

1.1. Анатомия

Сердце — жизненно важный орган человеческого тела. Оно состоит из специализированных мышечных волокон и обеспечивает поступление крови ко всем органам и тканям по артериальным сосудам.

Во внутриутробном периоде сердце развивается из слоя клеток мезодермы на третьей неделе гестации. Это скопление клеток, называемых мезокардиальными, формирует различные слои стенки сердца — эндокард, миокард, эпикард и перикард (рис. 1.1).

Сердце расположено немного левее центральной части грудной клетки. При проведении обследования сердце лучше пальпируется и выслушивается в левой половине грудной клетки, что обусловлено преобладанием размеров и силы сокращения левого желудочка по сравнению с правым.

Большой и малый круг кровообращения

Сердце человека состоит из четырех камер: две принимающих камеры, *предсердия*, и две нагнетающих камеры, *желудочки* (рис. 1.2).

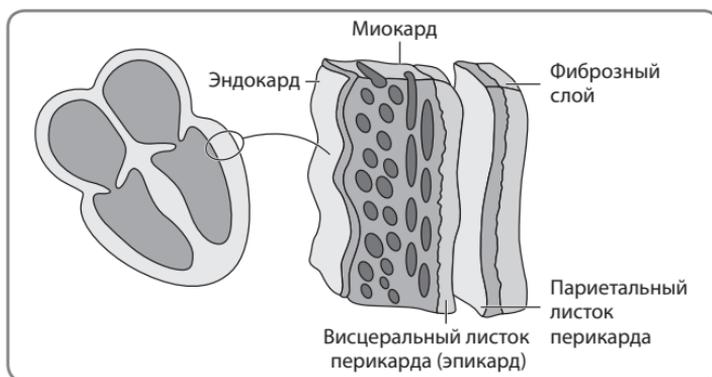


Рис. 1.1. Слои стенки сердца

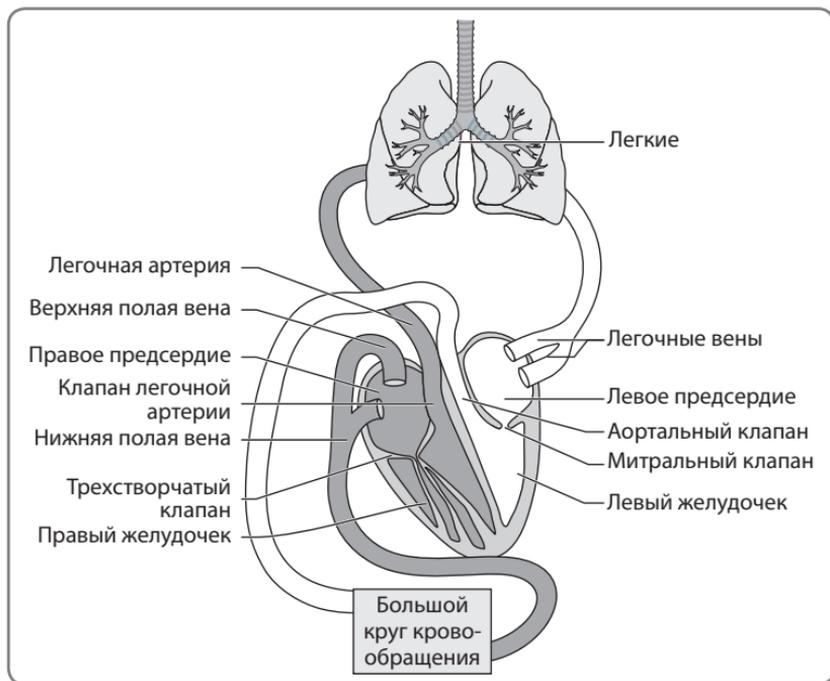


Рис. 1.2. Анатомия сердца

С участием камер сердца формируются два отдельных круга кровообращения — *малый*, кровь по которому доставляется к легким и обратно к сердцу, и *большой*, кровоснабжающий остальные части тела. Камеры сердца отделены друг от друга клапанами, препятствующими обратному току крови и обеспечивающими электрофизиологическую изоляцию предсердий и желудочков.

Обедненная кислородом кровь из венозных сосудов собирается в *верхнюю и нижнюю полые вены*, а затем поступает в правое предсердие. Кровь из правого предсердия в правый желудочек в начале диастолы желудочков течет пассивно, затем правое предсердие сокращается для более эффективного нагнетания крови в правый желудочек через отверстие трикуспидального клапана (рис. 1.3). В систолу правого желудочка створки *трикуспидального клапана* захлопываются, кровь выбрасывается через отверстие *клапана легочной артерии* в легочный ствол и далее поступает в легкие. В капиллярах легких происходит газообмен, и кровь насыщается кислородом. Обогащенная кислородом кровь транспортируется по легочным венам обратно к сердцу, наполняя левое предсердие.

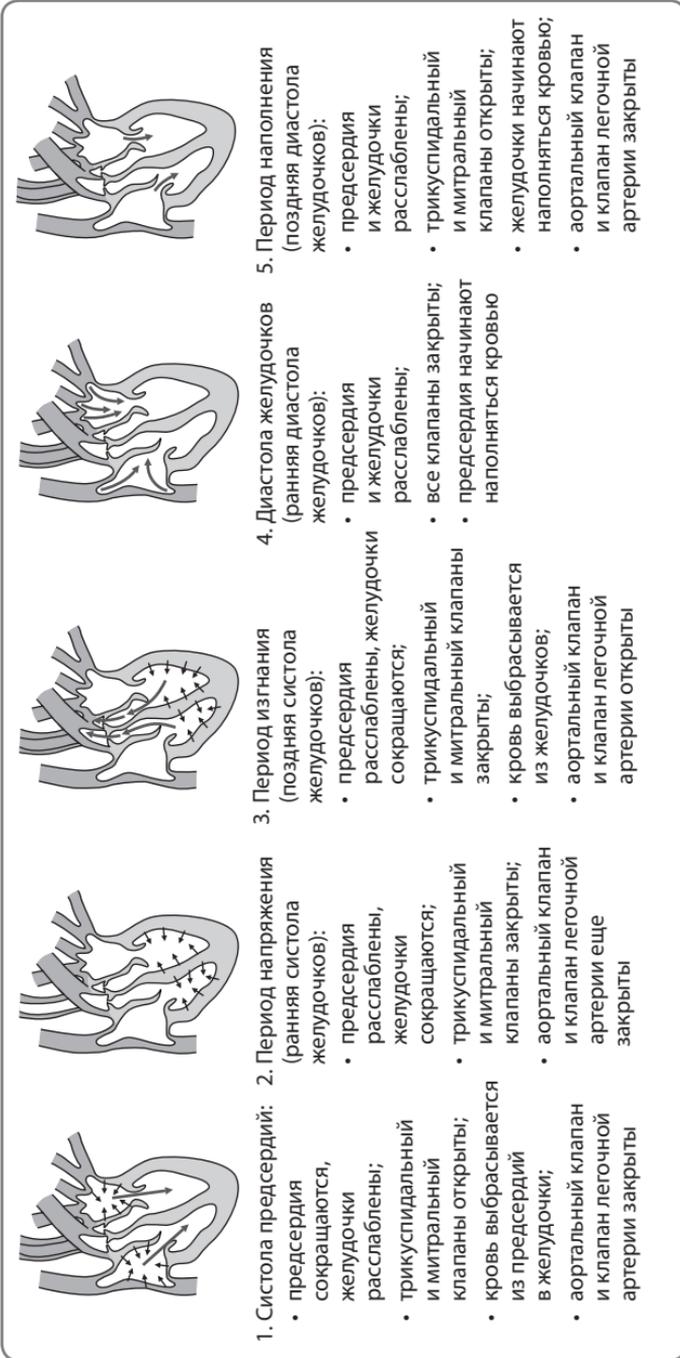


Рис. 1.3. Фазы сердечного цикла

Во время диастолы желудочков насыщенная кислородом кровь из левого предсердия пассивно перетекает в полость левого желудочка, затем происходит активное сокращение левого предсердия для более эффективного наполнения левого желудочка кровью через отверстие митрального клапана. Левому желудочку необходимо сокращаться с большой силой для нагнетания крови в кровеносные сосуды большого круга кровообращения, поэтому мышечная стенка левого желудочка развита в большей степени по сравнению с мышечной стенкой правого желудочка. Во время систолы левого желудочка створки *митрального клапана* смыкаются и кровь выбрасывается через отверстие *аортального клапана в аорту*. Из аорты насыщенная кислородом кровь распределяется по сосудам органов и тканей, в капиллярах которых происходит газообмен. Кровь, обедненная кислородом и насыщенная углекислым газом, собирается по венозным сосудам в *полые вены*, попадая затем в правое предсердие.

Коронарное кровообращение

Сердцу, как и другим мышечным органам, нужно кровоснабжение для обеспечения необходимыми веществами для сокращения и метаболических процессов. Кровь, обогащенная кислородом, поступает к сердцу по коронарным артериям (рис. 1.4).

Эти сосуды отходят от аорты непосредственно над аортальным клапаном (рис. 1.5). У большинства людей правая и левая коронарные артерии отходят от соответствующих сторон аорты. Правая коронарная артерия снабжает кровью правый желудочек и нижнюю стенку левого желудочка. Также она отдает ветви

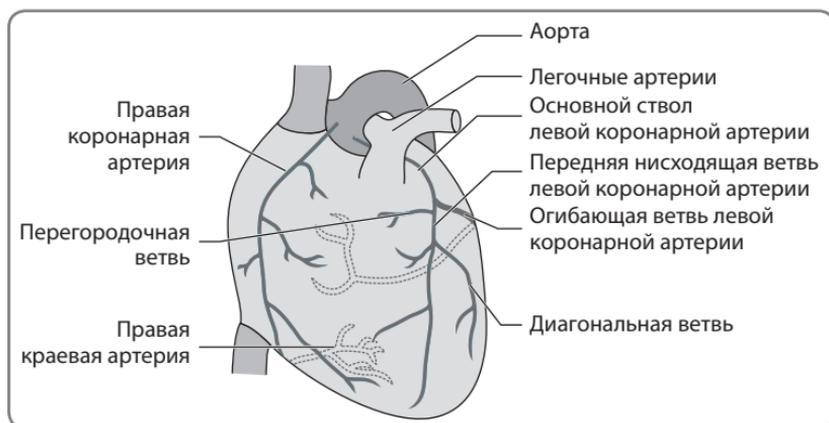


Рис. 1.4. Сердце и коронарное кровообращение

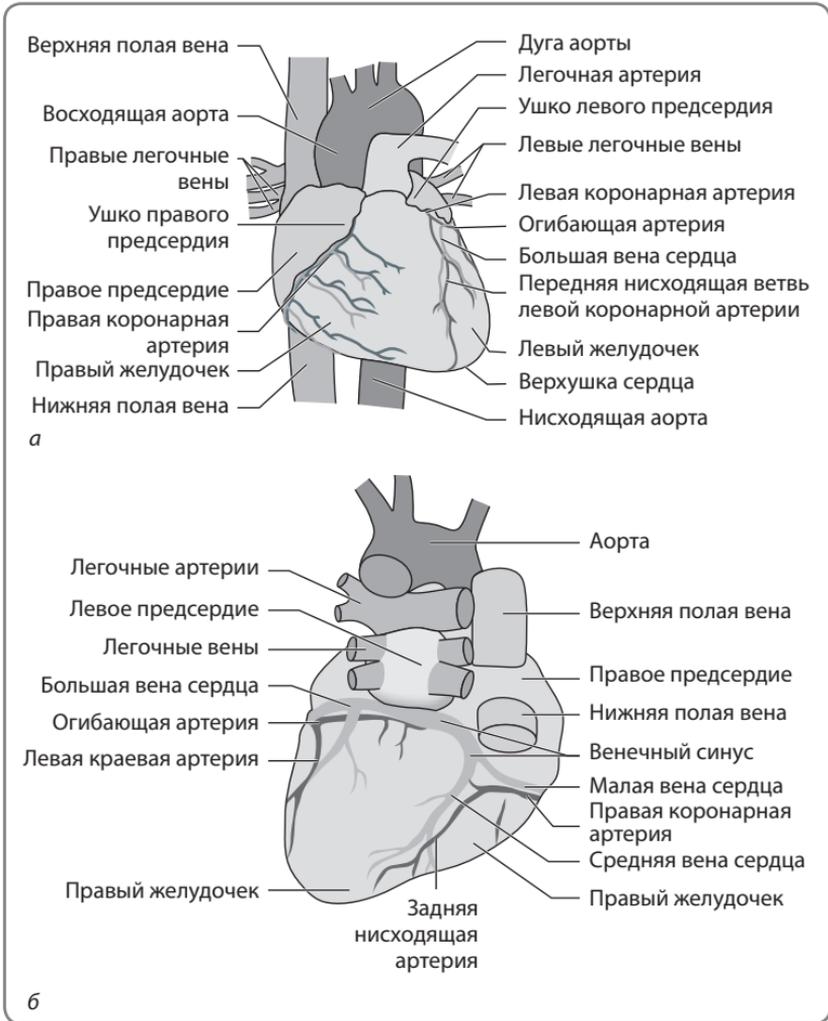


Рис. 1.5. Строение сердца, вид снаружи: *а* — передняя поверхность; *б* — задняя поверхность

к правому предсердию [в том числе к *синоатриальному (СА)* узлу], и к *атриовентрикулярному (АВ)* узлу. Основной ствол левой коронарной артерии разделяется на две большие ветви. Огибающая ветвь левой коронарной артерии кровоснабжает задние отделы левого желудочка. Нисходящая ветвь левой коронарной артерии кровоснабжает большую часть левого желудочка, включая переднюю стенку и верхушку, перегородку (перегородочные ветви) и боковую стенку (диагональные ветви).

Анатомия проводящей системы

Левое и правое предсердия расположены выше желудочков и разделены *межпредсердной перегородкой* (рис. 1.6). Правое предсердие развивается из двух эмбриологических зачатков: гладкостенная венозная (задняя) часть развивается из *венозного синуса*, мышечная передняя часть развивается из рудиментарного правого предсердия. В месте соединения обеих частей образуется вертикальный гребешок, располагающийся между устьями верхней и нижней полых вен и носящий название *пограничного гребешка*.

Синоатриальный узел расположен около пограничного гребешка ниже устья верхней полой вены. В этой области скопление специализированных кардиомиоцитов формирует собственный «водитель ритма» сердца.

В месте соединения верхней части пограничного гребешка и межпредсердной перегородки расположены проводящие пути (*пучок Бахмана*), возбуждение по которым проводится к левому предсердию.

Предсердия соединены с соответствующими желудочками посредством атриовентрикулярных клапанов: *трикуспидальный клапан* расположен между правыми предсердием и желудочком, *митральный клапан* расположен между левыми предсердием и желудочком.

Митральный и трикуспидальный клапаны и соответствующие им фиброзные кольца обеспечивают электрофизиологическую изоляцию предсердий и желудочков. Импульсы от предсердий к желудочкам проводятся по *атриовентрикулярному узлу (АВ-узлу)*, расположенному справа от нижней части межпредсердной перегородки около трикуспидального клапана.

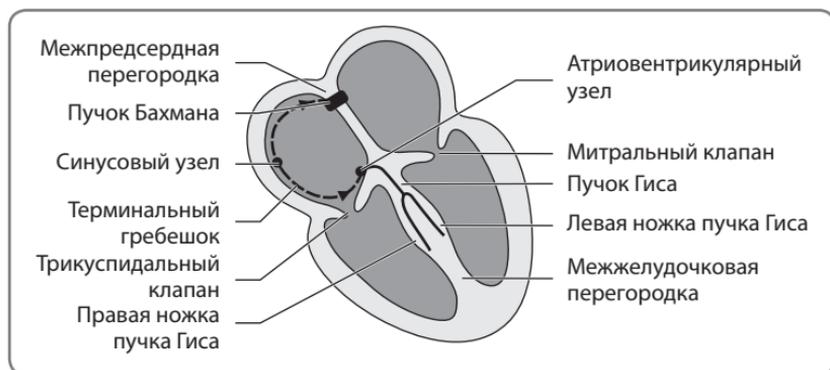


Рис. 1.6. Строение проводящей системы сердца

В АВ-узле есть два изолированных входа для электрических импульсов. *Быстрый проводящий канал* начинается в межпредсердной перегородке и соединяется с АВ-узлом в его передней части. *Медленный проводящий канал* является продолжением нижнего края терминального гребешка и соединяется с АВ-узлом в его задней части.

АВ-узел переходит в специализированный узкий проводящий путь — пучок Гиса. Этот пучок проходит через мембранозную часть межжелудочковой перегородки и затем разделяется на *правую и левую ножки*, достигающие верхушки сердца.

Левая ножка разделяется далее на *переднюю и заднюю ветви*. От ветвей ножек проводящие волокна (*волокна Пуркинье*) расходятся между волокнами сократительной мускулатуры желудочков. Клетки системы Гиса–Пуркинье обладают специализированными свойствами и способны к более быстрому проведению импульса по сравнению с обычными кардиомиоцитами.

Важно помнить!

С точки зрения электрофизиологии в сердце выделяют две, а не четыре камеры, предсердную и желудочковую, электрически изолированные друг от друга тканью фиброзных колец.

1.2. Физиология

Потенциал действия кардиомиоцита

Сердце состоит из специализированных мышечных клеток — *кардиомиоцитов*. Сокращения кардиомиоцитов обусловлены возникновением потенциала действия в этих клетках вследствие процессов *деполяризации*. Возникающие электрические заряды можно обнаружить и зарегистрировать на поверхности тела пациента.

Потенциал покоя мембраны кардиомиоцита составляет -96 мВ (рис. 1.7, а). Это означает, что мембрана внутри кардиомиоцита заряжена отрицательно. Данный заряд поддерживается работой белковых ионных каналов мембраны, регулирующих перемещение основных положительно заряженных ионов: натрия (Na^+), кальция (Ca^{2+}) и калия (K^+) (рис. 1.7, б). При возбуждении соседних кардиомиоцитов или поступлении импульса из СА-узла в мембране кардиомиоцита происходит активация ионных каналов, и при достижении порога возбуждения запускается цепочка внутриклеточных реакций. Быстрые натриевые каналы открываются, и ионы натрия входят внутрь клетки, вызывая быструю деполяризацию. Затем в сарколемме и саркоплазматическом ретикулуме открываются медленные кальциевые каналы, что

приводит к повышению содержания ионов кальция в цитозоле, и в это же время уменьшается проницаемость клеточной мембраны для ионов калия, выход калия из клетки замедляется. В результате

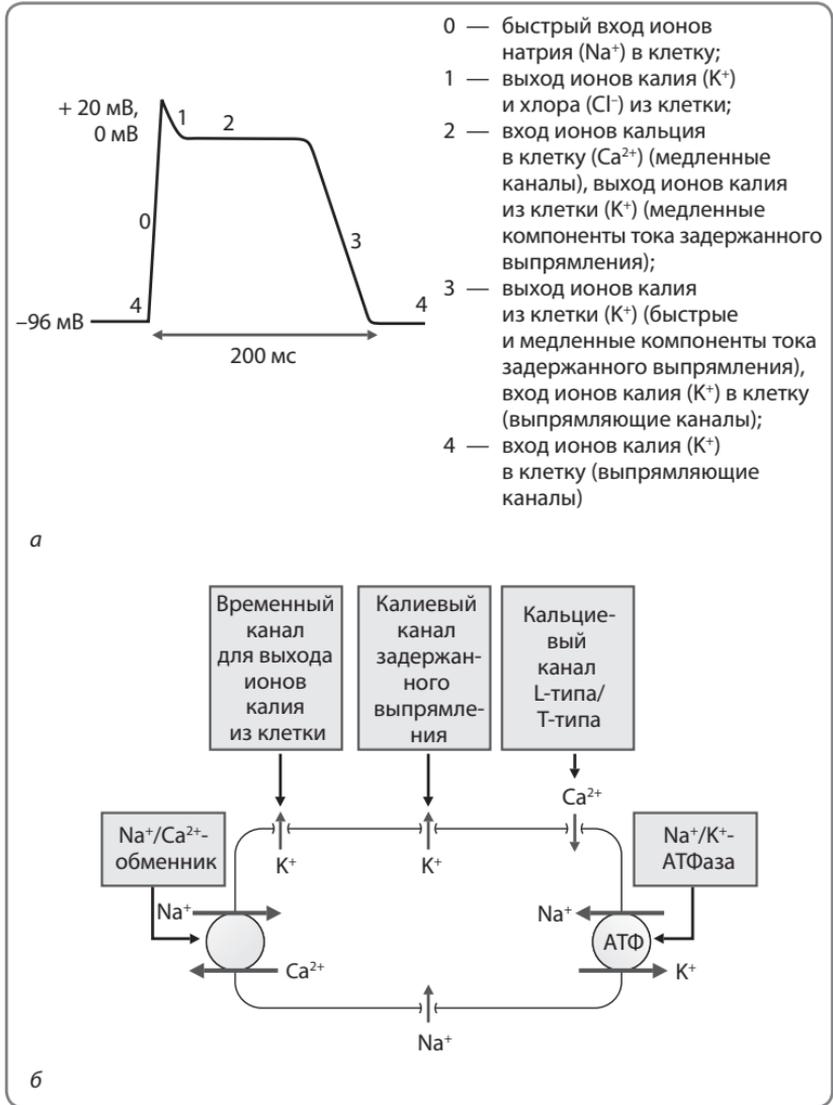


Рис. 1.7. Потенциал действия кардиомиоцита и последовательность открытия ионных каналов мембраны: *а* — потенциал действия кардиомиоцита и последовательность открытия ионных каналов мембраны; *б* — перемещение основных положительно заряженных ионов внутри клетки (Na^+ — натрий; Ca^{2+} — кальций; K^+ — калий)

этих процессов мембранный потенциал поддерживается на уровне около 0 мВ в течение продолжительной фазы «плато». Этот механизм обеспечивает способность кардиомиоцитов к возбуждению и сокращению в течение длительного времени. Затем калиевые каналы вновь открываются, кальциевые каналы закрываются, ионы калия выходят из клетки, меньше ионов кальция проникает в клетку, и отрицательный заряд внутри клеточной мембраны кардиомиоцита восстанавливается — происходит *реполяризация*.

В течение периода реполяризации повторное возбуждение клетки вызвать невозможно — в это время наступает рефрактерный период кардиомиоцита.

Проводящая система сердца

В процессе эмбрионального развития сердечной мышцы небольшая часть кардиомиоцитов приобретает свойство *автоматизма*, то есть способности к регулярной ритмичной деполяризации или генерации потенциала действия. Наибольшей способностью к автоматизму обладает СА-узел, естественный водитель ритма сердца, импульсы из которого вызывают процессы деполяризации во всей сердечной мышце.

На частоту возникновения импульсов в СА-узле оказывает влияние вегетативная нервная система: парасимпатические импульсы блуждающего нерва уменьшают частоту сердечных сокращений, а стимуляция симпатическими нервными волокнами и циркулирующими катехоламинами увеличивает частоту сердечных сокращений. В результате этих процессов число сердечных сокращений поддерживается в пределах 60–100 ударов в минуту (условная «норма»).

Возбуждение от СА-узла распространяется по трем пучкам

Важно помнить!

Регуляция работы СА-узла

- СА-узел — естественный водитель ритма сердца, способный к спонтанной деполяризации. Частота возникновения процессов деполяризации регулируется двумя основными механизмами — нервным и гуморальным.
- Нервный механизм регуляции осуществляется посредством блуждающего нерва (X пара черепных нервов), обеспечивающего парасимпатическую иннервацию. В периоды отдыха и отсутствия активности влияние блуждающего нерва уменьшает скорость процессов деполяризации в СА-узле. Симпатическую иннервацию СА-узлу обеспечивают симпатические волокна, выходящие из спинного мозга на уровне I–IV грудных позвонков. При физической нагрузке или воздействии стрессовых факторов влияние этих нервов увеличивает скорость процессов деполяризации в СА-узле и частоту сердечных сокращений.
- Циркулирующие гормоны (в особенности адреналин и тироксин) также оказывают влияние на скорость процессов деполяризации в СА-узле. Повышение уровня этих гормонов (к примеру, при физических нагрузках и патологии щитовидной железы соответственно) приводит к ускорению деполяризации в СА-узле и увеличению частоты сердечных сокращений.

проводящих путей, охватывая правое предсердие. Импульсы к левому предсердию проводятся по пучку Бахмана.

После возбуждения предсердий импульс достигает атриовентрикулярного узла и задерживается в нем на короткое время, достаточное для систолы предсердий и эффективного наполнения желудочков.

После задержки в АВ-узле импульс распространяется по пучку Гиса, который разделяется на правую ножку, охватывающую возбуждением правый желудочек, и левую ножку, охватывающую возбуждением левый желудочек и разветвляющуюся на переднюю и заднюю ветви.

Задняя ветвь левой ножки пучка Гиса — толстый пучок волокон, возбуждение по которому распространяется по задней и нижней поверхности левого желудочка. *Передняя ветвь левой ножки пучка Гиса* — узкий пучок волокон, распространяющий волну возбуждения по передней и верхней поверхности левого желудочка.

Распространившись по волокнам ножек пучка Гиса, импульс достигает терминальных разветвлений — волокон Пуркинье. Эти волокна проникают в толщу миокарда, и волна возбуждения охватывает его, распространяясь по направлению от эндокарда к эпикарду (то есть изнутри наружу).

1.3. Физиологические процессы внутри клетки

Внутри кардиомиоцита расположены сотни *миофибрилл* — длинных, тонких образований, состоящих из нитей разной толщины. Тонкие нити образованы белком *актином*, толстые нити — белком *миозином*.

При развитии потенциала действия в кардиомиоците (рис. 1.8) ионы кальция из саркоплазматического ретикулума выходят во внутриклеточное пространство. В присутствии ионов кальция головки нитей миозина соединяются с нитями актина, что приводит к их взаимному перемещению и, как следствие, укорочению миофибрилл. Так, в результате электрохимических процессов (развития потенциала действия) происходит сокращение каждой мышечной клетки. Потенциал действия возникает в близкорасположенных кардиомиоцитах за счет распространения волны возбуждения по *щелевым соединениям*, и сокращением охватывается вся толща миокарда.

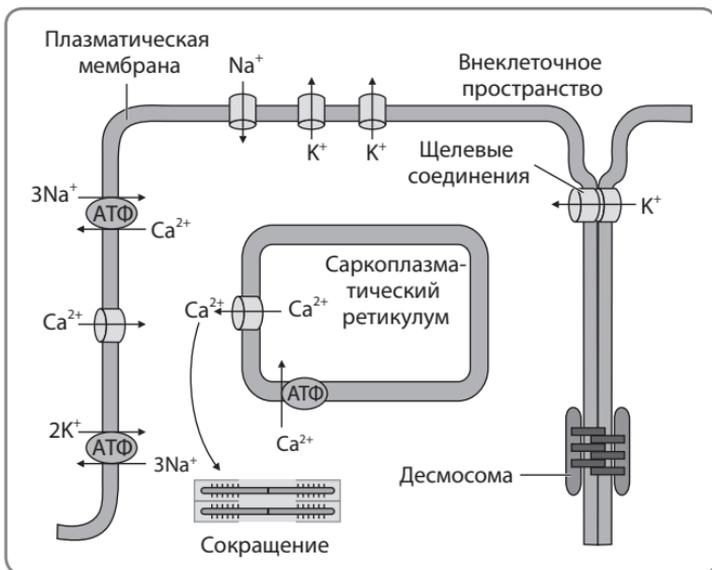


Рис. 1.8. Физиология кардиомиоцита

1.4. Регистрация электрофизиологических процессов в миокарде

Электрокардиография

Электрофизиологические процессы в сердечной мышце могут быть зарегистрированы при помощи электродов, расположенных на коже пациента. Запись этих процессов носит название *электрокардиографии* (ЭКГ).

ЭКГ регистрируется при наложении на участки тела пациента клейких одноразовых электродов, для записи используется бумага со стандартной разметкой.

Аппарат для регистрации ЭКГ, как правило, калибруется таким образом, что сигнал величиной в 1 мВ записывается в виде отклонения пера регистрирующего устройства на 1 см (два больших квадрата) на электрокардиограмме. Сигнал калибровки должен присутствовать при каждой записи ЭКГ. Скорость движения бумаги составляет 25 мм/с. Если электрический сигнал отсутствует, записывается прямая линия — *изолиния*.

Расположение зубцов по отношению к изолинии на электрокардиограмме зависит от двух факторов — направления движения электрических импульсов и расположения регистрирующего

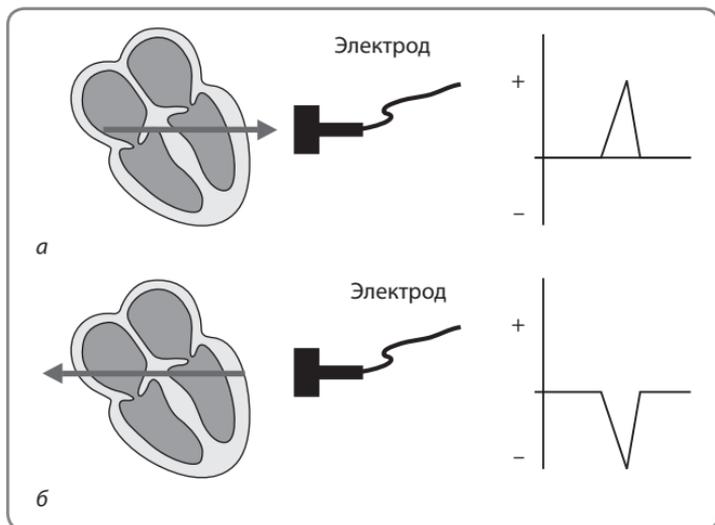


Рис. 1.9. Электрические импульсы, направляющиеся к электроду (а) и от него (б), проявляются на ЭКГ в виде положительных и отрицательных зубцов соответственно

электрода. Электрический импульс, направляющийся к электроду, регистрируется в качестве положительного зубца на ЭКГ (выше изолинии); электрический импульс, направляющийся от электрода, — отрицательного зубца (ниже изолинии) (рис. 1.9).

Электрическая активность — векторная величина, характеризующаяся определенным направлением и амплитудой. Амплитуда положительного или отрицательного зубца на ЭКГ зависит от сочетания двух этих свойств. К примеру, желудочки сердца обладают большей мышечной массой по сравнению с предсердиями, и величина генерируемого ими электрического потенциала (и, как следствие, амплитуда зубцов желудочкового комплекса на ЭКГ) также больше. Следует отметить, что амплитуда зубцов на ЭКГ будет варьировать в зависимости от расположения электрода на теле пациента.

В примере, показанном на рис. 1.10, а, расположение электрода совпадает с направлением процессов деполяризации в миокарде.

Важно помнить!

Размер зубцов на электрокардиограмме определяется абсолютной величиной электрического заряда и направлением его движения по отношению к регистрирующему электроду.

Амплитуда вектора деполяризации по направлению к электроду равна его суммарной величине, и амплитуда зубца на ЭКГ максимальна (10 мВ).

На рис. 1.10, б и 1.10, в электроды размещены таким образом,

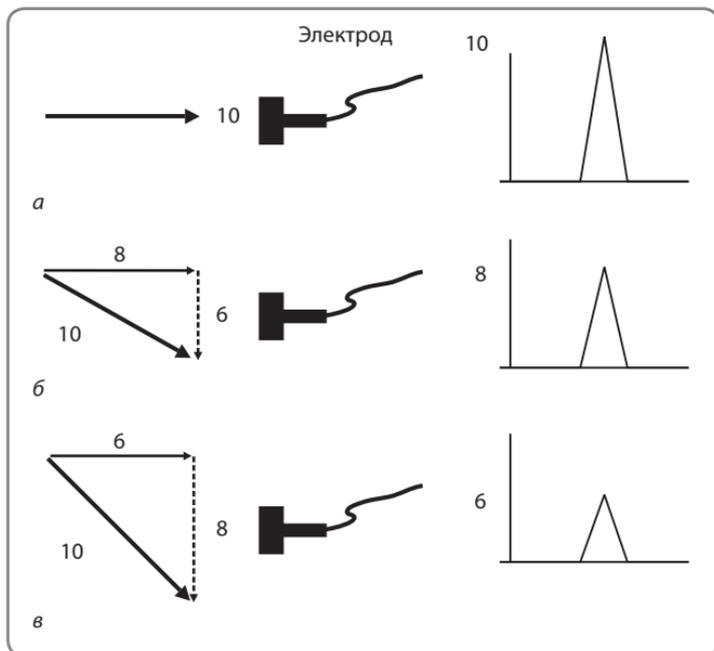


Рис. 1.10. Суммарный вектор деполяризации по отношению к расположению регистрирующего электрода: *a* — расположение электрода совпадает с направлением процессов деполяризации в миокарде; *б* — вектор деполяризации меньшей амплитуды, расположенный под углом к электроду; *в* — вектор деполяризации большей амплитуды, расположенный под углом к электроду

что вектор деполяризации расположен под углом к регистрирующему электроду. Результирующий вектор формируется из двух векторов, расположенных под углом друг к другу. В таких случаях амплитуда вектора деполяризации, направленного к регистрирующему электроду, меньше, что проявляется зубцами меньшей амплитуды на ЭКГ. Чем больше угол наклона, тем меньше амплитуда зубцов на ЭКГ.

Значение взаимного расположения регистрирующего электрода и векторов деполяризации в миокарде объясняется далее в главе 2.

Электрокардиограмма предоставляет данные об электрофизиологических процессах в миокарде в разные периоды сердечного цикла. При использовании большого числа электродов для регистрации ЭКГ можно оценить электрофизиологическую активность разных участков миокарда, при этом каждое отведение дает представление о состоянии определенной части сердечной мышцы.

Анализ нормальной электрокардиограммы

2.1. Введение

При возбуждении кардиомиоцитов электродвижущие силы (потенциалы действия) распространяются в разных направлениях. Эти электродвижущие силы можно обнаружить на поверхности тела пациента с помощью электродов и зарегистрировать в виде электрокардиограммы.

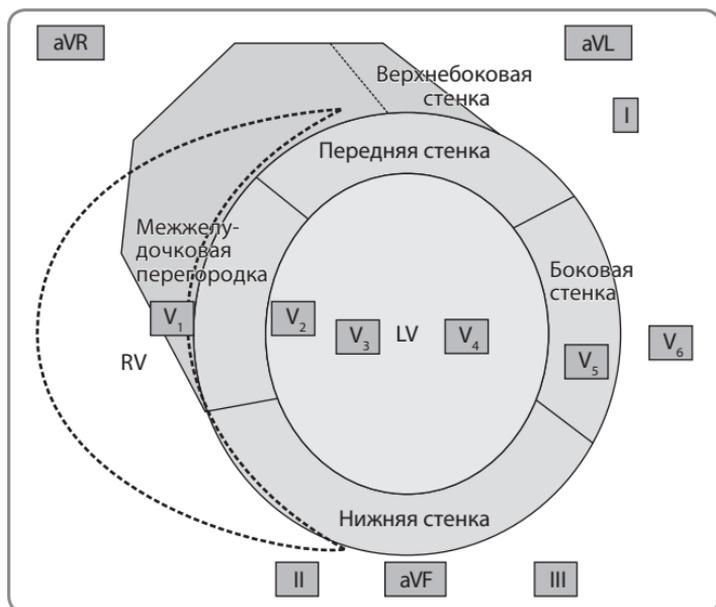


Рис. 2.1. Расположение 12 отведений ЭКГ: V_1 – V_6 — грудные отведения; LV — левый желудочек; RV — правый желудочек, I–III — стандартные отведения от конечностей. Усиленные отведения от конечностей: aVF — усиленное отведение от левой ноги; aVL — усиленное отведение от левой руки. Обратите внимание: усиленное отведение от правой руки aVR на данной схеме представлено быть не может

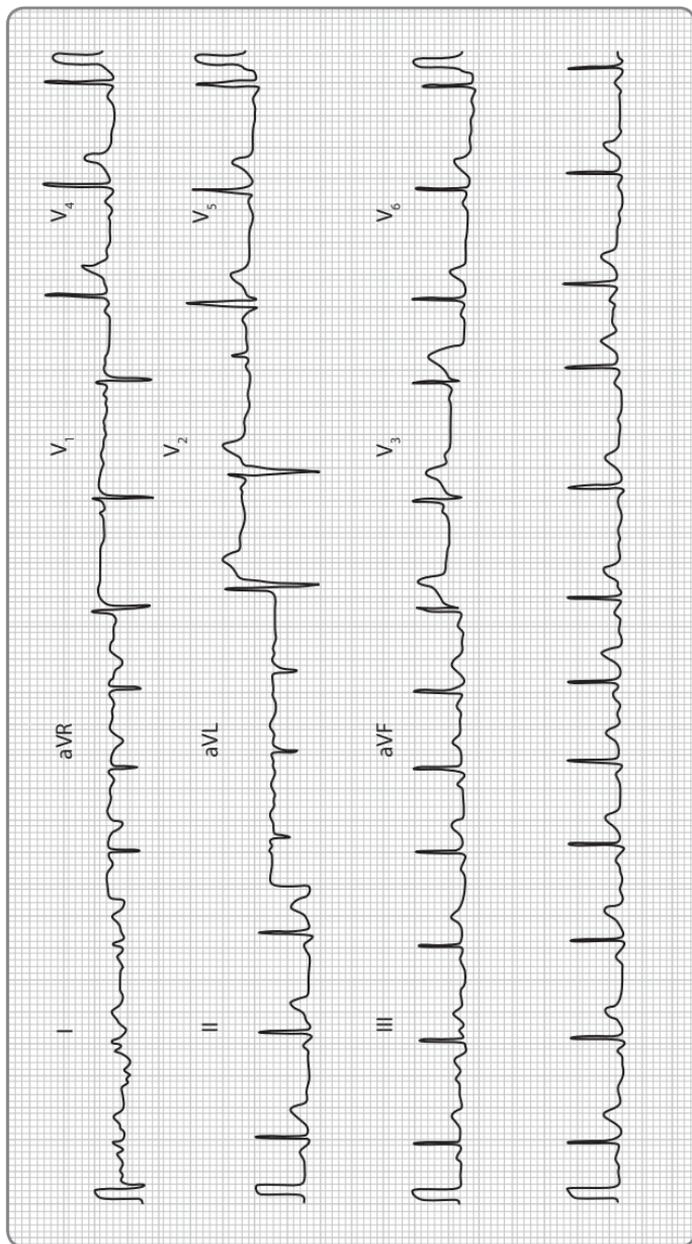


Рис. 2.2. 12 отведений нормальной ЭКГ

Электрокардиографическое отведение образовано парой электродов — отрицательно и положительно заряженных. Каждое отведение регистрирует электродвижущие силы определенного участка миокарда (рис. 2.1). Размещая электроды на различных участках тела, можно определить электрофизиологическую активность разных отделов сердца.

Следует помнить, что каждое отведение может зарегистрировать только суммарную электродвижущую силу, направленную к электроду в определенный момент времени. Следовательно, если все электродвижущие силы направлены к электроду, на ЭКГ регистрируется высокоамплитудный положительный зубец. Если основные электродвижущие силы направлены к электроду, но небольшая их часть отклоняется, то амплитуда положительного зубца на ЭКГ уменьшается. При меньшей величине электрического сигнала (к примеру, при тонкой стенке миокарда или направлении основных электродвижущих сил под углом к электроду) амплитуда положительного зубца на ЭКГ будет еще меньше.

На показатели ЭКГ оказывают влияние не только состояние и размеры сердечной мышцы, но и расположение электродов. Имеются международно утвержденные стандарты расположения электродов для снятия 12 отведений для получения 12-канальной ЭКГ (рис. 2.2). При правильной регистрации ЭКГ ее можно достоверно интерпретировать независимо от места ее регистрации.

12 отведений ЭКГ состоят из шести отведений от конечностей и шести грудных или прекардиальных отведений.

2.2. Отведения от конечностей

Отведения от конечностей регистрируют, накладывая электроды на верхние и нижние конечности. Электроды располагаются на правой руке, левой руке и левой ноге. Дополнительный электрод на правой ноге используется в качестве «заземляющего» (рис. 2.3). Регистрируя движение электрических сил между разными парами электродов, можно получить шесть отведений — три стандартных отведения от конечностей и три усиленных отведения от конечностей.

Стандартные отведения от конечностей

Стандартные отведения от конечностей регистрируют кривую движения электрических сил между двумя конечностями в определенный момент времени. В связи с этим их также называют *биполярными отведениями*. При регистрации этих отведений на одной конечности размещают положительно заряженный электрод, на другой — отрицательно заряженный. Имеется

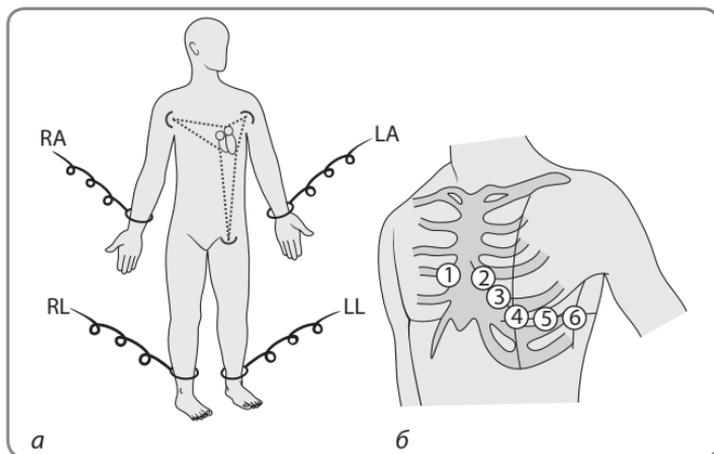


Рис. 2.3. Расположение электродов для записи ЭКГ. Отведения от конечностей (а): RA — правая рука; LA — левая рука; RL — правая нога; LL — левая нога. Грудные отведения (б): V_1 – V_6

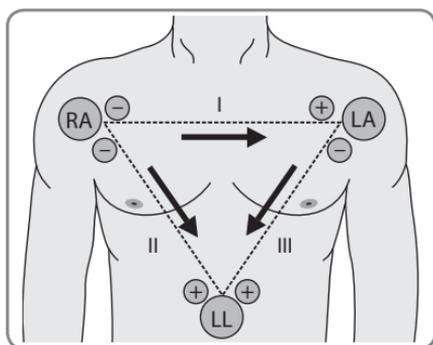


Рис. 2.4. Три стандартных отведения от конечностей (биполярные отведения) I–III: LA — левая рука; LL — левая нога; RA — правая рука

три стандартных отведения — I, II и III (рис. 2.4), где LA обозначает левую руку, LL — левую ногу, RA — правую руку.

Усиленные отведения от конечностей

Усиленные отведения от конечностей регистрируют кривую биопотенциалов от одной конечности в определенный момент времени и носят название однополюсных. В этих отведениях на одной конечности размещен положительно заряженный электрод, в качестве отрицательно заряженного электрода выступают три остальных электрода, объединенные в электрический центр, потенциал которого равен нулю. На рис. 2.5 представлены три усиленных отведения от конечностей: aVR — усиленное отведение

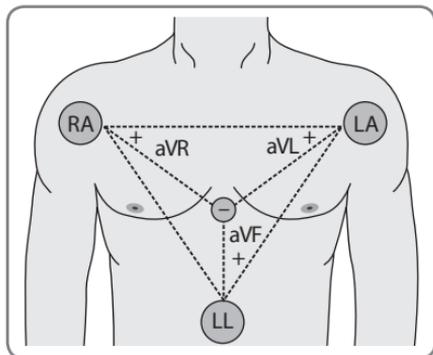


Рис. 2.5. Три однополюсных отведения от конечностей: aVR, aVL и aVF. LA — левая рука; LL — левая нога; RA — правая рука

от правой руки, aVL — усиленное отведение от левой руки, aVF — усиленное отведение от левой ноги.

2.3. Грудные отведения

Грудные отведения регистрируются при наложении электродов на поверхность грудной клетки в прекардиальной области. Электроды размещаются в шести стандартных положениях преимущественно на левой половине грудной клетки, у каждого отведения — свое местоположение (см. рис. 2.1):

V_1 — в четвертом межреберном промежутке, справа от грудины;

V_2 — в четвертом межреберном промежутке, слева от грудины;

V_3 — в точке на середине расстояния между V_2 и V_4 (V_4 см. ниже);

V_4 — в пятом межреберном промежутке по срединно-ключичной линии;

V_5 — по передней подмышечной линии, на уровне V_4 ;

V_6 — по средней подмышечной линии, на уровне V_4 и V_5 .

Иногда грудные отведения дополняются электродами, расположенными на правой стороне грудной клетки, которые называют V_{1R} , V_{2R} , V_{3R} , V_{4R} , V_{5R} и V_{6R} . Они располагаются зеркально по отношению к левым грудным отведениям:

V_{1R} — в четвертом межреберном промежутке, слева от грудины;

V_{2R} — в четвертом межреберном промежутке, справа от грудины;

V_{3R} — в точке на середине расстояния между V_{2R} и V_{4R} ;

V_{4R} — в пятом межреберном промежутке по срединно-ключичной линии;

V_{5R} — по передней подмышечной линии, на уровне V_{4R} ;

V_{6R} — по средней подмышечной линии, на уровне V_{4R} и V_{5R} .

Правые грудные отведения позволяют получить данные о состоянии правого желудочка.

2.4. Ориентация отведений электрокардиограммы

На стандартной ЭКГ различают следующие 12 отведений (записываемых одновременно): I, II, III, aVR, aVL, aVF, V₁, V₂, V₃, V₄, V₅, V₆.

Принимая во внимание строение сердечной мышцы (рис. 2.6), можно отметить, что большинство отведений накладывается на места проекции левого желудочка как доминирующего и клинически более значимого. Разные отведения отражают состояние различных отделов левого желудочка, как показано в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Стенки левого желудочка, представленные отведениями ЭКГ

Отведения ЭКГ	Стенки левого желудочка
V ₁ , V ₂	Перегородочная
V ₃ , V ₄	Передняя
V ₅ , V ₆	Боковая
От V ₁ до V ₄	Переднеперегородочная
От V ₃ до V ₆	Переднелатеральная
I, aVL	Высокая боковая
II, III, aVF	Нижняя

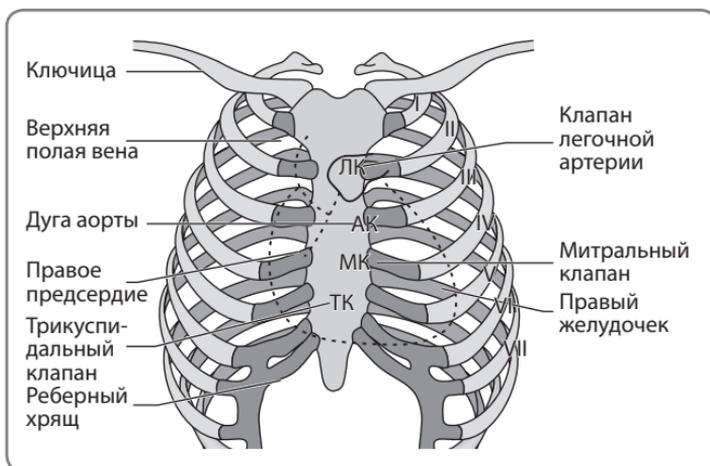


Рис. 2.6. Строение сердца, вид снаружи. Римскими цифрами обозначены ребра. ЛК — легочный клапан; АК — аортальный клапан; МК — митральный клапан; ТК — трикуспидальный клапан

Треугольник Эйнтховена

Стандартные отведения от конечностей регистрируются от двух конечностей в определенный момент времени. На одной конечности расположен положительно заряженный электрод, на другой — отрицательно заряженный. Оси трех стандартных отведений (I, II, III) образуют равносторонний треугольник, в центре которого находится сердце. Это — *треугольник Эйнтховена* (рис. 2.7).

Для облегчения графического представления электродвижущих сил в миокарде три конечности можно представить в виде вершин треугольника Эйнтховена, при этом оси трех отведений разделяют друг друга пополам, проходя через общую точку в центре. В результате образуется трехосевая система координат, где каждая ось находится под углом 60° друг к другу, а полярность отведений (положительные и отрицательные полюса) и ориентация (направление) остаются прежними (см. рис. 2.7).

Известно, что усиленные отведения от конечностей регистрируются от одной конечности в определенный момент времени, на этой конечности расположен положительно заряженный электрод, а отрицательный полюс находится в центральной точке. Три усиленных отведения от конечностей (aVR, aVL, aVF) формируют иную трехосевую систему координат, где каждая ось находится под углом 60° друг к другу (рис. 2.8, а).

Когда трехосевая система координат однополюсных отведений накладывается на трехосевую систему координат стандартных отведений от конечностей, получается шестиосевая система координат, где каждая ось находится под углом 30° друг к другу.

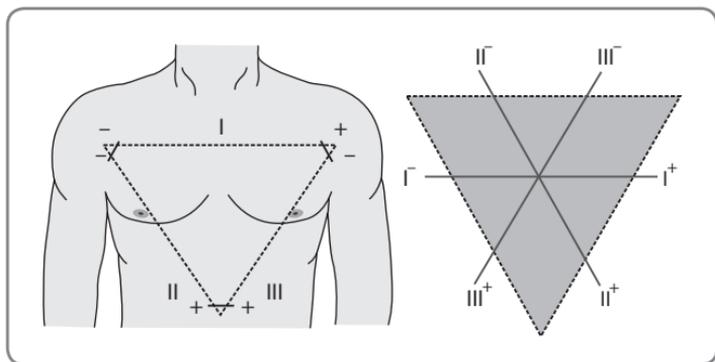


Рис. 2.7. Треугольник Эйнтховена, составленный из осей стандартных отведений от конечностей. Трехосевая система координат

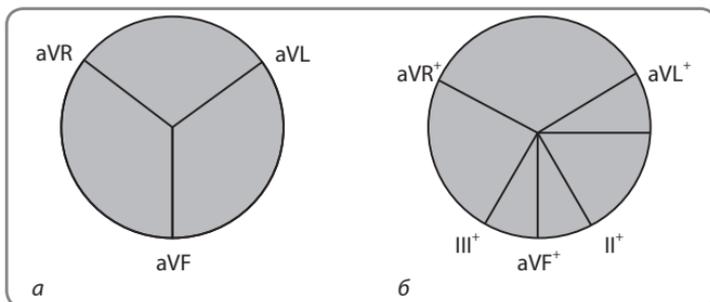


Рис. 2.8. Трехосевая система координат (а) однополюсных отведений. Шестиосевая система координат (б) из осей стандартных отведений от конечностей и однополюсных отведений

Каждое из шести отведений сохраняет свою полярность (положительный и отрицательный полюса) и ориентацию (направление отведения).

Шестиосевая система координат важна для определения основного направления движения электрических сил сердца. Как мы увидим далее, такое направление называют электрической осью комплекса QRS. Используя такой подход, можно определить конкретную локализацию патологических изменений, ведь ЭКГ можно рассматривать как сокращенную трехмерную карту электрической активности сердца.

2.5. Термины в электрокардиографии

ЭКГ состоит из ряда отклонений от изолинии, или зубцов. Расстояния между последовательными зубцами по временной оси называются интервалами. Участки изоэлектрической линии (изолинии) между зубцами носят название сегментов.

При анализе ЭКГ и электрофизиологических исследованиях сердце можно рассматривать как двухкамерное, состоящее из условных предсердия и желудочка (рис. 2.9), поскольку предсердия возбуждаются вместе, а желудочки сокращаются одновременно. В связи с этим на ЭКГ возбуждение предсердий представлено одним зубцом, а возбуждение желудочков — одним комплексом зубцов.

Волна возбуждения синхронизирована таким образом, что предсердия и желудочки сокращаются и расслабляются в ритмичной последовательности «деполяризация предсердий → реполяризация предсердий (почти совпадает по времени с деполяризацией желудочков) → реполяризация желудочков».

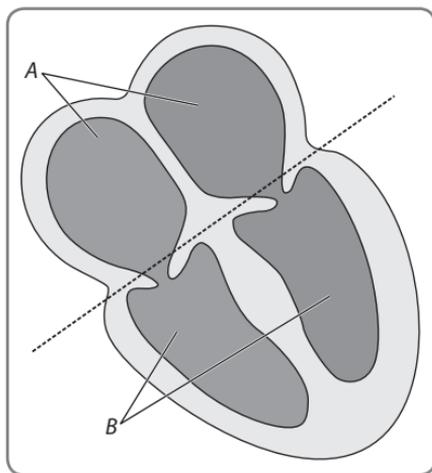


Рис. 2.9. Двухкамерная теория строения сердца: *A* — предсердная камера; *B* — желудочковая камера

Сокращение миокарда (систола) и расслабление (диастола) — это механические процессы, связанные с электрофизиологическими изменениями в сердечной мышце. Деполяризация непосредственно предшествует систоле, реполяризация — диастоле.

Зубцы ЭКГ

Каждый зубец на ЭКГ обозначается буквой латинского алфавита. Полный комплекс одного сердечного цикла последовательно обозначается буквами *P*, *Q*, *R*, *S*, *T* и *U* (рис. 2.10). Каждый зубец представляет различные части сердечного цикла:

- зубец *P* — деполяризация предсердий;
- комплекс *QRS* — деполяризация желудочков;
- зубец *Q* — первый отрицательный зубец перед зубцом *R*;
- зубец *R* — первый положительный зубец после зубца *Q*;
- зубец *S* — первый отрицательный зубец после зубца *R*;
- зубец *T* — реполяризация желудочков;
- зубец *U* — реполяризация волокон Пуркинью (рис. 2.11).

Реполяризация предсердий не регистрируется на ЭКГ, поскольку совпадает по времени с деполяризацией желудочков и потому «скрывается» в большем по амплитуде комплексе *QRS*.

Зубцы *P*, *T* и *U* всегда обозначаются заглавными буквами. Зубцы *Q*, *R* и *S* обозначаются заглавными или строчными буквами в зависимости от их абсолютной или относительной величины. Зубцы, амплитуда которых больше 5 мм, обозначаются заглавными

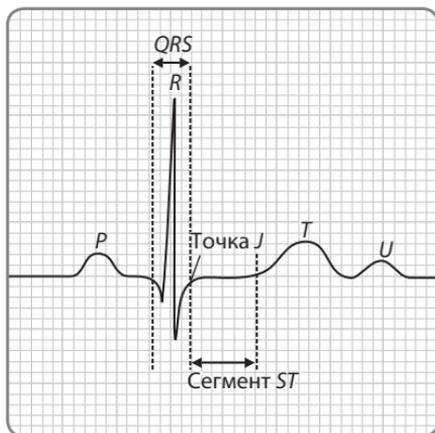


Рис. 2.10. Зубцы нормальной ЭКГ

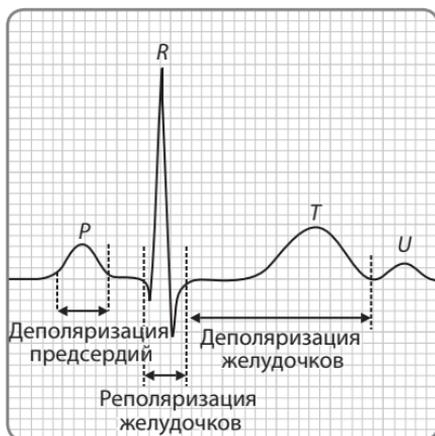


Рис. 2.11. Отражение процессов деполяризации и реполяризации на ЭКГ. Обратите внимание: зубец реполяризации предсердий «скрыт» в комплексе QRS

буквами Q, R, S, зубцы с амплитудой менее 5 мм — строчными буквами q, r, s.

Таким образом, комплекс QRS с маленьким зубцом q, за которым следует высокий зубец R, обозначается как комплекс qR, с глубоким зубцом Q и следующим за ним маленьким зубцом r — комплекс Qr (рис. 2.12). Аналогично, комплекс QRS с маленьким зубцом r и следующим за ним глубоким зубцом S обозначается как комплекс rS, с большим зубцом R и маленьким зубцом s — комплекс Rs. Если все зубцы комплекса QRS отрицательные, то он обозначается как комплекс QS.

Кроме того, если в комплексе QRS присутствуют два положительных зубца, второй положительный зубец обозначается как R', и комплекс носит название rSR' или RsR' в зависимости

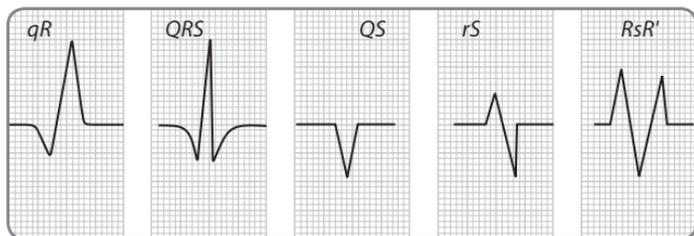


Рис. 2.12. Различные конфигурации комплексов QRS

от величины положительных зубцов (r или R) и отрицательных зубцов (s или S).

Интервалы и сегменты ЭКГ

Анализ расстояний между определенными зубцами ЭКГ используется для установки временного соотношения между фазами сердечного цикла. Расстояния между зубцами откладываются по временной шкале и называются *интервалами ЭКГ*. Участки изоэлектрической линии (изолинии) между определяемыми зубцами называются *сегментами*. Интервалы и сегменты ЭКГ, описанные ниже, имеют большое клиническое значение.

Интервал P–R

Интервал P–R (в России чаще используется обозначение PQ. — Прим. ред. перев.) измеряется от начала зубца P до начала комплекса QRS, независимо от того, является ли первый зубец комплекса QRS отрицательным или положительным (рис. 2.13). Продолжительность зубца P включается в общую продолжительность интервала P–R.

Измерение интервала P–R позволяет оценить время проведения возбуждения от предсердий к желудочкам. Продолжительность интервала включает время деполяризации предсердий (зубец P), задержку проведения в атриовентрикулярном узле и время, необходимое импульсу для прохождения по волокнам проводящей системы желудочков до начала их деполяризации (начало комплекса QRS).

Сегмент PR

Сегмент PR — это участок изолинии между окончанием зубца P и началом комплекса QRS (рис. 2.14). Данный сегмент не включает зубец P. Воспалительные процессы (к примеру, перикардит) могут проявиться изменением расположения сегмента PR по отношению к изолинии.

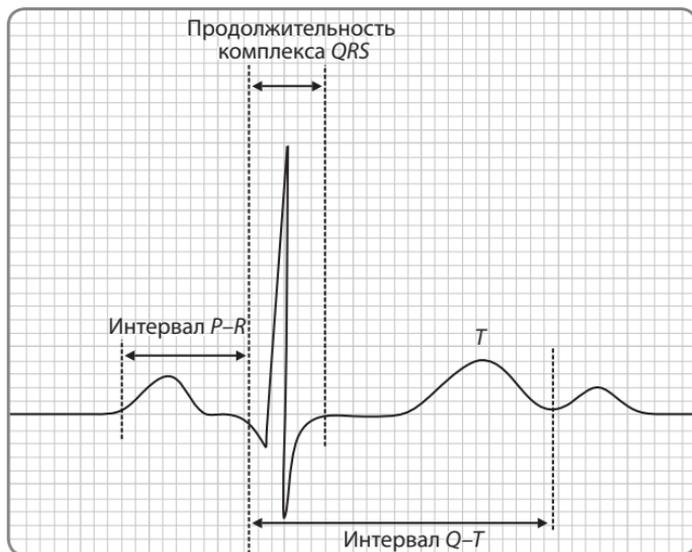


Рис. 2.13. Интервалы ЭКГ в норме

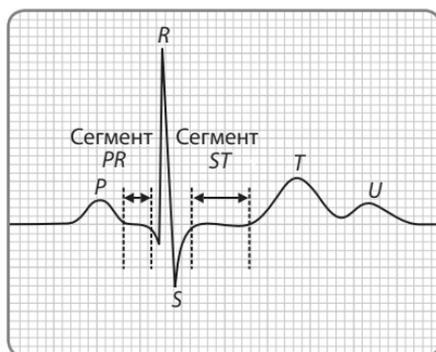


Рис. 2.14. Сегменты ЭКГ в норме

Интервал Q-T

Интервал Q-T измеряется от начала зубца Q до окончания зубца T (см. рис. 2.13). Если измерение интервала Q-T проводится до окончания зубца U, интервал обозначается как интервал Q-U. В интервал Q-T входит общая продолжительность зубцов комплекса QRS, сегмента ST и зубца T. Поскольку зубцы комплекса QRS отражают процессы деполяризации желудочков, а зубец T — реполяризации желудочков, интервал Q-T можно считать отражением электрической систолы желудочков. Пример подсчета скорректированного интервала Q-T ($Q-T_c$) приведен на рис. 2.15.

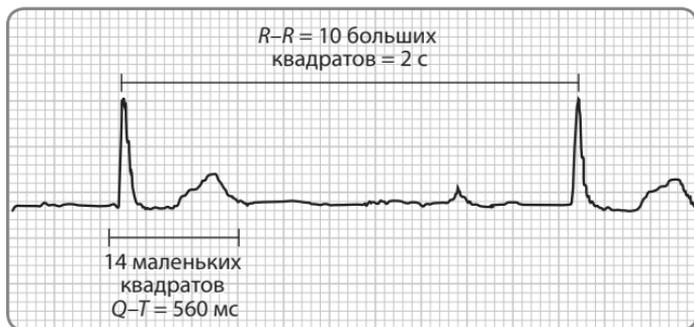


Рис. 2.15. Измерение интервала $Q-T$

- Интервал $Q-T$ в данном случае составляет 14 маленьких квадратов (длительность маленького квадрата — 40 мс), то есть 560 мс.
- Интервал $R-R$ составляет 10 больших квадратов, то есть 2 с (интервал $R-R$ измеряется в секундах)¹:

$$Q-T_c = \frac{Q-T}{\sqrt{R-R}} = \frac{560}{\sqrt{2}} = \frac{560}{1,4} = 400 \text{ мс.}$$

Таким образом, в приведенном примере интервал $Q-T$ удлинён, но при коррекции с учетом очень медленного сердечного ритма (у данного пациента полная поперечная блокада сердца с числом сокращений желудочков 30 уд./мин) его значение составляет 400 мс и находится в пределах нормы.

Зубец U отражает процессы реполяризации волокон Пуркинье, поэтому анализ интервала $Q-U$ позволяет дополнительно определить время реполяризации волокон системы Пуркинье.

Сегмент ST

Сегмент ST — это отрезок изолинии между окончанием зубца S и началом зубца T (см. рис. 2.14). Точка на ЭКГ, в которой заканчивается комплекс QRS и начинается сегмент ST , называется *точкой соединения*, или *точкой J* (см. рис. 2.10). Изменения сегмента ST могут встречаться при различных патологических состояниях, включая ишемическую болезнь сердца.

¹ При подсчете длительности интервала $Q-T$ принимают во внимание расстояние между зубцами R и используют специальную формулу. — Прим. ред. перев.