

БИОФИЗИКА

С. Г. ЮРОВ

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЛАЗА НА ДАННОМ  
УРОВНЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЯРКОСТИ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 10 VII 1950)

Поскольку между дневным и сумеречным зрением определенной границы не существует<sup>(1)</sup>, понятие эквивалентной яркости<sup>(2)</sup> нужно, по существу, применять не только в области „сумеречной“ фотометрии, но также и „дневной“. Ниже термином эквивалентная яркость обозначается результат любого измерения с помощью глаза путем уравнения по светлоте измеряемого излучения с эталонным, яркость которого задается в любых единицах, в частности, пересчитанных по стандартной кривой видности.

Практика требует, чтобы эквивалентная яркость могла не только измеряться, но и рассчитываться.

Будем измеренную эквивалентную яркость обозначать через  $B^{(u)}$ , а рассчитанную через  $B^{(p)}$ .

Спектральная чувствительность глаза есть совокупность коэффициентов ( $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n$ ), с помощью которых может быть рассчитана эквивалентная яркость  $B^{(p)}$  некоторого излучения с энергетической яркостью  $\mathfrak{B} \left\{ \frac{\text{вт}}{\text{стер. см}^2} \right\} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta \mathfrak{B}_i$ , где  $1, 2, \dots, i, \dots, n$  — длины волн середин отдельных элементов, на которые разбивается видимый участок спектра

$$B^{(p)} = k_1 \Delta \mathfrak{B}_1 + k_2 \Delta \mathfrak{B}_2 + \dots + k_i \Delta \mathfrak{B}_i + \dots + k_n \Delta \mathfrak{B}_n. \quad (1)$$

Отдельные коэффициенты  $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n$ , которые можно назвать монохроматическими чувствительностями глаза, должны быть выбраны так, чтобы обеспечить равенство

$$B^{(u)} = B^{(p)}. \quad (2)$$

До сих пор численные значения монохроматических чувствительностей определялись на основании измерений эквивалентных яркостей монохроматических излучений  $\mathfrak{B}_i$ :

$$k'_i = \frac{B_i^{(u)}}{\mathfrak{B}_i}. \quad (3)$$

При этом считалось, что если

$$B_i^{(u)} = B^{(u)}, \quad (4)$$

где  $B^{(u)}$  — эквивалентная яркость некоторого немонохроматического излучения, то

$$k_i = k'_i. \quad (5)$$

Это значит, что при расчетах по формуле (1) при условии (2) можно пользоваться монохроматическими чувствительностями, определенными по формуле (3) при условии (4). Таким образом, физическое содержание основных предположений, на которых основывается современная фотометрия, сводится к тому, что спектральная чувствительность определяется только уровнем ощущения светлоты (т. е. уровнем эквивалентной яркости) и при яркостях выше  $6 \div 9$  дцмсб она становится постоянной (кривая видности). Однако можно показать, что эти предположения неверны и свойства реального глаза при фотометрировании могут дать расхождение между измеренной и рассчитанной эквивалентной яркостью до  $10 \div 20\%$ .

Эти расхождения могут быть объяснены, если исходить из основных представлений современной теории зрительного процесса<sup>(3)</sup>. В ее основе лежит предположение, что ощущение светлоты (а следовательно и эквивалентная яркость) определяется числом ежесекундно диссоциируемых молекул светочувствительных веществ, находящихся в клетках (палочках и колбочках) сетчатки. Если наблюдать монохроматическое излучение с энергетической яркостью  $\mathfrak{B}_i$ , то эквивалентная яркость  $B_i^{(u)}$  этого излучения определится следующим выражением:

$$B_i^{(u)} = \{c^{(1)} p_i^{(1)} N^{(1)}(\mathfrak{B}_i) + c^{(2)} p_i^{(2)} N^{(2)}(\mathfrak{B}_i) + \dots\} \mathfrak{B}_i. \quad (6)$$

Индексы (1), (2) и т. д. относятся к различным светочувствительным веществам (родопсин и др.), находящимся в клетках сетчатки.

Коэффициенты  $c$  определяют долю излучения  $\mathfrak{B}_i$ , приходящуюся на то или иное светочувствительное вещество.

Величины  $p_i$  определяются вероятностью диссоциации молекулы соответствующего светочувствительного вещества при ее встрече с фотоном с длиной волны  $\lambda_i$ .

Концентрации  $N(\mathfrak{B}_i)$  светочувствительных веществ в клетках сетчатки определяются энергетической яркостью и длиной волны излучения  $\mathfrak{B}_i$ .

Поскольку формула (6) не предназначается для численных расчетов, то все постоянные коэффициенты, которые были необходимы для этих расчетов, в формуле (6) опущены.

Сопоставив (3) и (6), напишем:

$$\tilde{k}_i = c^{(1)} p_i^{(1)} N^{(1)}(\mathfrak{B}_i) + c^{(2)} p_i^{(2)} N^{(2)}(\mathfrak{B}_i) + \dots \quad (7)$$

При уменьшении  $\mathfrak{B}_i$  чувствительность  $k'_i$  растет за счет увеличения концентраций  $N(\mathfrak{B}_i)$ . Однако, начиная с некоторых уровней  $\mathfrak{B}_i$ , вообще говоря, различных для разных веществ (1), (2), ..., отдельные слагаемые в формуле (7) начинают уменьшаться. Происходит это из-за того, что для создания единичного импульса, посыпанного клеткой сетчатки мозга, необходимо объединение действия нескольких диссоциированных молекул. Если  $\mathfrak{B}_i$  достаточно велика, то диссоциируемые постепенно молекулы успевают накапливаться в достаточном для создания импульса количестве за время меньшее, чем продолжительность их жизни.

В противном случае, т. е. по мере уменьшения  $\mathfrak{B}_i$ , становится все более заметной рекомбинация\* диссоциированных молекул. При очень

\* Для краткости, термином „рекомбинация“ обозначаются все процессы, ведущие к уменьшению запаса диссоциированных молекул.

малых (подпороговых) значениях  $\mathfrak{B}_i$  процесс рекомбинации успевает вывести из игры все диссоциированные молекулы раньше, чем они успевают накопиться в достаточном для создания импульса количестве\*.

Влияние рекомбинации, различное на разных уровнях яркости  $\mathfrak{B}_i$ , можно характеризовать коэффициентом  $\xi(\mathfrak{B}_i)$ , который по своему физическому смыслу является вероятностью участия диссоциированных молекул в создании единичного импульса. Следовательно, монохроматическая чувствительность глаза  $k_i'$  определится так:

$$k_i' = c^{(1)} p_i^{(1)} \xi^{(1)} (\mathfrak{B}_i) N^{(1)} (\mathfrak{B}_i) + c^{(2)} p_i^{(2)} \xi^{(2)} (\mathfrak{B}_i) N^{(2)} (\mathfrak{B}_i) + \dots, \quad (8)$$

где  $0 \leq \xi \leq 1$ .

На рис. 1 представлен качественно ход изменения монохроматической чувствительности. При этом предполагается (для наглядности), что ощущение светлоты возникает в результате воздействия излучения только на два вещества.

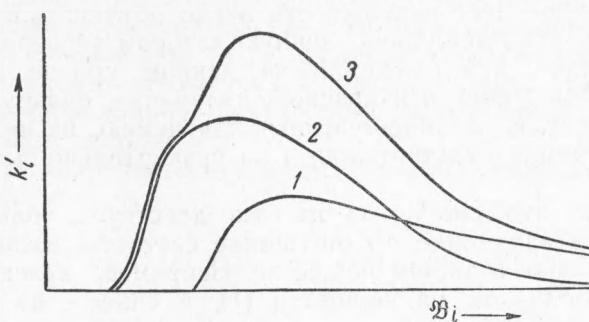


Рис. 1. 1 —  $c^{(1)} p_i^{(1)} \xi^{(1)} (\mathfrak{B}_i) N^{(1)} (\mathfrak{B}_i)$ ,

2 —  $c^{(2)} p_i^{(2)} \xi^{(2)} (\mathfrak{B}_i) N^{(2)} (\mathfrak{B}_i)$ ; 3 —  $k_i'$

В случае воздействия на глаз немонохроматического излучения  $\mathfrak{B}(\lambda)$  эквивалентная яркость последнего определится так:

$$\begin{aligned} B &= [c^{(1)} p_1^{(1)} \xi^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + \\ &+ c^{(2)} p_1^{(2)} \xi^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + \dots] \Delta \mathfrak{B}_1 + \dots \\ &\dots + [c^{(1)} p_i^{(1)} \xi^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + \\ &+ c^{(2)} p_i^{(2)} \xi^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + \dots] \Delta \mathfrak{B}_i + \dots \quad (9) \\ &\dots + [c^{(1)} p_n^{(1)} \xi^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + c^{(2)} p_n^{(2)} \xi^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + \dots] \Delta \mathfrak{B}_n. \end{aligned}$$

Сопоставив формулы (1) и (9), получим:

$$k_i = c^{(1)} p_i^{(1)} \xi^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(1)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + c^{(2)} p_i^{(2)} \xi^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} N^{(2)} \{\mathfrak{B}(\lambda)\} + \dots \quad (10)$$

Сравнивая формулы (8) и (10), видим, что предположение (5) может быть правильным только, если:

$$\xi \{\mathfrak{B}_i\} = \xi \{\mathfrak{B}(\lambda)\}, \quad N \{\mathfrak{B}_i\} = N \{\mathfrak{B}(\lambda)\}. \quad (11)$$

\* В этом случае только отдельные флуктуации в количествах фотонов, попадающих на ту или иную клетку сетчатки, могут привести к созданию за достаточно короткий промежуток времени такого количества диссоциированных молекул, которое обеспечит получение единичного импульса. Такие импульсы, как известно из опыта, существуют и наблюдаются при длительном рассматривании источника излучения, имеющего подпороговую яркость.

Поскольку и  $\xi$  и  $N$  функции тех потоков излучения, которые приходятся на долю соответствующих светочувствительных веществ, и притом функции независимые, то равенства (11) не имеют места даже если эквивалентные яркости излучений  $\mathfrak{B}_i$  и  $\mathfrak{B}(\lambda)$  и равны!

Следовательно:

$$k_i \neq k'_i. \quad (12)$$

Это означает, что принятый в настоящее время метод определения спектральной чувствительности глаза принципиально неверен!

Весьма вероятно, что в большинстве практических случаев для расчетов на данном уровне эквивалентной яркости можно пользоваться единственной спектральной чувствительностью, но ее определение должно идти по линии подбора совокупности коэффициентов ( $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n$ ), которые давали бы возможно малые расхождения между независимо измеренными и рассчитанными значениями эквивалентной яркости данного излучения.

Вышесказанное дает возможность легко объяснить неаддитивность эквивалентных яркостей, установленную автором экспериментально.

Действительно, при сложении на данном уровне эквивалентной яркости, например синего и красного излучения, обнаруживается, что к смешанному, т. е. к сине-красному излучению, на низких уровнях яркости глаз менее чувствителен, а на сравнительно высоких — более чувствителен.

Объясняется это так. Когда на глаз действует только синее или только красное излучение, то ощущение светлоты возникает преимущественно только в одном веществе. Например, красное излучение действует в основном на вещество (1), а синее — на вещество (2). Степень воздействия данного излучения на то или иное светочувствительное вещество определяется соотношением между спектром излучения и спектральной возбудимостью вещества  $p(\lambda)$ . При переходе к смешанному излучению количество и „красных“ и „синих“ фотонов, совместно обеспечивающих неизменность эквивалентной яркости, становится меньше, чем тогда, когда на глаз действовало только красное или только синее излучение.

На очень низких уровнях  $B$  это приводит к тому, что коэффициенты  $\xi$  у одного или нескольких веществ заметно уменьшаются для случая смешанного излучения, что и приводит к уменьшению чувствительности глаза.

На достаточно высоких уровнях яркости, когда  $\xi^{(1)} = \xi^{(2)} = 1$ , переход к смешанному излучению ведет к увеличению  $N^{(1)}$  и  $N^{(2)}$ , т. е. ведет к повышению чувствительности глаза.

Всесоюзный электротехнический институт  
им. В. И. Ленина

Поступило  
10 VI 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> С. Г. Юров, ДАН, 67, № 2 (1949). <sup>2</sup> А. А. Волькенштейн и А. А. Гершун, ДАН, 66, № 1 (1949). <sup>3</sup> С. О. Майзель, Изв. АН СССР, ОТН, № 9 (1949).