35	17.72
Лев.рука	216.8	187.6	6.6	6.22		1.78		8.00	7.64	1.57	19.35	17.78
Лев.нога	177.0	158.7	4.8	17.61	0.00	8.96	0.00	26.57	25.96	3.66	14.46	10.80
Пр.нога	195.6	174.0	5.0	17.61		8.96		26.57	25.96	3.32	14.46	11.15
Туловище	23.0	20.4	14.1	37.20		46.53		83.73	85.52	14.85	-5.41	-20.26
	○	○	○	○		○		○	○	○	○	○
Интегральные параметры:												
R50 (Ом)	375.5	ECW – Внеклеточная жидкость (л)		25.0						Рост (см)	174.0	
R5 (Ом)	427.3	TBW – Общая вода организма (л)		62.2						Объем тела (л)	152.7	
Хс50 (Ом)	35.7	ICW – Внутриклеточная жидкость (л)		37.2						Масса тела (кг)	152.9	
Phi50 (град.)	5.4	Безжировая масса тела (кг)		85.0	(%МТ)	55.6				Плотность (кг/л)	1.0	
		Жировая масса тела (кг)		67.9	(%МТ)	44.4						
		Активная клеточная масса (кг)		43.1	(%БЖМ)	50.7						
		Скелетно-мышечная масса (кг)		36.9	(%БЖМ)	43.4						
		Объем циркулирующей крови (л)		8.93	(%БЖМ)	10.5	(%ECW)	35.7				
		Висцеральный жир (кг)		22.4	(%ЖМ)	33.0	(%БЖМ)	26.4	(%АКМ)	52.0		

Рис. 7.14. Фрагмент экранного протокола программы с оценкой регионарных параметров

лекарственных препаратов, при изменении температуры окружающей среды, гравитационного поля (например, в условиях невесомости) и т.д.

Биоимпедансные оценки уровня основного обмена высоко коррелируют с данными непрямой калориметрии ($r^2 = 0,82$) [5] и используются для характеристики нутритивного статуса совместно с оценками индекса массы тела и жировой массы организма. Оценка основного обмена используется в эндокринологической диагностике и позволяет отслеживать эффективность действия лекарственных препаратов, влияющих на обмен веществ, в режиме реального времени, не дожидаясь изменения массы и конфигурации тела.

Из нескольких десятков определяемых в биоимпедансном анализе абсолютных и относительных оценок параметров состава тела и коррелятов скорости метаболических процессов наиболее изучены и верифицированы показатели жировой и безжировой,

активной клеточной и скелетно-мышечной массы, показатели гидратации, основного обмена, фазового угла. Сравнительно менее изучена группа параметров, связанных с оценкой минеральной массы костей и мягких тканей.

Список литературы

1. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. М.: Наука, 2009. 392 с.
2. Николаев Д.В., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ: основы метода, протокол обследования и интерпретация результатов // Спортивная медицина: наука и практика. 2012. № 2. С. 29–36.
3. Руднев С.Г., Соболева Н.П., Стерликов С.А. и др. Биоимпедансное исследование состава тела населения России. М.: РИО ЦНИИОИЗ, 2014. 492 с.

4. Николаев Д.В., Щелькалина С.П. Лекции по биоимпедансному анализу состава тела человека. М.: РИО ЦНИИОИЗ, 2016. 148 с.

5. Хрущева Ю.В., Зубенко А.Д., Чедия Е.С. и др. Верификация и описание возрастной изменчивости биоимпедансных оценок основного обмена // Сб. тр. науч.-практ. конф. «Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы». М., 2009. С. 353–357.

7.2. ЛАЗЕРНАЯ ДОППЛЕРОВСКАЯ ФЛОУМЕТРИЯ

А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров

В лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) используется зондирование ткани лазерным излучением с выделением из отраженного от тканей сигнала доплеровского сдвига частоты, пропорционального скорости движения частиц в микроциркуляторном русле. ЛДФ показывает изменения потока крови или лимфы в микроциркуляторном русле.

ЛДФ-сигнал имеет постоянную и переменную во времени составляющие. Постоянная составляющая (М) — это средний поток в микроциркуляторном русле за определенный промежуток времени. М — параметр, который используют для оценки реакции микроциркуляторного русла на функциональные пробы. Переменная составляющая ЛДФ-сигнала $\delta\text{ПМк}(t)$ обусловлена факторами, влияющими на постоянство потока частиц в микроциркуляторном русле, то есть связана с обстоятельствами, изменяющими величину скорости ($V_{\text{ср.}}$) и концентрацию частиц ($N_{\text{эр.}}$). Характер изменения $\delta\text{ПМк}(t)$ определяется вариациями во времени как просвета сосудов (их внутренних диаметров), так и скорости потока (рис. 7.15), которые контролируются регуляторными факторами в системе микроциркуляции.

7.2.1. МЕТОДИКА

ЛАЗЕРНАЯ ДОППЛЕРОВСКАЯ ФЛОУМЕТРИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ

Активные факторы контроля микроциркуляции (тонусоформирующие факторы, непосредственно воздействующие на микрососуды) — это эндотелиальный, миогенный и нейрогенный механизмы регуляции просвета сосудов. Эти факторы модулируют поток крови со стороны сосудистой стенки и реализуются через ее мышечно-тонический компонент. Исполнительным объектом, или мишенью, активных факторов контроля служит мышечный компонент сосудистой стенки. В физиологических условиях мишень нейрогенной регуляции — артериолы и артериоло-венулярные анастомозы; собственно миогенный компонент регуляции в чистом виде локализован на прекапиллярах и сфинктерах, эндотелиальная регуляция диаметра сосудов затрагивает преимущественно более проксимальные сосуды (мелкие артерии, крупные артериолы).

Пассивные факторы (факторы, формирующие вне системы микроциркуляции) — это пульсовая волна со стороны артерий и присасывающее действие дыхательного насоса со стороны вен. Эти колебания

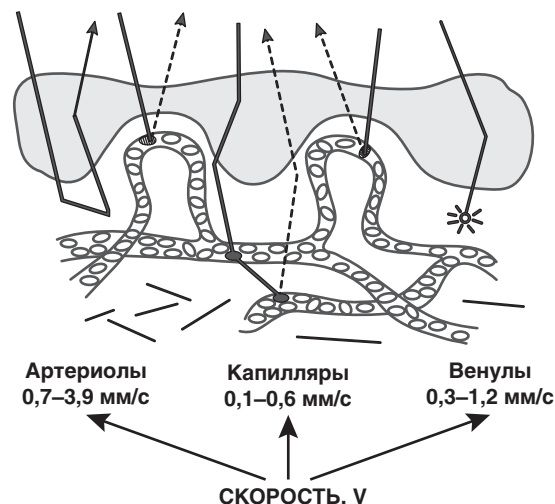


Рис. 7.15. Схема микроциркуляторного русла кровотока и диапазоны скоростей эритроцитов. Стрелками показан ход лучей обратно отраженного лазерного излучения

проникают с кровотоком в зондируемую область, так как микроциркуляторное русло, являющееся составной частью общей системы кровообращения, топографически расположено между артериями и венами.

Влияние активных и пассивных факторов на поток крови приводит к изменению скорости и концентрации потока эритроцитов. Эти изменения вызывают модуляцию перфузии и регистрируются в виде сложного колебательного процесса.

Активные механизмы создают поперечные колебания кровотока в результате чередования сокращения и расслабления мышц сосудов (сменяющие друг друга эпизоды вазоконстрикции и вазодилатации). Пассивные факторы организуют продольные колебания кровотока, выражающиеся в периодическом изменении давления и объема крови в сосуде. В артериолах характер этих изменений определяется пульсовой волной, в венах — колебаниями дыхательного насоса.

В переменной составляющей $\delta\text{ПМк}(t)$ -показателя микроциркуляции крови содержится ценная информация о модуляции кровотока. Ее расшифровка, анализ и интерпретация позволяют диагностировать состояние сосудистого тонуса и механизмов регуляции кровотока в микроциркуляторном русле. Если постоянная составляющая ЛДФ-сигнала — среднеарифметическое значение показателя микроциркуляции крови (M_k) характеризует величину перфузии, то $\delta\text{ПМк}(t)$ -показателя микроциркуляции крови — механизмы контроля за перфузией. Таким образом, для диагностики функционального состояния микроциркуляторного русла крови следует анализировать обе составляющие. Регистрируемый в ЛДФ колебательный процесс представляет результат наложения колебаний, обусловленных активными и пассивными факторами.

Кровоток в микроциркуляторном русле нестабилен и вариабелен. Параметр σ (рис. 7.16) — среднее колебание перфузии относительно среднего значения потока крови M_k , вычисляется по формуле для среднеквадратичного отклонения, имеет раз-

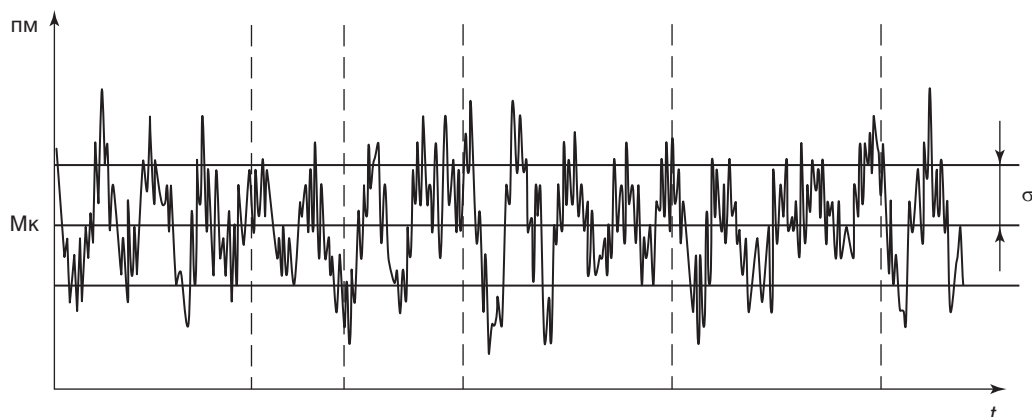


Рис. 7.16. Лазерная доплеровская флоуметрия. Мк — среднее арифметическое значение показателя микроциркуляции крови; σ — среднее квадратичное отклонение показателя микроциркуляции

мерность в перфузионных единицах. Параметр σ характеризует временную изменчивость перфузии, отражает среднюю модуляцию кровотока из-за указанных активных и пассивных факторов. На рис. 7.17 представлены средние значения Мк и σ в различных областях тела.

Чем больше величина σ , тем более глубокая модуляция микрокровотока происходит. Повышение σ обусловлено преимущественно более интенсивным функционированием регуляторных механизмов активного контроля за микроциркуляцией, но может происходить и в результате повышения амплитуд сердечных и дыхательных ритмов. Очевидно, что изменения значений Мк и σ связаны. В анализе результатов ЛДФ целесообразно использовать соотношение величин σ и Мк, то есть коэффициент вариации (K_v):

$$K_v = \sigma / \text{Мк} \times 100\%.$$

Величина K_v отражает напряженность функционирования регуляторных систем микрососудистого русла. Так, увеличение K_v в сочетании с Мк и повышением σ связано с усилением активных механизмов контроля, возрастанием энергетики колебательного процесса. Увеличение амплитуд пассивных (в основном сердечных) осцилляций может сопровождаться повышением параметра средней перфузии Мк.

По величинам амплитуд колебаний микрокровотока в конкретных частотных диапазонах возможно оценивать функциональное состояние определенных механизмов контроля за перфузией. Для расчета амплитудно-частотного спектра применяют несколько способов математической обработки: быстрое преобразование Фурье, математические узкополосные фильтры Butterworth и вейвлет-преобразование, которое наилучшим образом выявляет периодичность процессов физиологической природы (табл. 7.3).

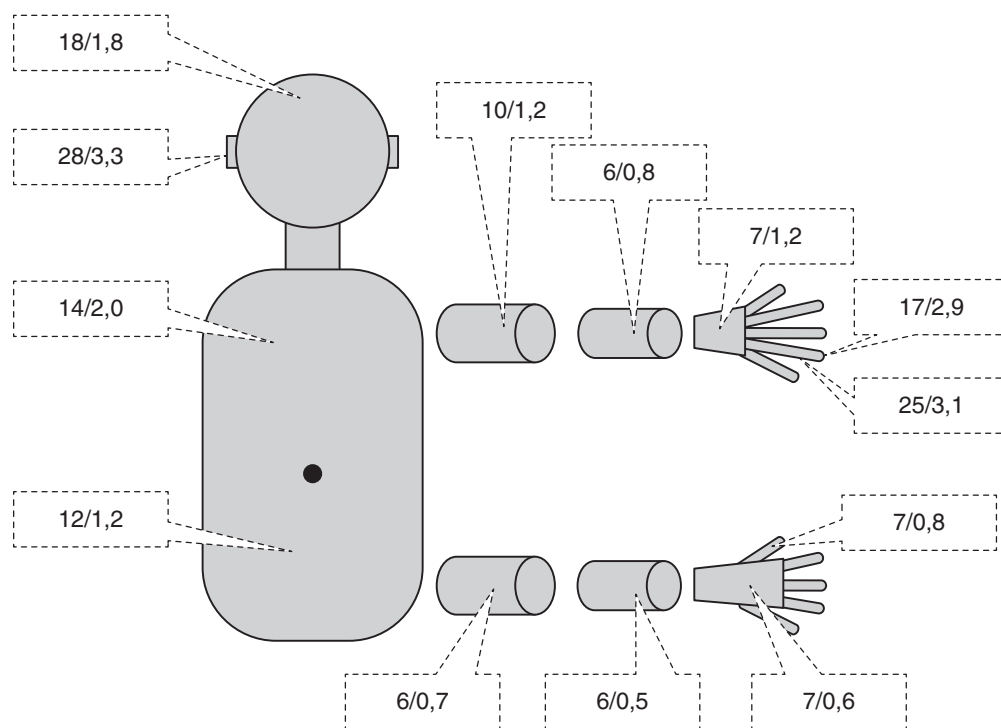


Рис. 7.17. Данные по средней перфузии и ее изменчивости микроциркуляции крови/σ для 20-летних волонтеров [2]

Таблица 7.3. Частотные диапазоны колебаний кровотока в микрососудах кожи человека

Частотный интервал		Средняя пиковая частота		Физиологическая природа	Диагностическое значение
Гц	кол./мин	Гц	кол./мин		
0,005–0,0095	0,3–0,6	0,007	0,4	Эндотелиальная	Оценка эндотелиальной дисфункции по изменению амплитуд колебаний вблизи 0,007 и 0,01 Гц (НО-зависимый диапазон). Доминирование в вейвлет-спектре осцилляций около 0,01 Гц, особенно в сочетании с высокоамплитудным пульсовым ритмом, свидетельствует о дилатации мелких артерий и крупных артериол
0,0095–0,02	0,6–1,2	0,01	0,6	Эндотелиальная НО-зависимая	
0,02–0,046	1,2–2,8	0,03	1,8	Нейрогенная симпатическая адренергическая	Возможность оценивать осцилляторный компонент симпатической адренергической регуляции артериол и артериоло-венулярный анастомоз; доминирование их амплитуды среди активных колебаний в спектре свидетельствует о преобладании эрготропной направленности регуляции микрогемоциркуляторно-тканевых систем. Увеличение амплитуд нейрогенных колебаний при уменьшении амплитуды миогенных колебаний в зонах кожи с артериоло-венулярным анастомозом — индикатор снижения сопротивления и активации путей нутритивного (шунтового) кровотока
0,047–0,069	2,8–4,1	0,06	3,6	Сенсорная пептидергическая (в том числе при гипертермии, миогенной ауторегуляции)	Появление высокоамплитудных осцилляций в этом диапазоне свидетельствует об активации сенсорных пептидергических волокон. Их выявление в спектре в сочетании со значительным снижением величины М свидетельствует об активации миогенного тонуса артериол. Велико значение этих осцилляций для диагностики нейрогенного воспаления, сенсорно-симпатического спаривания и симпатической зависимости боли, например при комплексном регионарном болевом синдроме. Сенсорные пептидергические волокна, секретирующие нейропептиды (вещество Р, кальцитонин-ген-родственный пептид, нейрокинин А) — основной компонент нервной трофики тканей
0,07–0,145	4,2–8,7	0,1	6	Собственно миогенная (вазомоции)	Оценка состояния колебательного компонента мышечного тонуса прекапилляров, регулирующих приток крови в нутритивное русло
0,16–0,18	9,6–10,8	0,17	10	Холинергическая, парасимпатическая	Отражают влияние центральных трофотропных механизмов, в том числе парасимпатических центров; их появление в спектре колебаний кровотока в зонах кожи, лишенной парасимпатической иннервации (например, кожи с артериоло-венулярным анастомозом), свидетельствует о снижении эрготропного центрального регуляторного компонента и сдвиге центральной регуляции в трофотропном направлении
0,2–0,4	12–24	0,3	18	Пассивная дыхательная	Увеличение амплитуды дыхательной волны указывает на снижение микроциркуляторного давления и/или ухудшение венозного оттока. Ухудшение оттока крови из микроциркуляторного русла приводит к росту числа эритроцитов, что сопровождается увеличением амплитуды дыхательной волны. Дыхательная волна напрямую не отражает кровотока венозных отделов капилляров и венул, она связана с его дыхательной модуляцией
0,8–1,6	48–96	1	60	Пассивная сердечная	Увеличение амплитуды пульсовой волны при повышенных или нормальных величинах средней перфузии М свидетельствует об увеличении притока в микроциркуляторное русло артериальной крови

Для сравнения амплитуд осцилляций у разных испытуемых, полученных при различных условиях окружающей среды, необходимо оперировать нормированными амплитудами колебаний. Используются два варианта нормировки амплитуд — на M_k или на σ .

1. Определение вклада амплитуды колебаний определенного частотного диапазона относительно средней модуляции кровотока оценивается по формуле A/σ (где A — амплитуда колебаний, σ — среднеквадратичное отклонение колебаний перфузии, средняя модуляция кровотока). Такая нормировка амплитуд ритмов активных тонусоформирующих диапазонов (эндотелиальных, нейрогенных, миогенных) позволяет исключить влияние нестандартных условий исследований, так как увеличение или уменьшение A и средней модуляции σ происходит в одну сторону.

2. Определение вклада амплитуды колебаний относительно величины M_k по формуле A/M_k . Величина A/M_k характеризует напряженность регуляции кровотока со стороны отдельных активных регуляторных факторов или модуляции кровотока со стороны пассивных (пульсовых, дыхательных) механизмов.

При анализе вейвлет-спектра отчетливое доминирование по амплитуде осцилляций (резонанс) в диапазонах эндотелиальной и/или симпатической активности свидетельствует о преобладании вклада кровотока артериол, артериоло-венулярного анастомоза и относительного снижения нутритивного кровотока. Наоборот, доминирование по амплитуде или резонансные собственно миогенные осцилляции

свидетельствуют об активации капиллярной перфузии (рис. 7.18).

На рис. 7.19, 7.20 представлены примеры амплитудно-частотных спектров осцилляций микрокровотока при гиперемии и венозном застое.

Оценка шунтирования кровотока. Общая величина показателя шунтирования (ПШ) вычисляется по формуле:

$$\text{ПШ} = \text{ПШ1} + \text{ПШ2},$$

где ПШ1 — ПШ, связанный с различиями тонуса в микрососудах нутритивных и ненутритивных путей кровотока непосредственно в пределах микроциркуляторного русла, а ПШ2 — связанный с различиями перфузии микрососудов и более крупных сосудистых сегментов (артерий, венул и вен) в случаях артериальной гиперемии или венозного застоя, при этом доля нутритивной перфузии также снижается в объеме зондирования ткани.

Возможны разные варианты шунтирования кровотока в микроциркуляторном русле. Во-первых, за счет перераспределения перфузии в микрососудах, которое в обычных условиях чаще встречается в зонах с артериоло-венулярным анастомозом. Во-вторых, за счет различия перфузии микрососудов и более крупных сосудистых сегментов. И, в-третьих, смешанный вариант, чаще встречается в зонах без артериоло-венулярного анастомоза (табл. 7.4).

В соответствии с особенностями перераспределения кровотока в микрососудах выделяют зоны с преимущественно ненутритивной перфузией (например,

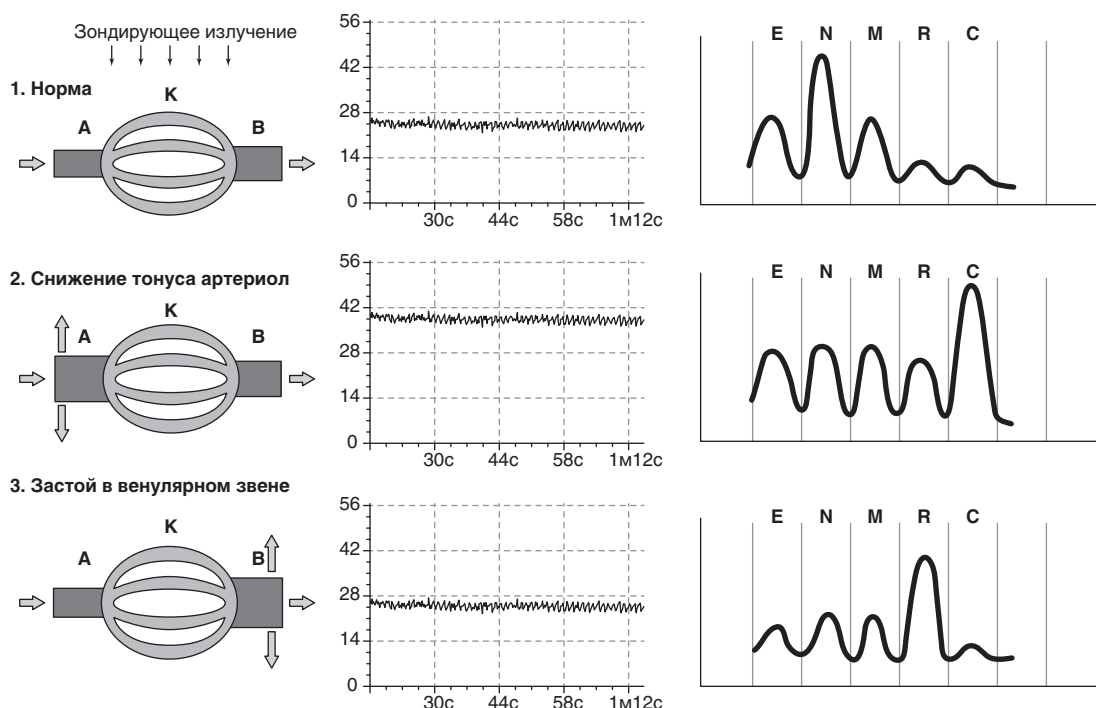


Рис. 7.18. Схема совместного анализа показателя микроциркуляции крови и спектра колебаний микрокровотока в коже. А — артериолы; К — капилляры; В — венулы. 1 — норма. Среднеарифметическое значение показателя микроциркуляции крови — контрольная величина, спектр осцилляций соответствует контролю (Е — эндотелиальный, N — нейрогенный симпатический, М — миогенный, R — дыхательный, С — сердечный диапазоны колебаний). 2 — гиперемия. Сосудистый тонус артериол (А) снижен, перфузия микроциркуляции крови выше контроля, в спектре колебаний доминирует амплитуда сердечного ритма (С). 3 — застой в веноулярном звене. Сосудистый тонус артериол в норме, микроциркуляция крови близка к норме или повышена относительно контроля, в спектре колебаний доминирует амплитуда дыхательного ритма (R)

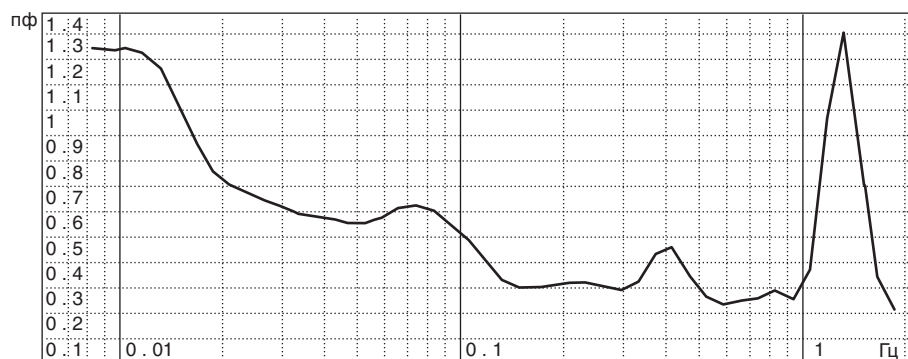


Рис. 7.19. Запись вейвлет-спектра кожи ладонной поверхности II пальца кисти. Первые сутки после десимпатизации (торакоскопическое клиппирование Th_3 -ганглия). По вертикали — перфузионные единицы, по горизонтали — частота колебаний (Гц). Выраженное увеличение амплитуд эндотелиального ритма с пиковой частотой 0,01 Гц и кардиального (пульсового) ритма с пиковой частотой 1,3 Гц. Активность осцилляций симпатического генеза не представлена. Артериальная гиперемия

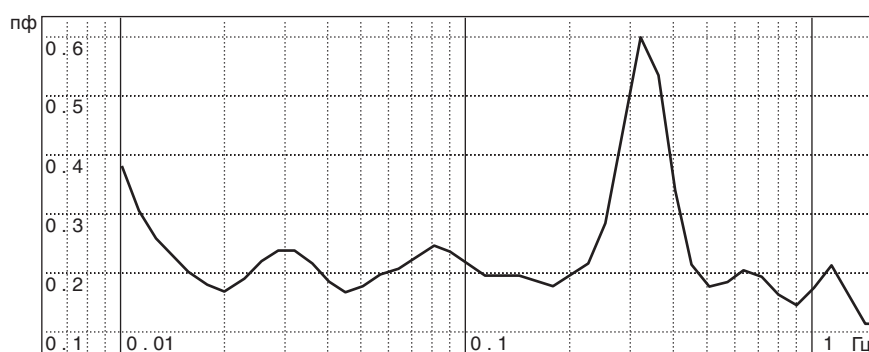


Рис. 7.20. Запись вейвлет-спектра колебаний в коже ладонной поверхности V пальца кисти. Через 1 мес после повреждения локтевого сосудисто-нервного пучка. По вертикали — перфузионные единицы, по горизонтали — частота колебаний (Гц). Выраженное резонансное увеличение амплитуды дыхательного ритма с пиковой частотой 0,31 Гц, веноулярный застой

Таблица 7.4. Варианты шунтирования кровотока в микроциркуляторном русле

Вариант шунтирования	ПШ1		ПШ2
	зона с артериоло-веноулярным анастомозом	зона без артериоло-веноулярного анастомоза	
За счет ПШ1	>1	>1	<1
За счет ПШ2	=1 (спазм артериоло-веноулярного анастомоза)	=1	≥1
ПШ1 и ПШ2	>1	>1	>1

кожа в зонах с артериоло-веноулярным анастомозом) и с преимущественно нутритивной перфузией (например, кожа в зонах без артериоло-веноулярного анастомоза с более низким ПШ1).

Оценка тонуса микрососудов. Колебательный компонент тонуса определяется по формуле:

$$\sigma/A,$$

где σ — среднее квадратичное отклонение от M_k ; A — значение амплитуды колебаний перфузии в соответствующем активном тонусоформирующем частотном диапазоне (эндотелиальном, симпатическом нейрогенном, миогенном и др.).

Стационарный компонент тонуса (СТ) резистивных сосудов (мелких артерий, приносящих артериол)

на входе в исследуемую микрососудистую сеть оценивают по формуле:

$$CT = A_{\text{дср.}}/M_k \text{ (мм рт.ст./п.е.)},$$

где п.е. — перфузионные единицы.

Этот показатель для кожи идентичен используемому в международных журналах показателю кожного сосудистого сопротивления (cutaneous vascular resistance). Стационарный компонент тонуса прекапилляров и прекапиллярных сфинктеров, а также артериоло-веноулярный анастомоз не рассчитывают, так как раздельно величины $A_{\text{дср.}}$ в этих сегментах микрососудистой сети неинвазивно не измеряются.

Диагностическое значение имеет выявление максимальной по амплитуде ($A_{\text{макс.}}$) осцилляции среди всех активных диапазонов в конкретном исследовании. В такой ситуации именно этот регуляторный фактор доминирует среди остальных тонусоформирующих влияний на мышечно-содержащие артериолы.

На рис. 7.21 показаны ключевые участки топографической локализации компонентов регуляции тонуса микрососудов кожи с артериоло-веноулярным анастомозом. Понятно, что осцилляторный компонент миогенного тонуса представлен во всех мышечно-содержащих микрососудах, но в зоне прекапиллярных сфинктеров и прекапилляров он реализуется в относительно чистом виде.

Типовые нарушения периферического кровообращения. К типовым нарушениям периферического кровообращения относят артериальную (активную)

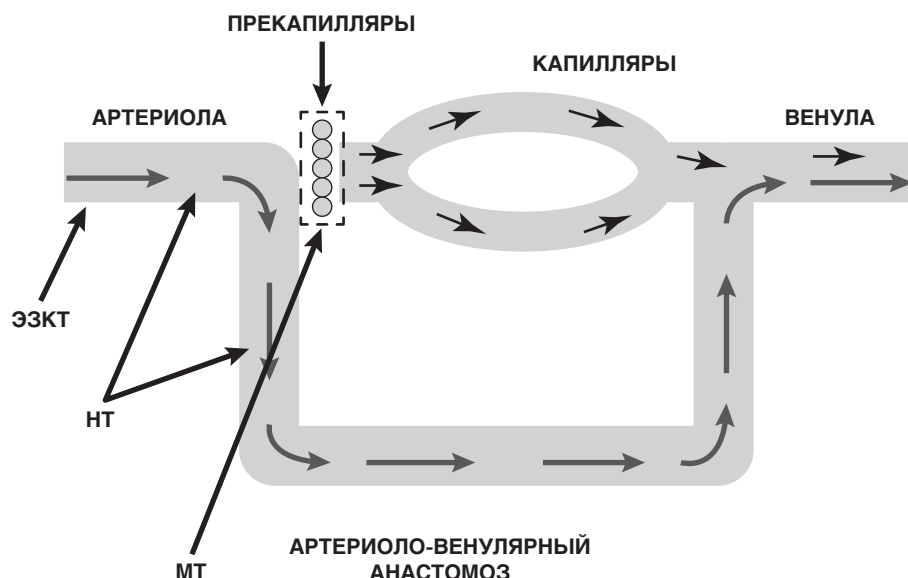


Рис. 7.21. Локализация регуляции нейрогенного симпатического (НТ), миогенного (МТ) и эндотелийзависимого (ЭЗКТ) компонентов тонуса

гиперемии, венозную гиперемию (congestion — застой, пассивную гиперемию), ишемию и стаз (табл. 7.5).

Для оценки типовых нарушений микроциркуляции по ЛДФ основное значение имеют величина M_k и состояние колебательных процессов, связанных с артериальным притоком (Ас.) и дыхательной модуляцией веноулярного оттока (Ад.). Целесообразна совокупная, а не изолированная оценка одного из параметров.

Для дифференциальной ЛДФ-диагностики типовых нарушений регионального кровообращения применяют алгоритм, основанный на установлении направленности соотношения Ас./Ад. Если величина Ас./Ад. больше 1,0, то в случае увеличения M_k диагностируют артериальную гиперемию, при уменьшении M_k — ишемию. Если величина Ас./Ад. $\leq 1,0$ и при этом отсутствует снижение M_k , а Ас. находится в пределах нормальных величин, то диагностируют венозный застой, а при повышении M_k и Ас. диагно-

стируют застойно-гиперемическую форму; когда же M_k снижена — это характерно для застойно-ишемической формы.

ЛАЗЕРНАЯ ДОППЛЕРОВСКАЯ ФЛОУМЕТРИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ ЛИМФЫ

ЛДФ микроциркуляции лимфы реализована для диапазона скоростей кожного лимфотока человека 5–30 мкм/с. В качестве примера на рис. 7.22 представлена запись показателя лимфотока ($M_L = K \times N_{рас.} \times V_{ср.}$, где $N_{рас.}$ — число рассеивателей в лимфотоке) на подушечке III пальца руки. Показатель лимфотока оценивается в относительных единицах (отн. ед.).

Средние значения показателя и переменной составляющей лимфотока на пальце руки для данного примера $M_L = 0,41$ отн. ед., $\sigma_L = 0,03$ отн. ед. Для диагностики применяют расчетные параметры, аналогичные приведенным для микрокровотока выше.

Таблица 7.5. Показатели лазерной доплеровской флоуметрии при расстройствах кровообращения

Параметр	Артериальная гиперемия		Венозный застой	Ишемия	Стаз
	ненутритивная	нутритивная			
M_k	↑	↑	= или ↑	↓	↓
Доля $M_{нутр.}$	↓	↑	± **	± (чаще ↓)	— *
Доля $M_{шунт.}$	↑	↓	±	±	— *
Ас.	↑↑ или ↑	↑	=	Чаще ↓	±, ↓ (при ишемическом стазе)
Ад.	=	=	↑↑	↓	±, ↑ (при венозном стазе)
Ас./Ад.	↑ (>1)	↑ (>1)	↓ (<1)	± (>1)	± (около 1)
Особенности осцилляций активного тонусоформирующего диапазона	Часто увеличена Аэ.	Доминирует амплитуда осцилляций общего миогенного диапазона	Чаще снижена Аэ.	Чаще снижение амплитуд при хронической ишемии	Резкое угнетение осцилляций

* ПШ не определяется из-за отсутствия осцилляций.

** При хроническом течении венозного застоя плотность и перфузия капилляров снижены.

Обозначения: ↑ — увеличение; ↓ — уменьшение; = — без изменений; ± — незначительные отклонения по сравнению с контролем.

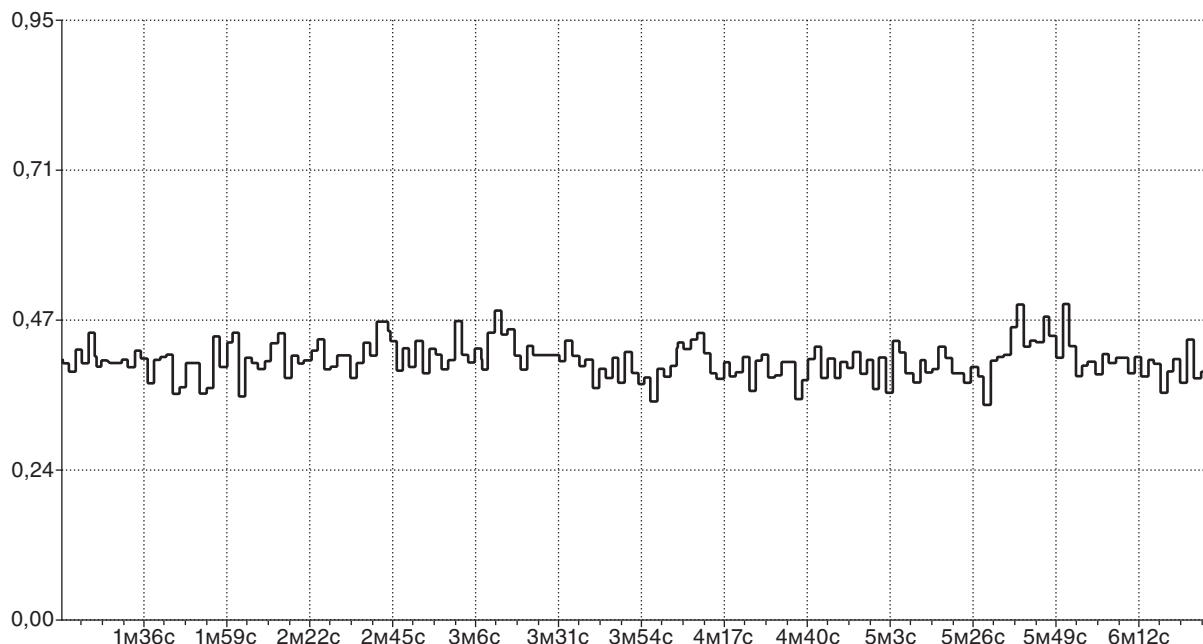


Рис. 7.22. Запись показателя лимфотока на III пальце руки. Ось Y — показатель лимфотока (отн. ед.); ось X — время

С помощью амплитудно-частотного анализа с применением вейвлет-преобразования выявлены следующие частотные диапазоны осцилляций лимфотока в коже человека: эндотелиальные (0,005–0,015 Гц), пейсмейкерные фазные (0,016–0,042 Гц), миогенные (0,05–0,145 Гц) и дыхательные осцилляции (0,2–0,4 Гц). Лимфатические микрососуды чередуются и переплетаются с кровеносными микрососудами. Происходит механическое давление на микролимфососуды со стороны приносящих (артериолы) и отводящих (венулы) кровеносных сосудов. Осцилляции в дыхательном диапазоне 0,2–0,4 Гц выявлялись постоянно, связаны с механическим давлением со стороны венул. Вследствие высокого гидродинамического сопротивления лимфатических узлов дыхательные ритмы вряд ли могут проникать в периферические лимфатические сосуды и микрососуды, в связи с чем генез дыхательных осцилляций — передача на тонкостенные лимфатические сосуды дыхательных ритмов рядом расположенных венул и вен.

Режимы колебаний потока лимфы в микрососудах кожи реализуются в двух вариантах — мультистабильном, когда представлены осцилляции разных диапазонов частот, и резонансном, когда отчетливо доминируют пейсмейкерные фазные осцилляции, передающиеся, вероятно, из более глубоких подкожных мышечно-содержащих лимфатических сосудов. В отдельных случаях в амплитудно-частотном спектре при резонансном режиме присутствовали осцилляции других частотных диапазонов (миогенных, дыхательных), но величины их пиковых амплитуд никогда не превышали аналогичные показатели фазных осцилляций. В случаях выраженного отека активность пейсмейкерных осцилляций низкая или не представлена в амплитудно-частотном спектре (табл. 7.6). Границы контрольных величин составляют $\pm 20\%$ средних значений.

Таблица 7.6. Клинико-физиологическая трактовка изменений показателя Ал/Мл*

Изменение Ал/Мл	Отсутствие отека	Наличие отека
В границах контрольных величин	Обычная фазная активность	Недостаточность активности фазных осцилляций
Снижение	Снижение активности фазных осцилляций	
Увеличение	Увеличение активности фазных осцилляций	Защитная активация фазных осцилляций

*Ал — амплитуда пейсмейкерных осцилляций, отн. ед.; Мл — показатель микролимфоциркуляции, отн. ед.

СОВМЕСТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКРОВОТОКА И МИКРОЛИМФОТОКА

Лимфатическая система тесно связана с венозным руслом, осуществляет дополнительный, коллатеральный к венам дренаж органов и одновременно очищение дренируемой тканевой жидкости. С диагностических позиций наиболее эффективно проводить одновременное исследование микроциркуляции кровотока и лимфотока.

На рис. 7.23 показан эффект компенсации — динамика изменения микрокровотока и микролимфотока в противофазе: при повышении микролимфотока регистрируется снижение микролимфотока, и наоборот. Именно одновременная запись кровотока и лимфотока выявляет данный эффект — индикатор отсутствия нарушений физиологической связи между этими компартментами микроциркуляторно-тканевой системы. На рис. 7.24 показан результат расчета спектров осцилляций микрокровотока и микролимфотока.

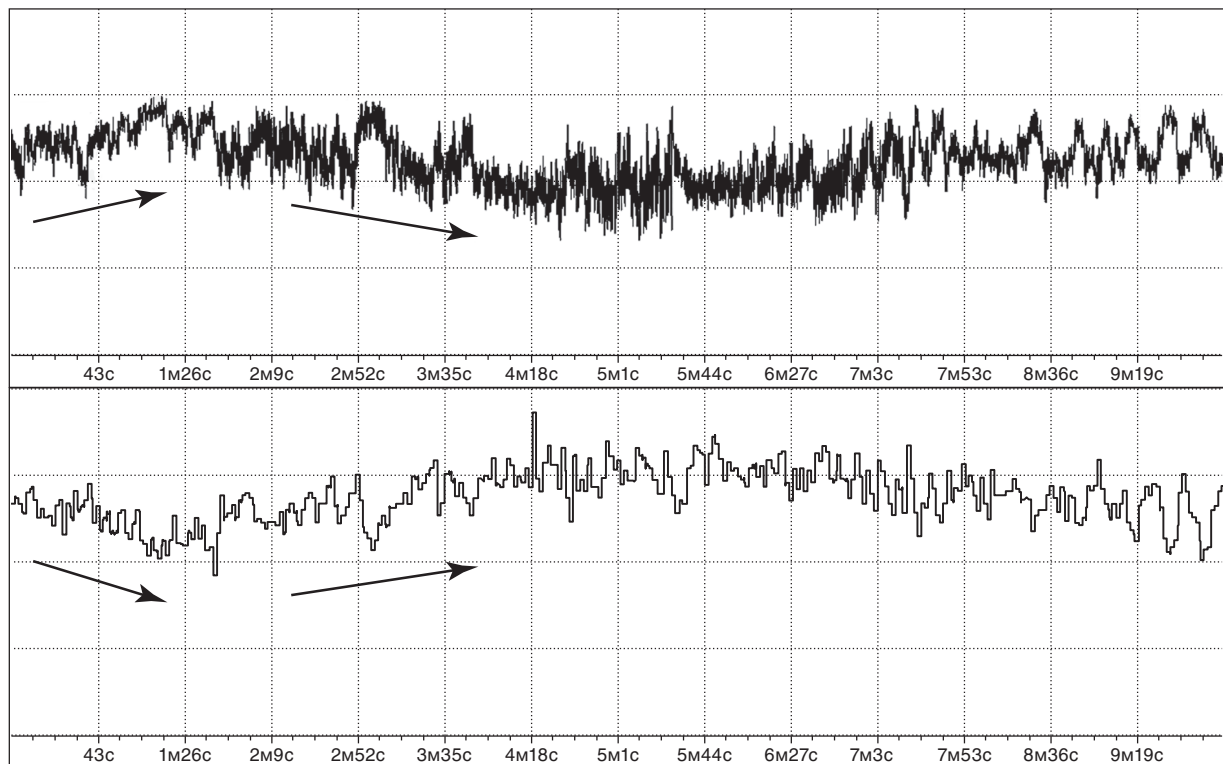


Рис. 7.23. Пример одновременной записи микрокровотока (верхний график) и микролимфотока (нижний график). Стрелками указана протифазность движения микрокровотока и микролимфотока

ЛАЗЕРНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТАБОЛИЗМА

Клеточный метаболизм как составная часть микроциркуляторно-тканевой системы неинвазивно диагностируется с помощью метода лазерной флуоресцентной спектроскопии. В качестве индикаторов окислительного метаболизма используют данные о флуоресценции клеточных коферментов — восстановленного никотинамидадениндинуклеотида (NADH) и окисленного флавинадениндинуклеотида (FAD). NADH переносит электроны к молекулярному кислороду. FAD — акцептор электронов. Существуют особенности локализации этих веществ в клетке: FAD содержится строго в митохондриях, а NADH — как в митохондриях, так и в цитоплазме. Обычно считается, что интенсивность флуоресценции NADH в цитоплазме играет минимальную роль в оптической диагностике. Для возбуждения флуоресценции NADH применяют излучение на длине волны 365 нм, спектр флуоресценции NADH — около 460–470 нм. Для возбуждения FAD применяют излучение на длине волны 450 нм, а спектр флуоресценции FAD — около 510–520 нм.

В качестве диагностического показателя на практике используют окислительно-восстановительный индекс — редокс-отношение (RR):

$$RR = (If \text{ NADH} / If \text{ FAD}) \times (Il \text{ FAD} / Il \text{ NADH}),$$

где If NADH и If FAD — соответственно амплитуды флуоресценции коферментов; Il FAD и Il NADH — соответственно амплитуды возбуждения флуоресценции коферментов.

Снижение флуоресценции NADH в сочетании с отсутствием снижения флуоресценции FAD (RR уменьшается) свидетельствует об активации анаэробного метаболизма (гликолиза). Метаболические процессы в ткани энергозависимы. Рекомендуется проводить температурную пробу с охлаждением (снижается утилизация коферментов) и с нагревом (активируется утилизация коферментов). Чем больше изменения в концентрациях ΔNADH и ΔFAD при температурной пробе, тем меньше утилизировано коферментов в исходном состоянии, значительнее снижение окислительного метаболизма.

Поскольку микроциркуляторно-тканевая система функционирует во взаимосвязи микрокровотока, микролимфотока и клеточного метаболизма, диагностика наиболее эффективна при одновременной регистрации указанных звеньев микроциркуляторно-тканевой системы в одном объеме ткани. На рис. 7.25 представлены примеры одновременной регистрации функциональных изменений указанных компарментов.

7.2.2. ПОКАЗАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Дисфункция микроциркуляторно-тканевых систем включена в патогенез травм и большинства известных заболеваний.

В кардиологии, ангиологии и лимфологии исследование микроциркуляции показано при всех нозологических формах заболеваний, так как дисфункция микроциркуляции — один из ключевых компонентов их патогенеза.

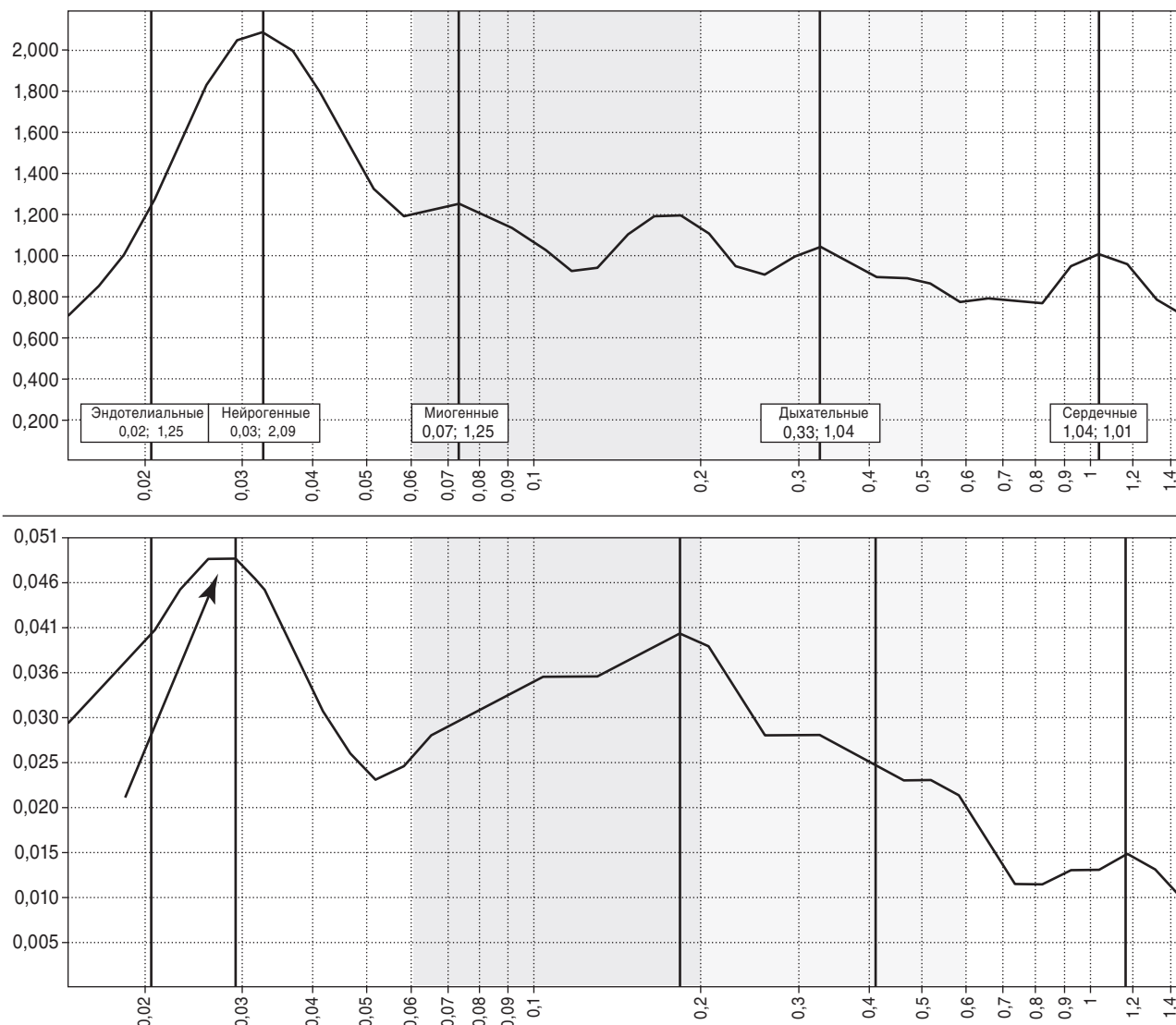


Рис. 7.24. Пример амплитудно-частотных спектров осцилляций при одновременной регистрации кровотока (верхний график) и лимфотока (нижний график). Стрелкой указан пик колебаний при активности пейсмекеров лимфатических сосудов

При заболеваниях и травмах периферической нервной системы ЛДФ с вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет оценить функцию тонких немиелинизированных нервных волокон (симпатических и сенсорных пептидергических). При травмах нервов выявление их активности в денервированной коже служит критерием отсутствия полного перерыва нерва до операции, а возрастание их функциональной активности после шва (пластики) нерва — ранним критерием регенераторного процесса (рис. 7.26) в доимпульсной стадии (до появления первых признаков активации миелинизированных волокон по данным ЭНМГ). Диагностическая эффективность — 91,6%. При туннельных синдромах активность симпатических волокон служит критерием выраженности сдавления нерва: для начальных сроков характерна симпатическая активация за счет соматосимпатического рефлекса, а для выраженной компрессии — гипосимпатикотония. Диагностическая эффективность — 91,7%. Кроме травматических и компрессионных невропатий исследование показано при всех формах полиневропатии.

При болевых синдромах (невропатической боли, комплексном регионарно-болевым синдроме) ЛДФ с вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет оценить симпатическую зависимость боли по показателям сенсорно-симпатического спаривания (табл. 7.7). Диагностическая эффективность — 89,8%.

При комплексном регионарном болевом синдроме ЛДФ с вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет диагностировать посттравматический комплексный регионарный болевой синдром в ранние сроки в течение 1 мес после перелома — специфично выявление активации сенсорных пептидергических волокон и воспалительного симпатолита в вейвлет-спектре (рис. 7.27). Диагностическая эффективность — 91,2%.

Оценка активности регенераторного процесса. Динамика состояния микроциркуляторно-тканевых систем — эффективный подход к оценке активности процесса регенерации, например посттравматической (после переломов костей, ожогов кожи, формирования оссификатов и др.). Ранними признаками процесса регенерации служат перестройка регуляции микрососудов в трофотропном направлении (возрас-

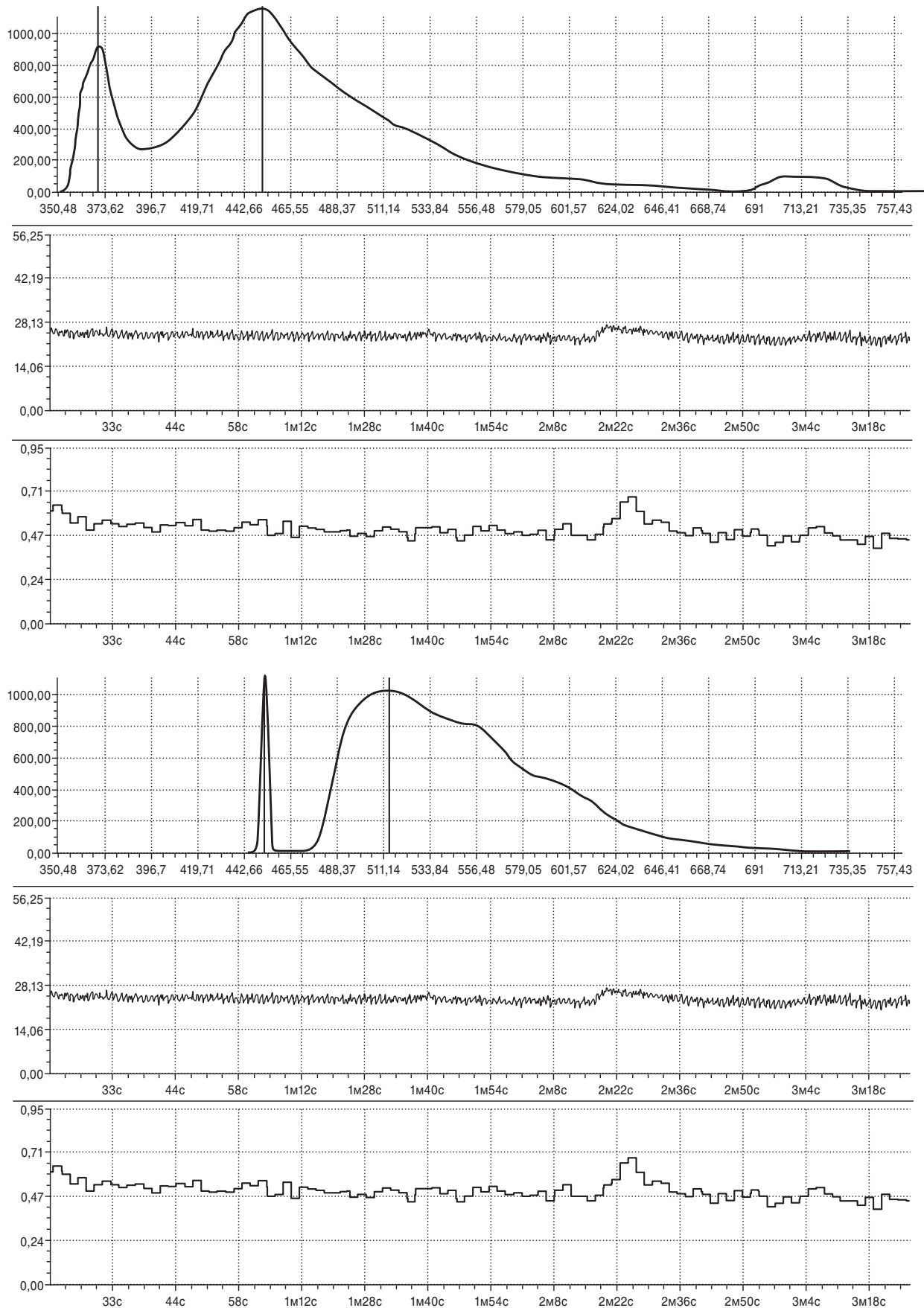


Рис. 7.25. Сверху вниз. Первые три графика: показана регистрация кофермента никотинададениндинуклеотида, микроквотока и микролимфотока. Вторые три графика: показана регистрация кофермента флавинадениндинуклеотида, микроквотока и лимфотока. Регистрация осуществляется одновременно

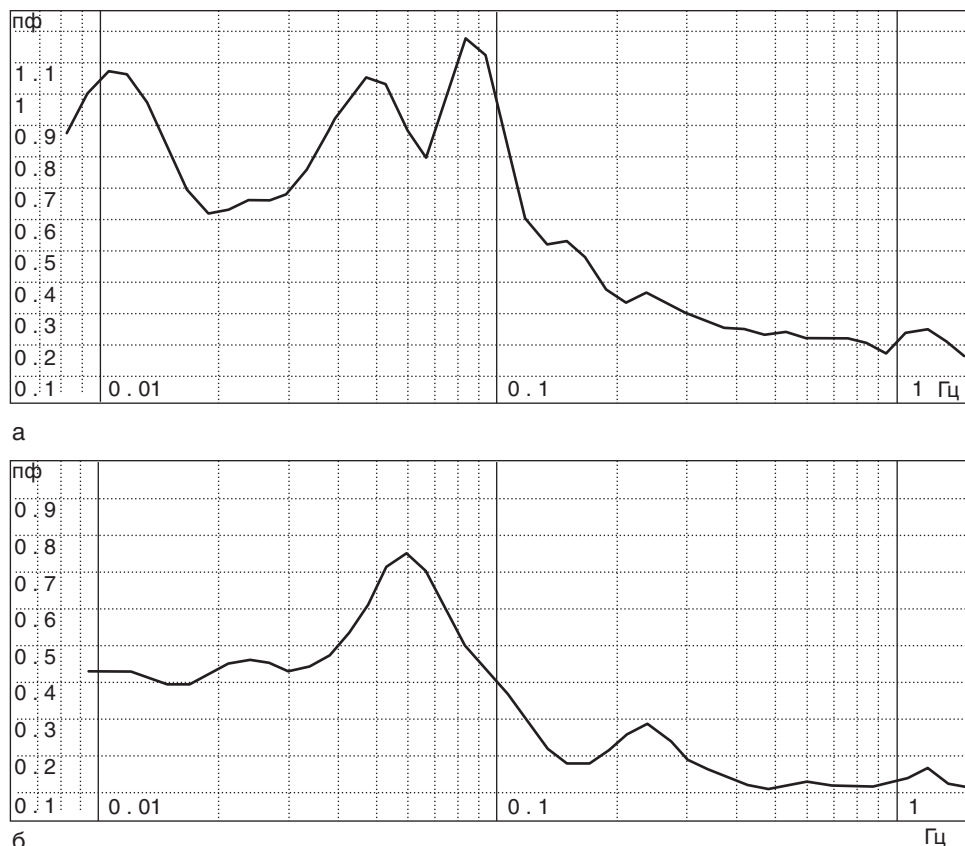


Рис. 7.26. Вейвлет-спектр колебаний кровотока кожи ладонной поверхности дистальной фаланги II пальца кисти: а — 6,5 нед после шва срединного нерва, доимпульсная стадия регенерации нерва. Выраженное доминирование активных трофотропных информационных каналов, отсутствие эрготропных симпатических влияний; б — 5 мес после шва срединного нерва, импульсная стадия регенерации, дизестезия с элементами гиперпатии кожи. Доминирование сенсорного пептидергического информационного канала, появление слабо реализуемых симпатических влияний

Таблица 7.7. Лазерная доплеровская флоуметрия — признаки сенсорно-симпатического спаривания

ЛДФ-параметры	Варианты сенсорно-симпатического спаривания	
	I	II
Осцилляции нейрогенного симпатического генеза 0,02–0,046 Гц	Доминируют по амплитуде среди активных частотных диапазонов вейвлет-спектра	Осцилляции присутствуют в вейвлет-спектре
Мк, п.е.	Снижен	Не учитывается
ΔМд., %	Не учитывается	≥ нормы
Осцилляции сенсорного пептидергического генеза	Осцилляции присутствуют в вейвлет-спектре	

Примечание. ΔМд. — степень снижения Мк при дыхательной пробе (в процентах исходного значения).

тание вклада нутритивного кровотока, активности собственно миогенных и/или сенсорных пептидергических осцилляций в гемодинамику), увеличение энергетики осцилляций кровотока и формирование гипердаптивных функциональных систем, активация путей синтеза АТФ и увеличение индекса флуоресценции, возрастание активности лимфотока.

Оценка дистрофического процесса. Для начальных стадий хронического дистрофического процесса (например, при периартрозах, эпикондилитах), сочетающегося с воспалительной реакцией, в вейвлет-спектре доминируют признаки гиперемии

(артериальной с увеличением амплитуд кардиальных пульсовых осцилляций или смешанной венозно-артериальной с увеличением пульсовых и дыхательных амплитуд), в активных диапазонах отсутствует доминирование амплитуд эрготропных осцилляций симпатического генеза 0,02–0,046 Гц. На дистрофической стадии процесс амплитуд пассивных осцилляций (особенно кардиоритмов) снижаются на фоне формирования ишемии или веноулярного застоя, в активных диапазонах доминируют осцилляции симпатического генеза.

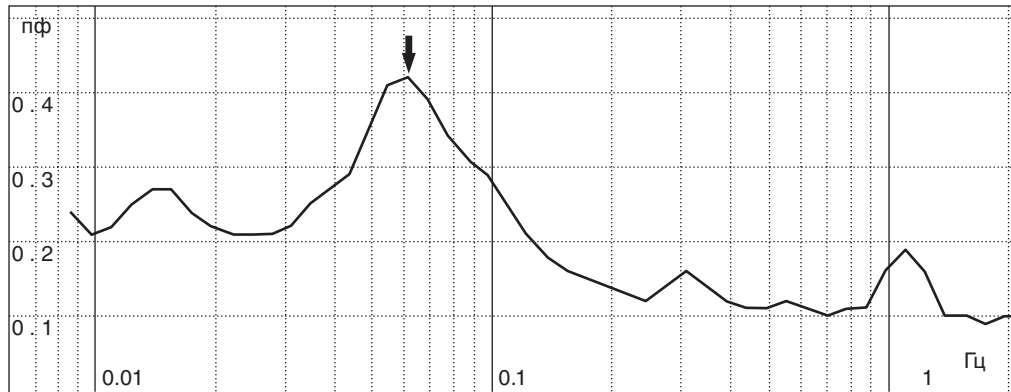


Рис. 7.27. Записи вейвлет-спектра осцилляций кровотока микрососудов кожи ладонной поверхности дистальной фаланги II пальца кисти на фоне острой фазы комплексного регионарного болевого синдрома, отсутствие осцилляций симпатического адренергического генеза и синхронизация миогенных колебаний на частоте сенсорного пептидергического диапазона около 0,06 Гц (указано стрелкой)

Список литературы

1. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем. Колебания, информация, нелинейность: Руководство для врачей. М.: Либроком, 2013. 496 с.
2. Лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) и оптическая тканевая оксиметрия (ОТО) в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови: Методические рекомендации. 2013.

7.3. ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ (ТЕПЛОВИДЕНИЕ)

А.И. Крупаткин

Медицинская термография — метод регистрации инфракрасного излучения биологического объекта с максимумом длины волны 9,5 мкм. Существуют три варианта методики:

- бесконтактная инфракрасная термография поверхностных слоев кожи глубиной до 1,5–2 мм;
- инфракрасная радиометрия — для оценки температуры структур, расположенных от поверхности на глубине до 17 см;
- контактная термография с помощью жидкокристаллических пленок с регистрацией теплоизлучения кожи толщиной 0,2–0,8 мм.

Для исследования термотопографии в клинической практике чаще используется бесконтактная инфракрасная термография с определением температур поверхностных тканей. Основные независимые факторы, влияющие на абсолютную температуру кожной поверхности (T , °C) — кровообращение, метаболизм исследуемых тканей, прямая теплопроводность от подлежащих тканей. Причем в обычных физиологических условиях тепломассоперенос кровью служит определяющим звеном и физиологически регулируемой величиной.

В условиях патологии, например воспаления близкого расположенных к поверхности органов и тканей (суставов и др.), возрастает относительный вклад теплопроводности. Объектом исследования может служить кожная поверхность или поверхность любой

ткани при интраоперационном исследовании. Какова физиологическая природа сосудистого компонента регистрируемой температуры? Температура в проекции крупных артерий диаметром более 0,1 см выше, чем соседних зон кожи, так как в связи с высокой скоростью кровотока он не успевает отдать тепло рядом лежащим тканям.

В физиологических условиях температура вне проекции крупных артерий отражает кровоток в сосудах диаметром большим, чем капилляры и прекапилляры, но меньшим, чем крупные артерии. Это зона преимущественно резистивных сосудов (артериол и мелких артерий), истинных артериоло-венулярных анастомозов. Вклад мелких вен и венул ниже, чем артериального звена, поскольку градиент температур между артерией и тканью выше, чем между веной и тканью. В капиллярах и прекапиллярах вследствие интенсивного теплообмена кровь уже в начале сосудов принимает температуру окружающих тканей, и теплоперенос кровью по направлению к окружающим тканям незначителен.

МЕТОДИКА

Метод абсолютно безвреден для пациента. Однако имеются требования к кабинету для термографии с целью исключить влияние окружающей среды на результаты исследования. Температурный режим в помещении должен находиться в пределах 20–25 °C; в более жарком помещении снижается контрастность термограмм, а в холодном — активируются вегетативные сосудистые реакции кожи. В помещении должно отсутствовать движение воздуха или скорость потока воздуха не должна превышать 0,25 м/с. В помещении должны отсутствовать посторонние источники нагрева поверхности тела. Вопросы техники безопасности — общие для работы с электроприборами, но следует соблюдать осторожность при работе с жидким азотом, пользоваться специальным термосом или лейкой при заливке в камеру и избегать попадания его на незащищенную кожу.

За сутки до исследования следует исключить проведение физиопроцедур, массажа, использование грелок или криопроцедур, прием вазоактивных средств, локальное применение кремов и мазей. Исследование у женщин проводят в межменструальный период, на

10-й день после окончания менструального цикла. Перед исследованием необходима адаптация пациента к условиям окружающей среды. Исследуемую область тела обнажают в течение 10 мин в состоянии мышечного покоя. Длительное пребывание без одежды (>40 мин) может изменить терморегуляторные реакции, в связи с чем для записей термограмм рекомендуется не превышать вышеуказанное время диагностики.

В качестве диагностических критериев используют как качественное описание, так и количественные показатели. Качественное описание включает локализацию, форму, характер зоны измененной топографии (гипер-, гипотермию, наличие симптома термоампутации конечности при выраженной гипотермии). Для количественной оценки используют как величину T , °C, так и выраженность термоасимметрии в виде горизонтальных (сравнение симметричных температур справа и слева) градиентов температур (ΔT , °C). При необходимости рассчитывают вертикальные градиенты температур (сравнение температур по вертикали конечностей со здоровой зоной), определение градиентов температур очага измененной топографии и соседней здоровой кожи. Значение имеет также площадь измененной топографии.

Обоснованием использования термографии в медицине служит то, что патологические процессы, затрагивающие метаболизм и состояние сосудистой системы, изменяют поверхностную топографию тела человека.

ПОКАЗАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Термография может быть использована при профилактических осмотрах с целью раннего выявления сосудистых заболеваний, патологии периферической нервной системы, воспалительных заболеваний опорно-двигательной системы.

В составе комплексной диагностики в ортопедии, травматологии и ревматологии термография может применяться для выявления воспалительных очагов опорно-двигательной системы; в неврологии и нейрохирургии — при травмах нервных стволов конечностей, вертеброгенных и миофасциальных болях, невропатиях и невралгиях, радикулопатиях, стенозирующих поражениях сонных артерий; в хирургии — при артериальной и венозной недостаточности конечностей и трансплантатов, флебопатиях поверхностных вен. Имеются наблюдения эффективности термографии кожных зон Захарьина–Геда для ранней диагностики патологии внутренних органов и контроля за терапией, а также раннего выявления склонных к гипертермии злокачественных опухолей, в частности молочных желез.

В ревматологии, ортопедии признаками воспалительных очагов (артритов, воспаления околосуставных тканей) служат ограниченные зоны гипертермии более 0,5 °C (рис. 7.28). При деформирующих артрозах метод позволяет дифференцировать воспалительную и дистрофическую природу болевого синдрома; для последнего характерна гипотермия со снижением температуры более 1 °C. Диагностическая эффективность метода составляет в среднем 82,4%.

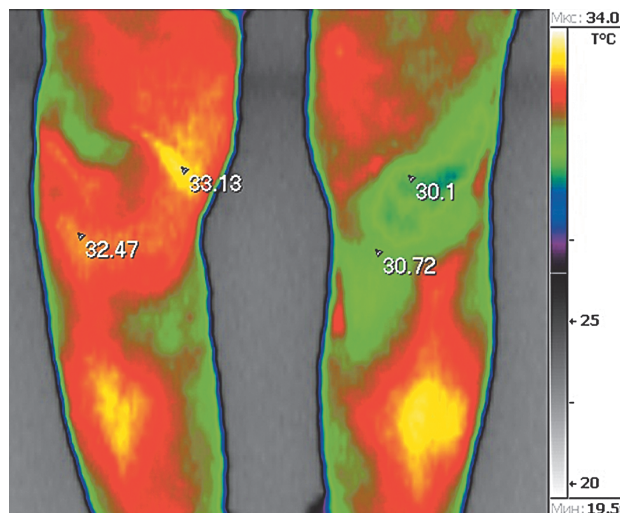


Рис. 7.28. Синовит в области правого коленного сустава. Гипертермия по переднемедиальной поверхности коленного сустава справа. Стрелками указана температура в зоне измерения, справа — цветовая шкала температур

В ангиологии и сосудистой хирургии при облитерирующих заболеваниях артерий нижних конечностей термография до и через 5 мин после сублингвального приема 0,5 мг нитроглицерина позволяет уточнить выраженность недостаточности периферического кровообращения. В случаях компенсации или субкомпенсации магистрального кровообращения температура (°C) дистальных отделов конечностей возрастает; отсутствие изменений температуры или усиление гипотермии происходит при декомпенсации дистального сосудистого русла и развития обкрадывания кровотока. Диагностическая эффективность метода составляет 80,2%.

В флебологии термография позволяет диагностировать варикоз поверхностных вен нижних конечностей на ранних стадиях. Характерна гипертермия более 0,5 °C в проекции и по ходу пораженной вены. Диагностическая эффективность метода составляет 90,4% (рис. 7.29).

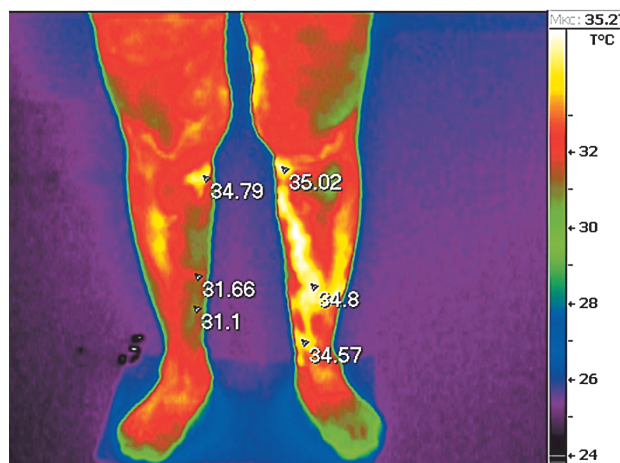


Рис. 7.29. Варикоз поверхностных вен левой и в меньшей степени правой голени. Гипертермия в проекции поверхностных вен

Применение термографии в неврологии и нейрохирургии обусловлено активным регулирующим влиянием тонких нервных волокон (вегетативных, сенсорных пептидергических) на кожный кровоток. В связи с несовпадением зон вегетативной и соматической иннервации перед термографией не следует ставить цель проведения точной топической неврологической диагностики, для этого существуют неврологический осмотр, лучевые и нейрофизиологические методы. Однако термография имеет уникальные возможности оценки соматосимпатического вазомоторного рефлекса конечностей, амплитуда и объем распространения которого позволяют оценить тяжесть заболевания, определить показания к консервативному или хирургическому лечению. Особенно это эффективно при патологии периферической нервной системы.

Ключевым проявлением активации соматосимпатического вазомоторного рефлекса служит гипотермия дистальных отделов конечности. Для кожи кистей и стоп следует использовать ладонные и подошвенные поверхности, где выше плотность вегетативной иннервации. Амплитуда соматосимпатического вазомоторного рефлекса диагностируется по степени гипотермии — оценивают температуру между исследуемой дистальной зоной конечности по сравнению с референтной. В качестве последней выбирают не вовлекаемые в патологический процесс отдаленные участки кожи туловища, например подлопаточной области. Использовать для этих целей противоположную конечность нецелесообразно из-за рефлекторных сегментарных изменений кровообращения. Объем соматосимпатического вазомоторного рефлекса оценивают по площади зоны гипотермии.

При болевом синдроме вследствие изолированных односторонних радикулопатий на фоне грыж межпозвонковых дисков термография позволяет подтвердить диагноз, при этом характерна гипотермия более $0,5^{\circ}\text{C}$ как дистальных зон, так и затрагивающая проекцию дерматомы пораженного корешка по сравнению с симметричной зоной здоровой конечности (рис. 7.30, 7.31). Диагностическая эффективность в случаях отсутствия дефицита функции толстых миелинизированных волокон составляет 74% с учетом того, что в этих случаях ЭНМГ малоэффективна, а при наличии дефицита функции толстых миелинизированных волокон (парезов мышц и особенно гипестезии кожи) — 81%. При болевом синдроме более 8 баллов по визуально-аналоговой шкале выраженная активация соматосимпатического вазомоторного рефлекса может характеризоваться термоампутацией стопы или кисти и появлением гипотермии на противоположной стороне. Длительная (>6 мес) стойкая гипотермия более 2°C в сочетании с выраженным болевым синдромом более 5 баллов по визуально-аналоговой шкале — показание к дискэктомии. Диагностическая эффективность составляет 81,5%.

При травмах нервных стволов конечностей, богатых вегетативными волокнами (срединный, большеберцовый нервы), термография эффективна для оценки нейродистрофического синдрома тканей в зоне денервации. В первые 2–4 нед после перерезки нерва характерна гипертермия в зоне иннервации и соседней кожи, связанная с вазодилатацией (горячая фаза), постепенно переходящая в стойкую

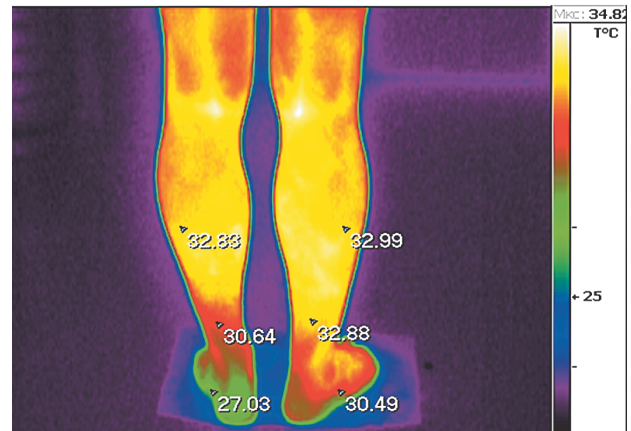


Рис. 7.30. Радикулопатия S_1 -корешка слева, 6 баллов по визуально-аналоговой шкале без выпадения функции толстых миелинизированных волокон. Гипотермия левой стопы в зоне S_1 -дерматомы

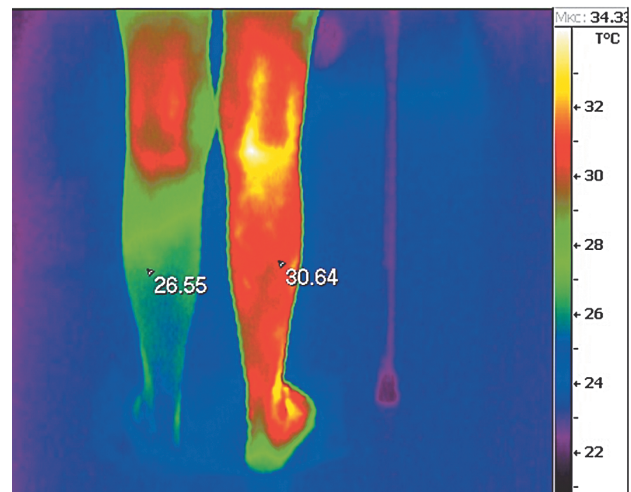


Рис. 7.31. LV-SI — радикулопатия и радикулоишемия слева, гипестезия, вялый парез левой стопы, болевой синдром 8 баллов по визуально-аналоговой шкале. Выраженная активация соматосимпатического вазомоторного рефлекса слева, термоампутация левой стопы

гипотермию на фоне активации соматосимпатического вазомоторного рефлекса и развития денервационной гиперчувствительности сосудов к катехоламинам (холодная фаза) вплоть до появления симптома термоампутации (рис. 7.30). После пластики нерва происходит сужение зоны гипотермии, что сопутствует положительной динамике реиннервации. Сохранение стойкой термоампутации дистальных зон конечности более 6 мес после операции независимо от уровня повреждения нерва дает показание к детальной электрофизиологической и УЗ-диагностике для определения показаний к повторной операции.

При туннельных синдромах нервов, богатых вегетативными волокнами (срединный, большеберцовый нервы), термография позволяет оценить выраженность компрессии нерва. Для ранних стадий миелинопатии характерны активация соматосимпатического вазомоторного рефлекса и гипотермия пальцев; для

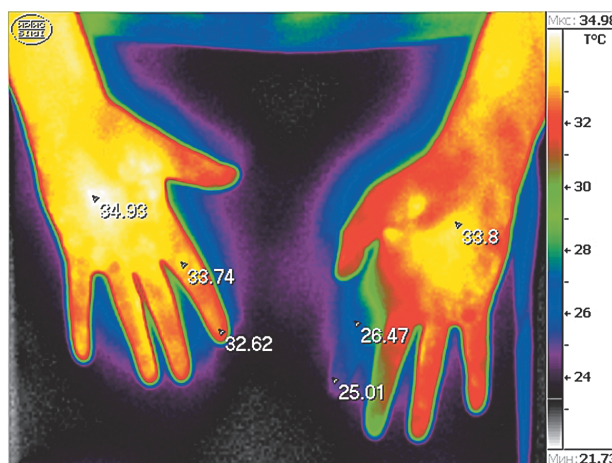


Рис. 7.32. Термограммы ладонных поверхностей кистей рук (руки заведены за спину). Полный травматический перерыв правого срединного нерва на уровне средней трети предплечья, 5 мес после травмы, гипотермия с термоампутацией в зоне правого срединного нерва

стадии валлеровской дегенерации и аксонопатии, в том числе симпатических волокон, характерны снижение соматосимпатического вазомоторного рефлекса и гипертермия пальцев на пораженной стороне за счет вазодилатации, что служит показанием к хирургической декомпрессии нерва. Диагностическая эффективность метода — 79,3%.

При комплексном регионарном болевом синдроме применение термографии неотъемлемо для его ранней диагностики после переломов костей конечностей, чаще лучевой кости (рис. 7.33). При этом характерно раннее развитие стойкого воспаления, в том числе за счет активации сенсорных пептидергических нервных волокон (нейрогенное воспаление). Наиболее значи-

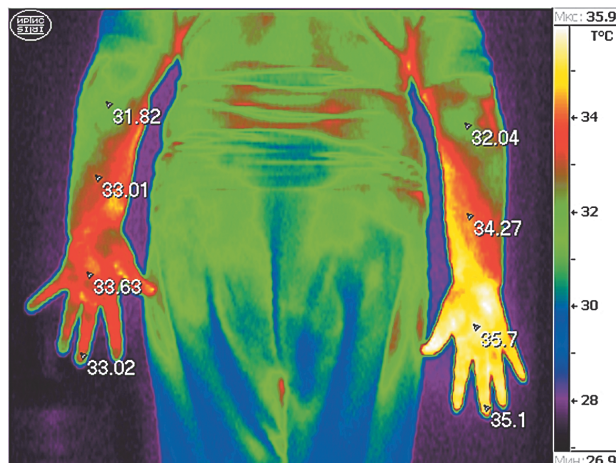


Рис. 7.33. Термограммы ладонных поверхностей кистей рук (руки заведены за спину). Комплексный регионарный болевой синдром правой кисти с резким ограничением движений пальцев, отеком мягких тканей, болевой синдром 6 баллов по визуально-аналоговой шкале; 2 мес после перелома лучевой кости в нижней трети предплечья. Диффузная гипертермия правой кисти

мым термографическим эквивалентом комплексного регионарного болевого синдрома в первые 2 нед после травмы является диффузная гипертермия более 0,5°C ладонной поверхности кисти и пальцев на пораженной стороне (диагностическая эффективность — 86%).

Список литературы

1. Крупаткин А.И. Клиническая нейроангиофизиология конечностей (периваскулярная иннервация и нервная трофика). М.: Научный мир, 2003. 328 с.
2. Diakides M., Bronzino J., Peterson D. Medical infrared imaging: principles and practices. — Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2013.