

Л. В. НИКИТИН

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛУХА*

(Представлено академиком Л. А. Орбели 16 VIII 1948)

1. Мною в 1936 г. ⁽¹⁾ было показано, что звук, действующий на коллодиевую мембрану, разделяющую два электролита, вызывает изменения потенциала мембраны, соответствующие частоте действующего звука. Прохождение через мембрану извне приложенного постоянного тока увеличивает амплитуду изменений потенциала. Тогда же было высказано предположение об электрокинетической природе открытых явлений. Звук, действуя на струи жидкости, вытекающие из капилляров, вызывает соответствующие изменения в потенциале потока. Чтобы подтвердить такое предположение, следовало показать, что для улавливания звука необходимо капиллярное строение мембран и наличие условий, благоприятствующих электрокинетическим явлениям. Действительно, все попытки получить улавливание звука маслоподобными — бейтнеровскими мембранами оканчивались неудачно. Далее оказалось, что в условиях, неблагоприятных для развития электрокинетических явлений, улавливания звука не наблюдалось. Так, не улавливали звука резиновые мембраны в водных растворах электролитов, коллодиевые мембраны, подвергнутые денитрации, и т. п.

С целью экспериментального обоснования сделанного предположения о значении электрокинетики для улавливания звука были поставлены следующие опыты. В порах мембран, не улавливающих звука, были образованы осадки веществ, обладающих способностью как к отрицательной адсорбции, так и к специфической ионной адсорбции. Отложение кремневой кислоты железистосинеродистой меди в порах, например, резиновой пленки или пергаментной бумаги сделало их улавливающими звук.

Зависимость диапазона улавливаемых частот от тонкости строения мембран, а также некоторые другие явления привели к мысли рассматривать улавливание звука мембранами как электрохимическую модель явлений, происходящих в улитке при действии на нее звука, — как модель, утверждающую электрохимическую природу улавливания звука в улитке.

2. При опытном исследовании мембран были обнаружены явления, поддерживающие предложенное моделирование и расширяющие его возможности.

а) Было отмечено прекращение улавливания мембраной звуковых колебаний определенной частоты при продолжительном действии их на мембрану.

* В экспериментальной части работы приняла участие А. Л. Иванова.

Приведем в качестве примера данные, полученные при действии звука на пергаментную бумагу с осадками кремнекислоты в ее порах и помещенную в 0,1 N растворы CuSO_4 . Электроды медные.

Такая мембрана улавливала звук в пределах от 40 до 160 герц. Звук частотой 80 герц после 60 мин. его действия на мембрану перестал улавливаться. После этого частота действующего звука была увеличена до 100 герц. Звук такой частоты улавливался той же мембраной в течение 45 мин. После прекращения улавливания звука этой частоты звук частотой 150 и 50 герц продолжал еще улавливаться. Можно предположить, что звук определенной частоты разрушает отложения кремнекислоты в порах капилляров только определенного диаметра.

Описанные здесь явления напоминают разрушение определенных участков основной мембраны улитки и прекращение восприятия соответствующих частот.

б) Явление адаптации. На основании опытов а) возникло предположение, что если поставить мембрану в такие условия, которые могли обеспечить продолжающееся при действии звука образование осадка в ее порах, то продолжительное действие звука скажется только на снижении амплитуды колебаний потенциала, своеобразной адаптации улавливания звука мембраной. Можно было предполагать, что после прекращения действия звука наступит „отдых“, и при продолжающемся пропускании тока без звука мембрана восстановит свои первоначальные свойства. Опыты подтвердили это предположение. Если пергаментная бумага с отложениями кремнекислоты разделяет растворы HCl и Na_2SiO_3 , то при пропускании через нее тока возможно образование кремнекислоты в ее порах. При действии на мембрану в таких условиях звука амплитуда начальных изменений потенциала уменьшалась с течением времени, однако не падала до нуля, как это было в опытах а). После же „отдыха“ в начале повторного действия звука амплитуда достигала первоначальных значений.

3. В известном труде, посвященном слуху и речи, С. Н. Ржевкин (2) отмечает те вопросы, которые должны быть объяснены каждой теорией слуха, претендующей на полноценность.

Вопросы эти таковы:

- а) Объяснение восприятия высоты тона.
- б) Объяснение способности слуха к анализу сложных звуков.
- в) Объяснение пределов восприятия звуков по частоте и различия в чувствительности уха к различным частотам.
- г) Объяснение восприятия силы звука.
- д) Объяснение возникновения субъективных тонов.
- е) Объяснение явлений маскирования звуков.
- ж) Объяснение бинаурального эффекта.

Рассмотрим на основе электрохимической модели возможность ответов на эти вопросы.

а) Согласно релаксационной теории Я. И. Френкеля (3), окончания слухового нерва, разветвляющиеся в улитке наподобие гребешка, характеризуются не различными значениями частоты собственных колебаний, а различными значениями времени релаксации. Согласно электрохимической модели, релаксационные явления разыгрываются в порах капилляров (не предрешая вопроса о местонахождении таких капилляров). Уменьшение диаметра капилляров, увеличивая трение в них, благоприятствует максимуму поглощения энергии на более высоких частотах. Действительно, резина (небольшой диаметр пор в спиртовых растворах) может улавливать звук выше 200 герц, тогда как осадки, образованные в грубых порах пергаментной бумаги, улавливают звук (в тех же условиях) примерно только до 200 герц. Влияние диаметра пор на высоту улавливаемого звука отчетливо видно

также на коллоидных мембранах разной пористости. Наблюдаемые нами явления прекращения улавливания звука при продолжительном действии на мембрану одного и того же тона и явления адаптации находятся, по нашему мнению, в согласии с ионной теорией возбуждения П. П. Лазарева, если в качестве звукочувствительного вещества в нашей модели принимать кремнекислоту или железистосинеродистую медь, осажденные в порах мембраны. В реальном случае капилляров тканей таким звукочувствительным веществом могут быть, например, ионы, избирательно адсорбированные на стенках капилляров и определяющие их электрокинетический потенциал. Возможно также, что при этом происходит расширение пор капилляров, увеличивается проницаемость тканей, а также изменяются в неблагоприятную сторону и другие условия, влияющие на электрокинетическую.

б) и в) Анализ сложных звуков объясняется одновременно происходящими электрокинетическими явлениями в порах разного диаметра: различное время релаксации в таких порах объясняет различные пределы восприятия звуков по частоте и различие в чувствительности уха к различным частотам.

г) Ощущение громкости объясняется разной амплитудой перемещения частиц и, соответственно, разной величиной потенциала потока.

д) Возникновение субъективных токов может быть объяснено нелинейностью отношений между плотностью поляризованного тока и потенциалом мембраны или также нелинейностью отношений между скоростью перемещения частиц и действующей силой.

е) Маскирующее действие может быть объяснено тем, что маскирующий звук действует также и на те капилляры, которые в наибольшей степени подвержены действию маскируемого звука. Очевидно, что при этом амплитуда маскирующего звука должна быть больше амплитуды маскируемого звука.

ж) Бинауральный эффект может быть поставлен в связь с тем обстоятельством, что поляризованные мембраны являются микрофонами скорости, а не давления. Для выяснения этого обстоятельства нами были поставлены опыты, в которых улавливание звука поляризованными мембранами происходило в узлах и пучностях стоячей звуковой волны. Максимумы улавливания отмечались в пучностях.

В заключение следует сказать, что разное состояние жидкости в улиточном, вестибулярном и барабанном ходах, а также движение крови в капиллярах благоприятствуют самополяризации мембран, улавливающих звук.

4. Электрохимическое моделирование слуха дает основания для теории слуха, которую можно было бы назвать релаксационно-электрохимической теорией слуха.

Ленинградский институт
точной механики и оптики

Поступило
20 VII 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. В. Никитин, ЖЭТФ, 6, 190 (1936); Физиол. журн. СССР, № 4 (1948).
² С. Н. Ржевкин, Слух и речь, 1936, стр. 200. ³ Я. И. Френкель, ДАН, 59, 679 (1948).