УДК 612.84

ПОРОГИ ВОСПРИЯТИЯ УГЛОВОГО РАЗМЕРА, КОНТРАСТА И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВРЕМЕНИ ОБНАРУЖЕНИЯ СТИМУЛА КАК ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ЗРИТЕЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

© **2007 г.** **Л. Н. Аксютов**, канд. техн. наук

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

С помощь метода прогнозирования вероятности различения зрительных стимулов и объектов натурных сцен выполнен анализ пороговой разности яркости $\Delta L_{\min}$, предложенной К. Нарисада в качестве оценки зрительной работоспособности в диапазоне яркости адаптации $-1{,}0 \le \lg L_a \le 3{,}0$. Численные значения контраста $K_{\min} = \Delta L_{\min}/L_a$ существенно отличаются от значений порогового контраста, полученных в экспериментах Блэквелла и рассчитанных нами для тех же условий зрительного восприятия. Результаты анализа дают основание полагать, что предложенная величина $\Delta L_{\min}$ нуждается в уточнении. Показано, что в качестве оценки зрительной работоспособности можно использовать вероятность различения стимула (объекта).

Коды OCIS: 330.3790, 330.4060.

Поступила в редакцию 14.02.2007.

Введение

В настоящее время рост потребления электричества для освещения создал экологические проблемы, связанные как с выработкой электроэнергии, так и с рассеянием света в окружающей среде [1]. В связи с этим поставлена задача снижения уровня электрической освещенности без ухудшения качества освещения, что предполагает научное обоснование ее решения по критерию *зрительной работоспособности* (ЗРС). Для оценки ЗРС в [1] предложена *пороговая разность яркости* (ПРЯ) $\Delta L_{\min}$, представленная зависимостью:

$$\Delta L_{\min} = f(L_\Sigma = L_b + L_{eq}), \qquad (1)$$

где L_{eq} – эквивалентная вуалирующая яркость, соответствующая условиям зрительного восприятия стимула; L_b – яркость неравномерного фона, при которой яркость адаптации L_a выступает в качестве параметра [1].

Методика определения ПРЯ в [1] основана на данных лабораторного эксперимента, в котором стимул с угловым размером $\gamma = 7'$ располагался в центре поля диаметром $30'$ и с экспозицией $\tau = 0{,}125$ с визуально воспринимался при равномерной яркости поля.

Полученные в этом эксперименте данные положены в основу оценки видимости объекта в условиях освещения автомобильной трассы, для которых величина $\Delta L_{\min}$ пересчитывается с учетом "полевого фактора дорожного освещения", экспозиции и углового размера воспринимаемого объекта.

Результаты эксперимента, полученные в [2] с применением методики Нарисада для углового размера $\gamma = 4'$ стимула, визуально воспринимаемого на равномерном фоне в диапазоне яркости адаптации $0{,}1 \le L_a \le 3$ кд/м^2 при экспозиции $\tau = 0{,}2$ с [2], близки, по мнению авторов этой работы, к данным эксперимента Блэквелла, которые описываются эмпирической формулой Бодмана (см., например, [3]). Однако этого факта недостаточно для подтверждения достоверности результатов, которые могут быть получены с помощью методики Нарисада [1] в различных условиях зрительного восприятия. Такой вывод обусловлен тем, что в методике Нарисада не определено, какой вероятности визуального различения объекта соответствует величина $\Delta L_{\min}$ и какова продолжительность времени его различения не только в центральной части поля зрения (фовеальная зона с угловым размером 6°), но и в более широком *поле визуального поиска* (ПВП), соответствующем условиям вождения автомобиля. При этом порог продолжительности времени различения объекта в ПВП с вероятностью $P = 0{,}5$ и продолжительности времени различения объекта с вероятностью $P > 0{,}5$ могут существенно отличаться.

Цель настоящей статьи состоит в сравнительной оценке численных значений величины ПРЯ $\Delta L_{\min}$, предложенной в [1], и значений ΔL_t порогового контраста, рассчитанного с помощью *метода прогнозирования вероятности различения* (МПВР) для диапазона яркости адаптации $-1{,}0 \le \lg L_a \le 3{,}0$, от которой зависят:

1) относительный угловой размер δ_r воспринимаемого стимула, равный отношению его эквивалентного углового размера $\delta_s = \gamma'/3{,}44$ к порогу $\delta_t = f(L_a)$ углового разрешения *зрительной системы* (ЗС) [4];

2) значение порогов K_t и $K_{t\tau}$ воспринимаемого контраста стимула при экспозициях $\tau = 15$ с и $\tau < 15$ с соответственно [5];

3) пороговое значение t_t продолжительности времени различения стимула в секундах.

Указанные пороговые значения определяют вероятность различения стимула (объекта), которую можно рассматривать как оценку решения зрительной задачи и, следовательно, как оценку зрительной работоспособности.

Анализ оценки ПРЯ при восприятии стимула в неравномерном по яркости поле зрения

В [1] утверждается, что для условий дорожного освещения "нельзя принимать пороговый контраст за основу для оценок уровня видимости" [1]. Данное утверждение ошибочно, так как согласно закону Вебера (см. [6]) визуально воспринимается не разница уровней раздражителей (в рассматриваемом случае – уровней яркости стимула и фона), а отношение этой разницы к величине фонового раздражителя. На этом основании Фехнер установил (см. там же), что воспринимаемое пороговое значение "едва заметного различия" пропорционально логарифму отношения ПРЯ стимула и фона к яркости фона.

Следовательно, вероятность решения зрительной задачи определяется отношением воспринимаемого контраста стимула к его флуктуирующему во времени порогу, среднее значение которого согласно распределению Гаусса соответствует вероятности 0,5 визуального различения стимула.

Порог, соответствующий вероятности 0,5 различения стимула, называется "операциональным" [6]. Следовательно, пороговые значения параметров, характеризующих в МПВР визуальное восприятие стимула или объекта при вероятности 0,5 их различения, также относятся к "операциональным". Например, отношение пороговой величины ΔL_t разности яркости стимула и фона к яркости адаптации L_a ЗС при вероятности 0,5 различения стимула эквивалентно операциональному порогу K_t его воспринимаемого контраста.

Вероятность различения стимула (объекта) в условиях зрительного восприятия при равномерной яркости фона рассчитывается в МПВР [5] по формуле

$$P_{\text{р}} = 1 - 0{,}5\Psi^{-3{,}2},\ \Psi = K/K_t > 1,\ P_{\text{р}} > 0{,}5, \qquad (2)$$

а для условий неравномерной яркости ПВП [7] – по формуле

$$P_{\text{р}} = 1 - 0{,}5\Psi^{-1{,}1},\ \Psi = t/t_t > 1,\ P_{\text{р}} \ge 0{,}5, \qquad (3)$$

где t и t_t – продолжительность времени различения и его операциональный порог соответственно.

Рассмотрим теперь зависимость $\Delta L_{\min} = f(L_b + L_{eq})$ [1], частично воспроизведенную нами на рис. 1, в которой яркость адаптации выступает в качестве параметра.

При неравномерном распределении яркости в поле зрения численное значение $\Delta L_{\min}$ эквивалентно пороговой величине $\Delta L_{t,c} = \Delta L_t + \Delta L_c$, где величина ΔL_t соответствует уровню равномерной яркости фона, эквивалентной яркости адаптации ЗС, а величина ΔL_c обусловлена уровнем неравномерной составляющей яркости фона ("clatter"), или фоновой помехой.

Известно, что при неравномерной яркости поля зрения (или ПВП) и соответствующей ей яркости адаптации L_a контрастная чувствительность зрения уменьшается в зависимости от соотношения средних значений яркости L_1 в центре поля зрения (в котором находится воспринимаемый стимул) и яркости L_2 его периферии [3]. В результате индуктивного действия яркостей L_1 и L_2 воспринимаемый разностный порог ΔL_c стимула возрастает, что определяет (с учетом уравнений, приведенных в [3]) величину $R = L_a/L_1$

$$R = (\Delta L_R/\Delta L_c)(0{,}456 + L_a^{0,5})^2(0{,}456 + L_1^{0,5})^{-2}, \qquad (4)$$

где $\Delta L_R = 0{,}007(0{,}456 + L_a^{0,5})^2$.

Из уравнения (4) следует, что величина ΔL_c рассчитывается по формуле

$$\Delta L_c = 0{,}007 L_1 L_a^{-1}(0{,}456 + L_a^{0,5})^4(0{,}456 + L_1^{0,5})^{-2}. \qquad (5)$$

При неограниченном времени визуализации, эквивалентном экспозиции стимула 15 с, и неравномерной яркости поля зрения, которой соответствует яркость адаптации L_a ЗС, воспринимаемый порог контраста $K_t = \Delta L_t/L_a$ стимула возраста-

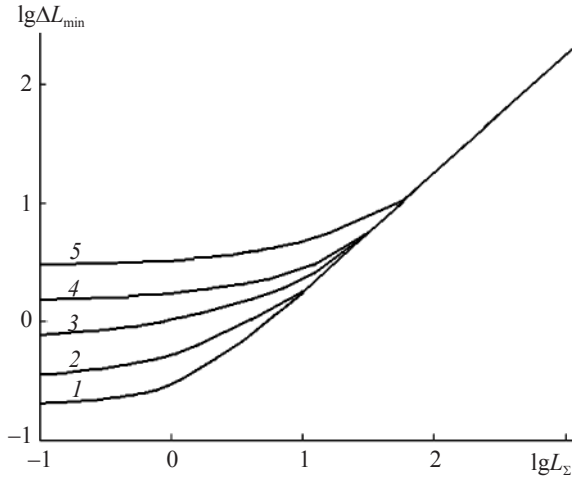


Рис. 1. Зависимости $\lg\Delta L_{\min} = f(\lg L_\Sigma)$ по данным [1]. Параметром кривых *1–5* выступает величина $\lg L_a = -1{,}0$ (*1*), 1,0 (*2*), 2,0 (*3*), 2,477 (*4*), 3,0 (*5*).

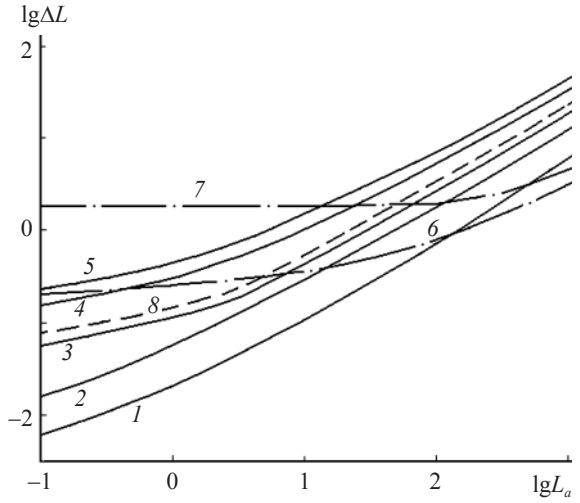


Рис. 2. Зависимости $\lg\Delta L = f(\lg L_a)$. $\lg\Delta L = \lg\Delta L_t$ для $\gamma = 7'$ (*1*) и $4'$ (*2*) при $\tau = 15$ с; $\lg\Delta L = \lg\Delta L_{t,\tau}$ для $\gamma = 4'$ при $\tau = 1/5$ с (*3*), 1/20 с (*4*), 1/30 с (*5*); $\lg\Delta L = \lg\Delta L_{\min}$ при $\lg L_\Sigma = -1{,}0$ (*6*), 1,0 (*7*); $\lg\Delta L = \lg(\Delta L_{t,\tau} + \Delta L_c)$ для $\gamma = 4'$ при $\tau = 0{,}2$ с и $L_1 = 500$ кд/м^2 (*8*).

ет на величину $\Delta L_c/L_a$, что выражается равенством $K_{t,c} = (\Delta L_t + \Delta L_c)/L_a$. При кратковременной экспозиции ($\tau < 1$ с) стимула и той же яркости адаптации ЗС в неравномерном по яркости поле зрения пороговый контраст выражается аналогичным равенством $K_{t\tau,c} = (\Delta L_{t\tau} + \Delta L_c)/L_a$.

На рис. 2 линии *1*, *2* и *3–5* представляют результаты нашего расчета зависимости $\lg\Delta L = f(\lg L_a)$ для экспозиции τ стимула 15 с и $\tau < 1$ с, а линии *6*, *7* относятся к данным рис. 1 для значений $\lg L_\Sigma = -1{,}0$ и 1,0 соответственно. Линия *8* иллюстрирует результаты расчета величины $\Delta L_{t\tau,c} = (\Delta L_{t\tau} + \Delta L_c)$, где численные значения ΔL_c получены для $L_1 = L_{1,a} = 5$ кд/м^2 и $L_1 = L_{1,b} = 500$ кд/м^2 при угловом размере стимула $\delta_s = 4'$ и $\tau = 0{,}2$ с. Поскольку отношение расчетных величин ΔL_c для $L_{1,a}$ и $L_{1,b}$ в среднем составило 39%, а отношение соответствующих логарифмов $\lg\Delta L_{t\tau,c} \approx 3{,}5\%$, линия *8* на рис. 2 представляет зависимость $\lg\Delta L_{t\tau,c} = f(\lg L_a)$ только для $L_{1,b} = 500$ кд/м^2.

На рис. 2 видно, что характер линий *6*, *7*, представляющих $\Delta L = \Delta L_{\min}$, существенно отличается от характера линий *3–5* ($\Delta L = \Delta L_{t\tau}$) и *8* ($\Delta L = \Delta L_{t\tau,c}$).

Поскольку решение задачи визуального различения стимула (объекта) в конкретных условиях восприятия определяется его пороговоым контрастом, данные рис. 2 воспроизведены функцией $\lg K_t = f(\lg L_a)$ на рис. 3 для соответствующих значений $K_t = \Delta L/L_a$.

Штриховая линия *9* на рис. 3 представляет данные эксперимента Блэквелла (см., например, [1]), полученные при равномерной яркости фона для параметров $\gamma = 4'$ и $\tau = 0{,}2$ с, которым соответствуют результаты расчета порогового контраста ($K_{t\tau B}$) по эмпирической формуле Бодмана [3]. Линии *3* и *8* на рис. 3 представляют результаты нашего расчета для этих же значений параметров γ и τ при равномерном ($K_{t\tau}$) и неравномерном ($K_{t\tau,c}$) яркостном фоне соответственно. На рис. 3 видно, что расхождение штриховых линий *8* и *9* значительно.

В табл. 1 приведены результаты расчета величин K_t и $K_{t\tau}$, а также численные значения величины $K_{\min} = \Delta L_{\min}/L_a$, соответствующие воспроизведен-

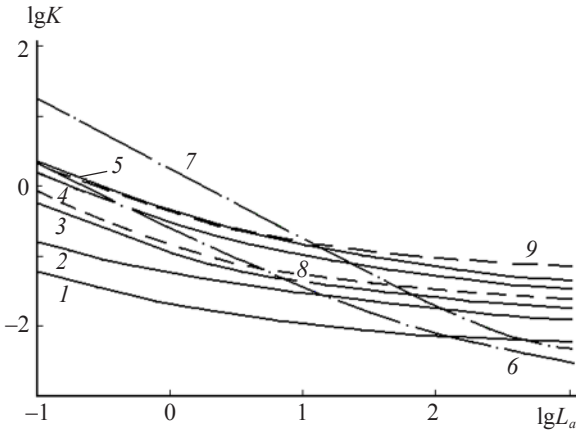


Рис. 3. Зависимости $\lg K = f(\lg L_a)$. *1–8* – $\lg K = \lg(\Delta L/L_a)$, где ΔL соответствует данным рис. 2 для тех же номеров линий; *9* – зависимость, рассчитанная по формуле Бодмана.

Таблица 1. Значения порогового контраста стимула размером $\gamma = 4'$, воспринимаемого на равномерном фоне при экспозиции $\tau = 15$ с (K_t) и $\tau = 0{,}2$ с ($K_{t\tau}$)

$\lg L_a$	–1,0	–0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
K_t	0,158	0,089	0,057	0,030	0,029	0,022	0,018	0,014	0,012
$K_{t\tau}$	0,566	0,250	0,113	0,058	0,042	0,032	0,025	0,020	0,018
$K_{t\tau,B}$	1,972	0,891	0,436	0,247	0,160	0,116	0,092	0,079	0,072
$K_{\min}$	1,99	1,0	0,25	0,091	0,036	0,016	0,0076	0,0048	0,0030
$K_{t\tau,B}/K_{t\tau}$	3,49	3,56	3,86	4,26	3,81	3,63	3,68	3,95	4,0
$K_{\min}/K_{t\tau}$	3,53	2,84	2,21	1,57	0,86	0,59	0,03	0,24	0,17
$K_{\min}/K_{t\tau,B}$	1,01	0,80	0,57	0,37	0,23	0,14	0,083	0,061	0,042

ным на рис. 1 данным Нарисада [1], представленным линиям *6* и *7* на рис. 2 и 3.

Следует отметить, что значения уточненных данных эксперимента Blackwell H.R, McCready D.W. (см. [5]), полученные для углового размера стимула от 0,72 до 15,45 мрад, воспринимаемого на равномерном фоне в диапазоне яркости адаптации – $2{,}464 \le \lg L_a \le 2{,}535$ при экспозиции 0,01 с $\le \tau \le$ 0,1 с [8], расходятся с соответствующими данными $K_{t\tau}$ нашего расчета [5] в пределах от +5% до –10%.

Сравнение отношений $K_{\min}/K_{t\tau}$ и $K_{t\tau B}/K_{t\tau}$ (см. табл. 1) показало, что в диапазоне $-1{,}0 \le \lg L_a \le 3{,}0$ данные Нарисада, а также данные эксперимента Блэквелла, представленные формулой Бодмана, не согласуются с соответствующими данными нашего расчета и, следовательно, с уточненными данными эксперимента Blackwell H.R, McCready D.W.

В приведенном выше контексте причину расхождения данных экспериментов Блэквеллла 1958 и 1981 гг. для идентичных условий восприятия стимула трудно предположить.

Оценка продолжительности времени и вероятности визуального различения стимула (объекта) в ПВП

Вероятность визуального различения объекта при неравномерной яркости ПВП рассчитывается в МПВР по формуле (3), где пороговая величина t_t продолжительности времени различения стимула (объекта) определяется выражением

$$t_t = (0{,}08/K)^2 \exp(2{,}33 - 3{,}16 \ln\delta_r + \ln\Omega)]. \qquad (7)$$

Здесь K – воспринимаемый контраст стимула при его относительном угловом размере δ_r, Ω – величина, численно равная телесному углу ПВП, выраженному в угл. град^2; $\delta_r = \delta_s/\delta_t$, где $\delta_s = \omega^{1/2}$ – угловой размер воспринимаемого стимула, эквивалентного его телесному углу ω, выраженному в мрад^2; δ_t – угловое разрешение ЗС, определяемое в диапазоне яркости адаптации $-2{,}09 < \lg L_a \le 4{,}0$ по формуле

$$\delta_t = \ln 2/(\lg L_a + 2{,}5). \qquad (8)$$

С помощью уравнений (7) и (8) рассчитан порог t_t продолжительности времени различения стимула для значений его углового размера γ и контраста K, приведенных в [9].

Расчетные значения величины t_t в табл. 2 близки к пороговыми значениям $t_{t,э}$, полученным с помощью линейной интерполяции данных эксперимента [9] для продолжительности времени t визуального различения и вероятности обнаружения $P_э = 0{,}4$ и $P_э = 0{,}6$ стимула при соответствующих значениях его углового размера и контраста.

В табл. 2 приведены также результаты расчета пороговой величины t_t по формуле (7) и вероятности различения $P_р$ по формуле (3). Среднее расхождение значений t_t и $t_{t,э}$, полученных нами по данным

Таблица 2. Порог t_t продолжительности времени обнаружения стимула при его угловом размере γ и контрасте K в поле визуального поиска $\Omega = 60° \times 70°$ при яркости адаптации $L_a = 300$ кд/м^2 (по данным табл. 2.5 в [9])

γ, угл. мин [9]	3,33	4,71	6,67	9,43	18,85
			$K = 0{,}08$		
$t_t(t_{t,э})$, с	94,3 (96,5)	31,5 (31,5)	10,5 (10,5)	3,5 (2,8)	0,39 (0,5)
$P_э$, [9]			$P_р$		
0,60	0,649	0,631	0,624	0,530	0,689
0,80	0,838	0,831	0,822	0,755	0,855
0,98	0,939	0,959	0,956	0,940	0,963
			$K = 0{,}16$		
$t_t(t_{t,э})$	23,6 (21)	7,9 (5,6)	2,6 (2,9)	0,88 (0,95)	0,1 (—)
$P_э$, [9]			$P_р$		
0,60	0,567	0,520	0,661	0,645	—
0,80	0,790	0,736	0,814	0,808	
0,98	0,952	0,913	0,933	0,951	
			$K = 0{,}32$		
$t_t(t_{t,э})$	5,89 (4,75)	1,97 (1,6)	0,66 (0,45)	0,22 (0,25)	0,024 (—)
$P_э$, [9]			$P_р$		
0,60	< 0,5	0,508	< 0,5	0,644	—
0,80	0,732	0,777	0,645	0,797	
0,98	0,916	0,918	0,905	0,923	

Примечание: $t_{t,э}$ и $P_э$ – данные эксперимента (см. табл. 2.5 в [9]), $P_р$ – расчет по формуле (3).

Таблица 3. Величина $t_{0,65} = 1{,}383\, t_t$ для вероятности различения $P = 0{,}65$ стимула размером $\gamma^2 = (17')^2$ и данные расчета $\bar{t}_р$ из табл. 2.8 в [9]

K, [9]	$\Omega^{1/2} = 2\beta$ [9]					
	20°		45°		60°	
	$t_{0,65}$, с	$\bar{t}_р$, с	$t_{0,65}$, с	$\bar{t}_р$, с	$t_{0,65}$, с	$\bar{t}_р$, с
$L_a = 20$ кд/м^2						
0,13	5,59	7,6	28,4	38	50,5	60
0,25	1,51	2,0	7,66	10	13,6	16
0,45	0,47	0,7	2,36	3,0	4,2	5,6
$L_a = 100$ кд/м^2						
0,13	3,28	3,8	16,6	22,1	29,6	40,1
0,25	0,89	1,0	4,49	5,7	7,99	9,2
0,45	0,28	0,4	1,38	1,7	2,46	3,8
$L_a = 500$ кд/м^2						
0,13	2,06	2,6	10,4	13,2	18,5	23,4
0,25	0,55	0,7	2,82	3,6	5,03	6,3
0,45	0,17	0,3	0,87	1,3	1,55	2,2

эксперимента, в котором "время обнаружения может изменяться от наблюдателя к наблюдателю более, чем в 2 раза" [9], составило 12,7%. Учитывая, что в данном эксперименте участвовали три наблюдателя, можно считать приемлемым расхождение значений t_t и $t_{t,э}$ в табл. 2, а также расчетных и полученных в эксперименте значений $P_р$ и $P_э$.

Следует отметить, что при расчетах в [9] учитывается среднее время $\bar{t}_р$, соответствующее вероятности различения стимула $P \approx 0{,}65$. По приведенным выше формулам были рассчитаны значения величины $t_{0,65} = 1{,}383 t_t$ для $P = 0{,}65$. В табл. 3 приведены полученные значения, а также (для сравнения) соответствующие значения величины $\bar{t}_р$, рассчитанные по формуле, полученной в [9].

$$P = 1 - \exp(-\lambda t),\ \lambda = 16K^2\gamma^3 L^{0,3}/(2\beta)^2,$$

где L – яркость равномерного фона, $(2\beta)^2$ – эквивалент величины Ω в ур. (7), t – продолжительность времени обнаружения стимула.

Расхождение $\Delta = t_{0,65}/\bar{t}_р - 1$ в среднем составило 32%.

Заключение

Анализ данных из работ [1] и [2] и их сравнение с результатами нашего расчета, выполненного с помощью формул разработанного нами метода прогнозирования вероятности различения, показали, что предлагаемая в [1] методика, основу которой составляет оценка уровня видимости объекта при искусственном освещении, нуждается в доработке. Доработка предполагает учет пороговых значений углового размера, контраста и продолжительности времени обнаружения стимула (объекта) с вероятностью 0,5 в поле зрения (в поле визуального поиска) при условиях освещения, от которых зависит уровень видимости, обеспечивающий решение актуальной зрительной задачи с заданной вероятностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нарисада К.* Баланс между энергией, окружающей средой и зрительной работоспособностью // Светотехника. 2000. № 1. С. 4–10.
2. *Карасава Й., Нарисада К.* Эффективность обнаружения объекта и уровень видимости // Светотехника. 2003. № 6. С. 14–19.
3. *Мешков В.В., Матвеев А.Б.* Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
4. *Аксютов Л.Н.* Операциональные пороги пространственного разрешения зрительной системы и восприятия контраста объектов // Оптический журнал. 2002. № 8. С. 36–42.
5. *Аксютов Л.Н.* Параметрическая модель порога воспринимаемого контраста для прогнозирования вероятности различения зрительных стимулов при их экспозиции менее 15 с // Оптический журнал. 2007. № 4. С. 75–81.
6. *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.
7. *Аксютов Л.Н.* Анализ моделей для оценки влияния фоновой помехи на вероятность визуального различения объектов // Оптический журнал. 2003. № 9. С. 24–31.
8. *Matchko R.M., Gerhart G.R.* ABCs of foveal vision // Opt. Eng. 2001. V. 40. № 12. P. 2735–2745.
9. *Травникова Н.П.* Эффективность визуального поиска. М: Машиностроение, 1985. 128 с.