

Влияние электродов на качество регистрации биопотенциалов

Д.В. Дроздов

ООО «Альтоника», г. Москва

Д.В. Дроздов – канд. мед. наук, эксперт по медицинским вопросам компании «Альтоника» (117638, г. Москва, ул. Сивашская, д. 2А).
Тел.: (495) 797-3070. E-mail: dddv@altonika.ru.

В статье рассматриваются электрохимические процессы, происходящие на электродах при регистрации биосигналов, даются определения и описывается физический смысл основных характеристик электродов. Эффекты, возникающие на электродах, носят универсальный характер и представляют интерес во всех областях электрофизиологии. Даются рекомендации по выбору электродов и уменьшению неблагоприятного влияния паразитных потенциалов, возникающих на электродах, на качество регистрируемых сигналов.

Ключевые слова: электроды для регистрации биопотенциалов, электрофизиология.

Effect of electrodes on the quality of registration of biopotential

Drozdzov D.V.

The article describes electrochemical processes observed on the electrodes during biosignals recordings. There are some definitions and explanations of chemical and electrical processes. Those effects are the same in all areas of biosignal registration practice and important in wide range of medical examinations. The article provides some recommendations for optimal electrode choice and minimisation of electrode noises.

Key words: electrodes for recording nerve action potential, electrophysiology.

При регистрации биосигналов электроды являются первым этапом преобразования сигнала. Отведение биопотенциалов предполагает преобразование токов, обусловленных разницей концентраций и движением ионов в биологических средах, в ток, обусловленный движением электронов в металле электрода и соединительных проводниках регистратора. Уже это очевидное положение определяет сложность и многообразие происходящих в месте контакта биологической структуры и электрода процессов.

В статье рассматривается влияние электродов на качество регистрации биосигналов. Необходимо отметить, что обсуждаемые ниже вопросы в равной степени касаются всех методов исследований, при которых происходит съём биопотенциалов как с поверхности тела, так и с электродов, погруженных в биологические структуры.

Утверждение, что свойства, надлежащее состояние и правильная эксплуатация электродов являются основой для адекватной регистрации биосигналов не является гиперолой. Даже при высоком качестве других элементов системы регистрации электроды являются первым этапом преобразования биосигналов и возможные искажения, внесенные ими, как правило, уже не могут быть без потерь качества компенсированы в других элементах регистрирующей системы.

Модель электрохимических процессов на электродах

Вначале рассмотрим модель (рис. 1), в которой металлический электрод находится в растворе соли (электролите). При прохождении электрического тока, пусть и минимальной величины, характерной для биообъектов, через границу электролит–металл происходят химические реакции окисления и восстановления металла электрода. Эти реакции протекают и при отсутствии внешнего электрического тока.

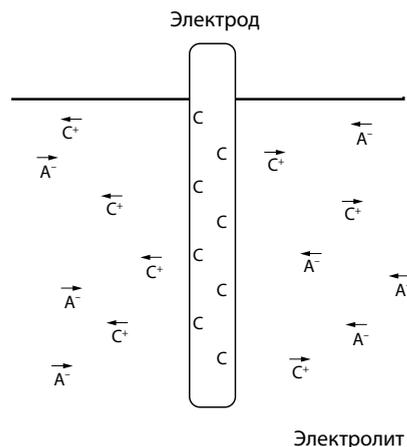


Рис. 1. Модель электрохимических процессов на электродах

Таблица 1. Стандартные электродные потенциалы некоторых металлов при 25 °С

| Металл | Реакция | Потенциал E^0 , В |
|---------|--|------------------------------|
| Цинк | $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ | -0,763 |
| Никель | $Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$ | -0,230 |
| Свинец | $Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2e^-$ $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | -0,126 0,0 по определению |
| Серебро | $Ag + Cl^- \rightarrow AgCl + e^-$ | +0,223 |
| Медь | $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ $Cu \rightarrow Cu^+ + e^-$ | +0,340 +0,552 |
| Золото | $Au \rightarrow Au^{3+} + 3e^-$ $Au \rightarrow Au^+ + e^-$ | +1,420 +1,680 |

При протекании реакций окисления и восстановления концентрация ионов в непосредственной близости от электрода изменяется относительно средней концентрации ионов в растворе в целом. Это приводит к возникновению разности потенциалов между раствором электролита в целом, части раствора, непосредственно прилегающей к электроду, и в конечном счете, электродом. Данное явление называется электродным потенциалом.

Очевидно, что электродный потенциал зависит как от материала электрода, так и от состава электролита. Оба этих фактора, а также температура, концентрация ионов в растворе, свойства растворителя и другие факторы, определяют характеристики протекающих химических реакций в непосредственной близости от электрода, которые и создают электродный потенциал.

В качестве эталона для измерения электродных потенциалов выбран потенциал химической реакции $H_2 \leftrightarrow 2H \leftrightarrow 2H^+ + 2e^-$ (так называемый водородный электрод). По отношению к потенциалу водородного электрода все электроды могут быть разделены на поляризуемые и неполяризуемые (в табл. 1 приведены величины стандартных электродных потенциалов для ряда металлов). Естественно, идеальных поляризуемых или неполяризуемых электродов не существует, однако с определенной долей приближения те или иные конструкции электродов можно отнести к одному из этих классов.

Электрохимические процессы в реальных электродных системах

В реальных электродных системах рассмотренные выше процессы протекают с участием значительного числа дополнительных внешних воздействий. Ниже дается краткий обзор наиболее существенных из этих факторов.

Прежде всего необходимо учитывать, что при регистрации биопотенциалов электрод располагается не в бесконечном объеме однородного электролита,

а на поверхности или в толще биологической ткани, которая сама по себе не может быть электрически однородной (на рис. 2 представлена схема электрода, находящегося на поверхности неповрежденной кожи), что создает значительные сложности для моделирования происходящих процессов. Например, эпидермис, имеющий относительно дермы высокое электрическое сопротивление, может выступать в роли полупроницаемой мембраны, по разные стороны которой наблюдается различие концентраций ионов, что приводит к возникновению потенциалов, сходных с потенциалами поляризации.

Регистрация биопотенциалов всегда ведется между несколькими электродами (минимум двумя), поэтому свойства всех электродов, участвующих в формировании измерительной электрической цепи, должны рассматриваться в совокупности. При различных свойствах электродов одной измерительной цепи вследствие разной поляризации возможно возникновение разности межэлектродных потенциалов (РМЭП). Усилители биопотенциалов проектируются таким образом, чтобы было можно без существенных искажений сигнала компенсировать РМЭП. Однако, при превышении РМЭП допустимого для данного усилителя значения возможно искажение регистрируемого сигнала или даже переход усилителя в состояние «насыщения», когда регистрация сигнала сигналов без искажений вообще становится невозможной (рис. 3).

Величина РМЭП может быть относительно стабильной; но при определенных условиях она может изменяться с течением времени. Такое явление носит название дрейфа РМЭП. С практической точки зре-

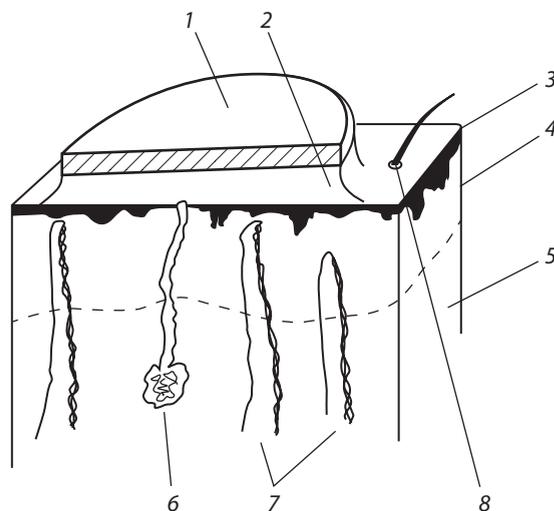


Рис. 2. Схема строения кожи и наложенного на нее плоского электрода:

1 — электрод; 2 — контактная проводящая среда; 3 — эпидермис; 4 — дерма; 5 — подкожные ткани; 6 — потовая (сальная) железа; 7 — капиллярная петля; 8 — волос и его луковица

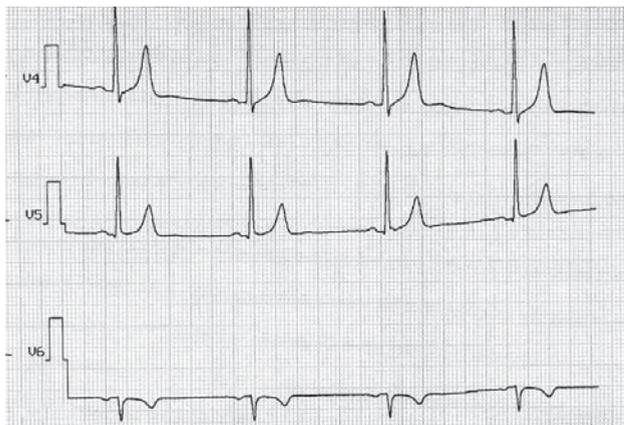


Рис. 3. Искажение формы ЭКГ в отведении V6. Превышение РЭМП вызвало «насыщение» усилителя, подключенного к электроду С6, в результате чего в данном отведении выводится потенциал, близкий по форме к потенциалу точки Вильсона. Отметим, что одновременно в отведениях V4 и V5 наблюдается дрейф изолинии, который, возможно, обусловлен дрейфом РЭМП

ния дрейф РЭМП должен рассматриваться отдельно для случаев кратковременной и продолжительной регистрации биосигналов. При при значительном изменении РМЭП во время регистрации будет наблюдаться дрейф изоэлектрической линии (рис. 4). При длительной регистрации из-за увеличения величины РМЭП возможно насыщение усилителей с неизбежными искажениями сигнала.

Если поверхность электрода электрически неоднородна, то наблюдаются области с локальными изменениями концентраций ионов. Поскольку электрохимическая система электрода постоянно находится в динамическом равновесии (т.е. химические реакции в ней протекают постоянно, но уравновешивают друг друга), то такие локальные изменения концентрации ионов приведут к возникновению локальных токов, часть которых может оказаться в полосе частот полезного сигнала. Эта часть токов будет обуславливать т.н. электродный шум. Электрическая неоднородность поверхности электрода может возникнуть из-за банального загрязнения поверхности электрода.

При смещении электрода может происходить перераспределение зарядов вблизи его поверхности. Результатом является кратковременное изменение электродного потенциала, которое продолжается до тех пор, пока равновесие в электрохимической системе электрода не установится вновь. Этот эффект носит название электромеханического шума движения. Изучение сигналов артефактов движения показало, что их спектр в основном лежит в той же области, что и основные биологические сигналы. Этот факт делает использование фильтрации неэффективным методом уменьшения влияния шума

движения на качество сигнала. Более эффективны для борьбы с электромеханическим шумом движения неполяризуемые электроды, снижение сопротивления эпидермиса, предотвращение прямого контакта электрода с кожей (плавающий электрод), стабилизация положения электрода относительно биообъекта и расслабление мышц в процессе регистрации. Наибольшую проблему электромеханический шум представляет при длительном мониторинге биосигналов.

Немаловажной характеристикой электродов, обусловленной перераспределением ионов вблизи электрода, является устойчивость к длительному малому постоянному току. Во входных цепях усилителей биосигналов могут возникать очень небольшие по величине постоянные токи (стандарты нормируют предельные величины этих токов на уровнях единиц наноампер). Любой постоянный ток будет приводить к перераспределению ионов в растворе электролита, что в свою очередь приведет к изменению электродного потенциала. Наибольшую проблему представляет данный эффект при длительной регистрации биосигнала. неполяризуемые электроды, как правило, имеют более высокую устойчивость к этому негативному эффекту.

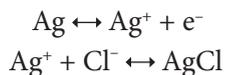
Для электрокардиографической практики также важно восстановление свойств электродов и всей регистрирующей системы после разряда дефибриллятора. При протекании через электродные цепи значительных по величине токов возникает существенное перераспределение концентраций ионов вблизи электродов. Не рассматривая детально происходящие при этом процессы, отметим при сочетании неблагоприятных факторов возможно заметное увеличение РМЭП с последующей стабилизацией потенциалов. Это может привести к невозможности регистрации ЭКГ в течение некоторого времени. Существенно, что возобновление отображения ЭКГ в течение установленного стандартом периода (5 с) возможно только с использованием неполяризуемых или малополяризуемых электродов при выполнении специальных требований к конструкции кабеля пациента и входным цепям электрокардиографического оборудования.

Основные типы неполяризуемых электродов

Наиболее распространёнными неполяризуемыми электродами в настоящее время являются хлор-серебряные (Ag/AgCl). Распространены две основных конструкции таких электродов. В первой конструкции серебряную (или, для снижения цены, посеребрённую) пластину покрывают электролитическим способом слоем хлорида серебра. В дру-

гой распространенной конструкции на проводящую подложку наносится смесь порошков серебра и хлорида серебра, которая спекается с подложкой.

Вне зависимости от конструкции в хлорсеребряном электроде протекают две реакции:



Первая реакция приводит к окислению серебра с выделением электрона. Вторая реакция начинается непосредственно после образования иона серебра и приводит к получению его хлорида. Ион хлора для этой реакции должен поступить из окружающего электролита, поэтому достаточная концентрация ионов хлора в окружающем электролите является необходимым условием работы такого электрода. Для большинства биологических жидкостей и применяемых проводящих сред это условие выполняется. При изменении направления тока реакции также протекают в обратном направлении.

Хлорид серебра нерастворим в воде, поэтому поверхность электрода мало разрушается в процессе эксплуатации. Однако, хлорид серебра обладает высоким электрическим сопротивлением, поэтому его слой не должен быть слишком толстым. С другой стороны, повреждение поверхностного слоя электрода может привести к нарушению работы хлорсеребряного электрода.

Подчеркнем, что условием нормального функционирования хлорсеребряного электрода является достаточная концентрация ионов хлора в контактной проводящей среде. Однако в последние годы появились разработки накожных электродов, не требующих обязательного использования электродного геля или другой жидкой проводящей среды. Поверхность таких электродов имеет специально выполненные микронеровности с регулярной или нерегулярной структурой, которые позволяют добиться хороших свойств электродов без проводящего геля. Между тем, при использовании таких электродов в некоторых случаях может быть необходимо нанесение на кожу маловязкой проводящей среды (вода, физиологический раствор).

Кроме низкого потенциала поляризации относительно биологических жидкостей, положительными качествами хлорсеребряных электродов являются низкий уровень собственных шумов и стабильность импеданса (полного сопротивления) в зависимости от частоты. Эти свойства важны для регистрации биосигналов малых амплитуд в широком диапазоне частот (электроэнцефалография, поздние потенциалы на ЭКГ и т. п.).

Хлорсеребряные электроды хорошего качества также достаточно быстро восстанавливают свой потенциал после внешних электрических воздействий, что может произойти, во время дефибриляции.

В качестве неполяризуемых для непродолжительных исследований используют и никелевые (Ni) электроды. Для снижения цены часто слой никеля наносится на более дешевый металл (например, медь). При длительной регистрации накопление в электродной проводящей среде солей никеля может приводить к изменению электрических свойств электрода. Также не до конца исследованы возможные токсические эффекты соединений никеля.

Кроме электрических свойств электродов существенными для эксплуатации характеристиками являются размеры, форма, способ крепления на поверхности биообъекта и другие механические и эргономические качества. При выборе электродов надо обращать внимание на соответствие этих характеристик области применения электродов в конкретных условиях.

Практические рекомендации по выбору и использованию электродов

На электрические свойства электродов при регистрации биопотенциалов оказывают непосредственное влияние:

- соответствие конструкции электродов и системы их крепления методу исследования;
- материал и покрытие электрода;
- состояние и электрическая однородность поверхности электрода;
- свойства электродной проводящей среды, при использовании прокладок — толщина и свойства прокладки;
- электрические свойства тканей биообъекта, с которых осуществляется съём биопотенциалов;
- воздействие на биообъект электрических токов и полей, включая электростимуляцию, дефибрилляцию, исследование импеданса тканей и др., а также наводок от другого электрического оборудования.

При одновременном использовании нескольких электродов для синхронной регистрации нескольких биосигналов, что является самым частым случаем в современной диагностической практике, необходимо учитывать следующие требования:

- все электроды комплекта должны быть одной электрохимической системы;
- все электроды комплекта должны иметь приблизительно одинаковую степень износа (следствием этих требований является необходимость одновременной замены всех электродов комплекта);
- для всех электродов необходимо использовать качественную и одинаковую проводящую среду.

Несоблюдение этих требований может привести к возникновению различных потенциалов (природа которых рассмотрена выше) между электродами, что неизбежно снизит качество регистрации сигналов.

В табл. 2 суммированы данные о влиянии основных видов потенциалов, возникающих на электродах, на качество регистрации биосигналов. Понимание природы этих потенциалов важно для выбора мер уменьшения их неблагоприятного влияния на качество регистрации сигналов. Необходимо отметить, что помехи могут наблюдаться как изолированно, так и в совокупности, что затрудняет распознавание их природы.

В процессе эксплуатации следует своевременно производить очистку электродов. Очистка необходима не только для соблюдения требований санэпидрежима, но для сохранения приемлемого качества регистрации сигналов. Очистка должна производиться по инструкции производителя. Высыхание на поверхности электродов электроодного геля или иных загрязнений часто приводит к коррозии электродов. Абсолютно недопустимо использовать для чистки электродов твердые и острые предметы, абразивы, жесткие мочалки, агрессивные жидкости и т.п. Механические или химические воздействия на поверхность электродов приводят к порче и необратимому ухудшению электрохимических свойств электрода.

В завершении обзора проблем регистрации биосигналов, связанных с электродами, отметим, что любые многоразовые электроды имеют ограниченный деструкцией их поверхностного слоя срок службы. Проявлением деструкции покрытия может быть изменение цвета, появление на поверхности электродов нехарактерных отложений, обнажение подложки и другие повреждения,

которые могут быть легко и своевременно выявлены осмотром. Наиболее вероятные места деструкции покрытия — углы и кромки электродов, где покрытие подвержено наиболее интенсивному износу. При выявлении повреждений даже одного электрода, необходимо заменять весь комплект или подбирать на замену электрод с теми же характеристиками, что и заменяемый.

Заключение

Таким образом, электроды оказывают существенное влияние на качество регистрации биосигналов. Несоответствие характеристик электродов требованиям регистрации конкретного сигнала может приводить к артефактам в записях или имитировать неисправности самой регистрирующей аппаратуры. Для своевременного выявления и предотвращения таких случаев необходимо понимание происходящих электрохимических процессов в местах контакта электродов и биологических тканей.

Список литературы

1. Медицинские приборы. Разработка и применение. М.: Медицинская книга, 2004.
2. ГОСТ 24878-81 (СТ СЭВ 2483-80). Электроды для съема биоэлектрических потенциалов. Термины и определения. Введено 01.07.81.
3. ГОСТ 25995-83. Электроды для съема биоэлектрических потенциалов: Общие технические требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1984.
4. Зайченко К.В. Съём и обработка биоэлектрических сигналов. С-Пб: ГУАП, 2001. 140 с.
5. ANSI/AAMI EC12:2000/(R)2005 – Disposable ECG electrodes.

Таблица 2. Виды помех при регистрации биопотенциалов, возникающих вследствие различных потенциалов на электродах

| Потенциал | Возможное негативное влияние |
|--|---|
| Разность межэлектродных потенциалов | Перегрузка усилителей, ограничения и другие искажения сигналов |
| Дрейф разности межэлектродных потенциалов | Дрейф изолинии в одном или нескольких отведениях |
| Электродный шум | Появление на записи шумов в различных диапазонах частот (чаще всего, в высокочастотной области) |
| Элекромеханический шум движения | Дрейф изолинии Отдельные импульсные помехи Высокочастотный постоянный и периодический шум |
| Поляризация электрода или тканей биообъекта (например, эпидермиса) вследствие протекания малого постоянного тока | Перегрузка усилителей, ограничения и другие искажения сигнала Дрейф изолинии |
| Поляризация вследствие протекания значительных токов (например, при дефибриляции) | Перегрузка усилителей, ограничения и другие искажения сигнала Дрейф изолинии |