

Нормальная физиология сердечно-сосудистой системы Гемодинамика

И немного мониторинга



Морозов В. А.

Что такое ССС?

- ССС (или система кровообращения) - это трехмерная гидродинамическая система, заполнена неоднородной жидкостью, приводимая в действие сердцем и предназначенная для транспортной связи между органами и тканями.

Функции и задачи

- Основная функция ССС – транспорт кислорода и питательных веществ к тканям, а метаболитов (в том числе, углекислого газа) – в органы, их выводящие.
- В этом же состоит ее главная онтогенетическая задача, обуславливающая особенности строения и функции

Составляющие части

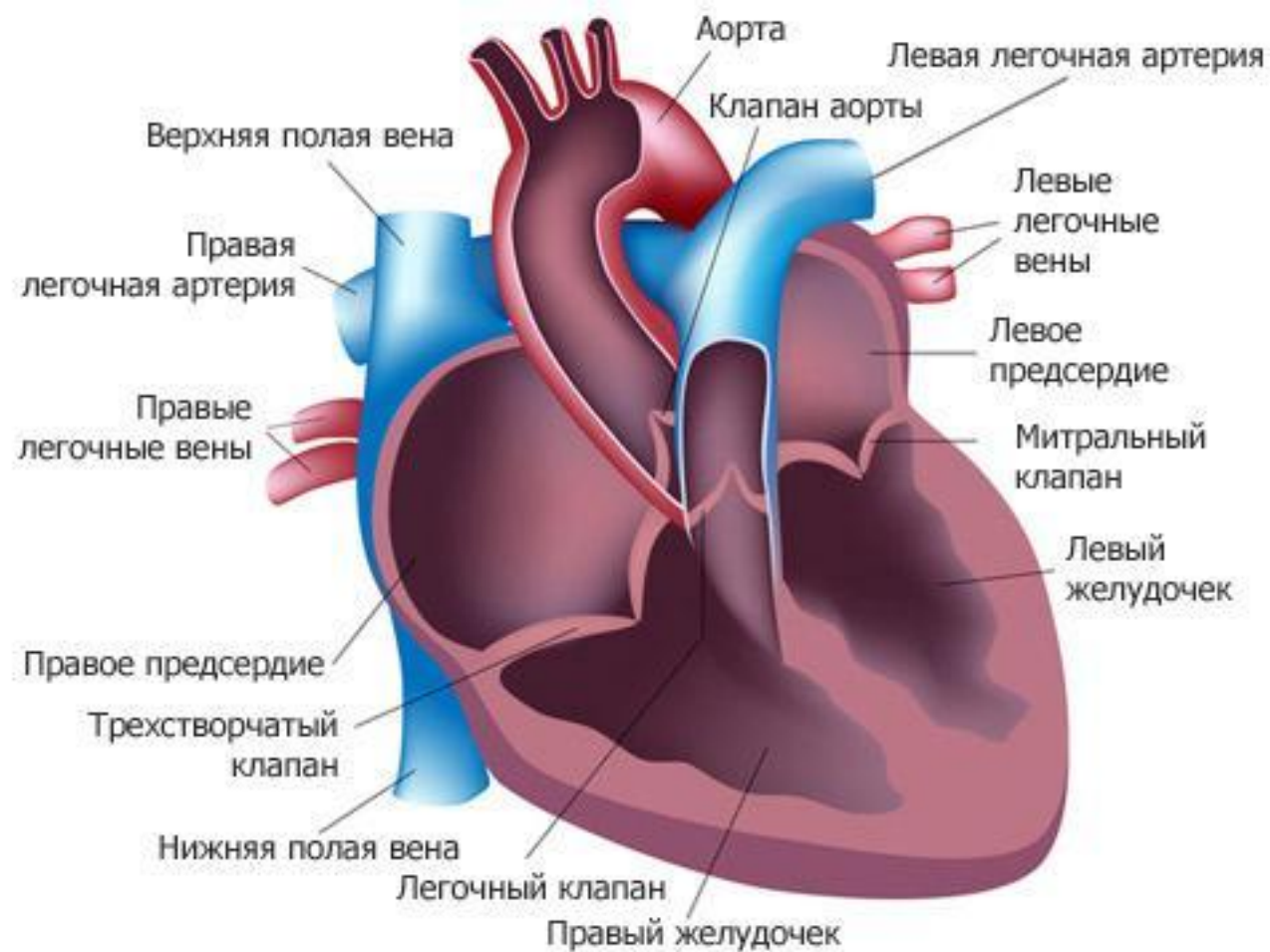
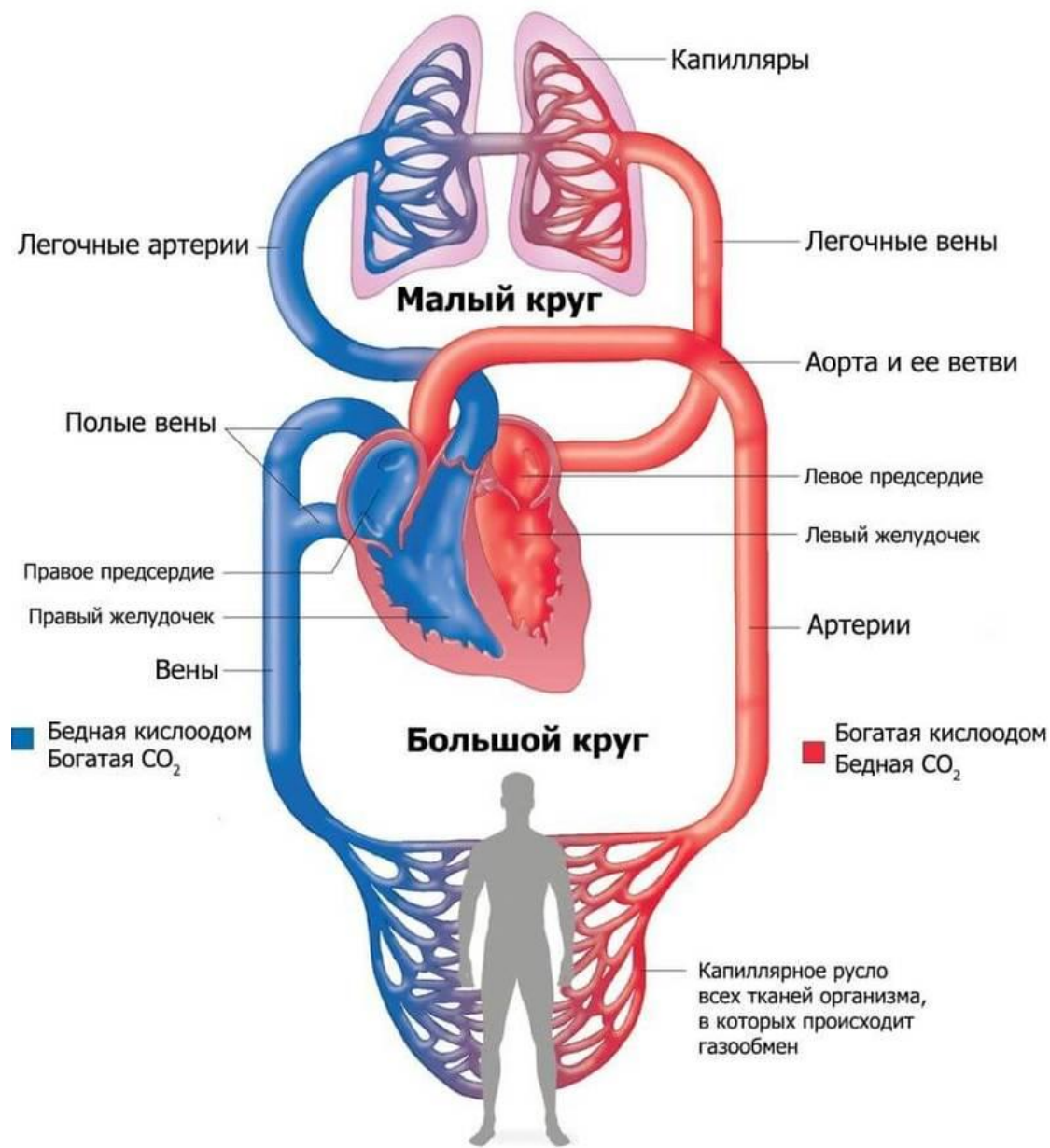
- ССС делится морфологически и функционально на две большие части – макроциркуляторное русло и

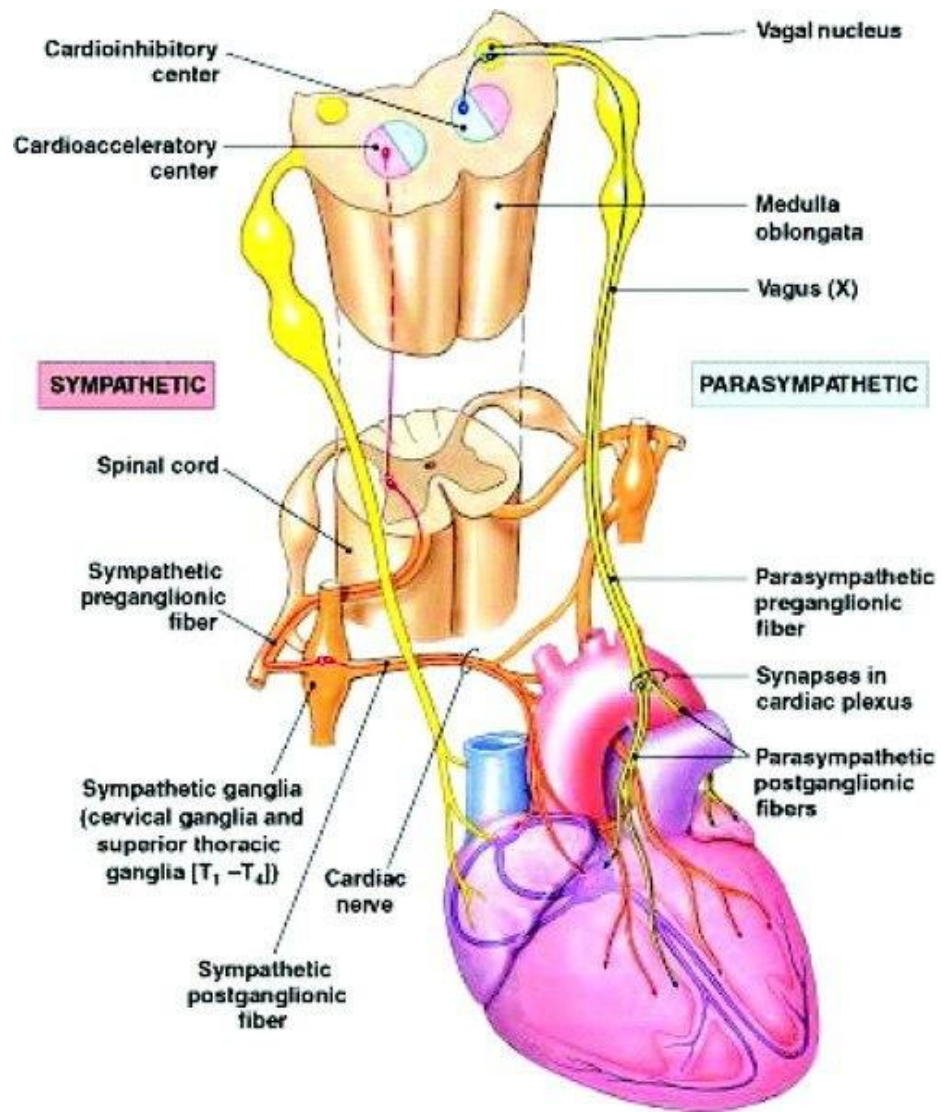
Макроциркуляторное русло

- Сердце (сердечный насос)
- Буферные сосуды (аорта, крупные артерии эластического типа)
- Депонирующие сосуды (вены)

Микроциркуляторное русло

- Сосуды сопротивления/распределения (артериолы и венулы)
- Сосуды обмена (капилляры)
- Сосуды-шунты (артериоловенулярные анастомозы)





Иннервация сердца

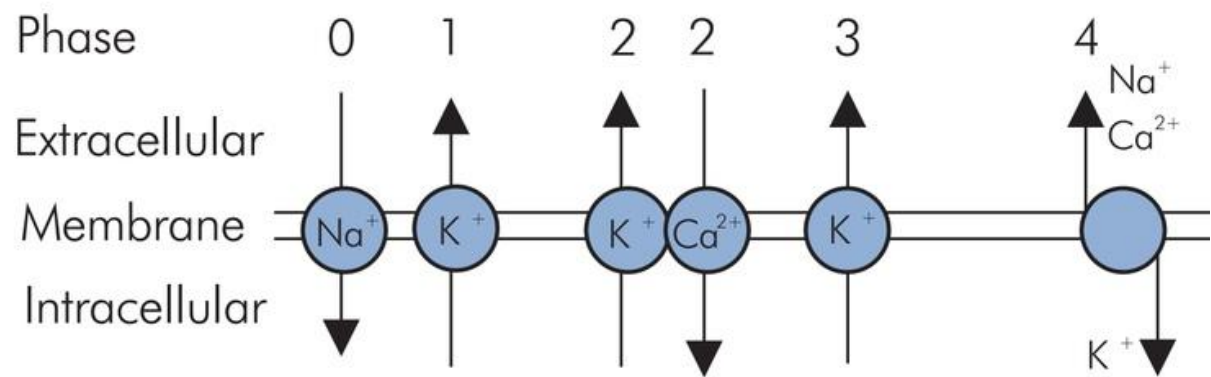
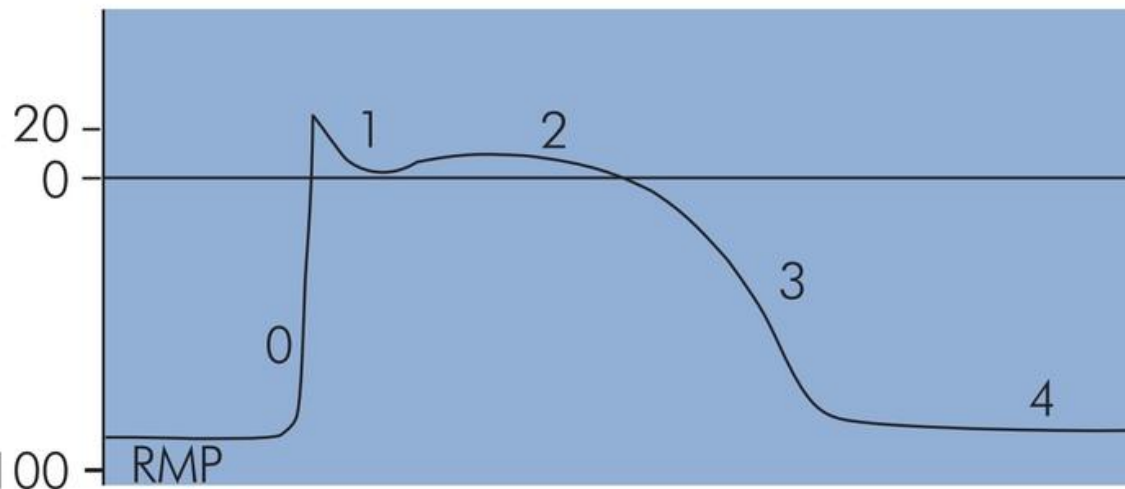
- Сердце иннервируется как симпатическим, так и парасимпатическим отделом ВНС
- Регуляция ЧСС нервной системой осуществляется преимущественно через **парасимпатические** волокна

Свойства сердечной мышцы

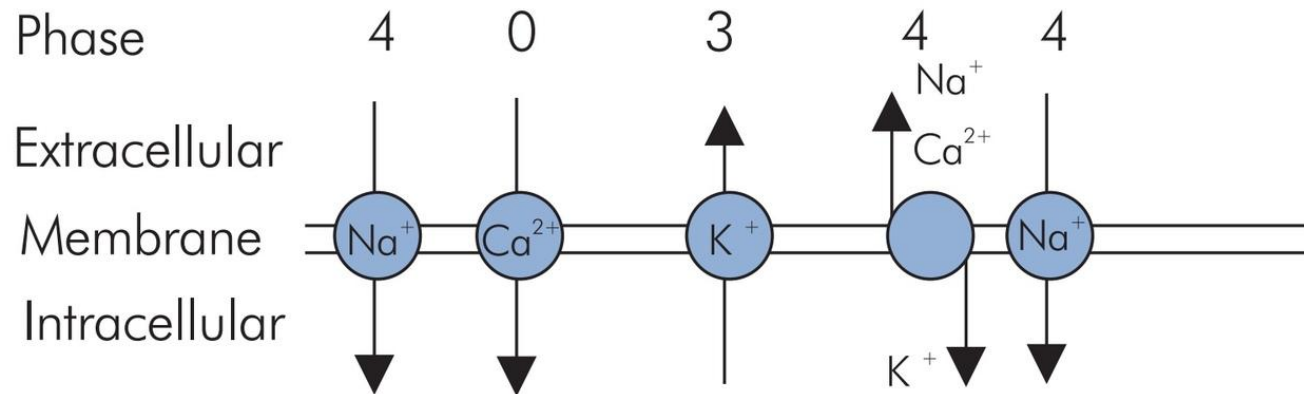
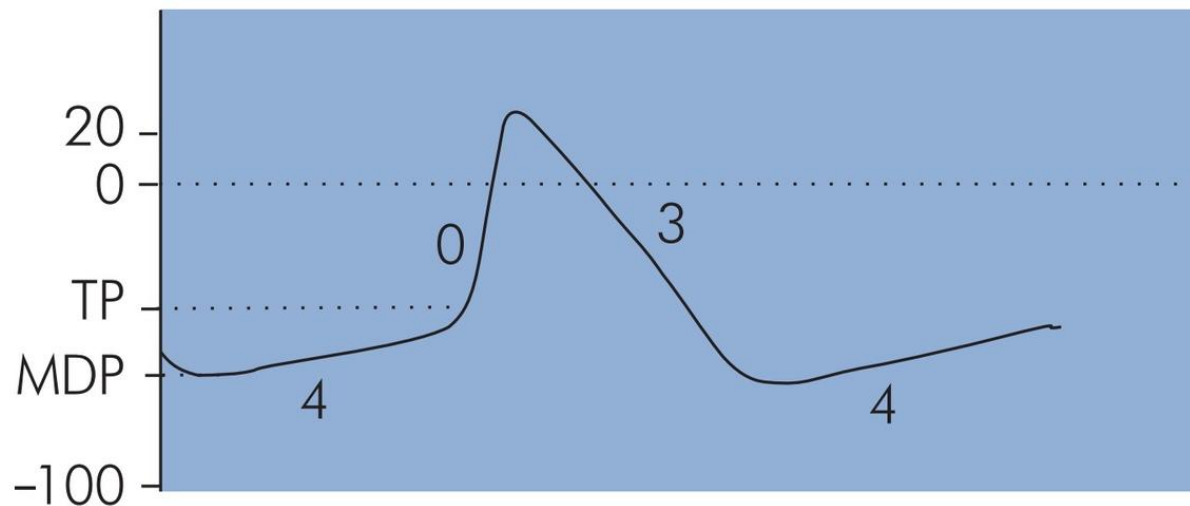
- **Возбудимость** - свойство отвечать на раздражение электрическим возбуждением в виде изменений мембранного потенциала (МП) с последующей генерацией ПД
- **Автоматизм** - способность пейсмейкерных клеток инициировать возбуждение спонтанно, без участия нейрогуморального контроля.
- **Проводимость** – это способность сердца к возбуждению, возникающему в специализированной проводящей системе сердца и распространяющемся посредством неё ко всем частям миокарда, что приводит к сокращению сердечной мышцы
- **Сократимость** - способность миокарда отвечать на возбуждение сокращением
- **Эластичность** – способность миокарда возвращаться в исходное состояние после изменения длины волокон.

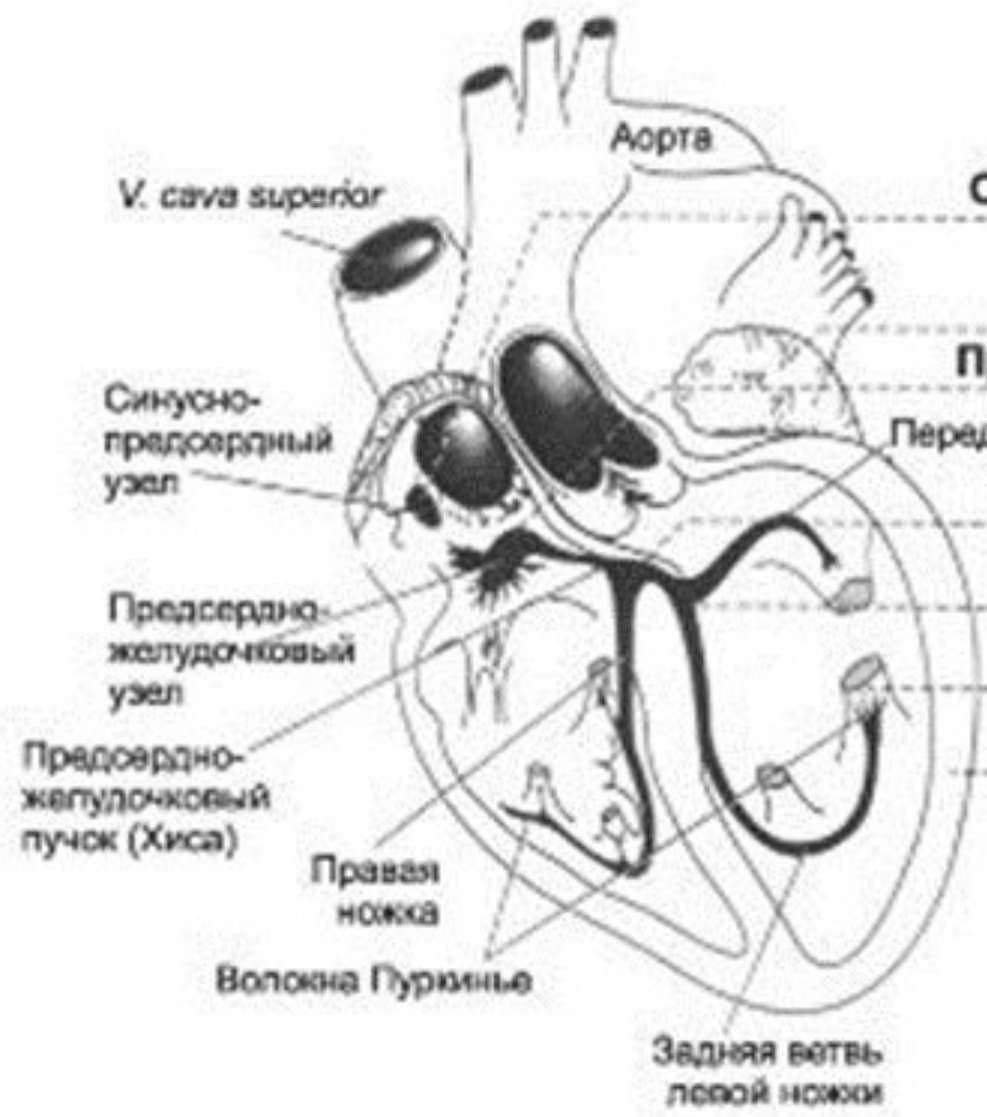
Основные ПД клеток миокарда

mV Рабочий

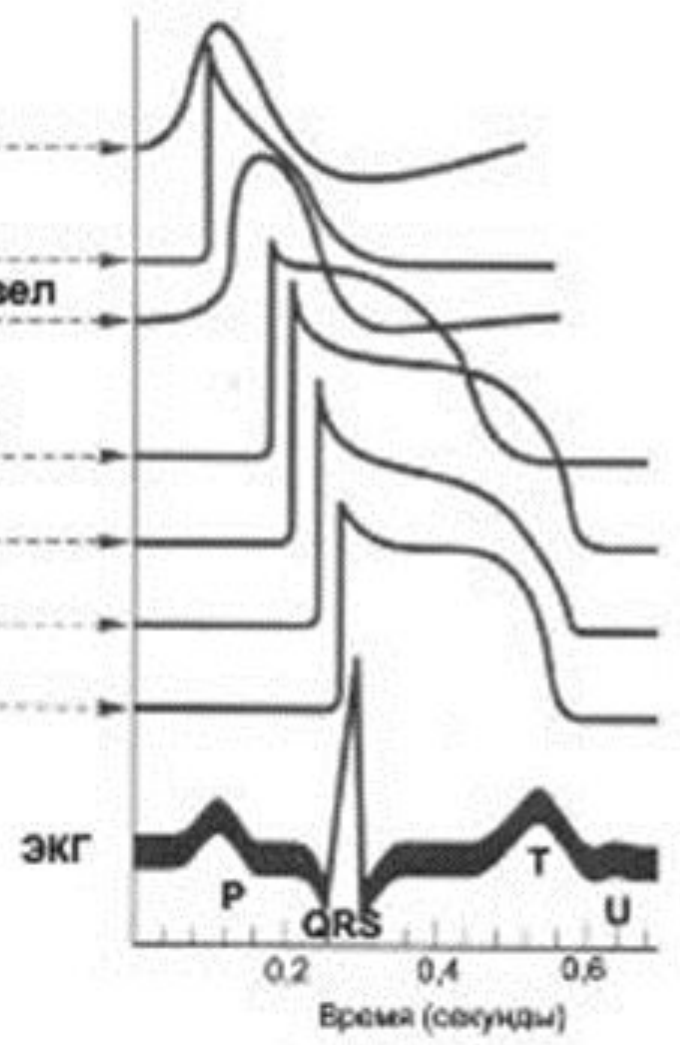


mV пейсмейкерный (СА)



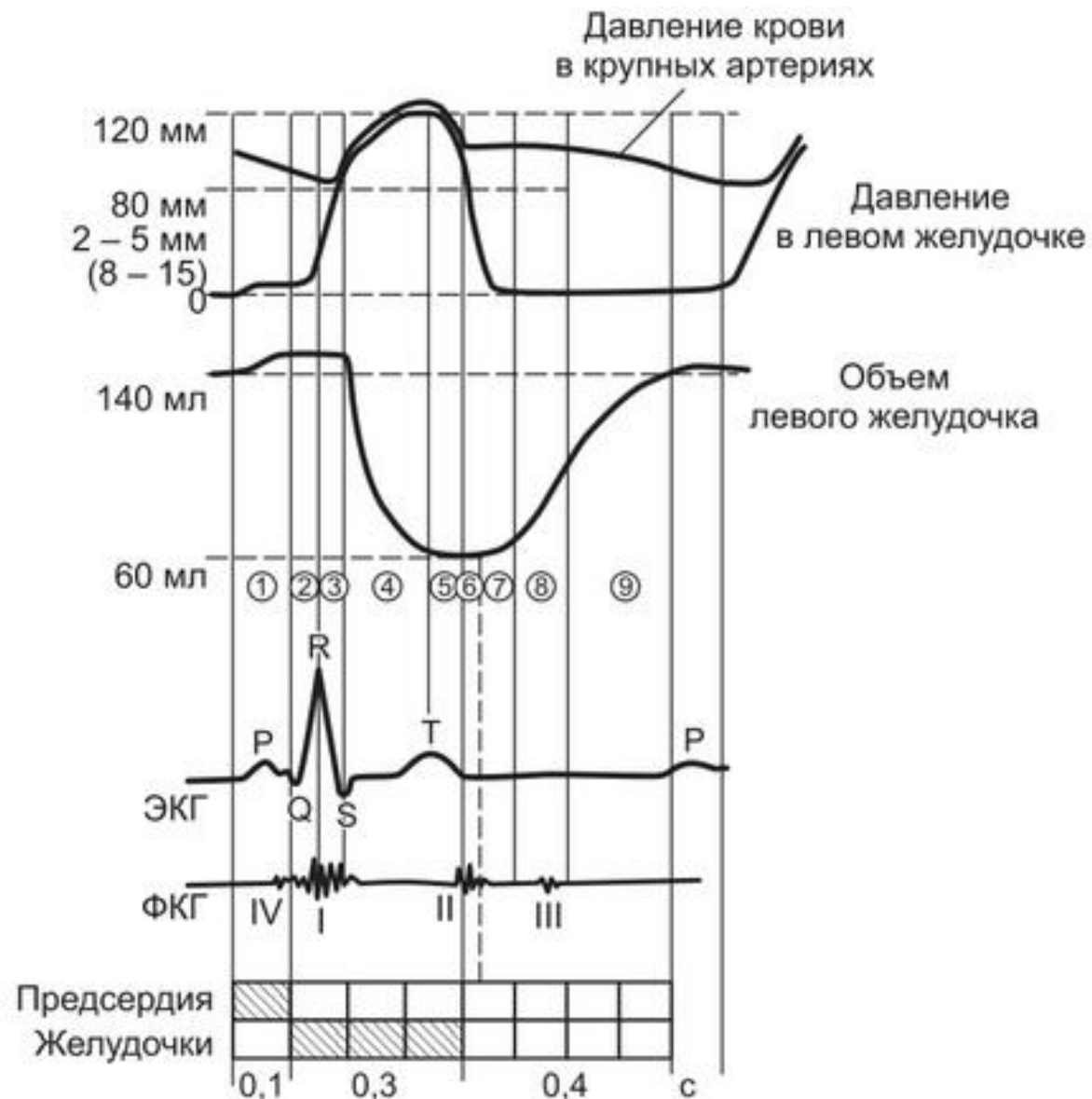


- Синусно-предсердный узел
- Миокард предсердий
- Предсердно-желудочковый узел
- Передняя ветвь левой ножки
- Предсердно-желудочковый пучок (Хиса)
- Ножки пучка (Хиса)
- Волокна Пуркинье
- Миокард желудочков



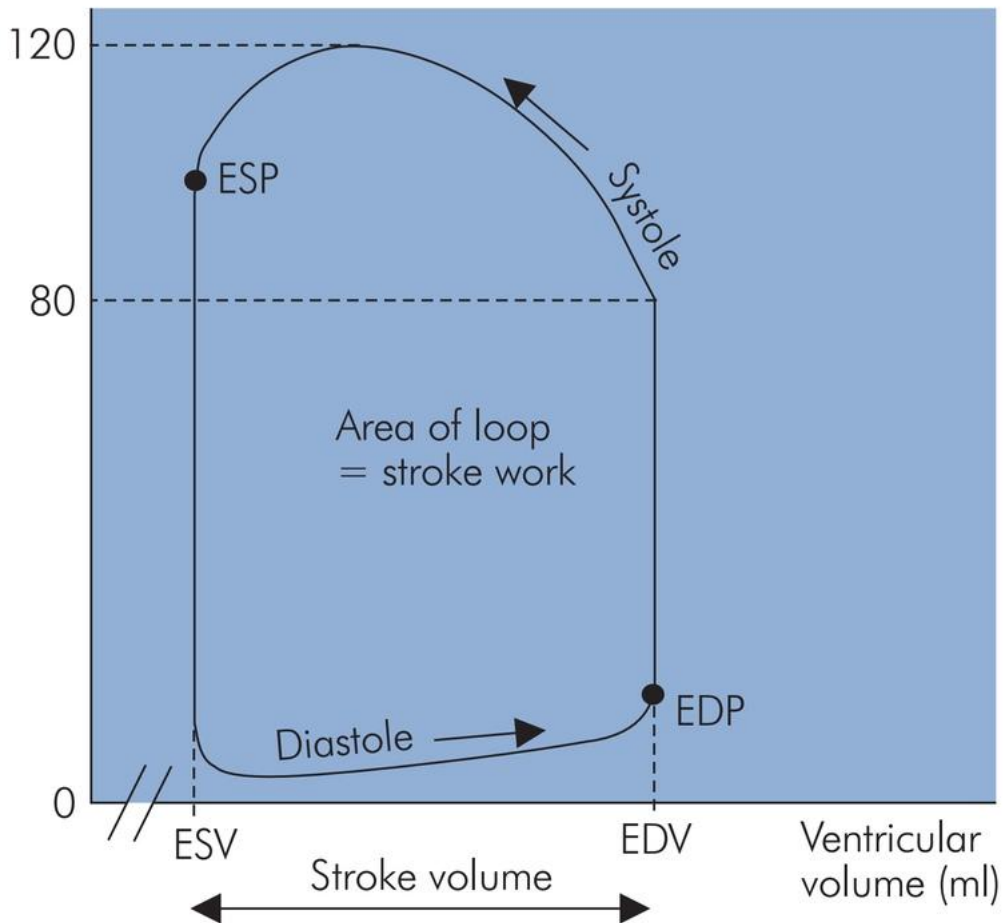
Сердечный цикл

Систола	Фаза	Длительность (с)	Суммарная длительность (с)
Систола	1. Пресистола	0,1	Период напряжения 0,08 с
	2. Фаза асинхронного сокращения	0,05	
	3. Фаза изометрического сокращения	0,03	Период изгнания 0,25 с
	4. Фаза быстрого изгнания	0,12	
	5. Фаза медленного изгнания	0,13	
Диастола	6. Протодиастолический интервал	0,04	Период расслабления 0,12 с
	7. Фаза изометрического расслабления	0,08	
	8. Фаза быстрого наполнения	0,08	Период наполнения 0,35 с
	9. Фаза медленного наполнения	0,17	
Диастола	1. Пресистола	0,1	



Гемодинамика сердца, ее показатели

Ventricular pressure (mmHg)



- Сердечный выброс (СВ, CO)
- Ударный объем (УО, SV)
- Фракция выброса (ФВ, EF)
- Сердечный индекс (индекс Гролльмана)
- Среднее артериальное давление (АДср, MAP)
- Частота сердечных сокращений (ЧСС, HR)
- Центральное венозное давление (ЦВД, CVP)

Figure 14.18 Pressure–volume loop for left ventricle

Сердечный выброс

- Сердечный выброс, СВ (Cardiac Output, CO) – это количество крови, выбрасываемой правым и левым желудочком в единицу времени (1 мин)
- Используется для оценки ~~сердечной деятельности~~ **сердечной деятельности** и **ЧСС (мин)**

$$СВ (мл/мин) = срАД (мм рт.ст.) / ОПСС (дин * с * см^5)$$

Методы измерения

- СВ
- Метод Фика
- Методы разведения индикатора
- Метод термодиллюции

Чтобы нивелировать влияние индивидуальных антропометрических различий на величину МОК, его выражают в виде **сердечного**

индекса

$$СИ (мл/мин * см^2) = СВ (мл/мин) / S (см^2)$$

В **норме** СВ = 5-6(7) л/мин (~10% от массы тела – мужчина, 70кг а СИ = 2,5-4 мл/мин*см²

Метод

Формула:

$$CB \text{ (л/мин)} = V (t_1 - t_2) \times 60 \times 1,08 / S$$

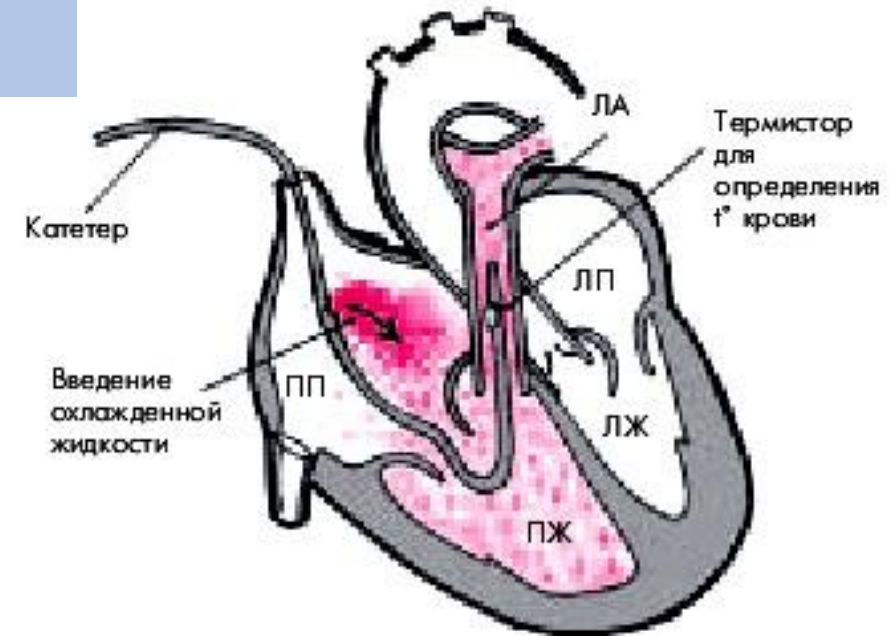
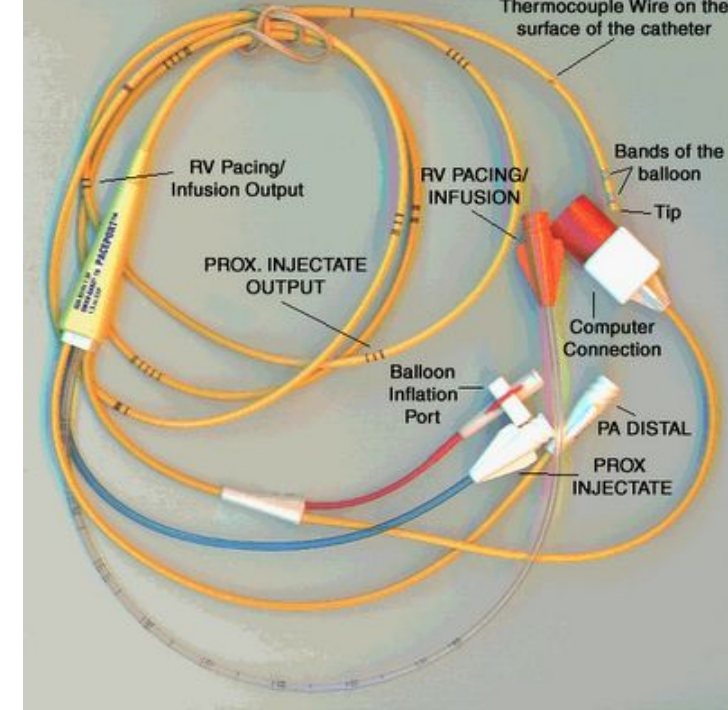
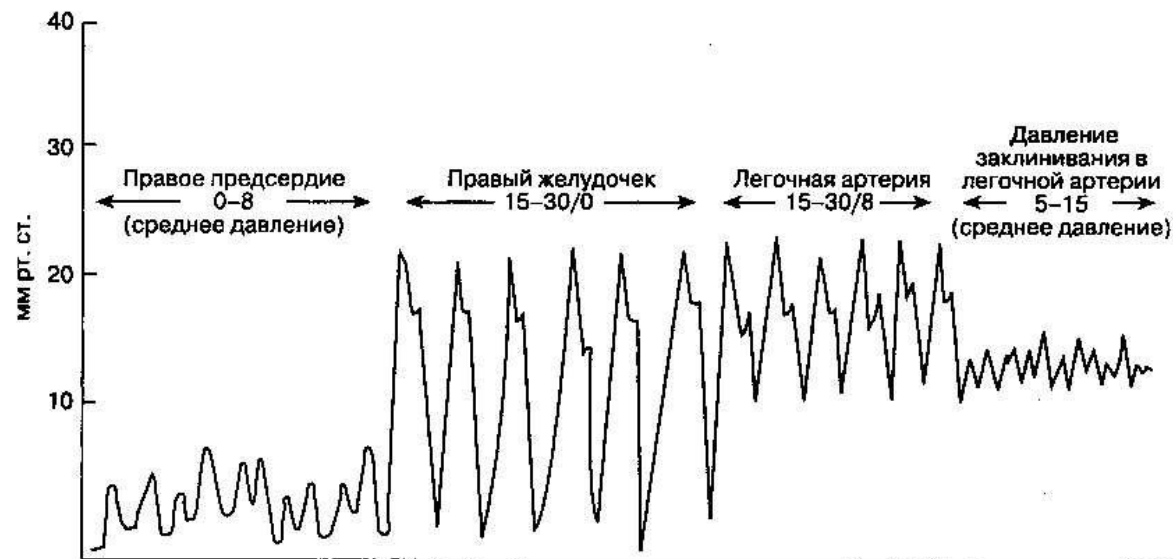
V — объем введенного индикатора

t1 — температура крови

t2 — температура индикатора

1,08 — коэффициент, учитывающий удельную плотность и теплоемкость крови и индикатора

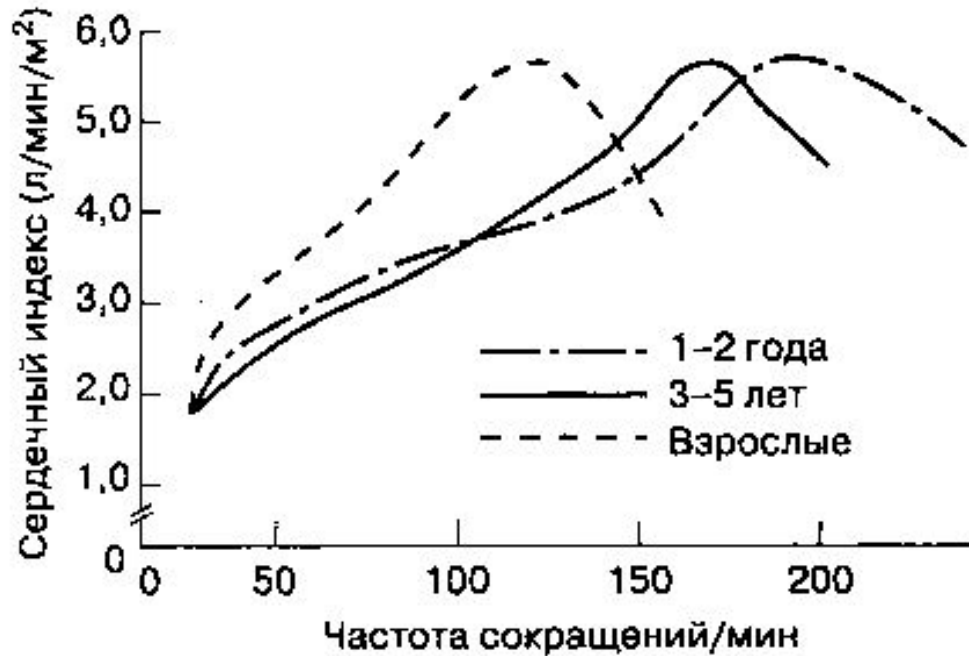
S — площадь под кривой разведения.



Данный метод (с помощью Swan-Ganz) позволяет измерить:

- ЦВД
- Сердечный выброс
- ДЗЛК (Косвенно отражает давление в ЛП)
- Давление легочной артерии

Частота сердечных сокращений



Сердечный выброс (сердечный индекс) прямо пропорционален ЧСС.

В норме ЧСС определяется **автоматизмом** синусового узла (его спонтанной диастолической деполяризацией), который модулируется вегетативными, гуморальными и местными факторами.

Усиление активности блуждающего нерва вызывает уменьшение ЧСС за счет стимуляции M_2 -холинорецепторов, а усиление симпатической активности приводит к увеличению ЧСС посредством стимуляции бета1-адренорецепторов.

Собственная частота синусового узла у молодого взрослого человека составляет 60-80 уд/мин

Связь сердечного выброса и ЧСС

- Повышение ЧСС постепенно увеличивает СВ, пока не дойдет до значения около 140 уд/мин; когда ЧСС увеличивается, сокращается время диастолы, что становится значительным при таком ЧСС
- После того, как ЧСС становится выше 150 уд/мин, УО левого желудочка ощутимо снижается, время диастолы гораздо более подвержено влиянию ЧСС, чем время систолы
- Хроноинотропный эффект (феномен Боудича) – повышение ЧСС вызывает повышение силы сокращения (повышение ЧСС увеличивает доступность внутриклеточного кальция, так как уменьшает время на его обратный захват в диастолу).
- В норме при тахикардии уменьшится КДО и КДД соответственно, а при ИБС – уменьшенный КДО и увеличенное КДД
- Тахикардия также увеличит эластичность желудочка в систолу из-за увеличения контрактильности
- Выраженная брадикардия (<40 уд/мин) также вызовет падение СВ, так повышение

Ударный объем - объём крови, выбрасываемый сердцем за одно сокращение



$$УО (л) = СВ (л/мин) / ЧСС (мин)$$

$$УО (л) = КДО (л) - КСО (л)$$

В норме УО ~ 70 мл

Ударный объем определяется

- Преднагрузкой
- Постнагрузкой
- Контракtilьностью

Преднагрузка

- Физиологическое определение – степень растяжения мышечных волокон перед систолой
- Физиологическая мера – Конечный диастолический объем (КДО)
- На практике – давление наполнение желудочков
- Мера – давление в легочной артерии (ДЛА), ДЗЛК

Согласно закону Франка-Старлинга, сила сокращения желудочков сердца, измеренная любым способом, является функцией длины мышечных волокон перед сокращением

То есть, чем сильнее желудочки растянутся в диастолу, тем сильнее

Преднагрузка зависит от:

- Объема циркулирующей крови (ОЦК)
- Положения тела
- Внутригрудного и внутрибрюшного давления
- Тонуса вен и податливости
- Функции мышечной помпы
- Синхронного сокращения предсердий и заполнения желудочков
- Податливость желудочков в конце диастолы (насколько они могут расширяться)

Измерить КДО напрямую на практике трудно, поэтому используются косвенные

параметры

Правое сердце:

- ЦВД (5-12 мм.рт.ст/нормы нет)

Левое сердце:

- ДЗЛК (6-12 мм.рт.ст)
- ДЛА (в диастолу 7-9)

Постнагрузка

- Физиологическое определение – степень нагрузки на стенку желудочка в систолу
- Физиологическая мера – напряжение стенки желудочка
- На практике – давление внутри желудочка в систолу
- Мера – ОППС и АДср, среднее давление в ЛА и ЛСС (SVR, MAP&PVR, MPAP)

Постнагрузка зависит от:

- ОПСС (или сопротивление в ЛА)
- Факторов, усиливающих или ослабляющих силу сокращения миокарда
- Внутригрудное давление и давление в перикарде
- Преднагрузки
- Толщины стенки ЛЖ

Как измеряем?

- АД (Среднее, систолическое, диастолическое) ($АД_{ср} = АД_{д} + (АД_{с} - АД_{д})/3$)

$$ОПСС \text{ (дин} * \text{с} * \text{см}^{-5}) = 80 \times (\text{срАД (мм рт. ст.)} - \text{ЦВД (мм рт. ст.)}) / \text{СВ (л/мин)}$$

80 – константа для перевода в метрическую систему

В **норме** ОПСС варьируется от 900 до 1500 дин * с * см⁻⁵

$$ЛСС = 80 \times (\text{срДЛА (мм рт. ст.)} - \text{ДЗЛК (мм рт. ст.)}) / \text{СВ (л/мин)}$$

срДЛА — среднее давление в легочной артерии
ДЗЛК — давление заклинивания легочных капилляров

В **норме** ЛСС варьируется от 50 до 150 дин* с *см⁻⁵

Контрактильность

- Физиологическое определение – работа миокарда в систолу без изменений пред- и постнагрузки
- Физиологическая мера – индекс сокращения ЛЖ
- На практике – фракция выброса с заданной пред- и постнагрузкой
- Мера – ***фракция выброса***

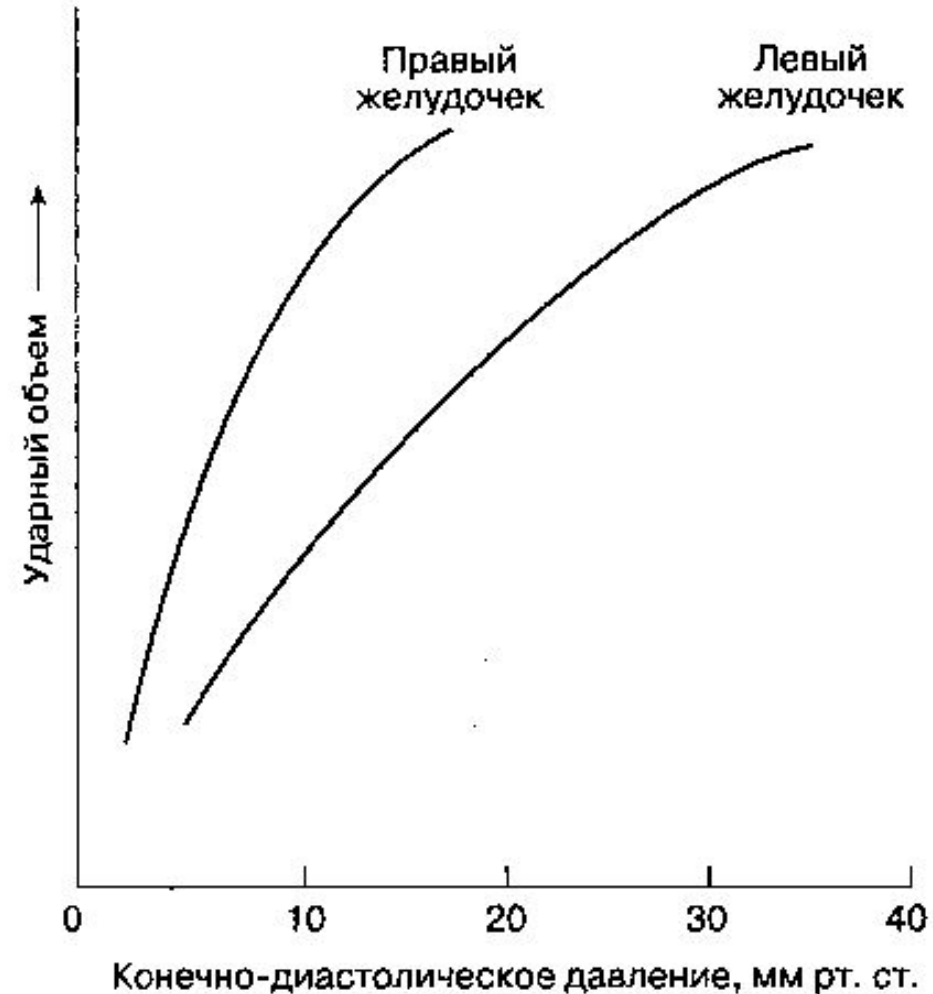
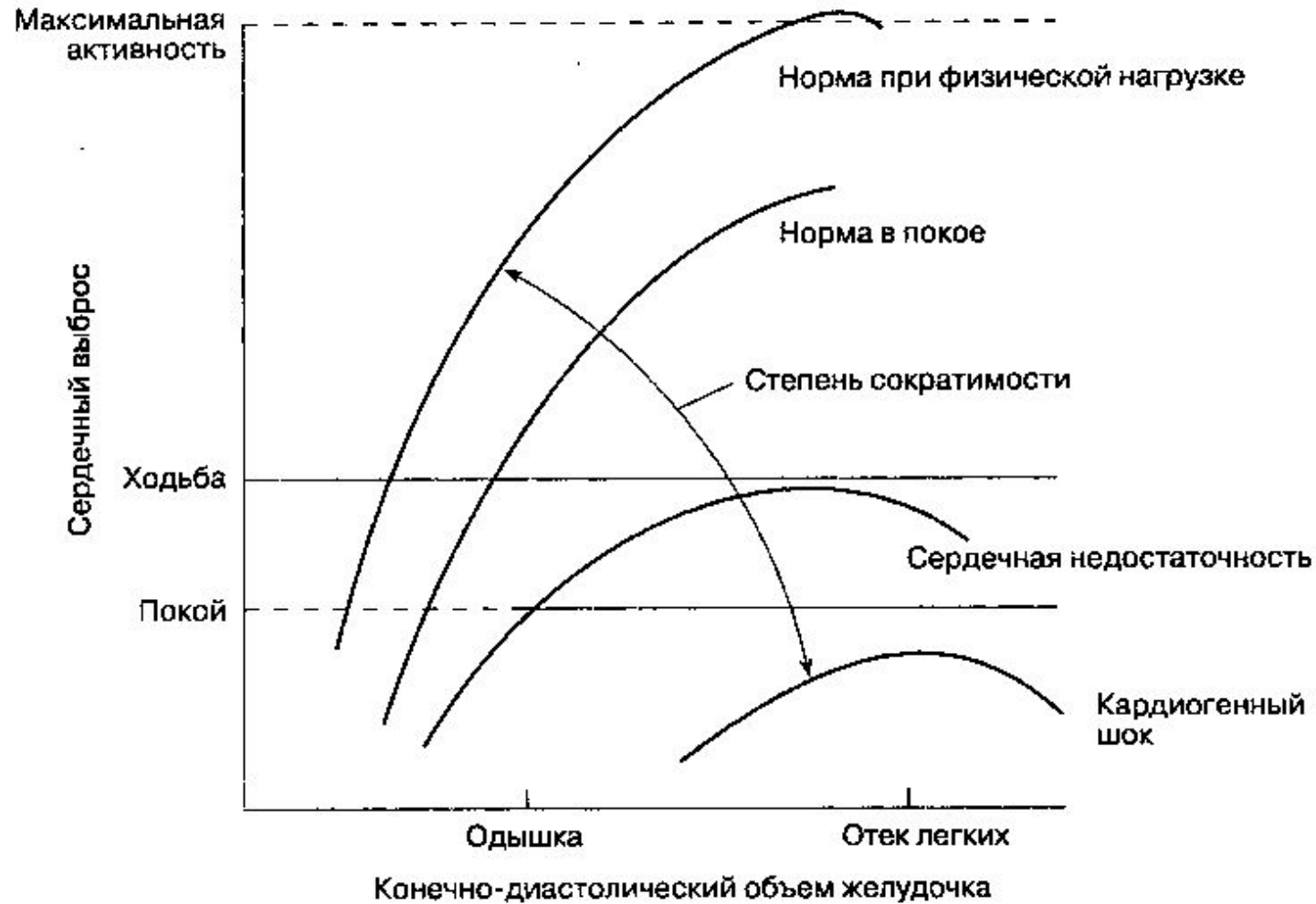
Контрактильность меняется при:

В сторону повышения:

- Повышении уровня кальция в крови (сила сокращения напрямую зависит от концентрации кальция)
- Симпатической стимуляции
- Ингибировании парасимпатки
- Применении препаратов с положительным инотропным эффектом
- Использовании сердечных гликозидов (дигоксин) (с осторожностью)

В сторону понижения:

- Снижении уровня кальция в крови
- Парасимпатической стимуляции
- Симпатической блокаде (бета-блокада, местная анестезия)
- Ишемии миокарда/инфаркте миокарда
- Гипоксии и ацидозе
- Разобщении сокращений предсердий и желудочков



$$\text{ФВ (\%)} = \text{УО (л)} / \text{КДО (л)} * 100\%$$

$$\text{ФВ (\%)} = (\text{КДО (л)} - \text{КСО (л)}) / \text{КДО (л)} * 100\%$$

В норме составляет 55-60%

Мониторинг показателей гемодинамики

Неинвазивный мониторинг:

- Стандартный: пульсоксиметрия, сфигмоманометрия, ЭКГ
- Фотоплетизмография
- Тонометрия
- Электрический биоимпеданс
- Чресторакальная ЭхоКГ

Минимально инвазивный мониторинг

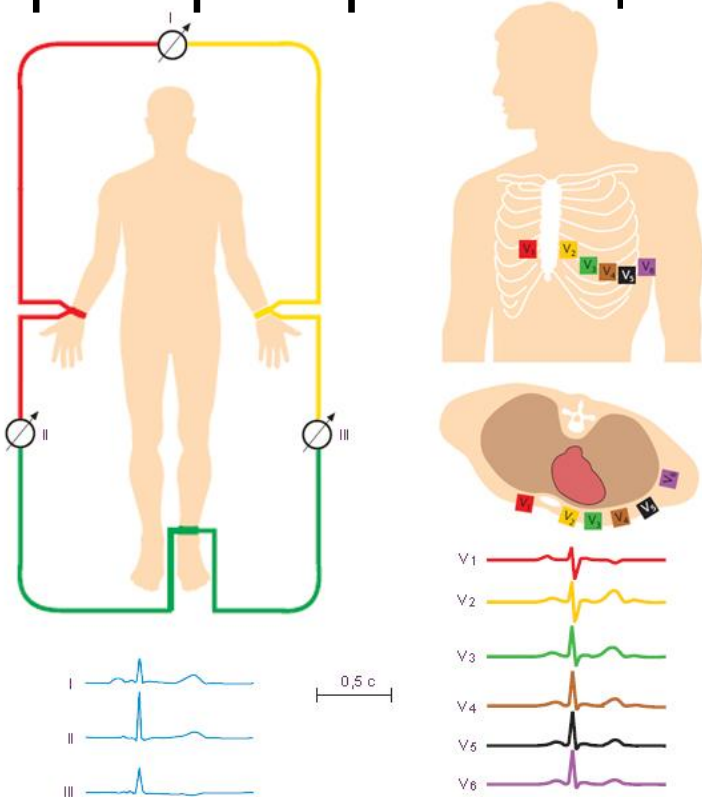
- Частичное реверсивное вдыхание CO₂
- Контурный анализ пульса
- Чреспещеводная ЭхоКГ
- Чреспещеводная УЗ-Допплерография

Инвазивный мониторинг

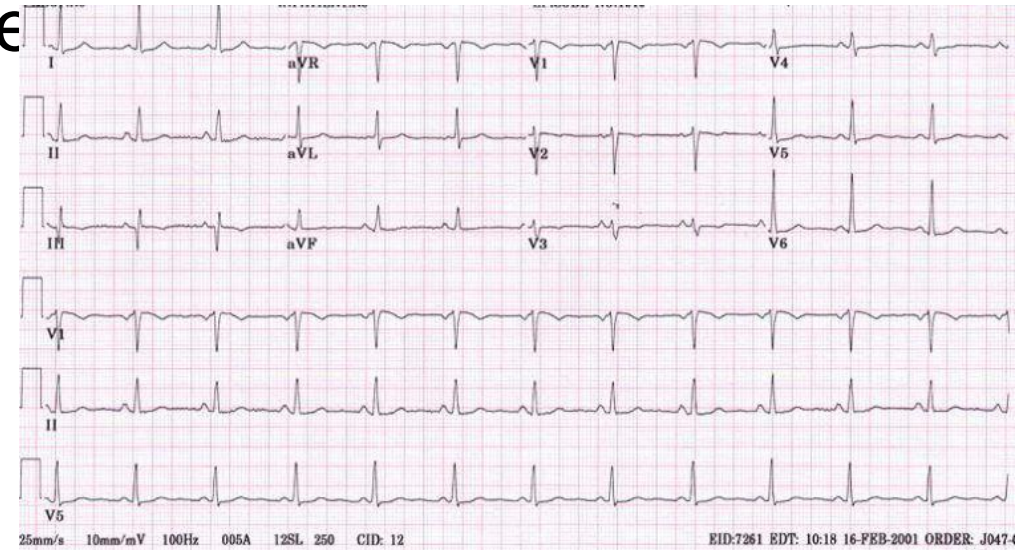
- Анализ ЦВД
- Катетеризация легочной артерии и разведение индикаторов

Немного об ЭКГ

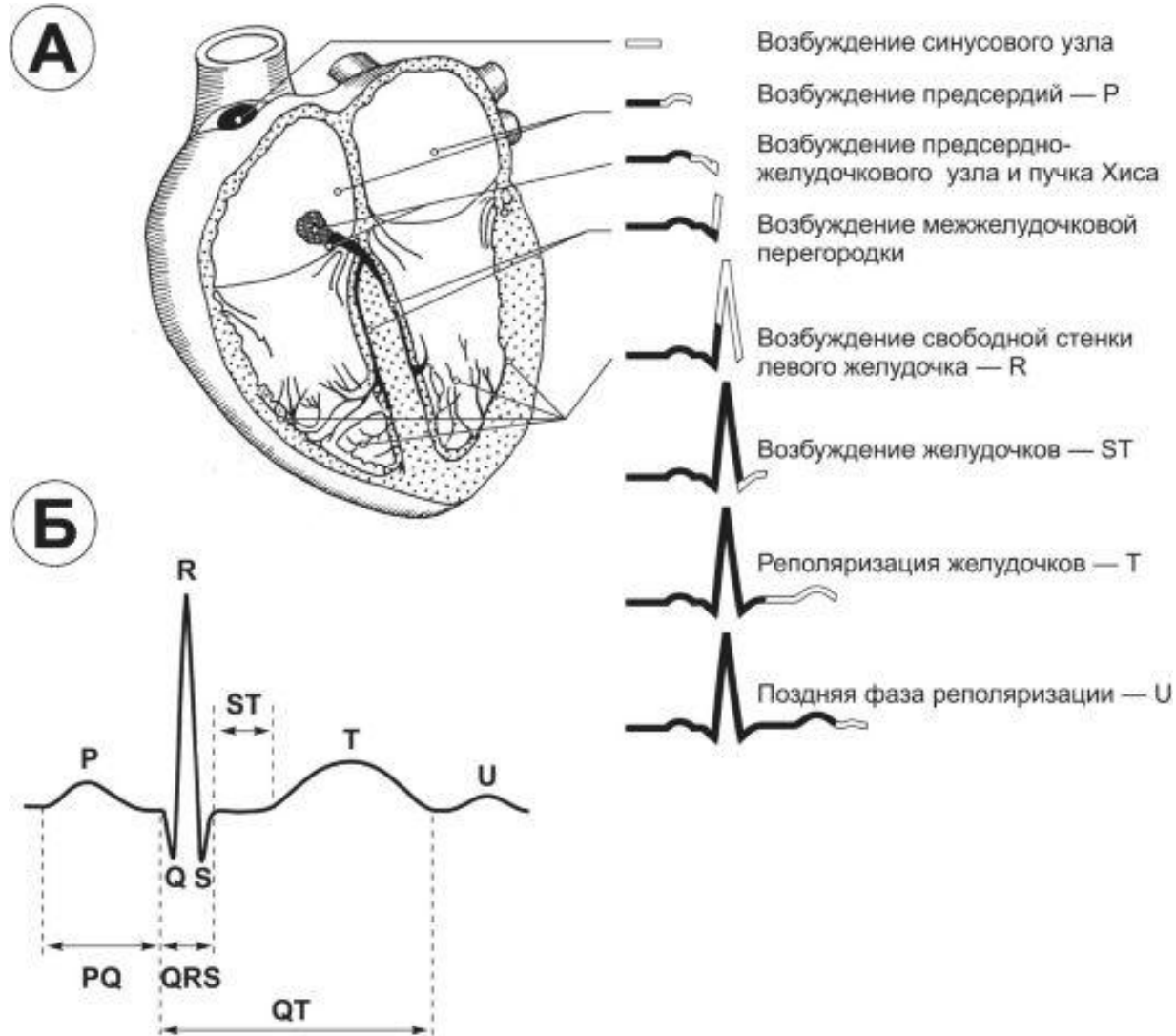
- Электрокардиография - метод электрофизиологического исследования деятельности сердца в норме и патологии, основанный на регистрации и анализе электрической активности миокарда, распространяющейся по сердцу в течение



Колебания разности потенциалов, возникающие при возбуждении сердечной мышцы, воспринимаются электродами, расположенными на теле обследуемого, и подается на вход электрокардиографа. Запись колебаний гальванометра осуществляется на движущейся ленте непосредственно в момент



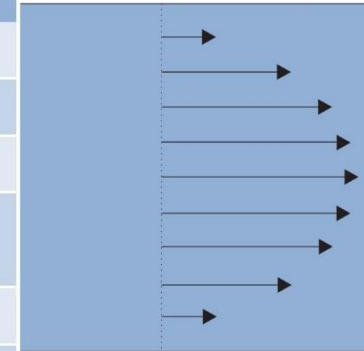
Регистрация электрической активности и формирования электрокардиограммы в норме



Ток крови по сосудам в большом кругу кровообращения



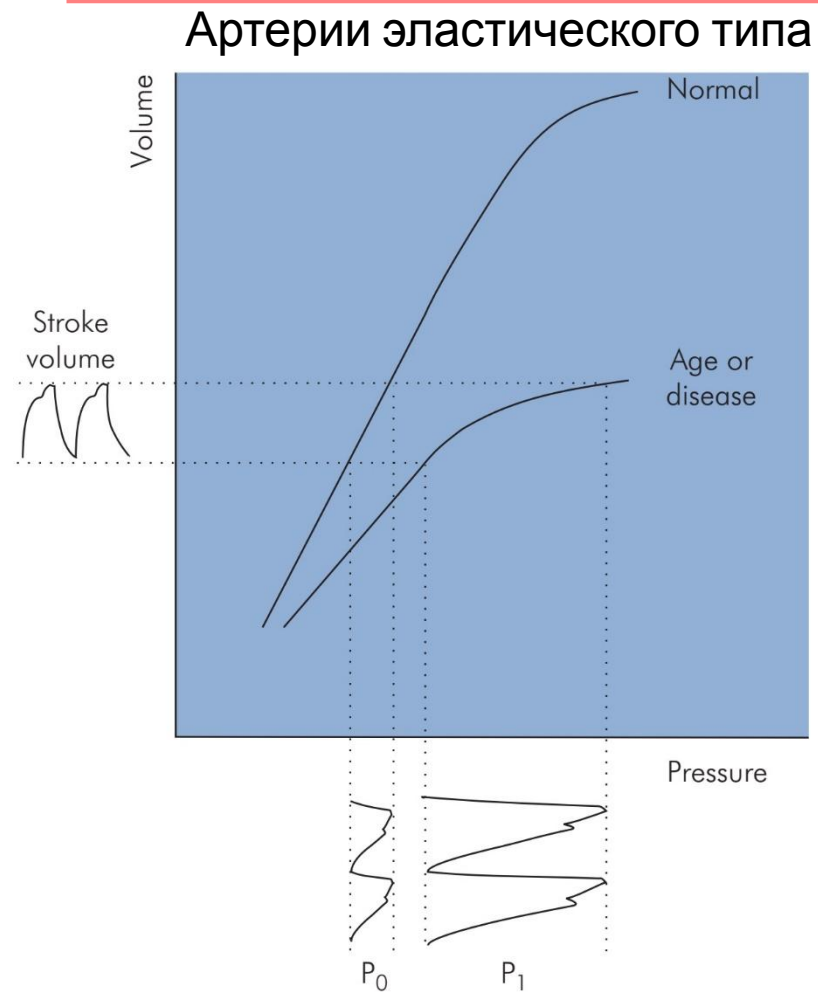
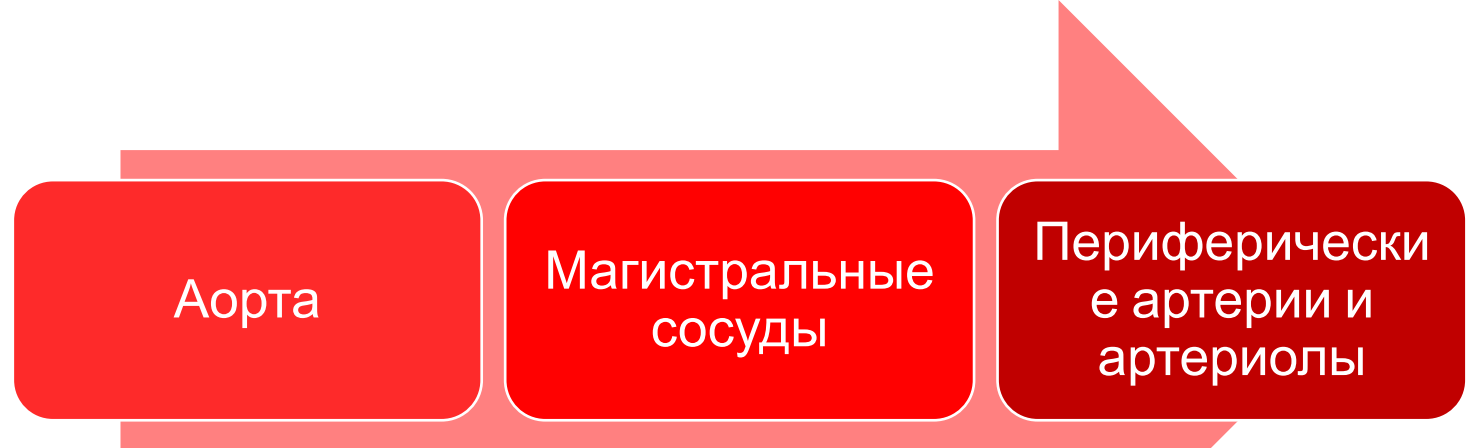
Vessel	Diameter	Wall thickness	Mean pressure (mmHg)
Aorta	25 mm	2 mm	100
Artery	4 mm	1 mm	95
Arteriole	20 μm	6 μm	50
Terminal arteriole	10 μm	2 μm	45
Capillary	8 μm	0.5 μm	30
Venule	20 μm	1 μm	20
Vein	5 mm	0.5 mm	8
Vena cava	30 mm	1.5 mm	3



Location	Volume (%)
Heart	5
Systemic circulation	
• Aorta and arteries	11
• Capillaries	6
• Veins and venules	66
Pulmonary circulation	
• Arteries	3
• Capillaries	4
• Veins and venules	5

Артериальное русло

- Артерии несут кровь от сердца к капиллярам
- Систолическое давление при данном УО определяется ОПСС и растяжимостью стенки артериального русла
- В систолу, когда ударный объем выбрасывается в русло, часть крови движется в сторону периферических сосудов, часть растягивает стенки артерий эластического (мышечно-эластического) типа
- В диастолу эластичные артерии возвращаются к исходному диаметру, что помогает поддерживать АДср
- Диастолическое давление определяется ОПСС



Венозное русло

- Система вен собирает кровь из капиллярного русла и несет ее к сердцу
- Давление в венах обуславливается в основном гравитацией
- Венозный возврат зависит от посткапиллярного давления, ОЦК, активности мышечной и грудной помп и тонуса симпатического отдела ВНС.

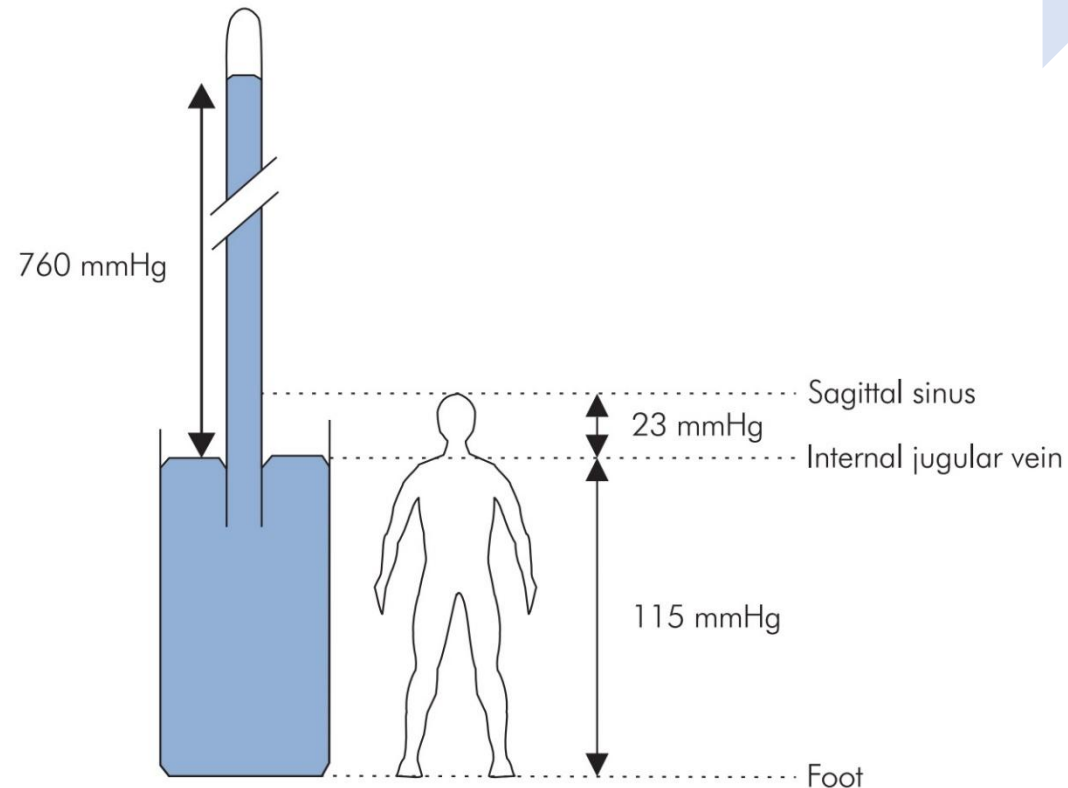


Figure 15.19 Gravity and venous pressure

Контроль циркуляции крови

- Контроль деятельности сердца регулирует СВ
- Контроль периферических сосудов опосредует регуляцию ОЦК и венозного возврата
- Локальное изменение сопротивления позволяет регулировать местную перфузию.
- Местная перфузия контролируется внутренними (местными) и внешними механизмами (автономная иннервация)
- На сосуды преимущественно влияет симпатика, парасимпатика в небольшой степени.

Механизмы регуляции

Местно

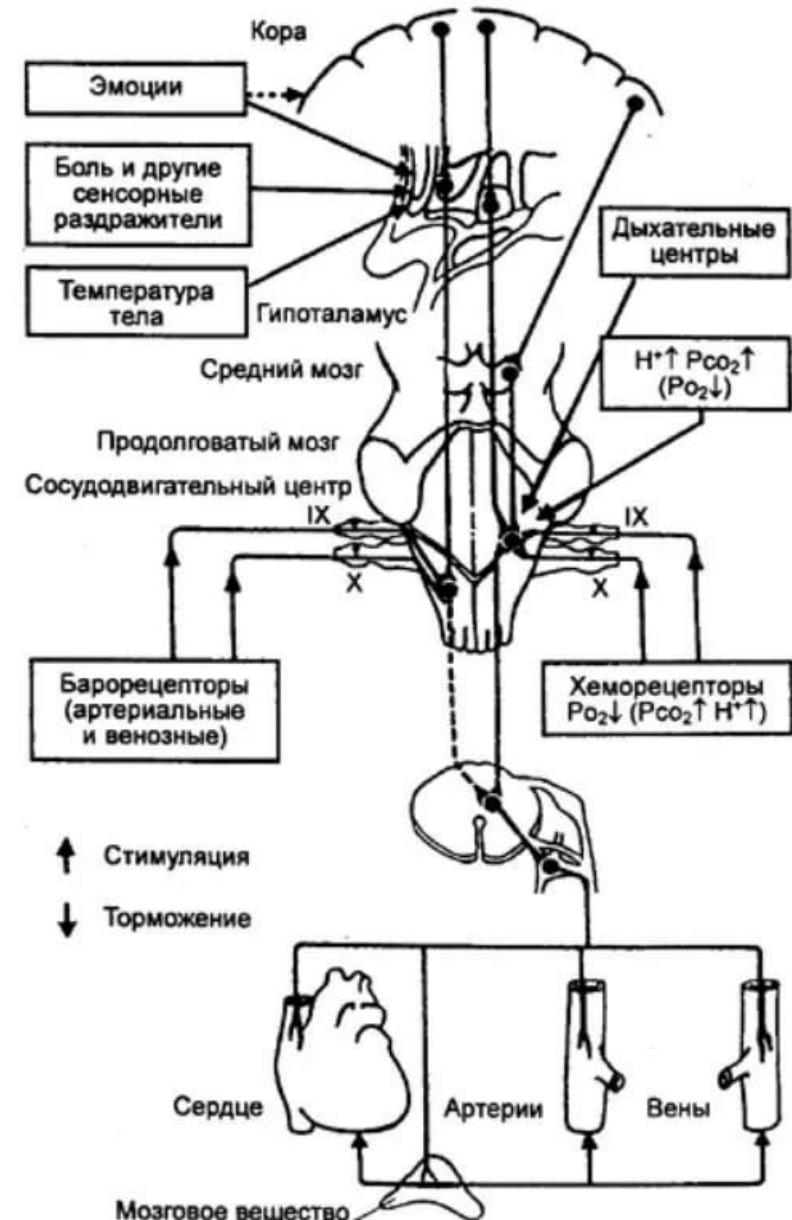
- Метаболический – на накопление метаболитов или при повреждении (СО₂, лактат, пируват, ионы водорода, аденозинфосфаты – АМФ, АДФ, АТФ, натрий, фосфаты, серотонин)
- Миогенный механизм
- Реакция эндотелия на некоторые вещества (простациклин, тромбоксан А₂, эндотелиальный фактор релаксации, эндотелины)

Системная регуляция

Нервно

- Иннервация гладких миоцитов стенки сосуда – адренергические волокна (альфа-1, альфа-2(вазоконстриция), бета-2 адренорецепторы (вазодилатация))
- Регуляция – сосудодвигательные центры (прессорный – вазоконстрикция, повышение ЧСС, силы сокращения миокарда, депрессорный – ингибирование прессорного, гуморальное ингибирование симпатки на уровне спинного мозга)

Action	Agent	Origin
Vasoconstrictors	Noradrenaline	Adrenal medulla, postganglionic nerve endings
	Adrenaline	Adrenal medulla
	Vasopressin	Posterior pituitary
	Angiotensin II	Conversion of angiotensin I in the lung
Vasodilators	Histamine	Mast cells
	Kinins	Pancreas, salivary glands, sweat glands
	Atrial natriuretic peptide (ANP)	Atria
	Vasoactive intestinal peptide (VIP)	Autonomic nerve endings Gastrointestinal tract nerves



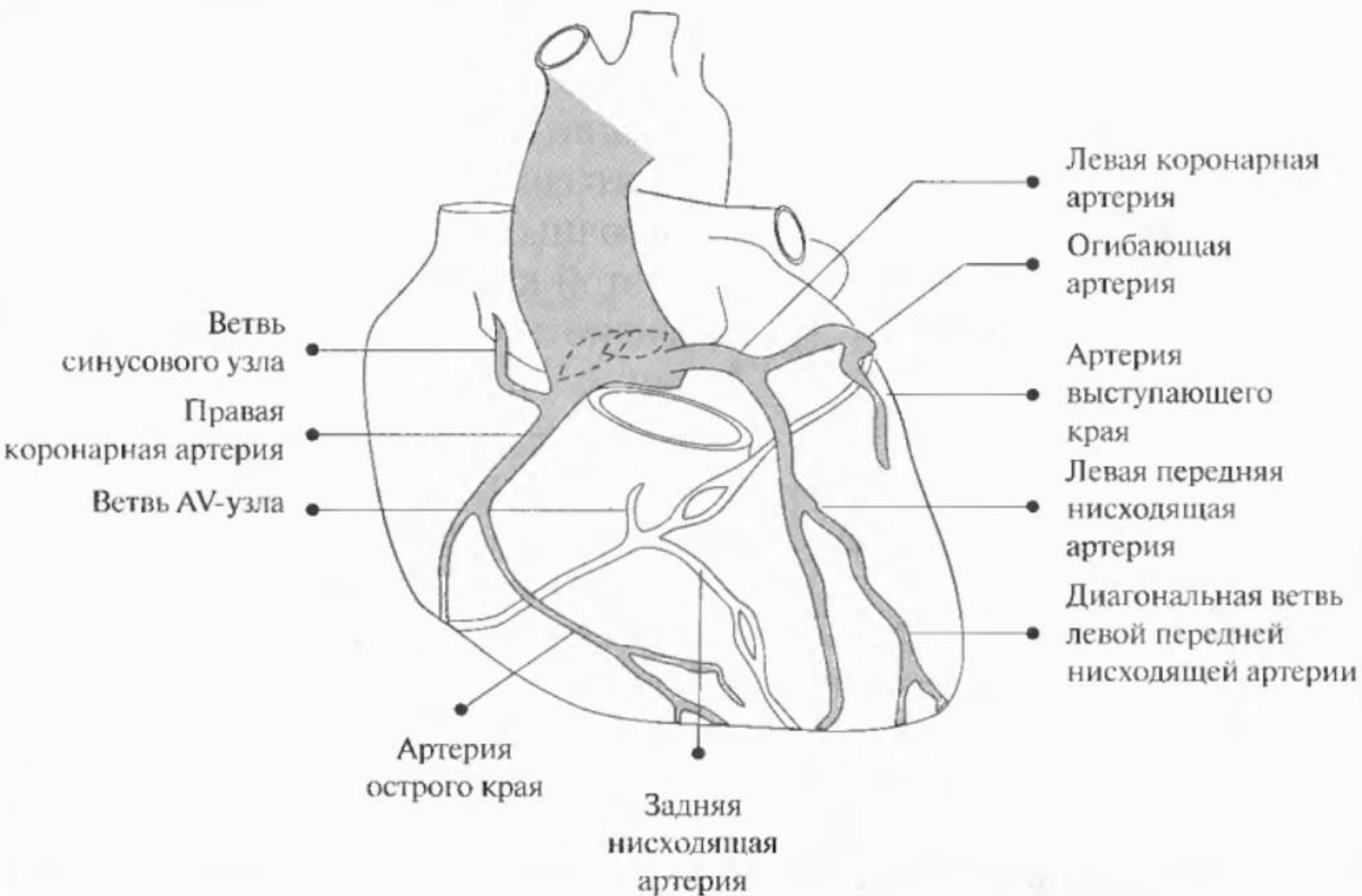
Особенности кровообращения некоторых органов

Коронарный кровоток

- ОСК - 250мл/мин и более
- Миокард потребляет около 70% доставляемого кислорода в норме, поэтому на практике единственная возможность повысить его доставку – улучшить перфузию
- Минимальное потребление кислорода миокардом – 10мл/мин на 100г, что дает среднее потребление в 30 мл/мин у взрослого в норме.
- Питание миокарда: жирные кислоты (60%), углеводы (40%), он также может использовать кетоновые тела как субстрат

Factor	Effect on coronary vascular resistance
Sympathetic activity	
α -receptors	↑
β -receptors	↓
Vagal activity	↓
Systolic compression	↑
Coronary perfusion pressure	↑ or ↓
Adenosine	↓
Other metabolic factors CO_2 , O_2 , H^{\downarrow} , K^{\downarrow}	↑ or ↓

Кровоснабжение



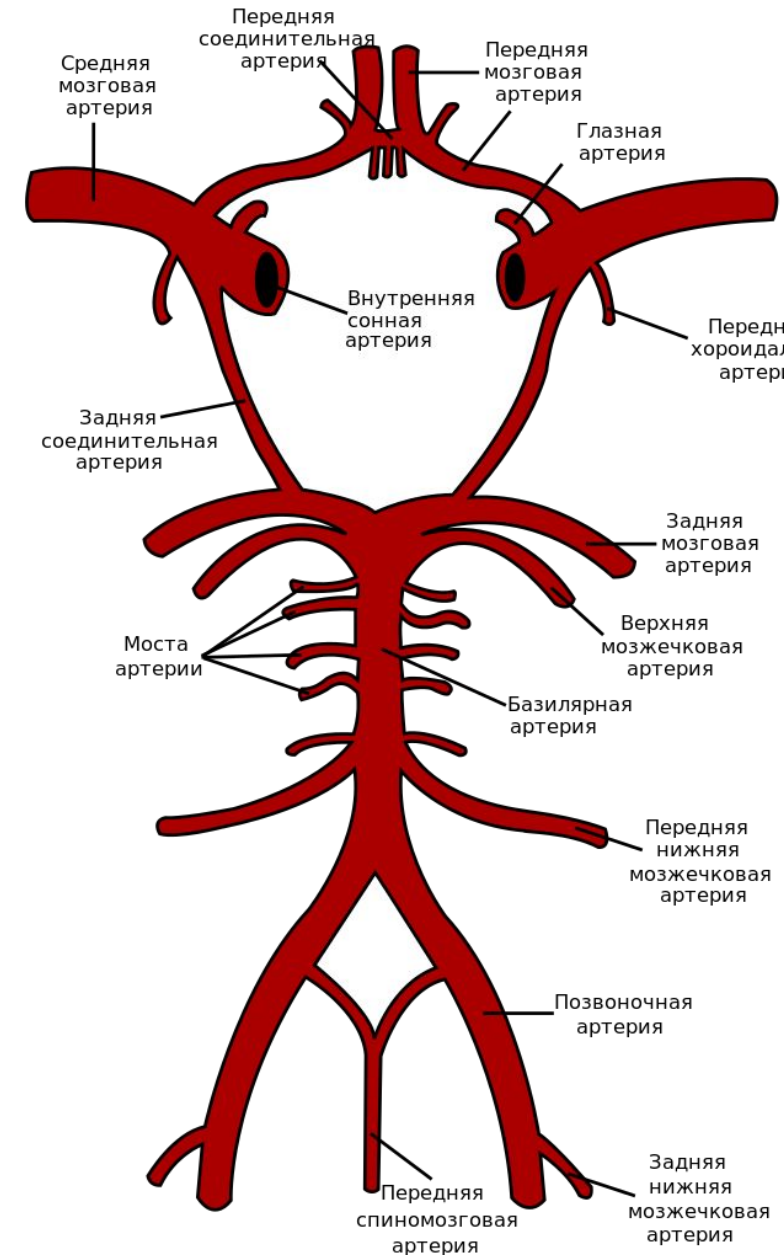
- Левая коронарная артерия** и её ветви снабжают кровью:
1. Левое предсердие
 2. Левый желудочек
 3. Межжелудочковую перегородку
 4. Переднюю поверхность правого желудочка
 5. Верхушку сердца.

- Правая коронарная артерия** и её ветви снабжают кровью:
1. Правое предсердие
 2. Синоатриальный узел
 3. Атриовентрикулярный узел
 4. Правый желудочек
 5. Заднюю стенку левого желудочка

Деоксигенированная кровь поступает из миокарда в систему вен сердца и коронарный синус, впадающий **в правое**

Мозговой кровоток

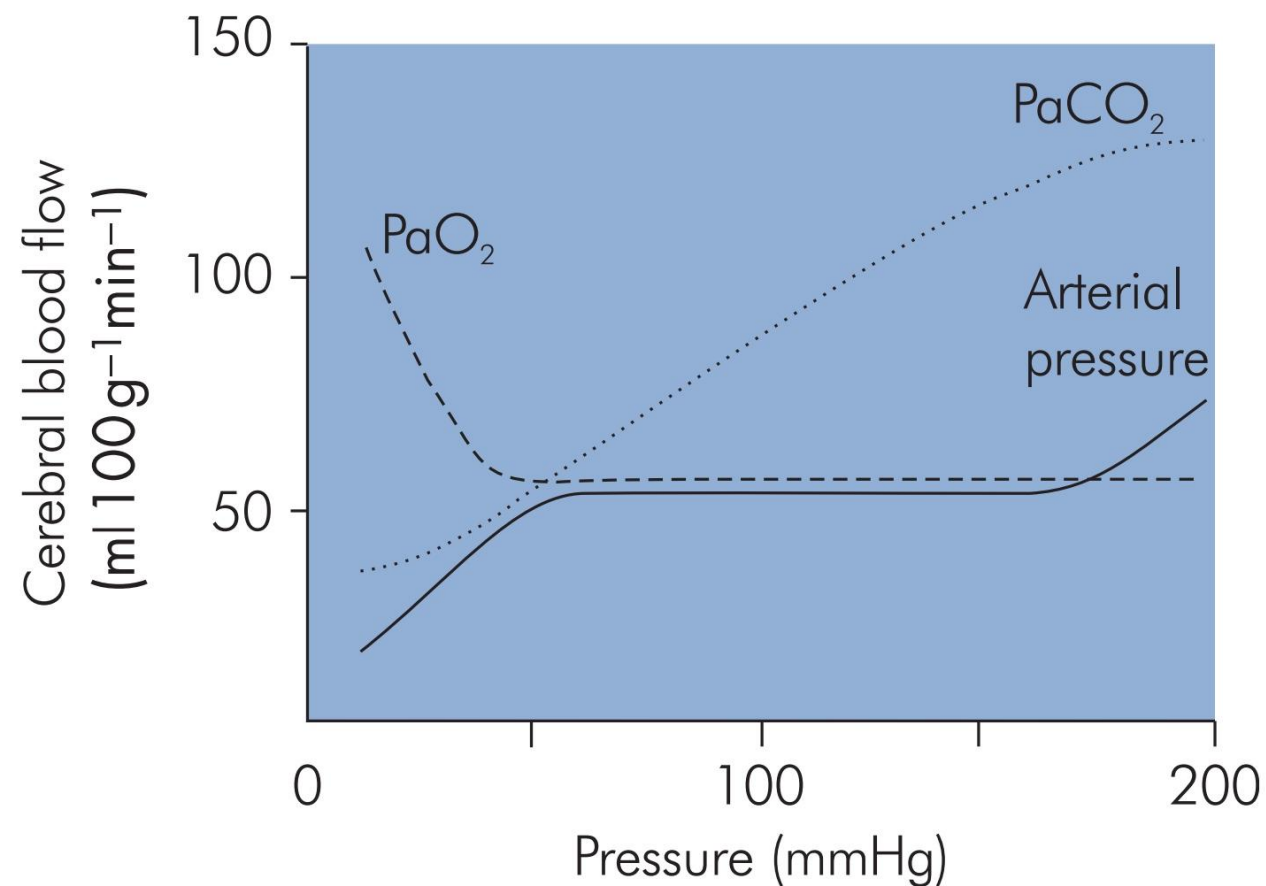
- Средняя ОСК в головном мозге – около 55 мл/100г/мин, она активно поддерживается относительно ОСК в других органах
- Перфузия тканей разная, серое вещество получает примерно вдвое больше (70 мл/100г/мин) крови, чем белое (30 мл/100г/мин)
- Мозг потребляет около 3,5мл/100г/мин кислорода, сатурация венозной крови – 65%
- Такие структуры, как четверохолмие и базальные ганглии получают гораздо больше крови, чем ствол и мозжечок.
- Кортикальный кровоток лабилен, в зависимости от активности перфузия определенных отделов достигает высокого уровня (>130мл/100г/мин), однако довольно долго поддерживается на одном уровне при изменениях АД.



Регуляция мозгового кровотока

Факторы, влияющие на кровоток

- Давление церебральной перфузии – разность между АДср и суммой давления в венах и ВЧД
- P_{aCO_2} – парциальное давление углекислого газа влияет на кровоток ГМ (низкое – вазоконстрикция, высокое – вазодилатация); гипервентиляция снижает мозговой кровоток и используется для снижения ВЧД при травмах головы.
- P_{aO_2} – низкое – вазодилатация, высокое – вазоконстрикция, однако влияние значительно менее выражено, относительно P_{aCO_2}
- pH – независимый от P_{aCO_2} механизм регуляции (снижение pH вызывает вазодилатацию)
- Метаболиты – аденозин и калий увеличивают местную перфузию; любые изменения, вызывающие повышение P_{aCO_2} и снижение оксигенации также провоцируют местное выделение аденозина и продукцию ионов



Литература

- Николай Агаджанян, Виктор Смирнов – Нормальная физиология, 2009;
- Г. Е. Ройтберг, А. В. Струтынский – Внутренние болезни. Сердечно-сосудистая система, 2011;
- Ted Lin, Tim Smith, Colin Pinnock (a.e. Chris Mowatt - Fundamentals of Anaesthesia, 4th edition, 2016

Спасибо за внимание!

