

В. В. АРТЕМЬЕВ

РИТМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ РЕАКЦИИ

(Представлено академиком Л. А. Орбели 2 VII 1948)

Настоящая работа возникла из наблюдений за периодическими колебаниями электрических потенциалов, которые происходят в мозговой ткани животных и человека. Основной задачей наших экспериментов являлось выяснение вопроса: в какой мере периодические колебания электрического потенциала мозговой ткани могут быть обусловлены определенными физико-химическими процессами, наблюдаемыми *in vitro*. Нам удалось обнаружить, что в некоторых физико-химических системах при протекании окислительно-восстановительной реакции происходят ритмические изменения потенциала. Амплитуда этих колебаний при определенных условиях опыта выражается в сотых долях милливольт, а периоды их — от 5—6 до 16 в секунду. Ритмы могут продолжаться в течение 1—2 час., причем порядок частот этих осцилляций мало отличается в той или иной системе и носит довольно постоянный характер.

Периодические изменения разности потенциалов, возникающие между двумя электродами, регистрировались при помощи шлейфного осциллографа после предварительного усиления (4-каскадный усилитель с емкостно-реостатной связью). Сопротивление входа усилителя равно 2 МΩ, постоянная времени — 0,25 сек.

Ритмичные колебания потенциала с частотой 8 в секунду (рис. 1, а) наблюдались при погружении серебряно-хлорированного электрода в 1% раствор H_2SO_4 , в то время как второй электрод, соединенный с усилителем, был опущен в раствор NaCl. Оба раствора соединялись между собой платиновым, серебряным или серебряно-хлорированным мостиком. Ритмичные осцилляции, достигающие частоты 16 в секунду (рис. 1, б), появлялись в том случае, если одним электродом была поверхность ртути, а другим служила платина, и оба электрода находились в растворе $K_3Fe(CN)_6$.

Серии экспериментов, проведенных с этими системами, позволили сделать предположение, что ритмические колебания разности потенциалов между электродами совершаются в том случае, если на одной из электродных поверхностей, погруженной в раствор, происходит окислительно-восстановительная реакция. Для дальнейшего исследования этого явления был взят процесс окисления органического вещества — гидрохинона.

Для ускорения процесса окисления гидрохинона к его раствору добавлялся КОН; необходимо было выяснить, будет ли разность потенциалов между платиновыми или серебряными электродами, погруженными только в раствор КОН, иметь колебательный характер. Как видно из рис. 1, в, в этом случае никаких колебаний потенциала

не появлялось. Если такие же электроды погружались в 1% раствор гидрохинона, то через 2—3 мин. появлялись ритмические колебания потенциала (рис. 1, *з, д*), которые вначале постепенно увеличивались в амплитуде, а через 3—4 мин. начинали уменьшаться. Значительно более длительное время ритмы можно было наблюдать в том случае, когда один электрод соприкасался с поверхностью раствора, где окисление шло быстрее, на что указывало образование коричнево-окрашенного слоя жидкости, а другой был соединен с внутренней прозрачной частью раствора. Точно так же ритмы были более стойки и в том случае, если к части раствора у одного электрода добав-

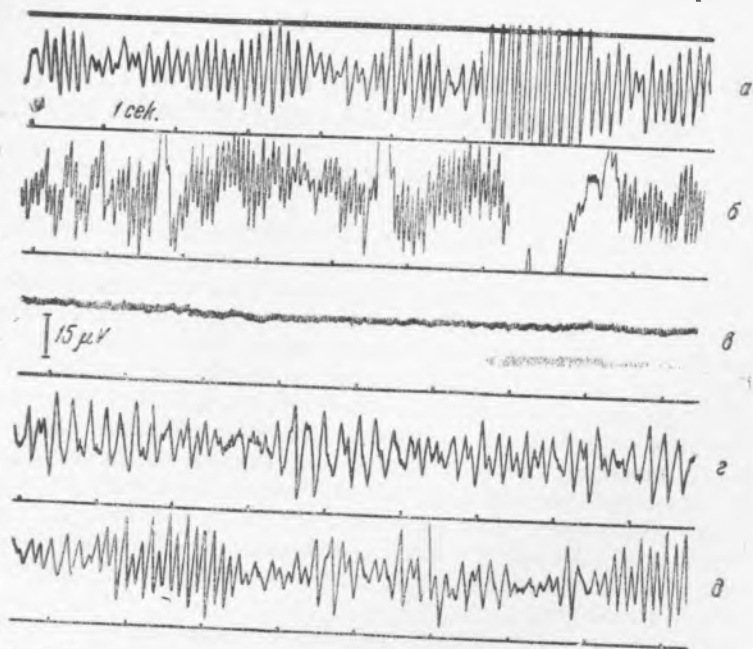


Рис. 1. Ритмические колебания электрического потенциала. *а* — в системе Ag — AgCl; в растворе H_2SO_4 ; *б* — Hg + $K_3Fe(CN)_6$; *в* — серебряные электроды в растворе KOH; *г, д* — серебряные электроды в растворе гидрохинона. Отметка времени — 1 сек.

лялось несколько капель KOH, чем ускорялся процесс окисления. Стало очевидным, что для получения длящихся большее время ритмических изменений потенциала в участках раствора, прилегающих к электродам, необходима различная скорость окисления вещества.

Следующий вопрос, возникший по ходу экспериментов, заключался в том, какую роль в происхождении ритмических колебаний потенциала играет металлический электрод, соприкасающийся с окислительно-восстановительной системой. Для ответа на этот вопрос была проведена серия опытов, в которых при окислении гидрохинона с раствором соприкасался не металл, а электрод, хорошо известный в физиологии как неполяризующийся электрод Дюбуа-Реймона.

В описываемых опытах каолин замешивался на 5% растворе NaCl. Ватные фитильки от каолиновых пробок опускались в 1% раствор гидрохинона, причем предварительно один из них смачивался 5% раствором NaCl, а другой 10% раствором KOH.

Периодические колебания потенциала, возникавшие в такой системе, совершались в течение 3—5 мин. и имели небольшую амплитуду. Причина, очевидно, состояла в том, что раствор довольно быстро перемешивался и отсутствовала определенная граница между окисляющимся веществом и частью раствора, где этот процесс был замедлен.

Ритмические колебания потенциала, возникающие при окислении гидрохинона и длящиеся продолжительное время, оказалось возможным получить в том случае, если в стакан с раствором гидрохинона опускалась стеклянная трубка, доходящая до дна сосуда. Таким способом в одном стакане жидкость удавалось разделить на две части, сообщающиеся между собой только через щель, образованную в одном месте между дном сосуда и опущенной трубкой. Наибольшая величина отверстия щели равнялась 1 мм. При такой постановке опыта влажный ватный электродный фитилек, смоченный КОН, находился внутри трубки, а другой, смоченный раствором NaCl, вне ее.

После того как электроды, соединенные с усилителем, погружались в раствор гидрохинона, начиналось наблюдение изменений потенциала. Ритмические колебания развивались постепенно в течение 10 мин. Вначале появлялись отдельные группы периодических колебаний потенциала, которые постепенно достигали обычной своей амплитуды (рис. 2). Ритмические колебания в течение долгого времени (от 1 до 1,5 часа) сохраняли как свою частоту, так и амплитуду без изменений (рис. 2, д).

Постоянная разность потенциалов, существующая между электродами, в среднем составляла 10—25 mV, причем катод создавался у электрода, вата которого была смочена КОН. При изменении методом компенсации постоянного потенциала всей системы частота периодических колебаний оставалась стабильной, а их амплитуда при этом несколько изменялась.

Рассмотрение ритмических колебаний электрического потенциала в окислительно-восстановительной системе приводит к вопросу, в какой связи и зависимости находятся они с хорошо известным в физической химии окислительно-восстановительным потенциалом?

Ритмические колебания электрического потенциала, описанные выше, очевидно, имеют в своей основе иной механизм возникновения, чем стандартный окислительно-восстановительный потенциал. Для получения колебательных изменений электрического потенциала нами был использован процесс окисления гидрохинона. Водный раствор последнего брался как исходное вещество, которое не одновременно окислялось во всей своей массе, а изменялось только в определенном участке, о чем можно было судить по изменению окраски раствора. Таким образом, в одной части раствора шло окисление молекул гидрохинона и превращение их в хинон, а в другой этот процесс был значительно замедлен. Создавались условия для быстрого непрерывного изменения концентрации веществ в области одного электрода и замедленного изменения в области другого. Таким образом, если стандартный окислительно-восстановительный потенциал образуется в равновесной окислительно-восстановительной системе, то ритмические колебания потенциала создаются в результате неравномерного процесса окисления гидрохинона. Это заставляет предполагать, что окисление вещества в такой системе создает не равновесное, а динамическое состояние, находящее свое выражение в изменении электрического потенциала, который имеет периодический синусоидальный характер.

Спонтанные электрические колебания в мозговой ткани имеют также синусоидальный характер, главным образом, в интервале частот 6—16 в секунду. Они наблюдаются как в головном мозгу человека, так и в нервных ганглиях беспозвоночных животных^(1, 2). Причины, обуславливающие их наличие в нервной ткани, до сих пор недостаточно ясны. П. П. Лазарев^(3, 4) высказывал предположение, что электрические колебания в мозгу зависят от протекающих там периодических химических реакций и аналогичны периодическим реакциям, которые известны в неорганической природе (образование „колец

Лизеганга⁴). Однако это предположение имело чисто формальный характер, так как оно не было связано с представлением о каких-либо химических реакциях, протекание которых могло бы иметь место в живой ткани. Описанная в настоящем сообщении окислительно-восстановительная реакция представляет собой тип реакции, имеющей широкое биологическое значение.

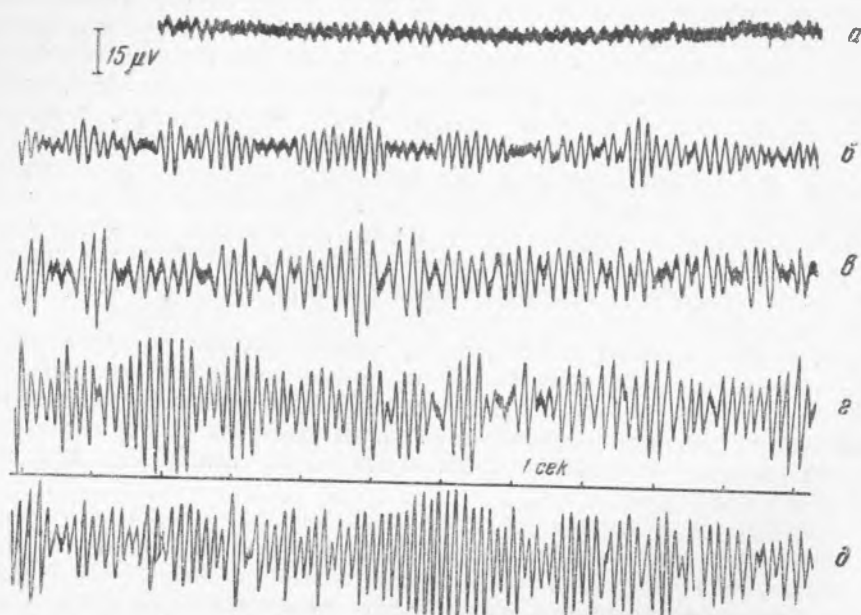


Рис. 2. Последовательное развитие колебаний электрического потенциала при окислении гидрохинона; а — через 1 мин.; б — 5 мин.; в — 8 мин.; г — 11 мин.; д — 20 мин.

Необходимым условием возникновения периодических колебаний потенциала в такой системе, как указывалось ранее, является разность в скорости течения окислительно-восстановительной реакции между двумя электродами. Наличие подобного типа отношений весьма вероятно в нервной системе, и особенно в тех ее отделах, которые обладают высоким окислительным обменом. Как известно, именно для этих отделов центральной нервной системы характерны ясно выраженные „спонтанные“ колебания электрических потенциалов правильной формы и указанного выше порядка частот. Теоретически вполне вероятно, что градиент скорости таких окислительно-восстановительных реакций между двумя электродами, достаточный для появления периодических колебаний потенциала, может быть обнаружен не только между разными отделами мозговой ткани, но также между разными участками одной и той же нервной клетки. Современные гистохимические исследования, говорящие о неоднородности химического состава различных участков нервной клетки (в частности⁵), дают основания для такого предположения.

Физиологический институт
им. И. П. Павлова
Академии Наук СССР

Поступило
28 VI 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ E. D. Adrian, J. Physiol., 91, 66 (1937). ² В. В. Артемьев, Тр. Ин-та им. И. П. Павлова, 4 (1948). ³ П. П. Лазарев, Современные проблемы биофизики, 1945. ⁴ П. П. Лазарев, Исследования по адаптации, 1947. ⁵ А. Л. Шабадаш, Бюлл. эксп. биол. и мед., 18, в. 6, 56 (1944).