

Глава 1

НОРМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММА

1.1. Электрическая активность сердца и происхождение нормальной электрокардиограммы

Электрокардиограмма (ЭКГ) является графическим выражением изменений во время интегральной электрической активности сердца. Все параметры, характеризующие ЭКГ, определяются следующими главными условиями:

- а) электрической активностью отдельных возбудимых структур сердца (потенциалы клеток);
- б) последовательностью суммирования потенциалов отдельных клеток во времени на протяжении всего периода электрической активности сердца;
- в) влиянием на интегральную электрическую активность сердца электрических свойств тканей и сред, находящихся на пути распространения электрических импульсов от сердца к электродам, с помощью которых регистрируется ЭКГ;
- г) особенностями примененной системы электрокардиографических отведений.

Потенциалы сердца

Мышца сердца состоит из двух основных видов клеток — клеток сократительного миокарда (кардиомиоцитов) и клеток специализированной системы формирования и проведения импульсов. Клеточная мембрана разделяет внутреннее содержимое клетки и внеклеточную среду. Концентрация ионов, участвующих в процессах деполяризации и реполяризации кардиальных клеток, по обе стороны клеточной мембраны существенно отличается: ионов натрия почти в 10 раз больше во внеклеточной жидкости, а ионов калия почти в 30 раз больше во внутренней среде клетки. В состоянии покоя клеточная мембрана непроницаема для ионов натрия и частично проницаема для ионов калия. Внутренняя поверхность клеточной мембраны кардиомиоцита в состоянии покоя имеет отрицательный заряд ($-85...-95$ мВ), соответственно, наружная поверхность мембраны заряжена положительно. Потенциал покоя может быть зарегистрирован, если один из электродов гальванометра ввести внутрь клетки, а другой электрод поместить на наружной поверхности клеточной мембраны (рис. 1).

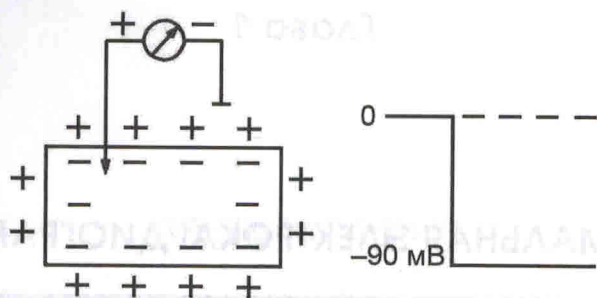


Рис. 1. Регистрация потенциала покоя в момент трансмембранного введения в клетку положительного электрода

Электрод, называемый активным или дифференциальным (положительным), соединен с положительным полюсом регистрирующего прибора, а неактивный, или индифферентный (отрицательный), электрод — с отрицательным полюсом. При условии, что на положительный полюс регистрирующей системы подается больший потенциал, а на отрицательный — меньший, отклонение записи направлено вверх, при обратных условиях — вниз. В связи с этим в момент введения в покоящуюся клетку дифференциального электрода на положительный полюс прибора подается отрицательный потенциал внутренней поверхности клеточной мембраны, и уровень регистрации смещается вниз (регистрация тока покоя).

При возбуждении клетки проницаемость ее мембраны для разных ионов изменяется. Процесс деполяризации кардиомиоцитов связан с открытием быстрых натриевых каналов мембраны, через которые в клетку по градиенту концентрации перемещаются положительно заряженные ионы натрия (I_{Na}). Это приводит к изменению полярности внутренней и наружной поверхностей ее мембраны: внутри клетки за 1–2 мс формируется положительный потенциал 30–50 мВ, на наружной же поверхности клеточной мембраны возникает отрицательный заряд. Такое быстрое перераспределение зарядов вызывает крутое отклонение записи вверх, превышающее нулевую линию (фаза 0 потенциала действия).

Вслед за короткой фазой деполяризации начинается длительный период реполяризации — постепенное уменьшение величины отрицательного заряда на поверхности клеточной мембраны, а затем восстановление на ней положительного потенциала покоя. Процесс реполяризации протекает с различной скоростью и разделяется на несколько фаз (рис. 2). Первая фаза потенциала действия — быстрая начальная реполяризация, обусловленная входением в клетку ионов калия через I_{K_0} -каналы мембраны, в результате чего внутренняя поверхность клеточной мембраны получает небольшой отрицательный потенциал.

Вторая фаза потенциала действия значительно более продолжительна (150–200 мс) и характеризуется достаточно медленным изменением величины заряда клеточной мембраны в сторону более отрицательных величин.

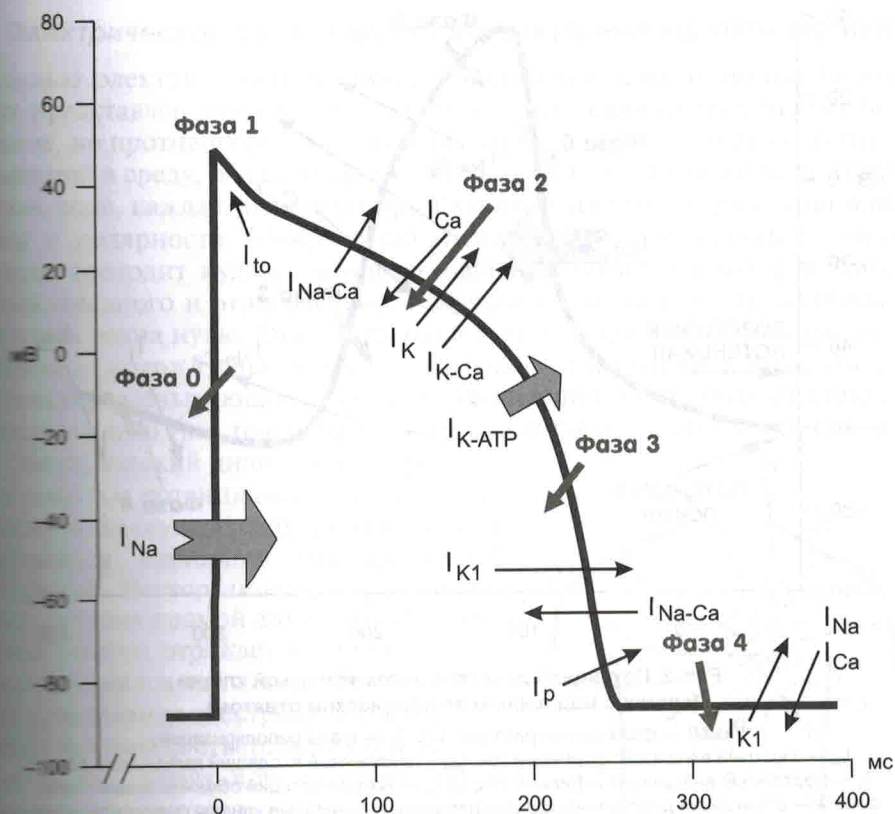


Рис. 2 Потенциал действия кардиомиоцита (клетки с быстрым электрическим ответом).

Фаза 0 — фаза деполяризации; 1, 2, 3, — фазы реполяризации;

I_{Na} — быстрый входящий натриевый ток; I_{Ca} — медленный входящий кальциевый ток;

I_K — медленный выходящий калиевый ток; I_{Na-Ca} — натрий-кальций обменывающий насос;

I_{K-ATP} — АТФ-зависимые калиевые каналы; I_{K1} — калиевые каналы входящего выпрямления;

I_{K-Ca} — калиевый ток через кальций-активируемые каналы с низкой проводимостью;

I_{to} — быстрые транзиторные K^+ -каналы выходящего тока

Фаза 0 обусловлено поступлением в цитоплазму клетки через медленные каналы мембраны положительных ионов кальция (ток I_{CaL}) и выходом из клетки ионов калия (ток I_K). В связи с этим 2-я фаза потенциала действия (фаза медленной реполяризации) регистрируется в виде медленно снижающегося «сплода». В процессе 3-й фазы потенциала действия (конечная реполяризация) происходит возврат ионов, участвовавших в процессах деполяризации в места их максимальной исходной концентрации: калий возвращается в клетку, кальций и натрий выводятся во внеклеточную среду. Во время 3-й фазы регистрируется сравнительно быстрое снижение кривой записи к исходному уровню потенциала покоя (восстанавливается статическая поляризация клетки в состоянии ее покоя). В начале 4-й фазы потенциала действия осуществляется перезарядка мембраны клетки для подготовки к очередному сокращению.

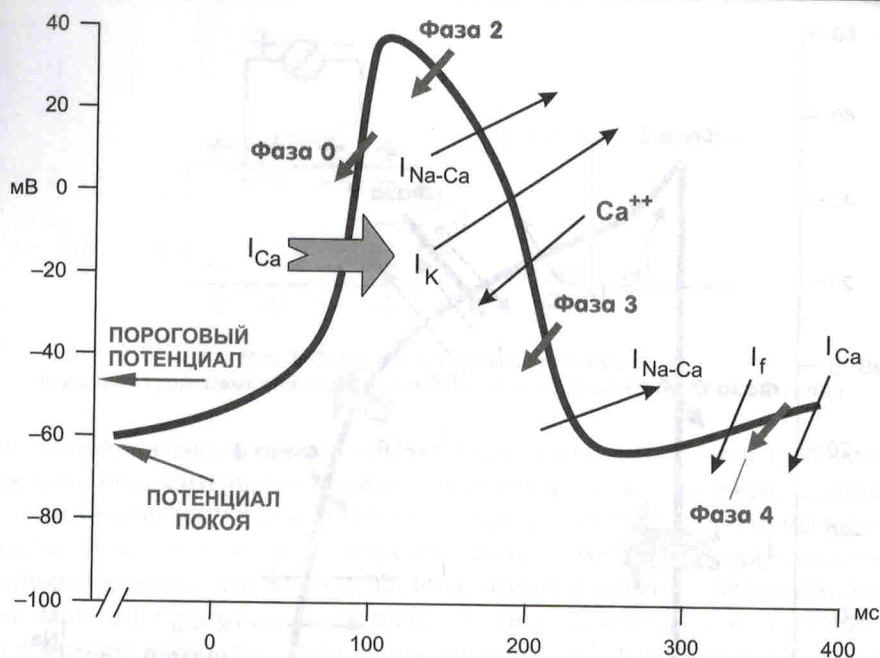


Рис. 3. Потенциал действия автоматической клетки (клетки с медленным электрическим ответом).

Фаза 0 — фаза деполяризации; 1, 2, 3, — фазы реполяризации;
 I_{Na} — быстрый входящий натриевый ток; I_{Ca} — медленный входящий кальциевый ток;
 I_{K} — медленный выходящий калиевый ток; I_{Na-Ca} — натрий-кальций обменивающий насос;
 фаза 4 — спонтанная диастолическая деполяризация; I_f — ионные каналы смешанного типа, обеспечивающие проведение как ионов натрия, так и ионов калия в 4-й фазе потенциала действия клеток с медленным электрическим ответом синусового узла

Клетки сократительного миокарда и проводящей системы сердца характеризуются существенными различиями электрических процессов, что выражается в разной амплитуде, продолжительности и форме их потенциала действия (рис. 3). В специализированных клетках синусового узла во время 4-й фазы происходит процесс спонтанной диастолической деполяризации, лежащий в основе автоматизма этих клеток, т. е. способности к выработке электрических импульсов. Данный процесс осуществляется за счет входящих в клетку через медленные каналы мембраны ионов Na и Ca (каналы I_f и I_{CaT}) и выхода во внеклеточную среду ионов калия (тоже через каналы I_f). В результате спонтанной диастолической деполяризации потенциал мембраны автоматической клетки постепенно смещается от уровня потенциала покоя ($-55...-65$ мВ) до порогового уровня ($-45...-55$ мВ), при достижении которого начинается быстрая деполяризация мембраны — фаза 0 потенциала действия. В основе деполяризации автоматических клеток лежит медленный входящий кальциевый ток через I_{CaL} -каналы мембраны. Более медленно, чем в кардиомиоцитах, происходят и фазы реполяризации автоматических клеток, хотя ионные токи в обоих типах клеток практически идентичны.

Электрическое поле сердца и его векторные характеристики

Моделью электрической активности отдельной клетки миокарда может быть представлен диполь — т. е. система, состоящая из двух равных по величине, но противоположных по знаку зарядов. Вокруг такой системы, помещенной в среду, обладающую электропроводностью, возникает электрическое поле, каждая точка в котором имеет потенциал определенной величины и полярности. Между отрицательным и положительным зарядами диполя проходит нулевая изопотенциальная линия, на которой влияние положительного и отрицательного зарядов уравновешены и величина потенциала равна нулю. Эта линия разделяет электрическое поле на две половины — положительную (все точки которой имеют положительные потенциалы, уменьшающиеся по мере увеличения расстояния от диполя) и отрицательную (все точки которой имеют отрицательные потенциалы).

Электрический диполь характеризуется разностью потенциалов, т. е. он создает электродвижущую силу, которая может выражаться векторной (направленной) величиной. Вектор диполя изображается в виде отрезка прямой линии со стрелкой. Длина вектора отражает величину разности потенциалов диполя, а стрелка указывает направление электродвижущей силы: начало вектора соответствует отрицательному заряду диполя, конец со стрелкой — направлению в сторону положительного заряда (рис. 4).

При одновременном существовании нескольких диполей их электродвижущие силы взаимодействуют по закону сложения векторов. Параллельные векторы суммируются как алгебраические величины. Направленные под углом друг к другу векторы складываются путем совмещения их начала в одну точку и построения параллелограмма; диагональ такого параллелограмма является суммарным (результатирующим) вектором.

На поверхности мышечного волокна, находящегося в состоянии покоя, разности потенциалов нет (ток покоя можно зарегистрировать лишь с помощью электрода, введенного внутрь клетки). При появлении возбуждения в каком либо участке мышечного волокна, на границе возбужденной и невозбужденной области его появляются диполи, которые вместе с волной возбуждения перемещаются на «гребне» этой волны. Если дифференциальный (положительный) электрод обращен к положительному заряду диполя, то регистрируется отклонение кривой вверх от изолинии (положительный зубец). Если же дифференциальный электрод обращен к отрицательному заряду диполя, то возникает отклонение вниз (отрицательный зубец).

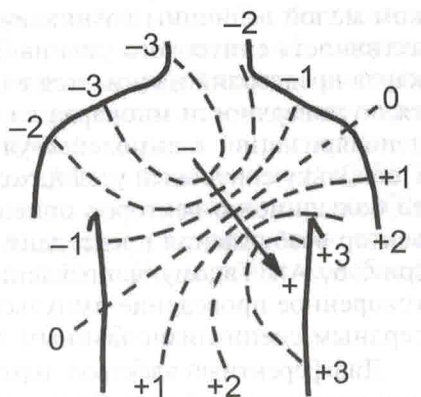


Рис. 4. Распределение потенциалов сердца на поверхности тела (результатирующий диполь сердца)