Доклады Академии наук СССР
1955. Том 103, № 5

БИОФИЗИКА

Н. И. ПИНЕГИН

НЕЗАВИСИМОСТЬ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПОРОГОВОГО ЧИСЛА КВАНТОВ ПРИ КОЛБОЧКОВОМ ЗРЕНИИ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 14 III 1955)

Спектральная чувствительность фовеальных колбочек простирается, по нашим измерениям, в пределах от $\lambda = 302$ мμ до $\lambda = 950$ мμ и имеет максимум около $\lambda = 550$ мμ (1). В ее основе лежит полоса поглощения светочувствительного вещества колбочек — иодопсина.

На рис. 1, *а* представлена зависимость от длины волны поглощенного в сетчатке при пороговом фовеальном зрении числа квантов

$$\Phi_\lambda = \frac{E_\lambda T_\lambda \sigma K}{h\nu},$$

где E_λ — пороговая освещенность на роговице глаза; T_λ — коэффициент пропускания глазных сред (6,7); σ — площадь зрачка в темноте; K — коэффициент перехода от порога при неограниченной экспозиции к порогу при экспозиции 0,01 сек.; $h\nu$ — энергия кванта. Эта зависимость получена путем пересчета данных (1) и соответствует полосе поглощения иодопсина в живом человеческом глазу. Она удовлетворительно согласуется с поглощением иодопсина у цыплят (8) (рис. 1, *б*).

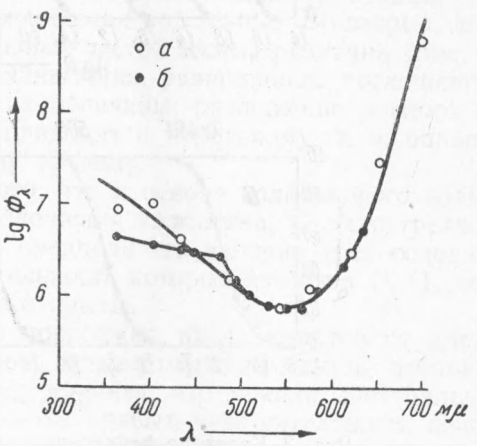

Рис. 1. Зависимость поглощения иодопсина от длины волны: *а* — в живом человеческом глазу; *б* — в экстрактах из сетчаток цыплят

Возникает вопрос, как изменяется число квантов, определяющее порог фовеального колбочкового зрения, в зависимости от длины волны: подобно поглощению иодопсина (рис. 1) или как-нибудь иначе? Ответ дают результаты измерений квантовых флуктуаций колбочками в условиях темновой адаптации.

Экспериментальная установка была подобна той, при помощи которой С. И. Вавилов (2) впервые осуществил флуктуационные измерения палочками. Наблюдатель бинокулярно или монокулярно наблюдал монохроматические вспышки длительностью в 0,01 сек. Для фиксации взгляда на вспышку рядом с ней помещалась красная, а в длинноволновой области спектра — белая точка размером менее 1′. Яркость точки была близка к порогу. Для контроля точка заменялась слабо светящимся кольцом с угловым диаметром в 5°, и вспышки наблюдались в центре ограниченного кольцом темного поля. Таким путем было доказано, что результаты измерений не зависели от способа фиксации взгляда на вспышку.

Яркость вспышек B_λ, пропорциональная числу поглощаемых колбочками квантов n, уменьшалась при помощи фотометрических клиньев таким образом, что наблюдатель видел вспышки с вероятностью P, изменявшейся от 1 до 0. В результате находилась зависимость

$$P = f(\lg B_\lambda) = f_1(\lg n).$$

Последняя сравнивалась с кривыми Пуассона, параметром которых являлось пороговое число квантов n_0. Вследствие свойства закона Пуассона наблюдаемые квантовые флуктуации зависят только от среднего числа поглощаемых колбочками квантов.

На рис. 2 приведена указанная зависимость в области спектра 405—700 мμ и 450—650 мμ. Сплошными линиями представлены кривые Пуассона с параметрами $n_0 = 30$ и $n_0 = 15$, а кружками — экспериментальные данные. Каждому кружку соответствует вероятность P на рис. 2 *А* из наблюдений 300 вспышек, а на рис. 2 *Б* — из наблюдений 100 вспышек. Легко видеть, что экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на соответствующие теоретические кривые.

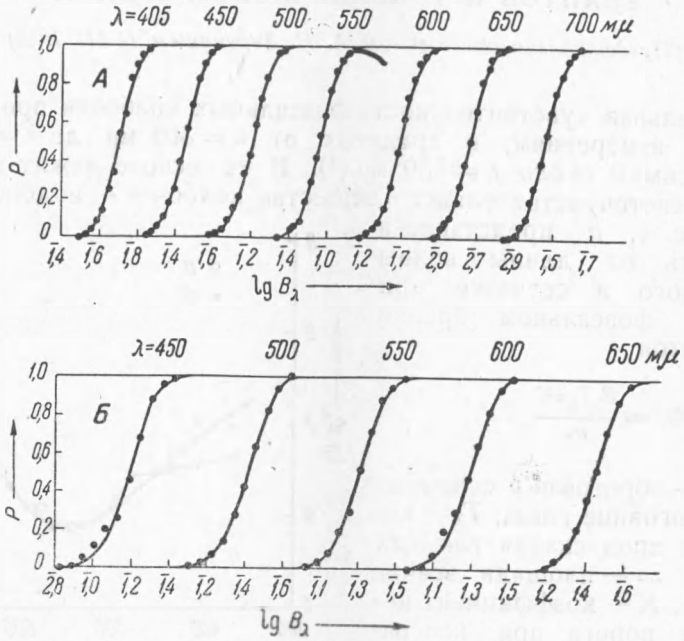

Рис. 2. Квантово-флуктуационная зависимость $P = f(\lg B_\lambda) = f_1(\lg n)$. *А* — область спектра 405—700 мμ; угловые размеры вспышек $\gamma = 13{,}3'$; пороговое число квантов $n_0 = 30$; бинокулярное фовеальное зрение; наблюдатель Л. И. К. *Б* — область спектра 450—650 мμ; угловые размеры вспышек $\gamma = 1'$; пороговое число квантов $n_0 = 15$; бинокулярное фовеальное зрение; наблюдатель Н. В. И.

Измерения для $\gamma = 13{,}3'$ были проведены 4 наблюдателями с нормальным зрением в возрасте от 19 до 27 лет; пороговое число квантов у отдельных наблюдателей колебалось при этом от $n_0 = 30$ до $n = 33$, т. е. практически было одинаковым. Измерения для $\gamma = 1'$ были проведены одним наблюдателем из той же группы.

Существенно отметить, что пороговое число квантов остается неизменным при бинокулярном и монокулярном наблюдении флуктуации. Меняется лишь число падающих на сетчатку квантов: при монокулярном наблюдении оно несколько больше, чем при бинокулярном.

Приведенные на рис. 2 результаты определения порогового числа

квантов для разных длин волн позволяют сделать следующий вывод: пороговое число квантов при колбочковом зрении не зависит от длины волны. В то же время пороговое число квантов зависит от размеров вспышек: при $\gamma = 1'$ оно вдвое меньше, чем при $\gamma = 13{,}3'$.

Из сопоставления рис. 1 и 2 мы видим, что в иодопсине происходит неполное поглощение света. В области максимума колбочковой чувствительности ($\lambda \approx 550$ мμ) оно составляет величину порядка $10^{-3} - 10^{-4}$, а в других областях спектра и того меньше.

Полученные нами результаты принципиально отличаются от результатов, опубликованных недавно Рицлером, Эспером и Мейерсом ([9]). Авторы нашли, что пороговое число квантов, оставаясь постоянным в области 505—629 мμ, возрастает в длинноволновой области спектра. Эти результаты представляются сомнительными, так как они основаны на совершенно недостаточной статистике. Авторы при одной и той же пороговой яркости B_λ предъявляли наблюдателю всего лишь 10 вспышек, что не могло не приводить к неточному определению вероятности P, большому отклонению экспериментальных точек от кривых Пуассона и, в конечном счете, к неточному определению порогового числа квантов.

Независимость порогового числа квантов при колбочковом зрении от длины волны отвечает всем требованиям фотохимии. Во-первых, она имеет место в пределах полосы поглощения иодопсина. Во-вторых, хотя вероятность поглощения квантов разных частей весьма различна (рис. 1), однако, в соответствии с законом Эйнштейна, равное число поглощенных квантов вызывает, независимо от их величины, разложение равного количества молекул иодопсина, что приводит к пороговому, т. е. равному для разных длин волн, зрительному эффекту.

До сих пор мы исходили из того, что в основе колбочкового зрения лежит фотохимический процесс разложения иодопсина. Однако трехкомпонентная теория цветного зрения предполагает наличие трех основных приемников, спектральная чувствительность которых известна ([4], [5]), хотя соответствующие пигменты пока не открыты.

Как согласовать независимость порогового числа квантов от длины волны с наличием полос поглощения неизвестных пигментов основных приемников? Для этого необходимо принять, что кривая спектральной чувствительности колбочек слагается из кривых чувствительности основных приемников. В таком случае следует считать, что иодопсин есть совокупность трех или более пигментов с характерными полосами поглощения. Эти полосы, частично перекрываясь, образуют общую полосу (рис. 1).

Независимость порогового числа квантов от длины волны выражает независимость квантового выхода первичного фотохимического процесса при колбочковом зрении. Независимость квантового выхода от длины волны присуща и другим процессам, например фотолюминесценции растворов сложных органических молекул красителей. С. И. Вавилов ([3]) показал, что она имеет место в широком спектральном интервале в пределах полосы поглощения.

Выражаю глубокую благодарность акад. А. Н. Теренину за ценные замечания.

Поступило
11 III 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Н. И. Пинегин, ДАН, 48, № 4, 266 (1945). [2] С. И. Вавилов, Микроструктура света, Изд. АН СССР, 1950, стр. 20. [3] С. И. Вавилов, Phil. Mag., 43, 307 (1922); Zs. Phys., 22, 266 (1924); 42, 311 (1927). [4] Е. Н. Юстова, ДАН, 74, № 6, 1069 (1950). [5] Н. Т. Федоров, М. А. Юрьев, В. В. Скляревич, О. Ф. Маширова, Пробл. физиол. оптики, 8, 99 (1953). [6] E. Ludgwigh, E. McCarthy, Arch. Ophth., 20 (1938). [7] G. Wald, Science, 101, 653 (1945). [8] A. Bliss, J. Gen. Physiol., 29, No. 5, 277 (1946). [9] W. Riezler, F. Esper, H. Meurers, Zs. Phys., 137, 238 (1954).