

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ ЭЛЕКТРОПУНКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

СООБЩЕНИЕ 1. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

М.Ю. Готовский, Ю.Ф. Перов

Центр интеллектуальных медицинских систем «ИМЕДИС» (г. Москва)

Electrochemical processes at electrodes during electropunctural diagnostics. Publication 1. Direct current

M.Yu. Gotovskiy, Yu.F. Perov

Center of intellectual medical systems «IMEDIS» (Moscow, Russia)

РЕЗЮМЕ

В аналитическом обзоре рассмотрены электрохимические процессы, протекающие на измерительных электродах при электропунктурной диагностике на границе раздела электрод-электролит и в тканях организма. Проведена современная оценка влияния и роли этих процессов в изменениях электрических свойств кожи на постоянном электрическом токе. Содержатся критические замечания по поводу некоторых методов электропунктурной диагностики.

Ключевые слова: электропунктурная диагностика, электрохимические электродные процессы, двойной электрический слой, контакт электрод-кожа, поляризация.

RESUME

Analytical review covers electrochemical processes taking place at measurement electrodes during electropunctural diagnostics at the electrode-electrolyte interface and in body tissues. Modern evaluation of influence and role of these processes in measurement of skin electrical properties utilizing direct current is given. Critical notes on certain methods of electropunctural diagnostics are presented.

Keywords: electropunctural diagnostics, electrochemical processes at electrodes, dual electrical layer, skin-electrode interface, polarization.

ВВЕДЕНИЕ

Электропунктурная диагностика (ЭПД) находит широкое применение как в клинической практике, так и при решении некоторых практических задач, связанных с оценкой действия на организм человека неблагоприятных факторов окружающей среды [1–4]. Такое положение обусловлено тем, что ЭПД является одним из наиболее простых и в то же время быстрых методов диагностики, который может использоваться с приемлемой во многих случаях точностью и воспроизводимостью.

В основе диагностического применения электропунктуры лежат экспериментально обоснованные представления о том, что отдельные зоны и точки кожи косвенно отражают уровень функционирования различных органов и систем организма человека по висцеро-кутанным и кутано-висцеральным связям [5]. Оценка состояния этих зон и точек кожи при ЭПД осуществляется косвенным образом путем измере-

ния их электрических свойств – сопротивления при использовании постоянного электрического тока и сопротивления и емкости (импеданса) при переменном/импульсном токе.

В настоящее время опубликовано значительное число монографий, обзоров и статей, посвященных описанию метода ЭПД с различными модификациями и его применению в различных областях клинической медицины и в медико-биологических исследованиях. Однако в большинстве из них основное внимание уделяется вопросам клинической диагностики и в меньшей степени анализу механизмов прохождения диагностического электрического тока (постоянного или переменного) от измерительных электродов через точки измерений на коже и происходящим при этом электрохимическим процессам [6]. Именно эти процессы и являются причиной основного затруднения при реализации практически всех контактных методов ЭПД, заключающегося

в нестабильности электрических параметров зоны контакта измерительного электрода с поверхностью кожи, что приводит к значительным погрешностям. Несомненно, сводить все метрологические трудности при ЭПД только к протекающим на электродах электрохимическим процессам было бы неправильным, поскольку есть и аппаратные погрешности. Однако приборному обеспечению измерений при ЭПД в различных публикациях уделяется существенно больше внимания, чем электродным процессам на границе раздела измерительный электрод-кожа [7, 8].

В настоящем сообщении будут проанализированы лишь некоторые моменты из тех сложных электрохимических процессов, протекающих на границе раздела «металлический электрод-поверхность кожи» при прохождении постоянного электрического тока, которые имеют отношение к методу ЭПД и влияющие на результаты диагностики. Предметом рассмотрения будут электрические свойства контакта «измерительный электрод-кожа» при прохождении постоянного электрического тока, а целью – обратить внимание на роль и участие этих процессов в методах контактной ЭПД. Современный анализ электродных процессов и природы явлений, происходящих при контакте и измерении электрических параметров кожи при ЭПД, требует понимания основных положений электрохимии. Более подробно все эти вопросы рассмотрены в специальной литературе по электрохимической кинетике и физико-химических свойствах кожи [9–12].

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ЭЛЕКТРОДАХ И В ТКАНЯХ

Вся поверхность кожи, в том числе и в месте соприкосновения с металлическим электродом, покрыта в результате потоотделения (ощутимой и неощутимой перспирации) тонким слоем водного раствора различных веществ, в первую очередь ионов, который, по существу, является электролитом. В связи с этим контакт «электрод-кожа» можно рассматривать как соприкосновение двух фаз – металла и раствора электролита, на границе раздела которых протекают электрохимические электродные процессы.

В соответствии с законами электрохимии при таком контакте на границе фаз возникает избыточный по сравнению с объемом электрический заряд, что сопровождается возникновением двойного электрического слоя. образова-

ние двойного электрического слоя происходит в том случае, когда ионы электролита в результате ориентации при электростатическом притяжении не могут подойти к электроду на расстояние ближе своей сольватной оболочки. Образующееся при этом пространство между поверхностью электрода и проходящей через центры ионов электролита плоскостью является плотной частью двойного электрического слоя или слоем Гельмгольца. По своему строению двойной электрический слой подобен плоскому конденсатору, расстояние между обкладками которого равно радиусу гидратированного иона, благодаря чему средняя емкость такого молекулярного конденсатора составляет большую величину – порядка $0,01 \text{ Ф/м}^2$. В растворе электролита в результате теплового движения ионов ориентирующее влияние электрического поля нарушается, что приводит к образованию диффузной части двойного электрического слоя или слоя Гюи, который размыт по сравнению с плотной частью и обладает свойствами объемного заряда. В принципе двойной электрический слой образуется на границах раздела любых двух фаз, в том числе и на границе раздела отличающихся по своим электрическим свойствам (проводимость и емкость) биологических тканей, плазматических и внутриклеточных мембран и т.д. [13].

В результате протекающих на границе раздела металл-электролит процессов электрод приобретает потенциал, который в отсутствии внешнего электрического тока является равновесным или обратимым. Такой потенциал имеет электрод, который находится в растворе собственной соли, например, Ag/AgCl , Zn/ZnCl , и когда на межфазовой границе происходит обмен носителями зарядов, и протекает равновесный ток обмена. Однако при протекании внешнего электрического тока через границу электрод-электролит его потенциал отклоняется от равновесного, что приводит к электродной поляризации и изменению величины тока обмена. В общем случае процесс поляризации складывается из последовательно протекающих стадий, связанных с изменением концентрации ионов в диффузной части двойного электрического слоя (концентрационная поляризация) и перехода зарядов через границу раздела (поляризация перенапряжения). В первом случае в формировании поляризации играет роль скорость диффузии из глубины раствора к его поверхности, во втором – процессы окисления-восстановления. Основ-

ное различие между концентрационной поляризацией и поляризацией перенапряжения определяет величина потенциала, который образовался на электроде при протекании внешнего электрического тока. Таким, например, является потенциал на электроде порядка 1 В, выше которого происходит электролиз, сопровождающийся выделением водорода на платиновом электроде в равновесном по кислороду 0,85 % растворе NaCl [14]. В результате происходит пересечение электронами границы раздела «электрод-электролит», что приводит к протеканию реакции окисления или восстановления в зависимости от полярности внешнего электрического тока. Прохождение постоянного электрического тока приводит к возникновению на электродах электродвижущей силы, противодействующей прохождению тока. Обратная электродвижущая сила обусловлена концентрацией положительных зарядов (катионов) и отрицательно заряженных (анионов) на соответствующих электродах.

Все эти процессы при измерении с контактными металлическими электродами приводят к тому, что электрод при включении внешнего электрического тока ведет себя как конденсатор с параллельным сопротивлением, который быстро заряжается, а затем относительно медленно разряжается. Емкостные свойства границы «электрод-электролит» обусловлено поляризационной емкостью, которая представлена двойным электрическим слоем (плотной и диффузной частями), а шунтирующее сопротивление – величиной тока обмена. В образовании поляризационной емкости также принимают участие и процессы концентрации катионов и анионов на соответствующих электродах. Таким образом, в системе электрод-электролит в начальный момент прохождения постоянного электрического тока, его величина резко возрастает, что в полярографии носит название бросковый ток [15]. Спустя некоторое время, которое зависит от величины тока, природы электролита и материала электродов, величина тока снижается и затем устанавливается на каком-то определенном уровне. Аналогичные процессы протекают не только на поверхности контакта измерительного электрода с кожей, но и во всех тканях, через которые в той или иной степени протекает ток.

В первых экспериментальных исследованиях было замечено, что при включении постоянного электрического тока сопротивление тканей небольшое, однако со временем оно быстро

повышается и регистрируемый ток падает [16]. Этот процесс сопровождается возникновением противоположно направленной электродвижущей силы, связанной с поляризацией, и первоначально ее появление объясняли увеличением сопротивления ткани. Однако впоследствии выяснилось, что электродвижущая сила связана с образованием внутри тканей дополнительных зарядов в результате накопления ионов противоположного знака на границах раздела тканей с разными электрическими характеристиками. Таким образом, к статической электрической емкости, имеющейся в любой ткани организма и обусловленной ее структурой, добавляется и поляризационная емкость. Противоположно направленная электродвижущая сила регистрируется в виде поляризационных или остаточных потенциалов, медленно спадающих после выключения тока. В экспериментах, которые были выполнены при измерениях на коже установлено, что спустя 1 мин. после выключения тока величина остаточных потенциалов достигала 0,2–0,4 В, которые медленно (в течение десятков минут) спадали по гиперболическому закону [17]. Необходимо отметить, что тот сложный комплекс электрохимических поляризационных процессов, происходящих на электродах и в тканях организма при ЭПД и влияющих на воспроизводимость и точность диагностики, разделить или устранить практически невозможно. Однако для повышения воспроизводимости и объективности ЭПД необходимо добиваться стабильности электродных процессах, их учета при измерениях и минимизации.

В качестве примера рассмотрим, каким образом эти положения были решены для ограничения нестабильности электрических параметров контакта электрод-кожа в двух основных методах ЭПД по Р. Фоллю и И. Накатани, причем в каждом по-своему. В обоих методах время нахождения активного электрода на коже (измерений), а также материал и конструкция электрода однозначно определены, что позволило свести к минимуму погрешности контакта «электрод-кожа» и, по-существу, измеряться бросковый ток, характеризующийся большей стабильностью и информативностью. В дополнении к этому, в методе Р. Фолля в результате дозированного давления электрода на поверхность кожи клетки эпидермиса и, в особенности рогового слоя вносящего наибольшие искажения из-за изменяющейся гидратации, механически уплотняются, что позволяет

получить сравниваемые диагностические результаты. В методе И. Накатани используется жидкостной контакт кожи с измерительным электродом, через чашечку с тампоном, смоченный раствором электролита – 0,9 % хлористого натрия. Все это позволило Р. Фоллю и И. Накатани создать воспроизводимые и объективные методы ЭПД, о чем свидетельствует, например, совпадение измерительных шкал у этих, казалось бы, разных методов [7].

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ СПОРНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОПУНКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ

В заключение нельзя не коснуться одного из направлений, которое существовало в ЭПД в середине 1970-х годов в нашей стране. Вся абсурдность этого направления, заключающегося в оценке функционального состояния акупунктурой точки, состояла в том, что точка акупунктуры в то время рассматривалась как самостоятельная и, по непонятной причине, не связанная с организмом человека структура. Основы этого, продержавшегося несколько лет недоразумения, изложены В.Г. Никифоровым, считавшим, что «...активные точки кожи здорового человека должны иметь одинаковый показатель проводимости при действии отрицательного и положительного тока. Это – нормальные точки, или проводники, не требующие лечебного вмешательства. Точки с асимметричной проводимостью (более низкой на положительном токе, чем на отрицательном) именуются автором точками-полупроводниками. Задача электротерапии заключается в выравнивании проводимости точек-полупроводников» и далее «Лечение продолжается до тех пор, пока во всех точках величина отрицательного и положительного заряда не станет одинаковой, т.е. пока точки не станут электронейтральными» [18, с.26]. Попутно отметим, что в цитате полностью сохранена терминология автора.

Справедливости ради следует сказать, что это положение непосредственно не афишировалось, но являлось подтекстом во многих статьях, методиках и разрабатываемой диагностической и лечебной аппаратуре. Так, например, в «Инструкции по использованию прибора ПЭП-1» (прибора для электропунктуры), излагается содержание приказа МЗ СССР № 303/40 от 25 марта 1976 г. «О внедрении в лечебную практику электропунктуры и микроэлектрофореза в БАТ», где метод оценки

функционального состояния точек акупунктуры осуществляется следующим образом. Точка считалась «нормальной», когда величина тока положительной полярности или была равна току отрицательной полярности, или незначительно от него отличалась. В тех случаях, когда ток при положительной полярности был больше или меньше, чем отрицательной, то точка считалась «точкой-полупроводником» и подлежала так называемому «лечению», т.е. воздействию до восстановления равенства токов. Однако и это еще не все – были еще так называемые «точки-изоляторы» у которых величина тока определялась только при одной полярности, и которые также подлежали лечению.

В целом зависимость величины тока от напряжения на электроде или поляризационная кривая носит нелинейный характер, но при малой величине потенциале порядка десятков мВ на ней можно выделить начальный линейный участок. Повышение потенциала на электроде и возникновение перенапряжения смещает рабочую точку на поляризационной кривой в область нелинейности, что приводит к появлению у границы раздела выпрямляющих свойств. Иными словами вольтамперная характеристика границы раздела «металл-электролит» совпадает с кривой, которая характерна для выпрямляющих свойств диода [19]. В результате разной подвижности ионов (анионов и катионов) в растворе полностью или частично диссоциированного электролита характер развития во времени выпрямляющих свойств границы раздела «металл-электролит», а, следовательно, и постоянного тока на аноде и катоде будет различной. В живом организме происходят аналогичные процессы, и при измерениях сопротивления тканей на постоянном токе определяется их выпрямляющая способность (коэффициент выпрямления), как отношении прошедших через ткань в прямом и обратном направлении [15].

Вероятно, что эти явления не учитывались при разработке метода вольтамперных характеристик точек акупунктуры, метрологические аспекты которого были изложены в статье, опубликованной в сборнике, посвященном медико-биологическим и физико-техническим основам рефлексотерапии [20]. Современный анализ показывает, что при проведении подобных измерений в основном регистрировались выпрямляющие свойства границы раздела «электрод-электролит», а вклад собственных свойств точек кожи был крайне неопределен-

ным. Нелинейность и гистерезисность полученных вольтамперных кривых объясняется мемристорным эффектом, что впоследствии и подтвердилось [21]. Однако по стечению обстоятельств в этом же сборнике была опубликована другая статья, в которой в качестве модели для изучения механизмов проводимости точек акупунктуры «...был выбран насыщенный раствор электролита, полученный на основе соли NaCl, где контакт между электродом и электролитом осуществлялся через бумажный фильтр» [22, с.228]. Характер вольтамперных характеристик в такой модели точек акупунктуры, т.е. системы электрод-электролит-электрод, в этих измерениях был аналогичен предыдущим и в них также проявлялся мемристорный эффект, хотя собственно кожа (ее точка) в этих измерениях и не присутствовала. Здесь нельзя не обратить внимание на тот факт, что по методу В.Г. Никифорова можно было бы вполне «вылечить» такую точку, пропуская ток «...до тех пор, пока во всех точках величина отрицательного и положительного заряда не станет одинаковой...» [18, с.26] или иными словами до тех пор пока и катионы, и анионы в результате разной подвижности и концентрации через определенное время «лечения» не соберутся у положительного и отрицательного электродов, в результате чего величины токов сравняются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного анализа показана роль и участие электрохимических процессов протекающих на границе раздела «металлический электрод-поверхность кожи» при прохождении постоянного электрического тока при контактных методах ЭПД. Проведена современная оценка влияния этих электрохимических процессов на объективность и воспроизводимость результатов диагностики при измерениях электрических свойств точек кожи на постоянном токе. Показана ошибочность некоторых ранее разработанных методов ЭПД, причиной чему являлось недостаточное внимание к влиянию электрохимических процессах на измерительных электродах, а также и поляризационным процессам, происходящим как в области контакта «электрод-кожа», так в подлежащих тканях. Вероятно, междисциплинарный поход к проблеме ЭПД позволит повысить ее диагностическую ценность как одного из перспективных диагностических методов традиционной медицины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Портнов Ф.Г. Электропунктурная рефлексотерапия. 3-е изд. перераб. и доп. – Рига: Зинатне, 1988.
2. Самохин А.В., Готовский Ю.В. Электропунктурная диагностика и терапия по методу Р. Фолля. – М.: ИМЕДИС, 1995.
3. Неборский А.Т., Неборский С.А. Электрокожная проводимость в оценке функционального состояния организма человека (экспериментально-теоретическое обоснование). – М.: Медицина, 2007.
4. Готовский М.Ю., Косарева Л.А., Перов Ю.Ф., Федоренко С.И. Электропунктурный вегетативный резонансный тест. – М.: ИМЕДИС, 2013.
5. Берсенева В.А. Структура висцерокутанного сенситивного синдрома (патогенез зон Захарьина-Геда) // Журнал невропатологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 1979. – Т.79, №7. – С.884–889.
6. Colbert A.P., Spaulding K., Larsen A., Ahn A.C., Cutro J.A. Electrodermal activity at acupoints: literature review and recommendations for reporting clinical trials // J. Acupunct. Meridian. Stud. – 2011. – Vol.4, N.1. – P.5–13.
7. Жуков В.В., Курик М.В. Прикладная метрология в электропунктурных измерениях // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2004. – №8-9. – С.53–60.
8. Бойцов И.В. Сравнительный анализ инструментальных методов пунктурного тестирования // Рефлексотерапевт. – М., 2011. – № 2-3. – С. 54–68.
9. Алдерсонс А.А. Механизмы электродермальных реакций. – Рига: Зинатне, 1985.
10. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Электрохимия. – М.: Высшая школа, 1987.
11. Edelberg R. Electrical properties of skin // Bio-physical Properties of the Skin / H.R. Elden ed. – John Wiley&Sons, New York, 1971. – P.513–550.
12. Boucsein W., Fowles D.C., Grimnes S., Ben-Shakhar G., Roth W.T., Dawson M.E., Filion D.L. Publication recommendations for electrodermal measurements // Psychophysiology. – 2012. – Vol.49, N.8. – P.1017–1034.
13. Grimnes S., Martinsen Ø.G. Bioimpedance and Bioelectricity Basics. – New York: Academic, 2008.
14. Березовский В.А. Напряжение кислорода в тканях животных и человека. – Киев: Наукова думка, 1975.
15. Делимарский Ю.К., Городынский А.В. Электродные процессы и методы исследования в полярографии. – Киев, Изд-во АН УССР, 1960.
16. Бурлакова Е.В., Вепринцев Б.Н., Колес О.Р., Кригер Ю.А. Исследование биоэлектрических явлений в тканях и клетках // Практикум по общей биофизике в восьми выпусках / под общей ред. проф. Б.Н. Тарусова. – М.: Высшая школа, 1961. – Вып. III-IV.
17. Ipser J., Konecny M., Kossowiczova M. // Fysiatri. Vestnik, 1961, 39, 129. (Цит по С.С. Духин. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. – Киев: Наукова думка, 1975).
18. Вельховер Е.С., Никифоров В.Г. Основы клинической рефлексологии. – М.: Медицина, 1984.
19. Schwan H.P. Linear and nonlinear electrode polarization and biological materials // Ann. Biomed. Eng. – 1992. – Vol.20, N.3. – P.269–288.

20. Всевожский Л.А. Метрологические аспекты исследования электрических параметров точек акупунктуры // Теория и практика рефлексотерапии. Медико-биологические и физико-технические аспекты. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1981. – С.180–188.

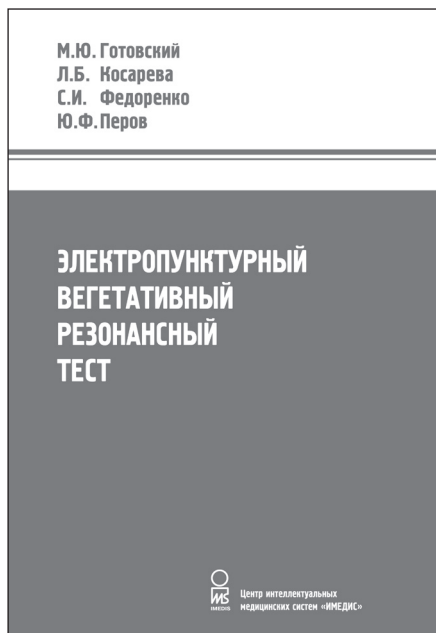
21. Johnsen G.K., Lütken C.A., Martinsen Ø.G., Grimnes S. Memristive model of electro-osmosis in skin // Phys. Rev. E. – 2011. – Vol.83, N.3, Pt.1. – 031916. – 5 p.

22. Мурцовкин В.А. Исследование моделей точек акупунктуры в различных условиях эксперимента // Теория и практика рефлексотерапии. Медико-биологические и физико-технические аспекты. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1981. – С.288–232.

Адрес автора

К.т.н. Готовский М.Ю.

Ген. директор ООО «ЦИМС «ИМЕДИС»
info@imedis.ru



ISBN 978-5-87359-105-3

Готовский М.Ю., Косарева Л.Б.,
Федоренко С.И., Перов Ю.Ф.

ЭЛЕКТРОПУНКТУРНЫЙ ВЕГЕТАТИВНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ТЕСТ.

– М.: ИМЕДИС, 2013. – 236 с.

Коллективная монография посвящена одному из распространенных методов электропунктурной диагностики – вегетативному резонансному тесту.

В книге дан обзор возникновения и развития основных методов электропунктурной диагностики. Подробно изложены методические основы и технология проведения вегетативного резонансного теста. Рассмотрены важные аспекты тестирования общего состояния организма, его функциональных систем, состояния обменных процессов, этиологических факторов заболеваний. Отдельно рассмотрено влияние факторов окружающей среды на состояние здоровья человека. Приведены основные принципы и рекомендации по использованию метода вегетативного резонансного теста в оценке и подборе терапевтических воздействий.

Проанализированы современные диагностические подходы и особенности проведения вегетативного резонансного теста для решения различных диагностических задач. Рассмотрены принципы постановки диагноза и развернутая схема индивидуального диагностического алгоритма.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия при преподавании метода электропунктурного вегетативного резонансного теста на курсах общего и тематического усовершенствования, а также при самостоятельном изучении метода врачами всех специальностей.