

БИОФИЗИКА

С. О. МАИЗЕЛЬ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СЕТЧАТКИ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 6 IV 1950)

Электрический характер зрительного процесса настолько твердо установлен, что вряд ли он подлежит сомнению. Его начало связано с диссоциацией молекул фотопротеинов в светочувствительных клетках (колбочках и палочках) на ионы, которые, в зависимости от знака заряда, должны двигаться в противоположных направлениях.

Но такое упорядоченное движение ионов может происходить только при наличии электрического поля в сетчатке. Без него ионы могут двигаться лишь хаотически и регулярный зрительный процесс не сможет осуществиться.

Что такое поле действительно существует, показывают прямые опыты. Внутренняя поверхность сетчатки имеет положительный потенциал по отношению к склере (и пигментному эпителию). Разность потенциалов между указанными поверхностями достигает 4—10 мв, в среднем 7 мв.

Происхождение электрического поля сетчатки может быть объяснено следующим образом. Внутренняя поверхность склеры, граничащая с пигментным эпителием, содержит сеть капиллярных кровеносных сосудов. Кровь несет с собою различные вещества в состоянии частичной или полной диссоциации, в том числе ионы восстановителя распавшихся молекул фотопротеинов светочувствительных клеток.

Осмотическое давление отрицательных ионов заставляет их проходить сквозь стенки капилляров в пигментный эпителий, а положительные ионы не проходят сквозь стенки и остаются внутри капилляров. Выходят наружу ионы восстановителя, а также и другие отрицательные ионы.

Если бы не было внутри капилляров постоянного тока крови и прохождения эритроцитов, то остающиеся в капиллярах положительные ионы образовали бы с прошедшими наружу отрицательными ионами двойной электрический слой и дальнейший выход ионов в эпителий прекратился бы.

Однако ток крови и приходящие эритроциты уносят с собой положительные ионы частично или полностью, вследствие чего освободившиеся на наружной поверхности капилляров отрицательные ионы диффундируют в эпителий, а на их место выступают новые ионы из капилляров.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока прошедшие в эпителий и частично в сетчатку (повидимому, до *membrana limitans exterior*) ионы не создадут парциальное давление, равное осмотическому давлению этих ионов внутри капилляров. Тогда дальнейший приток ионов из капилляров прекращается.

В эпителии и отчасти в сетчатке образуется объемный заряд, состоящий из облачка отрицательных ионов, вследствие чего эпителий получает отрицательный потенциал по отношению к внутренней поверхности сетчатки. В сетчатке возникает электрическое поле, напряженность которого, особенно в центральной ямке, достигает нескольких десятых вольта (до 1 в) на сантиметр.

Если до сетчатки доходят光子, излучаемые каким-либо источником света, то в пределах площади изображения источника на сетчатке они пронизывают светочувствительные клетки и частично поглощаются молекулами фотопротеинов. При этом молекулы претерпевают диссоциацию на ионы.

В электрическом поле сетчатки отрицательные ионы в клетках направляются к первым синапсам, двигаясь с относительно большой скоростью. Положительные ионы перемещаются в обратном направлении, к оболочке внешних членников клеток. Между положительными ионами и облачком отрицательных ионов в сетчатке и эпителии образуется местное искажение поля со значительным увеличением напряженности.

Стенки клеток непроницаемы для положительных ионов, которые поэтому могут дойти только до оболочки, но не в состоянии пройти сквозь нее. Отрицательные же ионы из эпителия в местном поле начинают перемещаться к наружной поверхности оболочек, проникают сквозь стенки и образуют с положительными ионами нейтральные молекулы двух родов.

Если положительный ион притянет ион восстановителя, то образуется вновь нейтральная молекула фотопротеина, готовая поглотить фотон и опять распасться на два иона. Если же притянутый отрицательный ион окажется иным, то он также нейтрализует положительный заряд внутриклеточного иона, но при этом возникает неустойчивая молекула, которая просуществует некоторое, различное для разных фотопротеинов время и распадется опять на первоначальные составляющие ионы.

Освобожденный отрицательный ион второго рода направится под действием основного поля сетчатки к первому синапсу, а положительный снова притянет к себе отрицательный ион того или другого рода. Так будет продолжаться до тех пор, пока извне поступают в глаза光子.

Вероятность для положительного иона притянуть тот или иной род отрицательных ионов зависит от отношения их концентраций в объемном заряде эпителия и сетчатки. При данной, постоянной во времени яркости источника света это отношение определяет как количество наличных в каждый момент времени недиссоциированных молекул фотопротеина, так и количество готовых к самопроизвольному распаду неустойчивых молекул, образовавшихся в результате нейтрализации положительных ионов фотопротеина отрицательными ионами второго рода.

Ритмические импульсы в нервных волокнах образуются благодаря прохождению к первому синапсу отрицательных ионов любого происхождения, так что, при непрерывном распаде неустойчивых молекул, частота импульсов пропорциональна общей сумме чисел приходящих к первому синапсу отрицательных ионов от обоих родов веществ. Это определяет постоянство (если отвлечься, для упрощения, от неизбежных флуктуаций) частоты импульсов при неизменяющейся яркости, причем частота пропорциональна произведению из числа действующих фотонов n_e и статистически постоянного количества наличных в клетке молекул фотопротеина N .

Однако при внезапном уменьшении яркости (например, до нуля) распад неустойчивых молекул продолжается еще некоторое время.

При освещении сетчатки равновесное состояние электрического поля нарушается. Часть отрицательных ионов, находившихся в непосредственном соседстве со светочувствительными клетками, проникает внутрь

их и там нейтрализуется положительными ионами. На место исчезнувших ионов к клеткам проникаются ионы из более глубоких слоев эпителия. Благодаря этому из капилляров выступают новые ионы.

Устанавливается как бы поток отрицательных ионов от капилляров к клеткам и через короткое время, при неизменной внешней яркости, наступает опять равновесие, теперь уже подвижное. Меняется ли при этом заметно разность потенциалов сетчатки, и в какую сторону от темновых равновесных условий, пока еще трудно сказать.

Более детальное изучение электрического поля в сетчатке и процессов распада молекул фотореагентов и неустойчивых молекул дает возможность получить некоторые количественные соотношения, важные для понимания зрительного процесса.

Всесоюзный электротехнический институт
им. В. И. Ленина

Поступило
6 IV 1950