

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОРОГА ВОСПРИНИМАЕМОГО КОНТРАСТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗЛИЧЕНИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ СТИМУЛОВ ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ МЕНЕЕ 15 С

© 2007 г. Л. Н. Аксютлов, канд. техн. наук

НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор,
Ленинградская обл.

Проведен анализ экспериментальных данных, по результатам которого разработана параметрическая модель порога воспринимаемого контраста зрительных стимулов в широком диапазоне их углового размера при яркости адаптации $-2,465 \leq \lg L_a \leq 2,535$ и экспозиции стимула $1/100 \leq \tau < 15$ с. Предлагаемая модель позволяет прогнозировать вероятность различения стимула, значения которой согласуются с данными независимых экспериментов.

Коды OCIS: 330.3790, 330.1800, 330.6790, 3000.3027.

Поступила в редакцию 02.02.2005.

Введение

Информативность визуального восприятия на сенсорном уровне психического отражения зависит от пространственного разрешения зрительной системы (ЗС) и условий наблюдения. Известно [1], что рецептивные поля ЗС разбивают наблюдаемую сцену на дискретные участки и выделяют неоднородности (стимулы) сцены, информативность восприятия которых и вероятность их различения зависят от числа элементов разрешения (“пикселей”) ЗС в изображении стимула на сетчатке глаза, воспринимаемого контраста и продолжительности экспозиции стимула.

В работе [2] на основе данных эксперимента Блэквелла [3] разработана модель для расчета порога K_t воспринимаемого контраста зрительного стимула, соответствующего вероятности 0,5 его различения. Данная модель используется в диапазоне $-4,465 \leq \lg L_a \leq 3,535$ (L_a , кд/м²) яркости адаптации ЗС при угловом размере стимула $0,173 \text{ мрад} \leq \delta_s \leq 104,6 \text{ мрад}$ и его экспозиции $\tau \geq 15$ с. Поскольку значения порога K_p , рассчитанные с помощью этой модели, используются в модели прогнозирования вероятности различения (МПВР) объектов натуральных сцен [4], назовем ее моделью ПВР- K_t .

Установлено, что определяемые в эксперименте с помощью психофизических методов пороги визуального восприятия, характеризующие различительную способность ЗС, “являются, без сомнения, операциональными порогами” (см. [5], параграф 2.1.3, с. 20). В настоящей статье рассматриваются именно эти пороги, соответствующие вероятности 0,5 различения стимула.

Цель настоящей статьи состоит в разработке модели порогового контраста $K_{t,\tau}$ визуального воспринимаемого стимула при его экспозиции $\tau = 1/3-1/100$ с

(модель ПВР- $K_{t,\tau}$), что позволит расширить возможности МПВР.

Продолжительность экспозиции $\tau = 1/3-1/100$ с выбрана на основании данных работы [6], согласно которым информативность восприятия достаточна для визуального различения неоднородностей сцены ($\tau = 15$ мс), их фрагментов ($\tau \approx 70$ мс) и деталей фрагментов ($\tau \approx 170$ мс).

Средства решения поставленной задачи

Для решения поставленной задачи нами использованы:

1) модель ПВР- K_t , с помощью которой рассчитываются значения порога воспринимаемого контраста $K_{t,15}$ при экспозиции стимула $\tau \geq 15$ с в диапазоне яркости адаптации $-4,465 \leq \lg L_a \leq 3,535$ [2];

2) численные значения величины $\lg K_{t,\tau}$, полученные в эксперименте Блэквелла (В1-данные) [7] для диапазона яркости адаптации $-2,465 \leq \lg L_a \leq 2,535$ при экспозиции стимула $\tau = 1/3-1/100$ с;

3) некоторые из уточненных данных эксперимента Блэквелла с соавтором (ВМ-данные) (см. ссылки в [8, 9] на отчеты авторов Blackwell H.R., McCready D.W., свидетельствующие о том, что ВМ-данные не опубликованы в открытой литературе).

Величина $K_{t,15}$ при числе δ_r^2 “пикселей” ЗС, приходящихся на площадь стимула δ_s^2 , может быть выражена как

$$\lg K_{t,15} = -\lg \delta_r^2, \lg \delta_r \leq \lg \delta_r^* \quad (1)$$

где $\delta_r = \delta_s / \delta_t(L_a)$ – число “пикселей” ЗС, приходящихся на эквивалентный угловой размер δ_s стимула в миллирадианах; $\lg \delta_r^*$ – максимальное значение величины $\lg \delta_r$, при котором выполняется равенство (1); $\delta_t(L_a)$ – выраженный в миллирадианах порог углового разрешения ЗС при яркости адаптации L_a :

$$\delta_i(L_a) = \ln 2 / (\lg L_a + 2,5), \quad -2,09 < \lg L_a \leq 3,535, \quad (2.1)$$

$$\lg \delta_i(L_a) = -(0,3 \lg L_a + 0,4), \quad -4,465 \leq \lg L_a \leq -2,09. \quad (2.2)$$

В мезопическом диапазоне яркости адаптации $(-2,09 < \lg L_a \leq 1,5)$ значение $\lg \delta_r^*$ рассчитывается по формулам:

$$\lg \delta_r^*(L_a) = 1 - 0,5 \Psi^{-3,2}, \quad -0,75 \leq \lg L_a \leq 1,5, \quad (3.1)$$

$$\lg \delta_r^*(L_a) = 0,5 \Psi^{1,8}, \quad -2,09 < \lg L_a < -0,75, \quad (3.2)$$

где $\Psi = (\lg L_a + 3,5) / 2,75$.

При $\lg L_a = 1,5$ величина $\lg \delta_r^*(L_a) = 0,9262$ и остается постоянной в опическом диапазоне $\lg L_a > 1,5$.

В скотопическом диапазоне $(-4,465 \leq \lg L_a \leq -2,09)$ численное значение величины $\lg \delta_r^*(L_a)$ определяется уравнением

$$\lg \delta_r^*(L_a) = 0,14 \lg L_a + 0,443. \quad (4)$$

Нами установлено (см. рис. 1), что для значений $\lg \delta_r > \lg \delta_r^*$ функция $\lg K_{t,15} = f(\lg \delta_r)$ уменьшается на $\Delta \lg K_{t,15} = \lg K_{t,15}^* - \lg K_{t,15}$ при возрастании δ_r на $\Delta \lg \delta_r = \lg \delta_r - \lg \delta_r^*$.

Уменьшение порогового контраста $K_{t,15}$ с возрастанием δ_r при прочих равных условиях свидетельствует об увеличении контрастной чувствительности ЗС и, следовательно, о повышении информативности восприятия.

В [2] показано, что при равенстве $\lg \delta_r = \lg \delta_{r,m}$ порог $\lg K_{t,15}$ достигает своего минимального значения и остается постоянным при $\lg \delta_r > \lg \delta_{r,m}$. Следовательно, при $\lg \delta_r = \lg \delta_{r,m}$ информативность восприятия достигает своего максимума и остается постоянной при $\lg \delta_r > \lg \delta_{r,m}$.

Для диапазона $\lg \delta_r^* < \lg \delta_r \leq \lg \delta_{r,m}$ численное значение величины $\lg K_{t,15}$ рассчитывается в [2] с помощью параметров X_m, Y_m, A и B , где $X = \Delta \lg \delta_r = \lg \delta_r - \lg \delta_r^*$, $Y = \Delta \lg K_{t,15} = \lg K_{t,15}^* - \lg K_{t,15}$. Анализ этих параметров показал, что в мезопическом диапазоне (МД) яркости адаптации их численное значение зависит от $\lg \delta_r^*$.

$$X_m = 2,78 - 1,53 \lg \delta_r^*, \quad Y_m = 1,76 - 1,14 \lg \delta_r^*, \quad (5.1)$$

$$A = 1,16 + 0,61 \lg \delta_r^*, \quad B = 0,90 - 0,66 \lg \delta_r^*. \quad (5.2)$$

При яркости адаптации вне МД значения этих параметров постоянны и равны таковым на соответствующей границе МД.

Для экспозиции $\tau < 15$ с при заданных яркости адаптации и $\lg K_{t,15}$ модель ПВР- $K_{t,\tau}$ позволяет рассчитать пороговый контраст воспринимаемого стимула по формуле

$$\lg K_{t,\tau} = \lg K_{t,15} + \Delta \lg K_{t,\tau} \quad (6)$$

где $\Delta \lg K_{t,\tau}$ определяется функцией $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg^2 \tau)$, полученной нами по результатам оцифровки графических

данных из работ [8, 9], где приведены численные значения величины $\lg K_{t,\tau}$ и соответствующие им угловые размеры стимулов. Максимальное расхождение значений $\lg K_{t,\tau}$, рассчитанных по формуле (6), и соответствующих значений, полученных по данным из [8] и [9] для конкретного углового размера стимула, составило около 4%.

Особенности функций $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg \delta_r)$, $\lg \delta_r = f(\lg L_a)$, $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg^2 \tau)$

На рис. 1 и 2 представлены зависимости $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg \delta_r)$, рассчитанные с помощью (6), и ВЛ- и ВМ-данные для соответствующих значений яркости адаптации и углового размера стимула. Прямые линии на этих рисунках подчеркивают характер взаимного расположения точек.

На рисунках отчетливо различаются три зоны изменения функции $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg \delta_r)$, обозначенные цифрами I, II и III.

В зоне I величина $\Delta \lg K_{t,\tau}$, рассчитанная по ВЛ- и ВМ-данным, постоянна.

На границе I и II зон (линия *a*) величины $\lg \delta_r$ и $\Delta \lg K_{t,\tau}$ обозначены как $\lg \delta_{r,1}$ и $\Delta \lg K_{t,\tau,1}$, а на границе II и III зон (линии *b* и *c*) – как $\lg \delta_{r,2}$ и $\Delta \lg K_{t,\tau,2}$.

В зоне III значения $\Delta \lg K_{t,\tau,2}$ одинаковы для ВЛ- и ВМ-данных и в зависимости от яркости адаптации могут возрастать (см. рис. 1) или оставаться постоянными (см. рис. 2) при $\lg \delta_r \geq \lg \delta_{r,2}$.

Зона I на рис. 2 требует особого рассмотрения. Дело в том, что полученные по ВЛ-данным значения $\Delta \lg K_{t,\tau}$ для $\lg L_a = 1,535$ в этой зоне (обозначены на рис. 2 цифрой 2) оказались заниженными для

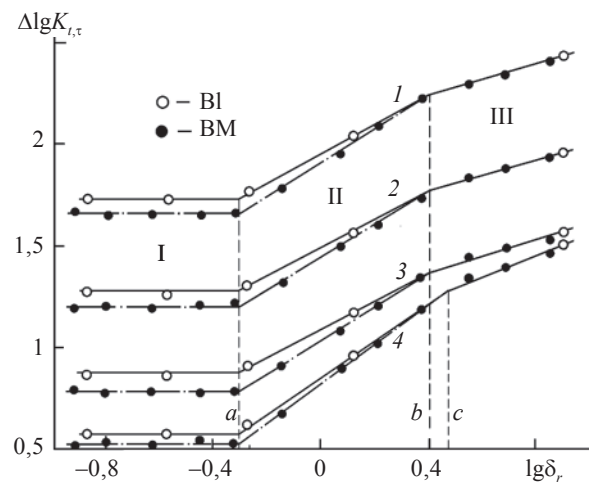


Рис. 1. Зависимости $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg \delta_r)$ по данным из [7, 8] для $\tau = 1/100$ (1), $1/30$ (2), $1/10$ (3), $1/3$ с (4) для $\lg L_a = -2,465$. Штриховые линии *a*, *b* и *c* соответствуют граничным значениям $\lg \delta_r$.

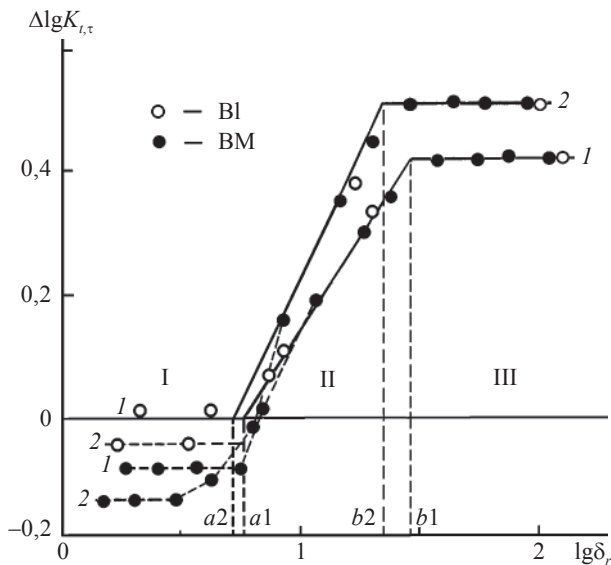


Рис. 2. Зависимости $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg \delta_r)$ по данным из [7] и [9] для $\tau = 1/3$ с. 1 – $\lg L_a = 2,535$, 2 – $\lg L_a = 1,535$. Обозначения те же, что на рис. 1.

двух стимулов с малым угловым размером, для которых величина $\Delta \lg K_{t,\tau}$ оказалась отрицательной, что соответствует неравенству $\lg K_{t,\tau} < \lg K_{t,15}$. Этот результат следует считать ошибочным, поскольку он противоречит закономерности, согласно которой для $\tau = 1/3$ с должно выполняться или равенство $\lg K_{t,\tau} = \lg K_{t,15}$, или неравенство $\lg K_{t,\tau} > \lg K_{t,15}$.

Для стимула с минимальным угловым размером (1') при $\lg L_a = 2,535$ и $\lg L_a = 1,535$ величина расхождения $D = (\lg K_{t,\tau} - \lg K_{t,15}) / \lg K_{t,15} = \Delta \lg K_{t,\tau} / \lg K_{t,15}$ имеет значения 1,5 и 10% соответственно, что отвечает общей погрешности VI-данных. Следовательно, в пределах этой погрешности для рассматриваемых условий восприятия справедливо равенство $\Delta \lg K_{t,\tau} = 0$ или $\lg K_{t,\tau} = \lg K_{t,15}$.

Значения $\lg K_{t,\tau}$, относящиеся к VM-данным для $\lg L_a = 1,535$ и $\lg L_a = 2,535$ в зоне I (см. рис. 2), оказались меньше соответствующих значений VI-данных на $0,091 \pm 0,001$.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют линейность функции $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg \delta_r)$ в зонах II ($\lg \delta_r > \lg \delta_{r,1}$) и III ($\lg \delta_r > \lg \delta_{r,2}$), которая характеризуется параметрами

$$\gamma_2 = (\Delta \lg K_{t,\tau,2} - \Delta \lg K_{t,\tau,1}) / (\lg \delta_{r,2} - \lg \delta_{r,1}) \quad (7)$$

и

$$\gamma_3 = (\Delta \lg K_{t,\tau} - \Delta \lg K_{t,\tau,2}) / (\lg \delta_r - \lg \delta_{r,2}) \quad (8)$$

соответственно (см. рис. 1).

Для $\lg \delta_r > \lg \delta_{r,2}$ величина γ_3 может принимать значения $g_3 > 0$ или $g_3 = 0$ в зависимости от экспозиции стимула и яркости адаптации (см. рис. 1 и 2).

Характер зависимости $\lg \delta_r = f(\lg L_a)$, соответствующей VI-данным во всем диапазоне $-2,465 \leq \lg L_a \leq 2,535$,

показан на рис. 3, где для удобства графического представления этих данных по оси абсцисс отложены значения величины $B = \lg L_a + 2,465$.

Из рис. 3 следует, что для величины $\lg \delta_{r,2}$ зависимость $\lg \delta_r = f(\lg L_a)$ линейна и дискретна при различной экспозиции стимула (см. линии 1–3) и нелинейна для величин $\lg \delta_{r,1}^*$ и $\lg \delta_{r,1}$ (кривые 4 и 5) независимо от экспозиции стимула. К сожалению, в настоящее время нет теоретической модели, которая позволила бы правильно интерпретировать эти данные.

Рассмотрим построенную по VI- и VM-данным зависимость $\Delta \lg K_{t,\tau,1} = f(\lg^2 \tau)$, необходимую для анализа значений $\Delta \lg K_{t,\tau,1}$ при соответствующей яркости адаптации (рис. 4).

На рис. 4 начало координат по оси абсцисс соответствует значению $\tau = 15$ с, светлыми кружками и темными кружками и квадратами для $\tau = 1/3-1/100$ с отмечены значения $\Delta \lg K_{t,\tau,1}$, полученные по VI- и VM-данным соответственно. Для $\lg L_a = 1,535$ и $\lg L_a = -1,465$ зависимость $\Delta \lg K_{t,\tau,1} = f(\lg^2 \tau)$ на рис. 4 не представлена, чтобы не загромождать его.

Данные рис. 4 показывают, что линии 1–3 при соответствующей величине $\lg L_a$ практически параллельны, а расстояние между ними по оси ординат

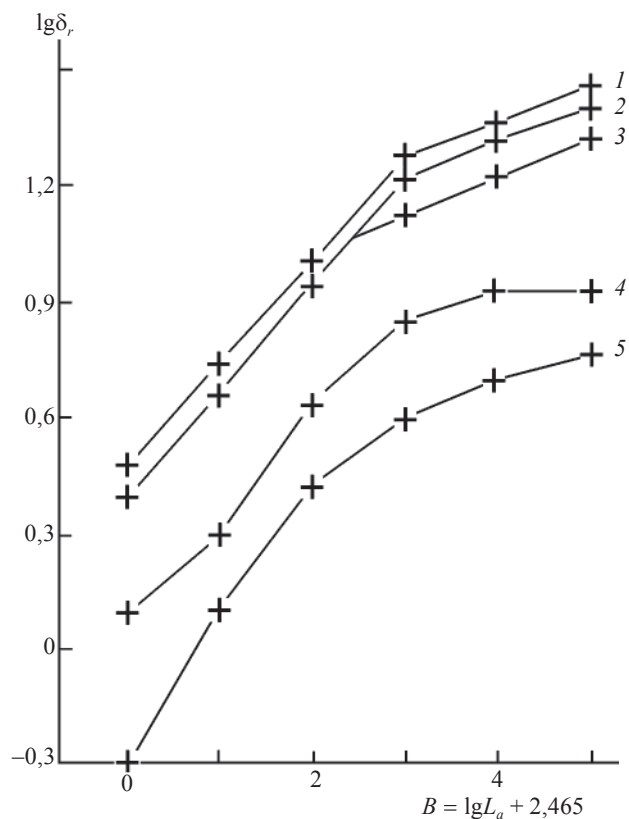


Рис. 3. Зависимости $\lg \delta_r = f(\lg L_a)$ по VI-данным при экспозиции стимулов $\tau = 1/3-1/100$ с. 1–3 – $\lg \delta_r$ при различных τ : 1 – $1/3$, 2 – $1/10$, 3 – $1/30-1/100$ с; 4 – $\lg \delta_{r,2}^*$, 5 – $\lg \delta_{r,1}$.

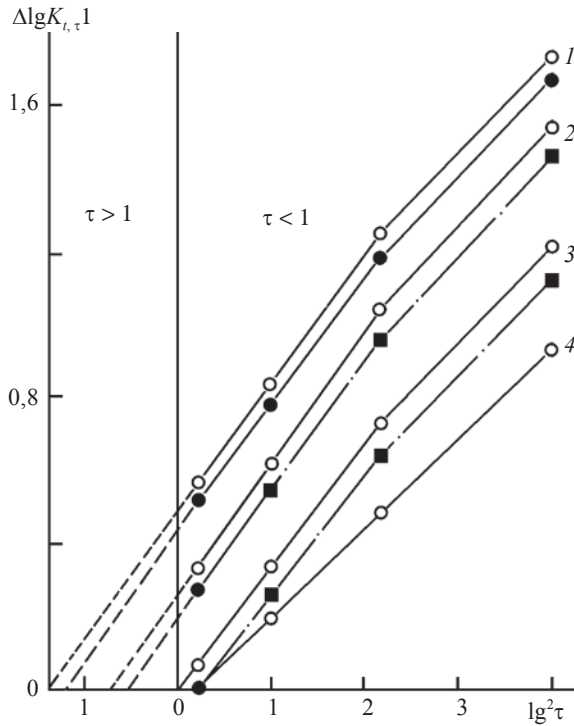


Рис. 4. Зависимости $\Delta \lg K_{t,\tau}1 = f(\lg^2\tau)$ по ВЛ- и ВМ-данным. 1 – $\lg L_a = -2,465$, 2 – $-0,465$, 3 – $0,535$, 4 – $2,535$. Пояснения в тексте.

Таблица 1. Усредненные значения $\Delta \lg K_{t,\tau}1$ и их разность $R = \Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВЛ}} - \Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВМ}}$ по данным работ [7–9] для указанных значений экспозиции τ стимулов и яркости адаптации $\lg L_a$

$\tau, \text{с}$	$\Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВЛ}}$	$\Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВМ}}$	R	$R_{\text{ср}}$
	$\lg L_a = -2,465$ [7, 8]			
1/100	1,730	1,669	0,061	0,065
1/30	1,265	1,199	0,066	
1/10	0,864	0,788	0,076	
1/3	0,574	0,517	0,057	
$\lg L_a$	$\tau = 1/3 \text{ с}$ [7, 9]			
-2,465	0,574	0,512	0,062	0,067
-1,465	0,606	0,539	0,067	
-0,465	0,328	0,283	0,045*	
0,535	0,071	0,000	0,071	

Таблица 2. Сравнение данных Блэквелла [7] и расчета величины $\lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau} + \lg K_{t,15}$, где $\Delta \lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВМ}} + R_{\text{ср}}$, $R_{\text{ср}} = 0,066$ (табл. 1), для стимула размером $1'$ при экспозиции $\tau = 1/3 \text{ с}$ и указанных значениях $\lg L_a$

Данные работы [7]			Расчет по модели ПВП-К					$D, \%$
$\lg L_a$	$\lg K_{t,\tau}1_{\text{ВЛ}}$	$K_{t,\tau \text{ВЛ}}$	$\lg \delta_r$	$\lg K_{t,15}$	$\Delta \lg K_{t,\tau}$	$\lg K_{t,\tau}$	$K_{t,\tau}$	
-0,465	0,466	2,924	-0,0688	0,1376	0,349	0,4866	3,066	4,9
0,535	-0,139	0,726	0,1049	-0,2098	0,066	-0,1438	0,718	-1,1

Примечание. $D = (K_{t,\tau}/K_{t,\tau \text{ВЛ}} - 1)100$.

определяется величиной $R = \Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВЛ}} - \Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВМ}}$ для соответствующих значений $\lg L_a$ и абсциссы $\lg^2\tau$. Это подтверждается данными табл. 1, где величина $R_{\text{ср}}$ представляет усредненные значения R , полученные для малоразмерных стимулов по ВЛ- и ВМ-данным без учета отмеченного звездочкой значения R .

Значения величины $\Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВМ}}$ в табл. 1 по определению более точные, чем $\Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВЛ}}$. Этой точности при $R = R_{\text{ср}} = 0,066$ для $\lg L_a = -0,465$ и $\lg L_a = 0,535$ соответствуют приведенные в табл. 2 значения $\lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau} + \lg K_{t,15}$ и $\Delta \lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВМ}} + R_{\text{ср}}$, которые подтверждают, что линии, соединяющие светлые и темные точки на рис. 4, практически параллельны.

На этом основании из точек на рис. 4, полученных по ВМ-данным для $\tau = 1/3 \text{ с}$ при различных яркостях адаптации, проведены штрихпунктирные линии, параллельные прямым, представляющим ВЛ-данные для соответствующей яркости адаптации (см. линии 1–3 на рис. 4). Темные квадраты на этих линиях для значений абсциссы $\lg^2\tau$, соответствующих экспозиции $\tau = 1/10, 1/30$ и $1/100 \text{ с}$, представляют значения $\Delta \lg K_{t,\tau}1_{\text{ВМ}}$, которые, как мы полагаем, соответствуют ВМ-данным, не опубликованным в открытой литературе.

Штриховые линии, представляющие на рис. 4 функцию $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg^2\tau)$ по ВМ-данным для $\lg L_a = -2,465$ и $\lg L_a = -0,465$, пересекают ось абсцисс при $\Delta \lg K_{t,\tau}1 = 0$ в точках, соответствующих экспозиции стимула $\tau_0 \approx 13 \text{ с}$ и $\tau \approx 5,7 \text{ с}$.

Таким образом, получены численные значения параметров $\lg \delta_r, 1, \lg \delta_r, 2, \gamma_2, \gamma_3$ и $\Delta \lg K_{t,\tau}1$, позволяющие рассчитать порог воспринимаемого контраста $K_{t,\tau}$ стимула заданного углового размера при его экспозиции $1/100 \leq \tau < 15 \text{ с}$ и яркости адаптации в диапазоне $-2,465 \leq \lg L_a \leq 2,535$.

Результаты расчета величины $\lg K_{t,\tau}$

Численные значения параметров $\lg \delta_r, 1, \lg \delta_r, 2, \Delta \lg K_{t,\tau}1, \gamma_2$ и γ_3 приведены в табл. 3.

На основании этих параметров значения величины $\lg K_{t,\tau}$ рассчитываются по уравнениям, отвечающим функции $\Delta \lg K_{t,\tau} = f(\lg \delta_r)$ в каждой из трех зон:

Таблица 3. Параметры модели для расчета значений $K_{t,\tau}$, соответствующих ВМ-данным для $\tau = 1/3-1/100$ с и $-2,465 \leq \lg L_a \leq 2,535$

τ, c	$\lg \delta_r, 1$	$\Delta \lg K_{t,\tau} 1$	$\lg \delta_r, 2$	γ_2	γ_3	$\lg \delta_r, 1$	$\Delta \lg K_{t,\tau} 1$	$\lg \delta_r, 2$	γ_2	γ_3
$\lg L_a = 2,535$						$\lg L_a = -0,465$				
1/100	0,76	0,93	1,32	0,48	0	0,43	1,44	0,95	0,52	0
1/30		0,48					0,96			
1/10		0,19	1,40				0,55			
1/3		0,00	1,46	0,60			0,28	1,00	0,72	0,05
$\lg L_a = 1,535$						$\lg L_a = -1,465$				
1/100	0,70	1,00	1,22	0,50	0	0,10	1,70	0,66	0,53	0,02
1/30		0,55					1,22			
1/10		0,22	1,32				0,81			
1/3		0,00	1,36	0,70			0,54	0,74	0,74	0,06
$\lg L_a = 0,535$						$\lg L_a = -2,465$				
1/100	0,60	1,16	1,12	0,51	0	-0,30	1,68	0,40	0,80	0,38
1/30		0,68					1,20			
1/10		0,27	1,22				0,79			
1/3		0,00	1,27	0,71			0,52	0,48	0,98	0,52

в зоне I, где $\lg \delta_r \leq \lg \delta_r, 1$,

$$\lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau} 1 + \lg K_{t,15}; \quad (9)$$

в зоне II, определяемой неравенством $\lg \delta_r, 1 < \lg \delta_r \leq \lg \delta_r, 2$,

$$\lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau} 1 + (\lg \delta_r - \lg \delta_r, 1) \gamma_2 + \lg K_{t,15}; \quad (10)$$

в зоне III при $\lg \delta_r > \lg \delta_r, 2$

когда $\gamma_3 = 0$,

$$\lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau} 2 + \lg K_{t,15}; \quad (11)$$

когда $\gamma_3 > 0$,

$$\lg K_{t,\tau} = \Delta \lg K_{t,\tau} 2 + (\lg \delta_r - \lg \delta_r, 2) \gamma_3 + \lg K_{t,15}; \quad (12)$$

где $\Delta \lg K_{t,\tau} 2 = \Delta \lg K_{t,\tau} 1 + (\lg \delta_r, 2 - \lg \delta_r, 1) \gamma_2$.

Отметим, что значения $\Delta \lg K_{t,\tau}$ при $\lg \delta_r \geq \lg \delta_r, 2$ одинаковы для ВМ- и ВМ-данных. Это позволяет оценить расхождение между значениями $K_{t,\tau, \text{ВМ}}$ полученными в эксперименте [7] для стимула с максимальным угловым размером ($60'$) при его экспози-

ции $1/3 \leq \tau \leq 1/100$ с и яркости адаптации $\lg L_a = -2,465$ и $\lg L_a = -1,465$, и соответствующими значениями $\lg K_{t,\tau, \text{ВМ}}^{\text{расч}}$, рассчитанными по уравнению (12) при использовании параметров из табл. 3. Приведенные в табл. 4 результаты оценки показывают, что ВМ-данные для указанных величин $\lg L_a$ совпадают в пределах допустимой погрешности.

Результаты расчета величины $K_{t,\tau}$ по приведенным выше формулам и соответствующие им численные значения ВМ-данных [9] представлены в табл. 5. Здесь же показаны расхождения D ВМ-данных с результатами нашего расчета и расчета, выполненного в [9] с помощью компьютерной модели АВСт, основанной на аппроксимации ВМ-данных гиперболой.

Данные табл. 5 показывают, что предложенная в настоящей статье параметрическая модель операционного порога $K_{t,\tau}$ (модель ПВР- $K_{t,\tau}$) позволяет с большей точностью, чем сложная компьютерная модель АВСт [9], оценить его численное значение.

Таблица 4. Расхождение D значений $K_{t,\tau, \text{ВМ}}$ для максимального размера ($60'$) стимула [7] с данными расчета величины $K_{t,\tau, \text{ВМ}}^{\text{расч}}$ по соответствующим параметрам табл. 3

τ, c	$\lg L_a = -1,465, \lg \delta_r = 1,416, \lg K_{t,15} = -1,667$				$\lg L_a = -2,465, \lg \delta_r = 0,902, \lg K_{t,15} = -1,111$			
	$\lg K_{t,\tau, \text{ВМ}}$	$\Delta \lg K_{t,\tau, \text{ВМ}}^{\text{расч}}$	$\lg K_{t,\tau, \text{ВМ}}^{\text{расч}}$	$D, \%$	$\lg K_{t,\tau, \text{ВМ}}$	$\Delta \lg K_{t,\tau, \text{ВМ}}^{\text{расч}}$	$\lg K_{t,\tau, \text{ВМ}}^{\text{расч}}$	$D, \%$
1/100	0,359	2,012	0,345	-3,2	1,309	2,431	1,320	2,6
1/30	-0,139	1,532	-0,135	0,9	0,836	1,951	0,840	0,9
1/10	-0,542	1,112	-0,545	-0,7	0,446	1,541	0,430	-3,6
1/3	-0,604	1,055	-0,612	-1,8	0,391	1,503	0,392	0,2

Примечание: $D = (K_{t,\tau, \text{ВМ}}^{\text{расч}} / K_{t,\tau, \text{ВМ}} - 1) 100$.

Таблица 5. Значения $K_{t,\tau}$, рассчитанные с помощью параметров табл. 3 и модели ПВР-К, и их расхождение D с ВМ-данными

ВМ-данные (п.п. табл. 1 в [8])					Результаты расчета по модели ПВР-К					D , %	
$\lg L_a$	п.п.	A , угл. мин ²	τ , с	$K_{t,\tau,ВМ}$	$\lg \delta_r$	$\lg K_{t,15}$	$\Delta \lg K_{t,\tau}$	$\lg K_{t,\tau}$	$K_{t,\tau}$	Расч.	[8]
2,535	1	314,12	1/30	0,020	1,573	-2,455	0,749	-1,706	0,0197	-1,5	10,9
	2	706,46		0,017	1,749	-2,515		-1,766	0,0171	0,6	10,6
1,535	6	153,85	1/100	0,082	1,322	-2,306	1,260	-1,046	0,090	9,8	11,3
	7	314,12		0,068	1,477	-2,403		-1,143	0,072	5,9	10,4
0,535	8	706,46	1/100	0,113	1,529	-2,359	1,425	-0,934	0,116	2,6	16,6
-0,465	9	6,15	1/30	1,941	0,326	-0,651	0,960	0,309	2,037	4,9	12,6
-1,465	10	6,15	1/10	5,433	0,032	-0,064	0,810	0,746	5,572	2,6	-16,0
	11		1/30	13,74			1,220	1,156	14,32	4,2	-11,2
-2,465	18	6,15	1/10	52,72	-0,482	0,963	0,790	1,753	56,62	7,4	-10,5
	19	12,56	1/100	205,6	-0,327	0,653	1,680	2,333	215,3	4,7	13,2
	20	28,25		114,8	-0,151	0,301	1,740	2,041	109,9	-4,3	13,3
	21	2825,5		20,37	0,849	-1,075	2,411	1,336	21,68	6,4	11,4

Примечание: $D = (K_{t,\tau}/K_{t,\tau,ВМ} - 1)100$.

Прогнозирование вероятности различения стимула

Вероятность различения P_p стимула определяется в МПВР по формулам, приведенным в [5],

$$P_p = 1 - 0,5\Psi^{-\eta}, \Psi > 1 \text{ и } P_p = 0,5\Psi^{\eta}, \Psi < 1, \quad (13)$$

где $\Psi = K/K_{t,\tau}$, K – воспринимаемый контраст объекта, η – показатель уверенности различения, численное значение которого определяется равенством $\eta = -\ln P_{лт,t}$, где $P_{лт,t}$ – операциональный порог вероятности ложной тревоги ($P_{лт}$) при различении объекта в актуальных условиях восприятия.

Для оценки достоверности прогнозирования вероятности различения стимула при его экспозиции $\tau < 15$ с по формулам (13) и параметрической модели воспринимаемого порогового контраста $K_{t,\tau}$ (табл. 3) мы воспользовались результатами эксперимента из работы [10]. В этом эксперименте определены вероятность различения $P_{рз}$ (вероятность правильного обнаружения) и вероятность ложной тревоги $P_{лт}$ по данным, полученным двумя наблюдателями при восприятии на экране монитора (яркости экрана 20 кд/м²) квадратного стимула с линейным размером 32' при его экспозициях $\tau = 0,15, 0,10$ и 0,05 с и контрасте K , равном 0,030 и 0,015.

Таблица 6. Значения вероятности различения $P_{рз}$ и ложной тревоги $P_{лт}$ по данным эксперимента, приведенным на рис. 2 в работе [10]

τ , с	$K = 0,030$		$K = 0,015$	
	$P_{рз}$	$P_{лт}$	$P_{рз}$	$P_{лт}$
0,05	0,70	0,20	0,45	0,31
0,10	0,85	0,10	0,64	0,24
0,15	0,92	0,07	0,75	0,20

Результатам, полученным при считывании графических значений величин $P_{рз}$ и $P_{лт}$ и представленным в [10], соответствуют уравнения

$$P_{рз} = 1,02 - 1,6P_{лт} \text{ для } K = 0,030 \text{ и} \quad (14)$$

$$P_{рз} = 1,29 - 2,7P_{лт} \text{ для } K = 0,015,$$

подтверждающие линейный характер зависимости $P_p = f(P_{лт})$, обнаруженный нами [11] по данным другого эксперимента.

Согласно этой зависимости вероятность $P_p = 0,5$ различения стимула в конкретных условиях восприятия соответствует значению порога вероятности ложной тревоги $P_{лт,t}$ и, следовательно, значение показателя уверенности различения $\eta = -\ln P_{лт,t}$. Таким образом, условиям различения стимула в эксперименте [10] отвечают значения

$$P_{лт,t} = 0,325, \eta = 1,12 \text{ для } K = 0,030 \text{ и} \quad (15)$$

$$P_{лт,t} = 0,293, \eta = 1,23 \text{ для } K = 0,015.$$

Для значений экспозиции стимула в эксперименте [10] с помощью данных табл. 3 нами определены численные значения параметров $\lg \delta_{r,1}$, $\Delta \lg K_{t,1}$, γ_2 , $\lg \delta_{r,2}$, относящиеся к яркостям адаптации $\lg L_a = 1,535$ и 0,535. С помощью линейной интерполяции полученных данных определены указанные параметры в предположении, что яркость экрана монитора в эксперименте $L = 20$ кд/м² эквивалентна яркости адаптации 3С оператора.

На этом основании для $\tau = 0,15, 0,10$ и 0,05 с рассчитаны порог воспринимаемого контраста $K_{t,\tau}$ и вероятность P_p различения стимулов, численные значения которых представлены в табл. 7.

Полученные значения расхождения расчетных значений P_p с данными эксперимента $P_{рз}$ из табл. 6

Таблица 7. Сравнение данных эксперимента P_{ps} из табл. 6 и расчета P_p по модели ПВР

τ, c	Результаты расчета							$K = 0,030,$ $\eta = 1,12$		$K = 0,015,$ $\eta = 1,23$	
	$L_a = 20 \text{ кд/м}^2, \lg L_a = 1,301, \delta_s = 32' = 9,3 \text{ мрад}, \delta_r = 0,1824 \text{ мрад},$ $\lg \delta_r = 1,708, \lg \delta_r^* = 0,916, \lg K_{t,15}^* = -1,832, \lg K_{t,15} = -2,531$							P_p	$D, \%$	P_p	$D, \%$
	$\lg \delta_r$	$\Delta \lg K_{t,\tau} 1$	$\lg \delta_r 2$	γ_2	$\Delta \lg K_{t,\tau} 2$	$\lg K_{t,\tau}$	$K_{t,\tau}$				
0,05	0,68	0,433	1,20	0,50	0,693	-1,838	0,0145	0,778	11	0,520	16
0,10		0,232	1,30	0,50	0,542	-1,989	0,0103	0,849	-0,1	0,685	-6,6
0,15		0,137	1,32	0,58	0,508	-2,023	0,0095	0,862	-6,3	0,715	4,9

Примечание: $D = (P_p/P_{ps} - 1)100$.

подтверждают достоверность результатов прогнозирования вероятности различения стимулов с помощью представленной в настоящей статье параметрической модели порога воспринимаемого контраста $K_{t,\tau}$ зрительных стимулов при их экспозиции $1/100 \leq \tau < 15$ с.

Заключение

На основании данных эксперимента из работ [7] (В1-данные) и [8, 9] (ВМ-данные) разработана параметрическая модель воспринимаемого порогового контраста $K_{t,\tau}$ зрительных стимулов для широкого диапазона их углового размера, экспозиции стимула $1/100 \leq \tau < 15$ с и яркости адаптации $-2,465 \leq \lg L_a \leq 2,535$ (см. табл. 3 и формулы (7)–(12)).

Разработка данной модели позволила:

1) выявить неизвестные ранее закономерности восприятия зрительных стимулов при экспозиции $1/100 \leq \tau < 15$ с (рис. 1–4),

2) рассчитать значения воспринимаемого порогового контраста зрительных стимулов при экспозиции $1/100 \leq \tau < 15$ с в диапазоне $-2,465 \leq \lg L_a \leq 2,535$, достоверность которых подтверждена их сравнением с В1- и ВМ-данными (табл. 4 и 5),

3) подтвердить линейный характер зависимости $P_p = f(P_{ps})$,

4) подтвердить согласие данных независимого эксперимента и результатов прогнозирования вероятности различения зрительных стимулов для экспозиции $\tau < 15$ с (табл. 7), полученных с помощью формул (13) модели МПВР [4] и разработанной в настоящей статье параметрической модели ПВР- $K_{t,\tau}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шеленин Ю.Е., Глезер В.Д., Бондарко В.М. и др. Пространственное зрение // Физиология зрения / Ред. А.Л. Бызов. М.: Наука, 1992. С. 528–585.
2. Аксютлов Л.Н. Операциональные пороги пространственного разрешения зрительной системы и восприятия контраста объектов // Оптический журнал. 2002. № 8. С. 36–42.
3. Blackwell H.R. Contrast Thresholds of the Human Eye // JOSA. 1946. V. 36. № 11. P. 624–643.
4. Аксютлов Л.Н. Прогнозирование вероятности распознавания объектов по космическим снимкам // Исследование Земли из космоса. 1995. № 2. С. 3–11.
5. Бардин К.В., Забродин Ю.М. Проблемы психического отражения свойств объективного мира на сенсорно-перцептивном уровне // Психофизические исследования восприятия и памяти. М.: Наука, 1981. С. 9–42.
6. Крость В.М. Психологические механизмы зрительного восприятия: интегральная модель // Вопросы психологии. 1998. № 6. С. 44–58.
7. Blackwell H.R. Specification of interior illumination levels // Illuminating Eng. 1959. V. 54. № 6. P. 317–353.
8. Matchko R.M., Gerhart G.R. Parametric analysis of the Blackwell-McCready data // Opt. Eng. 1998. V. 37. № 7. P. 1937–1944.
9. Matchko R.M., Gerhart G.R. ABCs of foveal vision // Opt. Eng. 2001. V. 40. № 12. P. 2735–2745.
10. Юхно П.М., Огреб С.М., Марек Я.Л. Исследование особенностей визуального поиска в условиях временных ограничений и неопределенности относительно наличия объекта в зоне поиска // Оптический журнал. 2002. № 5. С. 51–55.
11. Аксютлов Л.Н. Взаимосвязь вероятности различения зрительных стимулов и вероятности ложной тревоги // Оптический журнал. 2004. № 7. С. 36–42.