

УДК 616.13-073.432.19

ББК 54.102

С14

В. И. Садовников

ДОППЛЕРОГРАФИЯ. Интерпретация спектров артериального кровотока.

Руководство для врачей. — М.: ООО «Фирма СТРОМ», 2018. — 192 с.: ил.

В руководстве анализируется влияние патофизиологических процессов на доплеровский спектр артериального кровотока. Показана необходимость знания гемодинамических принципов для специалистов по ультразвуковой диагностике вне зависимости от их узкой профильной специализации. Приведены примеры, как умелое применение этих принципов в анализе кривых спектра доплеровского сдвига частот существенно помогает сделать верный вывод и принять единственно правильное решение в постановке диагноза. Показаны возможности применения гемодинамических принципов в наиболее распространенных клинических ситуациях.

В отдельном приложении кратко приведены основы доплерографии: от истории открытия эффекта Допплера и начала его применения в медицине до основных методических приемов и формул, которые используются врачами ультразвуковой диагностики в рутинной практике. В конце приложения в форме вопросов и ответов приведены ключевые положения ультразвуковой доплерографии.

Руководство предназначено для врачей ультразвуковой диагностики, курсантов циклов профессиональной подготовки и переподготовки, ангиохирургов и врачей других клинических дисциплин, в чьей практике встречается сосудистая патология.

Ни одна из частей этой книги не может быть перепечатана в любом виде (электронном, механическом, фотографическом, письменном и др.) полностью или частями без письменного разрешения ООО «Фирма СТРОМ».

ISBN 978-5-900094-54-0

© В. И. Садовников, 2018

© ООО «Фирма СТРОМ», 2018

Содержание

Глава 1

Функция артериальной системы.

Интерпретация сложных гемодинамических процессов. 9

1.1. Основы центральной гемодинамики. 10

1.2. Патологические основы нарушений в системе микроциркуляции. 12

1.3. Функция артериальной системы.

Механизмы регуляции гемодинамических (физиологических) процессов. 14

Механизмы регуляции движения крови по артериям. 18

Отраженные волны давления и их влияние на кровоток. 23

1.4. Фазовая структура кровотока. Гемодинамические механизмы регуляции, связь с функцией и диагностическое значение. 28

Фазовая структура коронарного кровотока. 29

Фазовая структура кровотока в периферических артериях. 36

Фазовая структура кровотока в почечных артериях. 40

Глава 2

Характеристика доплеровской кривой. 49

2.1. Качественная характеристика доплеровской кривой.

Типы кровотока. 50

2.2. Количественная характеристика доплеровской кривой. 59

2.3. Профили скорости кровотока. 64

Ламинарный тип кровотока в крупных магистральных артериях. 64

Ламинарный тип кровотока в мелких магистральных артериях. 65

Турбулентный (неламинарный) тип кровотока. 67

Критерии, характеризующие турбулентный поток. 67

Наличие или отсутствие спектрального окна. 68

Глава 3

Интерпретация спектра артериального кровотока. 69

3.1. Физиологические механизмы регуляции периферического кровообращения. 69

Фазовая структура артериального кровотока при вазоконстрикции в сосудах с низким сопротивлением. 72

Фазовая структура артериального кровотока при вазодилатации в сосудах с низким сопротивлением. 74

Фазовая структура артериального кровотока при вазодилатации в сосудах с высоким сопротивлением. 76

Фазовая структура артериального кровотока при нарушениях венозного оттока	77
3.2. Влияние отраженной волны артериального давления на контур кривой объемного кровотока.	82
Гармоника «давление — кровоток» как критерий нарушения периферического кровообращения.	85
3.3. Влияние работы сердца на форму доплеровской кривой.	89
3.4. Анализ доплеровской кривой артериального кровотока.	91
Ранняя систола.	92
Вершина, или пик кровотока.	95
Поздняя систола. Нисходящий сегмент кровотока.	97
Дикротическая инцизура.	99
Диастолический кровоток в сосудах с низким сопротивлением.	103
3.5. Типы доплеровской кривой артериального кровотока в сосудах с низким периферическим сопротивлением.	109
3.6. Мозаичная картина кровотоков в различных сегментах почки.	119
Локальные нарушения кровотока в почках.	120
3.7. Базальный кровоток и сосудистый тонус.	121
3.8. Реакция сосудистой системы паренхиматозных органов на повышение венозного давления и нарушение венозного оттока.	122
3.9. Индекс резистентности. Факторы, влияющие на величину индекса резистентности. Реверсивный диастолический кровоток.	123
Интерстициальное давление и индекс сопротивления.	126
Реверсивный диастолический кровоток.	131
Стил-синдром, или сброс крови в почке по укороченному пути.	135

Глава 4

Основные гемодинамические принципы в диагностике сосудистых поражений. Формы спектров артериального кровотока.	140
4.1. Турбулентный (неламинарный) тип кровотока.	140
4.2. Локальный стеноз.	142
Объемный кровоток и скорость кровотока в месте стеноза.	143
Доплеровский спектр артериального кровотока до и после стеноза.	144
Доплеровский спектр артериального кровотока в зависимости от степени стеноза.	149
Гемодинамические факторы в механизме развития стеноза и эмболии в системе внутренней сонной артерии.	151

<i>Спектр кровотока при стенозе почечной артерии.</i>	152
<i>Количественная оценка степени стенозов.</i>	156
4.3. Турбулентный тип кровотока вследствие извитости артерии.	158
<i>Извитость внутренней сонной артерии.</i>	158
<i>Извитость артерии трансплантированной почки.</i>	159
4.4. Артериовенозные фистулы.	160
4.5. Артериальные аневризмы.	161
4.6. Феномен обкрадывания.	162
 Приложение	
Основы доплерографии.	164
<i>Эффект Допплера, основные режимы излучения.</i>	166
<i>Доплеровские режимы исследования кровотока.</i>	168
<i>Доплеровский угол.</i>	174
<i>Оптимизация изображения в доплеровских режимах.</i>	174
<i>Артефакты при выполнении доплерографии.</i>	181
<i>Основные расчеты в доплерографии.</i>	183
<i>Основные положения доплерографии в вопросах и ответах.</i>	185
 Рекомендуемая литература.	 190

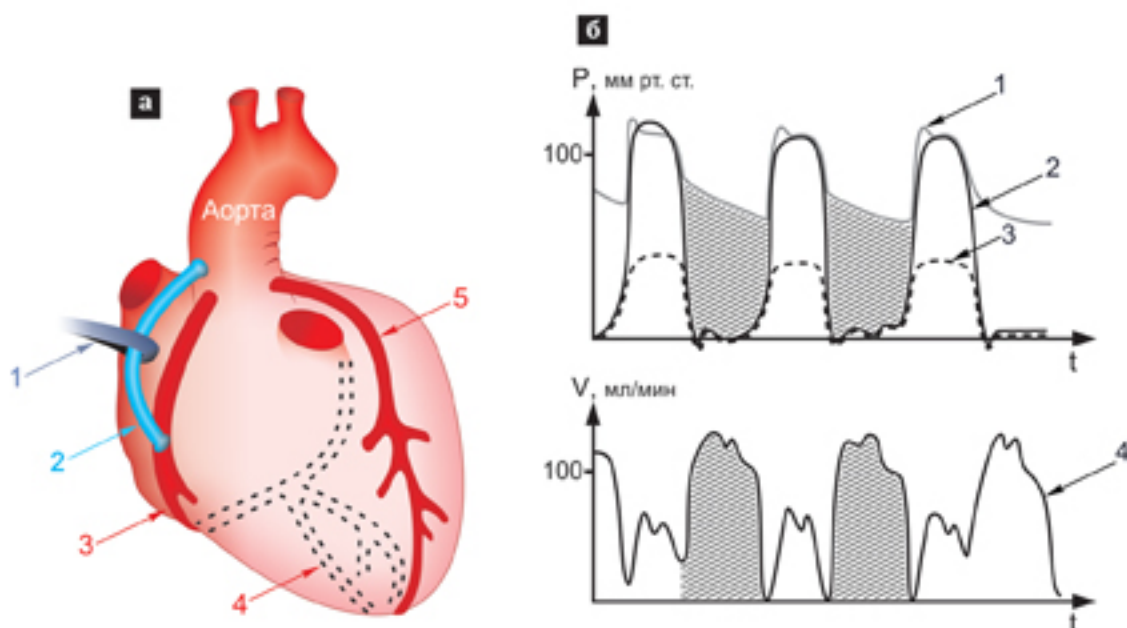


Рис. 14. Коронарный кровоток в аутовенозном шунте в бассейне правой коронарной артерии, питающей миокард левого желудочка:

а — схема аортокоронарного шунтирования в бассейн правой коронарной артерии, питающей миокард левого желудочка: **1** — датчик электромагнитного расходомера крови; **2** — аутовенозный шунт; **3** — правая коронарная артерия; **4** — задняя нисходящая артерия; **5** — левая коронарная артерия.

Аортокоронарный аутовенозный шунт в правую коронарную артерию. Пунктирными линиями показаны ветви левой коронарной артерии, которые питают миокард левого желудочка и заполняются кровью из бассейна правой коронарной артерии через заднюю нисходящую артерию.

б — диастолический тип кровотока (атипичный): **1** — давление в аорте; **2** — давление в левом желудочке; **3** — давление в правом желудочке; **4** — объемный кровоток в аортокоронарном шунте бассейна правой коронарной артерии. Заштрихованный сегмент кровотока — диастолический компонент кровотока в аортокоронарном шунте.

Диастолический компонент кровотока превалирует над систолическим (атипичный кровоток для правой коронарной артерии). Такой тип кровотока характерен для бассейна левой коронарной артерии. Левый желудочек кровоснабжается из бассейна правой коронарной артерии через заднюю нисходящую ветвь.

Обходное аортокоронарное шунтирование ликвидирует ишемическую задолженность миокарду. Нормализация фазовой структуры коронарного кровотока, т. е. преобладание диастолического пика кровотока над систолическим пиком, указывает на адекватную реваскуляризацию миокарда и восстановление сократимости левого желудочка.

В тех случаях, когда по аортокоронарному шунту регистрируется низкий объемный кровоток для оценки коронарного резерва, проводится проба с реактивной гиперемией. Увеличение объемного кровотока в ответ на пережатие аутовенозного шунта в течение 10 с указывает на хороший коронарный резерв (рис. 15).

При отрицательном результате в ответ на реактивную гиперемию необходимо исключить стеноз проксимального и дистального анастомоза, плохое дистальное коронарное русло (т. е. дополнительные стенозы, расположенные ниже дистального анастомоза) и рубец в зоне реваскуляризации миокарда.

Кроме того, анализ фазовой структуры кровотока позволяет оценить адекватность реваскуляризации миокарда, наметить пути устранения и прогнозировать дальнейшую функцию аортокоронарных шунтов (рис. 16).

Таким образом, фазовый анализ коронарного кровотока и ясное понимание гемодинамических факторов, оказывающих влияние на его формирование, позволяют с уверенностью оценить распределение кровотока, сократительную функцию реваскуляризованного миокарда и состояние коллатерального кровообращения.

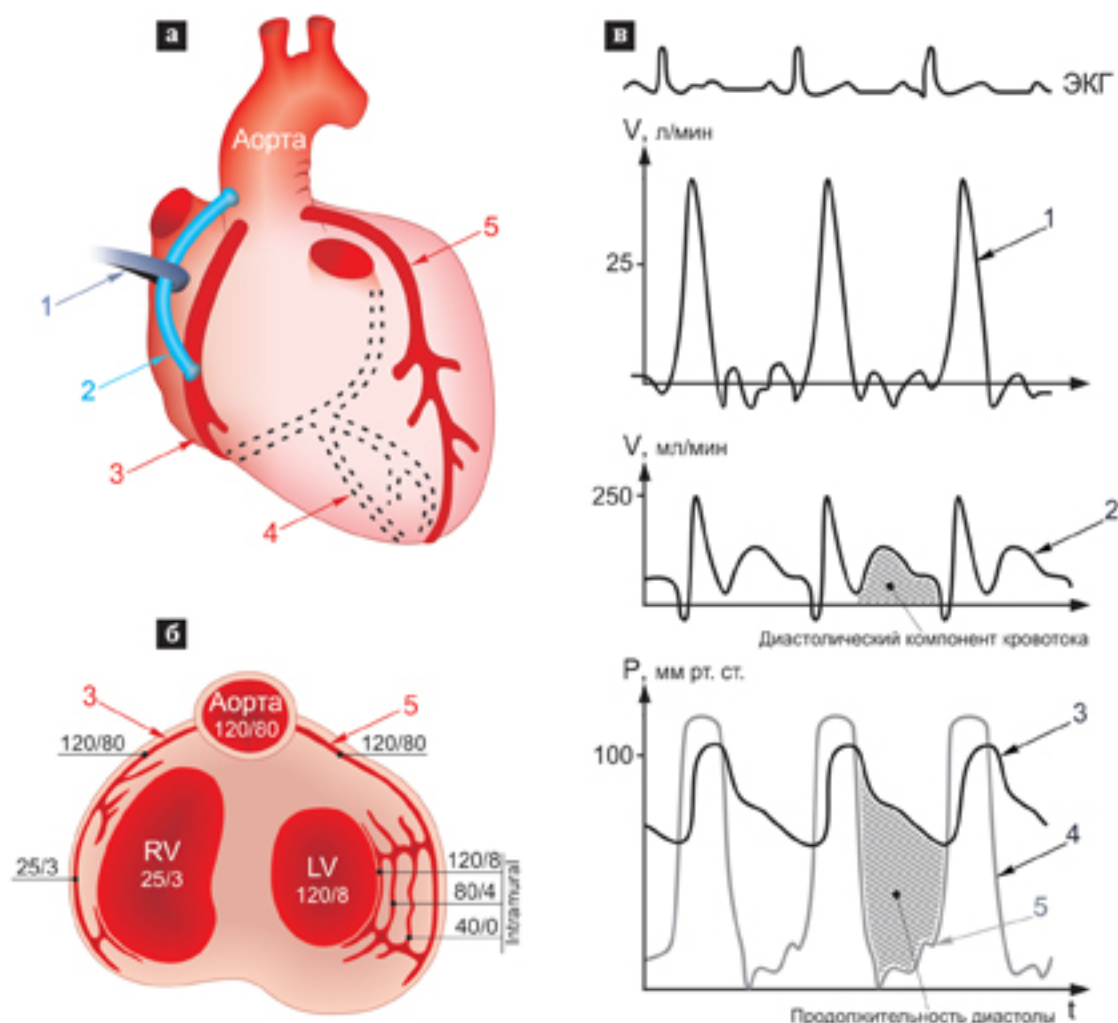


Рис. 17. Коронарный кровоток в аутовенозном шунте в бассейн правой коронарной артерии, питающей миокард левого желудочка:

а — схема аортокоронарного шунтирования в бассейн правой коронарной артерии, питающей миокард левого желудочка: 1 — датчик электромагнитного расходомера крови; 2 — аутовенозный шунт; 3 — правая коронарная артерия; 4 — задняя нисходящая артерия; 5 — левая коронарная артерия. Аортокоронарный аутовенозный шунт в правую коронарную артерию. Пунктирными линиями показаны ветви левой коронарной артерии, которые питают миокард левого желудочка и заполняются кровью из бассейна правой коронарной артерии через заднюю нисходящую артерию.

б — схема распределения давления по слоям миокарда в левом и правом желудочках сердца в фазы сокращения и расслабления. LV — давление в полости левого желудочка (120 мм рт. ст. — систолическое давление, 8 мм рт. ст. — конечное диастолическое давление). Давление в аорте во время сердечного сокращения: систолическое давление — 120 мм рт. ст.; диастолическое давление — 80 мм рт. ст.

Левая коронарная артерия: систолическое давление в субэпикардиальном сегменте левой коронарной артерии — 120 мм рт. ст.; диастолическое — 80 мм рт. ст. Давление в системе левой коронарной артерии по внутримиокардиальным слоям от эпикарда до эндокарда: в наружных внутримиокардиальных (Intramural) слоях — 40/0 мм рт. ст.; в средних внутримиокардиальных слоях — 80/4 мм рт. ст.; в субэндокардиальных слоях — 120/8 мм рт. ст. RV — давление в полости правого желудочка во время сердечного сокращения (25 мм рт. ст. — систолическое давление, 3 мм рт. ст. — конечное диастолическое давление в правом желудочке). Правая коронарная артерия: систолическое давление — 120 мм рт. ст.; диастолическое давление — 80 мм рт. ст.

в — изменение давления и кровотока на протяжении всей диастолы: ЭКГ — электрокардиограмма; 1 — объемный кровоток в аорте; 2 — объемный кровоток в аортокоронарном шунте бассейна правой коронарной артерии; 3 — давление в плечевой артерии; 4 — давление в левом желудочке; 5 — конечное диастолическое давление левого желудочка. Заштрихованный сегмент кровотока — диастолический компонент кровотока в аортокоронарном шунте. Давление в левом желудочке на протяжении всей диастолы изменяется от 0 до 8 мм рт. ст. Заштрихованный сегмент под кривой 2 — диастолический компонент кровотока в аортокоронарном шунте. Заштрихованный сегмент под кривой 3 — продолжительность диастолы.

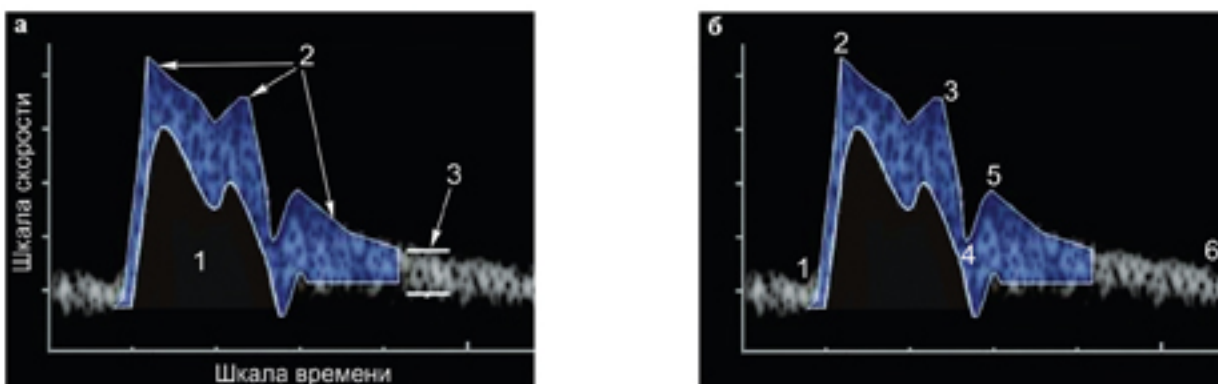


Рис. 30. Характеристики доплеровской кривой кровотока в артериях с низким периферическим сопротивлением [7]: а — характеристики спектра: 1 — спектральное окно; 2 — доплеровская кривая — огибающая спектра; 3 — спектральное расширение;

б — стандартно выделяемые точки при анализе доплеровской кривой (как и на кривой артериального давления): 1 — начало систолического выброса; 2 — максимальная, или пиковая, систолическая скорость; 3 — искажение нисходящего сегмента кровотока в позднюю систолу (эффект отраженной волны давления); 4 — дикротический зубец; 5 — дикротическая волна; 6 — конечная диастолическая скорость.

Комментарий к рисунку. Кровоток в артериях с низким периферическим сопротивлением — монофазный, пульсирующий, идентичный кривой артериального давления и располагается над базовой линией.

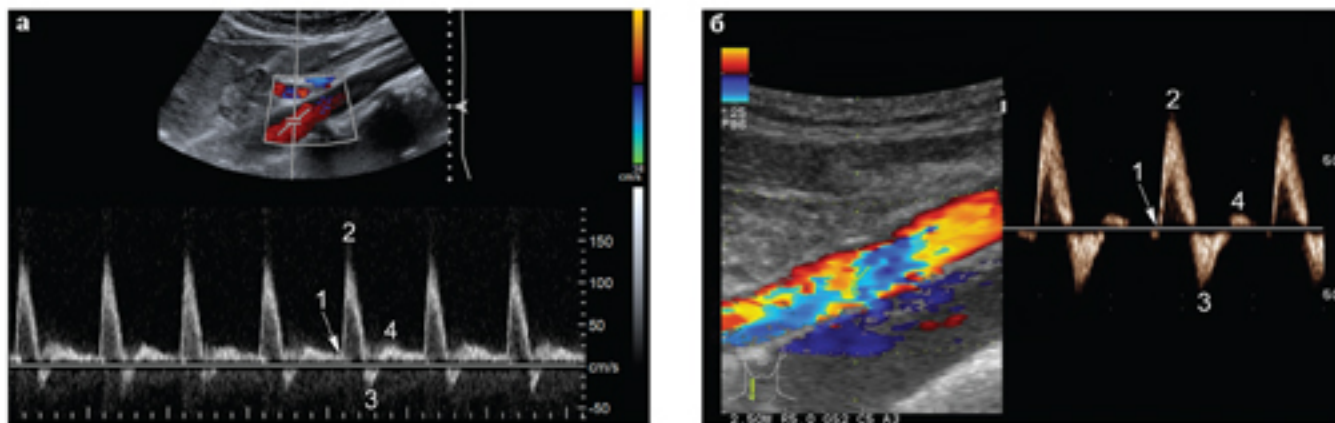


Рис. 31. Характеристики доплеровской кривой кровотока в артериях с высоким периферическим сопротивлением: а — спектр кровотока в брюшной аорте; б — спектр кровотока в общей бедренной артерии.

Обозначения: 1 — начало систолического выброса; 2 — максимальная систолическая скорость; 3 — ретроградную скорость; 4 — положительная диастолическая волна.

Комментарий к рисунку. Кровоток в артериях с высоким периферическим сопротивлением — разнонаправленный или трехфазный и характеризуется наличием: антеградного — положительного пика (2), ретроградного — отрицательного пика (3) и положительной диастолической волны (4).

Периферическое сопротивление играет важную роль в жизнедеятельности организма. Если бы не было сопротивления кровотоку, не было бы пульсирующего кровотока, не было бы ритмичного сокращения сердца и не было бы регуляции и перераспределения крови в организме человека в зависимости от физиологических потребностей. Сопротивление в артериях напрямую влияет на форму доплеровского спектра. Следовательно, форма спектра, соответствующая высокому сопротивлению, будет возникать при регистрации кровотока в сосудах с высоким сопротивлением, а формы, соответствующие низкому сопротивлению, возникнут в сосудах с низким периферическим сопротивлением. В артериях, которые захватывают большую зону кровоснабжения и являются началом для сосудов как с высоким, так и с низким сопротивлением, спектр может представлять собой последовательное наложение двух соответствующих спектров (рис. 32).

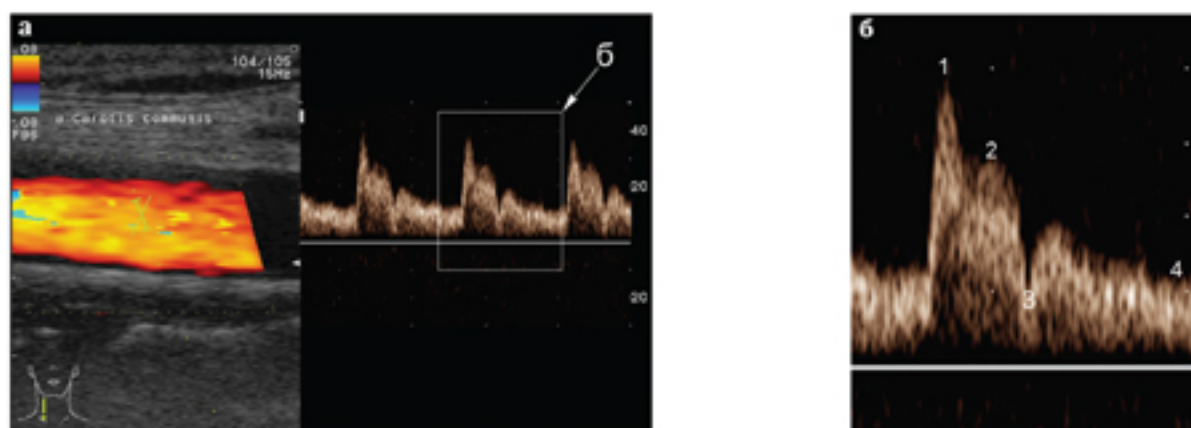


Рис. 32. Характеристики доплеровской кривой кровотока в артериях со смешанным периферическим сопротивлением (общая сонная артерия):

а — спектральная доплерография общей сонной артерии;

б — выделенный фрагмент рисунка (**а**) с увеличением: **1** — пиковая систолическая скорость кровотока (V_{ps}); **2** — искажения контура огибающей спектра; **3** — инцизура; **4** — конечная диастолическая скорость кровотока (V_{ed}).

Комментарий к рисунку. Доплеровский спектр в сосудах со смешанным сопротивлением характеризуется тем, что нижнее окаймление спектров кровотока приближается к базовой линии. Спектральное расширение имеет широкий разброс доплеровских частот, что указывает на присутствие бассейнов с низким и высоким периферическим сопротивлением.

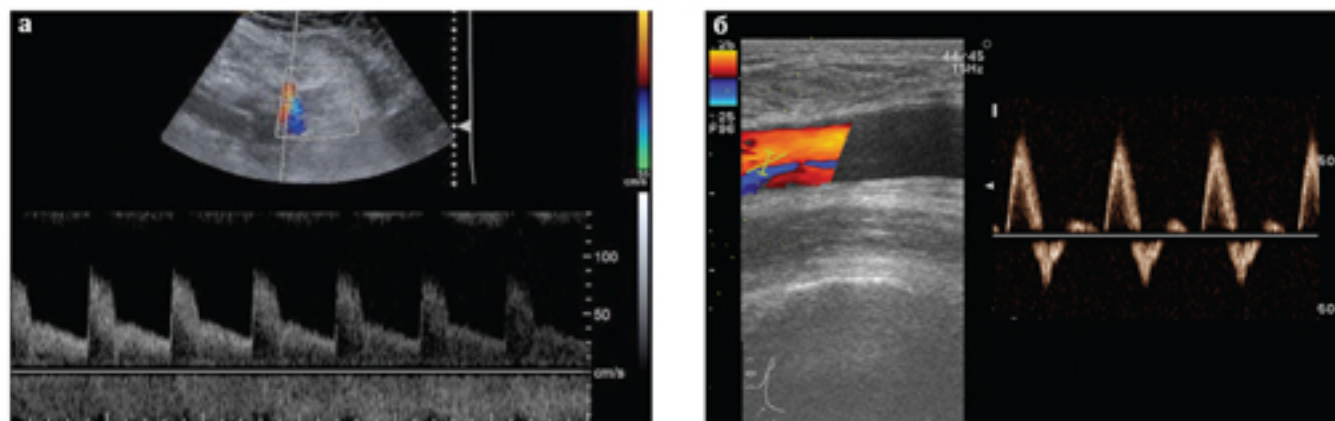


Рис. 33. Варианты доплеровских спектров кровотока в сосудах с различным сосудистым сопротивлением:

а — спектр кровотока в сосуде с низким периферическим сопротивлением (в почечной артерии);

б — спектр кровотока в сосуде с высоким периферическим сопротивлением (в общей бедренной артерии).

Хорошим примером для такого типа кровотока является общая сонная артерия, которая делится на внутреннюю сонную артерию — бассейн с низким сосудистым сопротивлением и наружную сонную артерию — бассейн с высоким сосудистым сопротивлением. Сосудистое сопротивление может изменяться в ответ на большое число различных физиологических и патологических состояний. В одних случаях включаются физиологические механизмы регуляции, которые способствуют вазодилатации. В других — низкое сосудистое сопротивление обусловлено наличием патологических сосудов с отсутствием мышечного слоя (нарушение неосангиогенеза) и выраженной гиперваскуляризацией.

Приступая к исследованию кровотоков в магистральных или внутриорганных сосудах, необходимо четко представлять, к какому типу кровотоков относится данный сосуд: к кровотокам с высоким или низким периферическим сопротивлением (рис. 33).

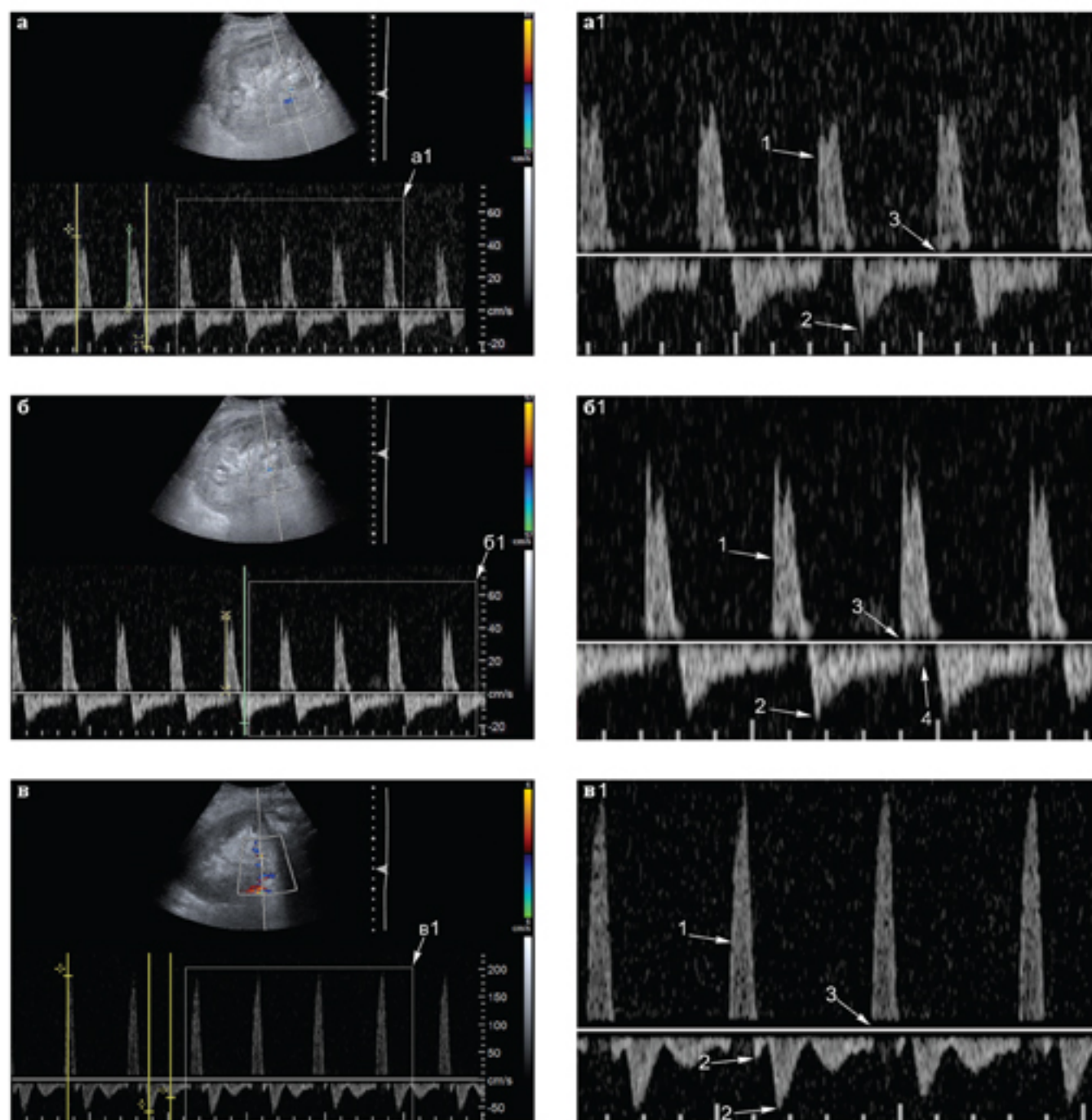


Рис. 107. Варианты ретроградного и реверсивного диастолического кровотока в почечной артерии в различные фазы сердечного цикла:

- вариант а: 1 — систолический кровоток, 2 — ретроградный пик, 3 — конец диастолы, начало систолы;
- вариант б: 1 — систолический кровоток, 2 — ретроградный пик, 3 — начало систолы, 4 — конец диастолы;
- вариант в: 1 — систолический кровоток; 2 — ретроградный пик; 3 — конец диастолы, начало систолы.

понент, затруднения оттока крови по венозному руслу на уровне мелких сосудов и частичного или полного тромбоза магистральной вены. Клинические ситуации, при которых могут проявиться эти условия, многообразны. Многообразие клинических сценариев, естественно, затрудняет интерпретацию спектров артериального кровотока и снижает диагностическую значимость и специфичность реверсивного диастолического кровотока в диагностике тромбоза почечной вены.

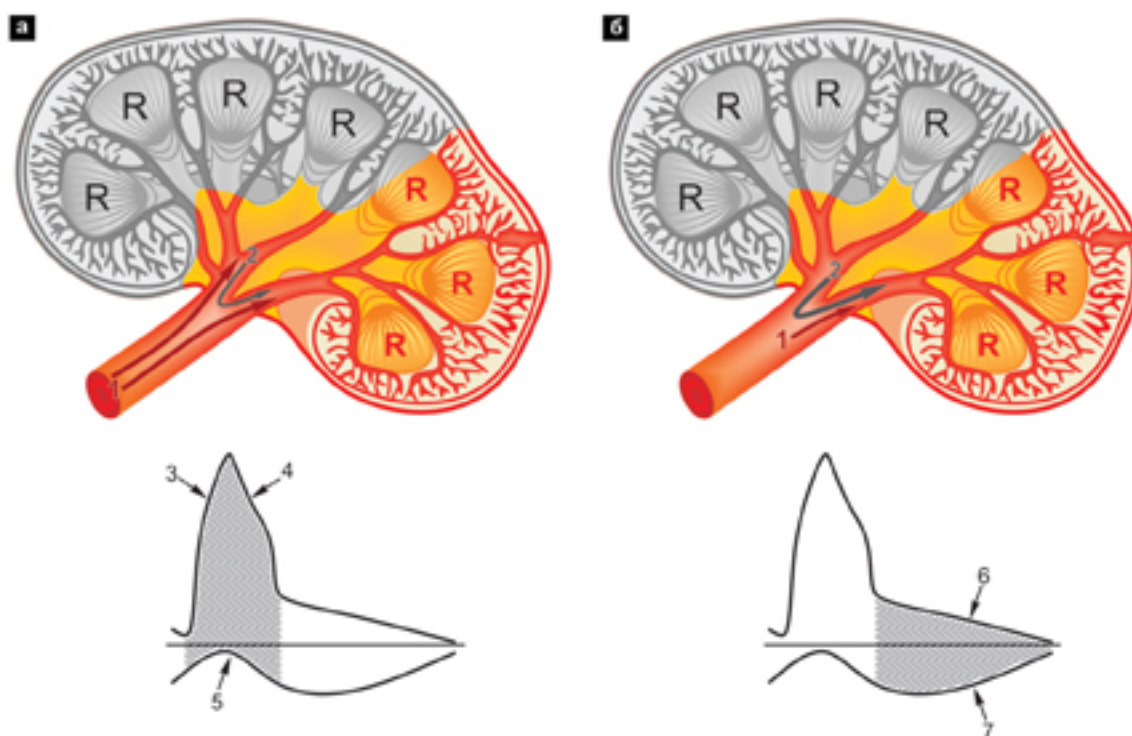


Рис. 108. Схема формирования реверсивного диастолического кровотока при затруднении венозного оттока при высоком интерстициальном давлении: **R** — высокое сосудистое сопротивление (сегмент почки с нарушением венозного оттока); **R** — низкое сосудистое сопротивление (сегмент почки в норме); 1 — направление кровотока в почечной артерии в систолу; 2 — направление кровотока из сегмента почки с высоким сопротивлением в сосуды с более низким сопротивлением; 3 — искажение ранней систолы, 4 — деформация нисходящего сегмента кровотока, 5 — начало формирования реверсивного диастолического кровотока; 6 — диастолический кровоток; 7 — реверсивный диастолический кровоток.

Механизм формирования ретроградного и реверсивного диастолического кровотока в почечной артерии проявляется в следующих гемодинамических принципах. Во время систолы кровь из аорты устремляется в магистральную почечную артерию, и, поскольку артерия во время систолы способна к растяжению, она принимает дополнительный объем крови. Регистрируется пикообразный, короткий по продолжительности антеградный кровоток. В силу того, что отток крови по венозному коллектору невозможен из-за тромбоза почечной вены и спазма сосудов на уровне артериол, возникают все условия, при которых дальнейшее продвижение крови невозможно. В месте препятствия формируется отраженная волна давления, за которой следует кровоток и направляется из почечной артерии обратно в аорту. За счет этого в фазу поздней систолы образуется остроконечный ретроградный кровоток. Во время диастолы стенка почечной артерии расслабляется, выдавливая кровь из почечной артерии обратно в аорту, вследствие чего реверсивный кровоток регистрируется на протяжении всей диастолы (рис. 106–107).

При параллельном расположении сосудов (как известно, в почках внутриорганный архитектоника имеет параллельное подключение сосудов), если один из дистальных отделов сосуда в силу различных причин закрыт, кровоток направляется в другую ветвь функционирующей артерии. Данная ситуация полностью противоположна той, при которой отток по венозному руслу полностью блокирован. В таком случае сохраняется частичный отток крови (рис. 108–109).

Кроме того, необходимо учитывать и анатомо-функциональную особенность строения внутриорганный кровообращения почки. При определенных условиях она способствует развитию синдрома обкрадывания коркового слоя почки со сбросом шунтируемой крови по укороченному юкстамедуллярному пути.

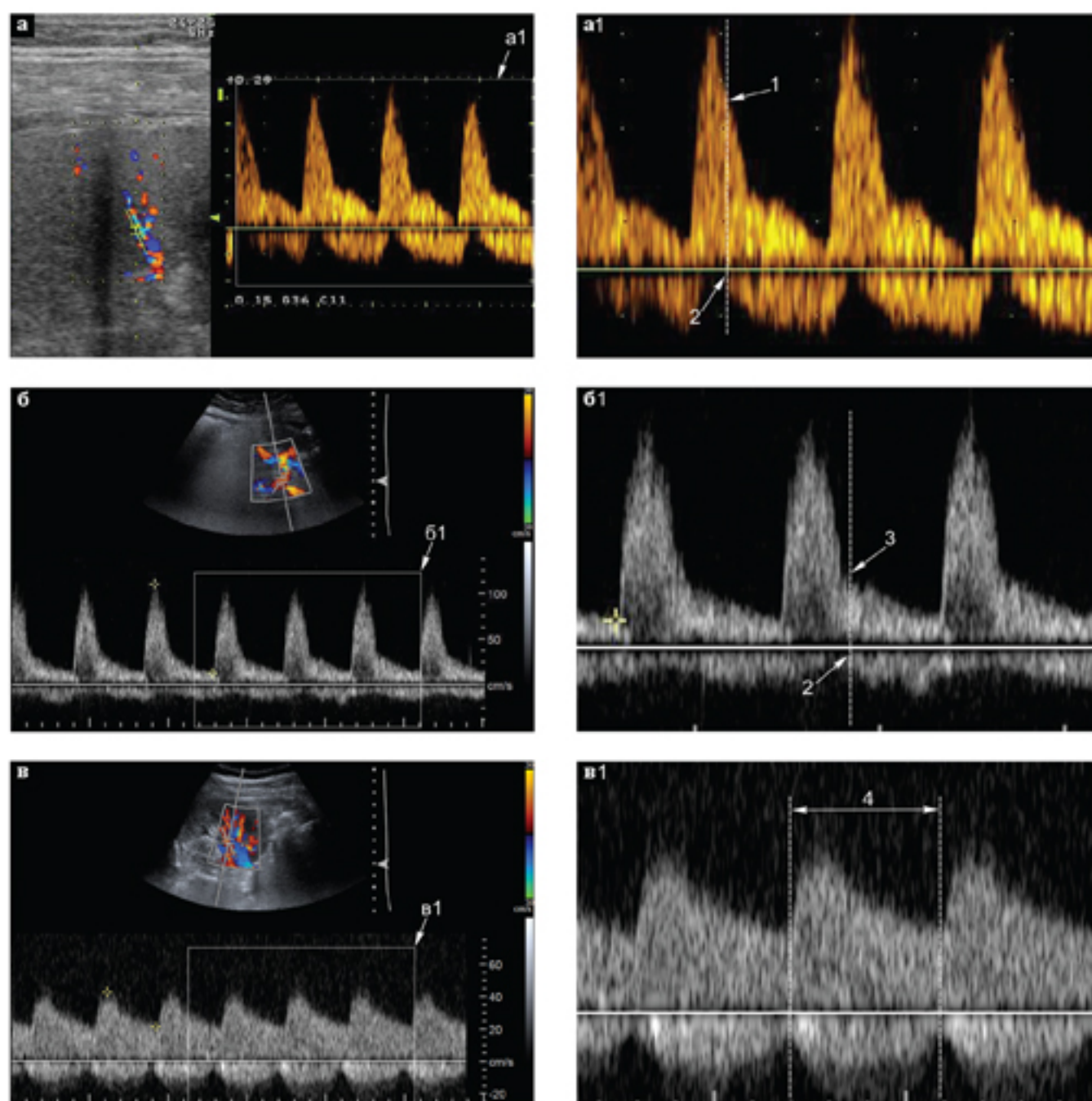


Рис. 109. Варианты реверсивного диастолического кровотока при затруднении венозного оттока при высоком интерстициальном давлении (1 — начало отраженной волны давления, 2 — начало реверсивного диастолического кровотока, 3 — инцизура; 4 — сердечный цикл):

- вариант а: начало формирования реверсивного диастолического кровотока с момента отраженной волны давления;
- вариант б: начало формирования реверсивного диастолического кровотока с момента инцизуры;
- вариант в: реверсивный диастолический кровоток на протяжении всего сердечного цикла.

Стил-синдром, или сброс крови в почке по укороченному пути

Существенное отличие почки от других органов — два круга кровообращения в ней: большой — кортикальный и малый — юкстамедуллярный. Возможность кровообращения в почке по юкстамедуллярному пути обеспечивается прежде всего особым строением и своеобразной функцией юкстамедуллярных клубочков и сосудов пограничного слоя. Эти клубочки, в отличие от корковых, имеют выносящие сосуды значительно большего диаметра, чем приносящие. Широкие выносящие сосуды