

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

## OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

---

УДК 621.397.6  
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-776-789

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ И РАСПОЗНАВАНИИ ОБЪЕКТОВ

В. А. Овсянников\*, Я. В. Овсянников

*Государственный институт прикладной оптики, Казань, Россия*

\*jar\_ovs@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается усовершенствованная инженерная методика оценки вероятности обнаружения и распознавания объектов местности посредством телевизионных камер (ТК) воздушного и наземного базирования, работающих в видимом и/или ближнем инфракрасном диапазоне спектра в дневное и ночное время суток. Представленная методика концептуально схожа с таковой для тепловизионных приборов, что обеспечивает возможность получения сопоставимых оценок показателей эффективности этих видов аппаратуры наблюдения и, значит, прогнозирование эффективности всего оптико-электронного комплекса, состоящего из телевизионного и тепловизионного каналов. Предложенная расчетно-аналитическая методика, в отличие от известных, учитывает ряд дополнительных существенных факторов: работу ТК в зависимости от уровня естественной освещенности местности как в шумограниченном, так и контрастно-ограниченном режиме, когда их эффективность лимитируется соответственно шумом ТК или же ограниченной контрастной чувствительностью зрительного анализатора человека-оператора; тип и балльность облачности, ослабляющей облученность объекта от Солнца; турбулентность атмосферы, размывающую изображение; дымку, увеличивающую фотонный шум ТК; возможность выбора условий дешифрирования изображения (яркости, контрастности, увеличения); усовершенствованную модель зрительного анализатора оператора при пространственно-временном интегрировании визуальных сигналов и его квалификацию.

**Ключевые слова:** телевизионная камера, операционная модель, обнаружение, распознавание объектов

**Ссылка для цитирования:** Овсянников В. А., Овсянников Я. В. Усовершенствование расчетно-аналитической методики оценивания эффективности телевизионных камер при обнаружении и распознавании объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 776–789. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-776-789.

### IMPROVEMENT OF THE CALCULATION AND ANALYTICAL METHOD OF TV-CAMERA EFFICIENCY ASSESSMENT IN OBJECTS DETECTION AND RECOGNITION

V. A. Ovsyannikov\*, Ya. V. Ovsyannikov

*State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia*

\*jar\_ovs@mail.ru

**Abstract.** An improved engineering methodology for assessing the probability of detection and recognition of terrain objects using air- and ground-based television cameras operating in the visible and/or near infrared range of the spectrum during the day and night is considered. The presented methodology is conceptually similar to that for thermal imaging devices, which makes it possible to obtain comparable estimates of the performance indicators of these types of surveillance equipment and, therefore, to predict the performance of the entire optical-electronic complex, consisting of television and thermal imaging channels. The proposed calculation and analytical method, unlike the known ones, takes into account a number of additional significant factors: the television camera operation depending on the level of natural illumination of the area both in noise-limited and contrast-limited modes, when their efficiency is limited, respectively, by the noise of the camera or the limited contrast sensitivity of the visual analyzer of the human operator; the type and severity of cloudiness, weakening the irradiation of the object from the Sun; atmospheric turbulence, select image

deciphering conditions (brightness, contrast, visible magnification); an improved model of the operator's visual analyzer during spatial-temporal integration of visual signals and its qualifications.

**Keywords:** television camera, operational model, object detection, object recognition

**For citation:** Ovsyannikov V. A., Ovsyannikov Ya. V. Improvement of the calculation and analytical method of TV-camera efficiency assessment in objects detection and recognition. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 776–789 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-776-789.

**Введение.** Одним из перспективных направлений развития видовых оптико-электронных систем воздушного и наземного базирования является объединение информации, получаемой разнотипными датчиками, работающими в различных спектральных диапазонах, причем особенно продуктивным считается комбинирование или комплексирование тепловизионного и телевизионного каналов этих систем, что повышает вероятность вскрытия (обнаружения и/или распознавания) объектов местности. Поскольку данные каналы, основанные на современной элементной базе, имеют практически одинаковую структуру, а потребителем видеинформации в обоих случаях является человек, для обеспечения оптимального сочленения каналов и сопоставимости оценок их эффективности, необходимых для прогнозирования таковой всей системы, целесообразно использовать общие, унифицированные методики оценивания этой эффективности, определяемой вероятностями вскрытия объектов, находящихся на заданном удалении. Эти методики представляют собой соответствующие операционные модели — совокупности зависимостей, связывающих показатели эффективности с основными техническими параметрами каналов и условиями их использования, а также с параметрами фоноцелевой, помеховой и погодной обстановки. Задачей, рассматриваемой в настоящей статье, является развитие операционной модели одного из основных компонентов оптико-электронных систем — твердотельных телевизионных камер (ТК).

Актуальность поставленной задачи определяется тем, что известные методики оценивания эффективности ТК при вскрытии объектов (например, [1–5]) чрезмерно упрощены и, главное, построены на существенно различной теоретической базе, что дезориентирует пользователя и далеко не всегда позволяет получать достаточно надежные, вызывающие доверие результаты. В отличие от этих методик, представленная ниже операционная модель ТК учитывает:

— влияние на эффективность ТК не только ее шума, но и контрастной чувствительности зрительного аппарата оператора-дешифровщика, т. е. работу ТК в зависимости от естественной освещенности местности как в шумограниченном, так и контрастно-ограниченном режиме;

— тип и балльность облачности, ослабляющей облученность объекта от Солнца, турбулентность атмосферы, размывающую телевизионное изображение, и дымку, увеличивающую фотонный шум ТК;

— возможность выбора условий наблюдения изображения, комфортных для оператора-дешифровщика;

— усовершенствованную модель зрительного анализатора оператора при пространственно-временном интегрировании визуальных сигналов.

Корректный учет этих дополнительных и уточнение влияния других существенных факторов расширяет диапазон применения ТК и снижает погрешность прогнозирования показателей их эффективности, доводя ее до уровня, который определяется только методической погрешностью, присущей используемой в операционной модели ТК самой концепции эквивалентных мир [6].

**Методика решения задачи.** Для оценки вероятности вскрытия посредством ТК наземных объектов далее используем подход, аналогичный подходу, разработанному для оценки эффективности несканирующих тепловизионных приборов, методы расчета которых достаточно хорошо отработаны [7].

Считаем, что в ТК используются кремниевые фотоприемники — приборы с зарядовой связью, чувствительные в диапазоне спектра  $\Delta\lambda = 0,4 \dots 1,1$  мкм, весьма малые размеры элементов

которых обеспечивают максимально высокую разрешающую способность ТК — их основное достоинство. При этом существенно то, что в летних условиях в видимом диапазоне спектра, в котором облученность земной поверхности от Солнца максимальна, разность спектральных коэффициентов яркости типовых наземных объектов, в частности транспортной техники, и естественных фонов положительна, а в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне 0,7–1,1 мкм отрицательна, причем контрасты объектов в этой спектральной области в 1,5–2 раза больше (по абсолютной величине) их контрастов в видимом диапазоне. Помимо этого, в данном диапазоне спектра имеют место лучшие, чем в видимом, внешние условия функционирования ТК — более высокая прозрачность и меньшая турбулентность атмосферы.

Однако в зимнее время года яркостные контрасты типовых объектов на фоне снежного покрова однополярны (конкретно — отрицательны) во всем диапазоне спектра 0,4–1,1 мкм, поэтому для повышения эффективности ТК их спектральные рабочие диапазоны  $\Delta\lambda$  рекомендуется адаптировать к времени года следующим образом:

$$\Delta\lambda = \begin{cases} 0,4 - 0,7 \text{ или } 0,7 - 1,1 \text{ мкм} & \text{— летом;} \\ 0,4 - 1,1 \text{ мкм} & \text{— зимой.} \end{cases}$$

Как известно, одним из основных технических параметров тепловизионных приборов является разность температур  $\Delta T_0$ , К, эквивалентная шуму, входящая в состав исходных данных методик прогнозирования их эффективности. В спецификациях же ТК, как правило, используется другая величина — чувствительность (фактически — пороговая чувствительность) — освещенность объекта  $\Delta E_0$ , лк, от эталонного источника с определенным спектральным составом излучения (для отечественных ТК это обычно источник типа *A* с цветовой температурой 2856 К, для зарубежных — галогенная лампа с цветовой температурой 3200 К), создающая в нормированных условиях на выходе ТК без учета влияния атмосферы определенное отношение  $m_0$  „сигнала на белом к шуму на черном“ (т. е. без учета фотонного шума от объекта), обычно равное 10 (иногда 6) [8,9].

В отличие от визуально-оптических приборов (бинокли и др.), а также электронно-оптических приборов ночного видения первых поколений, в ТК, так же как и в тепловизионных приборах, в каждом конкретном случае реализуется оптимальный для оператора выбор условий дешифрирования изображений — их яркости, контрастности, видимого увеличения. Это означает, что ТК фактически реагирует не на относительный контраст объектов  $k = (r_{об} - r)/(r_{об} + r)$ , где  $r_{об}$ ,  $r$  — интегральные коэффициенты яркости объекта и фона соответственно в диапазоне  $\Delta\lambda$ , а на разность этих коэффициентов  $\Delta r = r_{об} - r$ , инициирующую видеосигнал в виде разности яркости изображения объекта и фона, пропорциональной  $\Delta r$ .

Поскольку в ТК усиление видеосигнала происходит лишь по переменной составляющей, искусственно созданная постоянная составляющая сигнала, формирующего изображение, связана не с энергетической яркостью поля объектов, приведенной к ТК, а с яркостью пространства, окружающего оператора. Поэтому от яркости атмосферы, определяющей контраст изображения в визуально-оптических приборах, контраст телевизионного изображения, вообще говоря, не зависит, однако ее рассеянное излучение (дымка) влияет на величину фотонного шума и, как следствие, на отношение сигнал/шум.

На практике при работе с ТК оператор путем регулирования коэффициента усиления видеосигналов подбирает такой контраст изображения, чтобы, для обеспечения возможности наблюдения объекта и его окружения, приведенные к ТК разность коэффициентов яркости объекта и фона и вариации коэффициента яркости близлежащего фона укладывались в диапазон регистрируемой разности коэффициентов яркости. При этом значение коэффициента усиления должно быть по возможности большим, чтобы на изображении был замечен шум, не превышающий, однако, субъективно приемлемого уровня, — тогда достигается максимально высокая пороговая чувствительность камеры и она работает в шумограниченном режиме, характерном для ТК при низком уровне освещенности, т.е. ночью. Если же видимый шум отсутствует, что имеет место в дневное время суток или в сумерках, то дальность действия этой ТК по сути

лимитируется контрастной чувствительностью глаз оператора и камера функционирует в контрастно-ограниченном режиме.

Рассмотрим вначале шумограничный режим работы, когда важное значение имеет отношение сигнал/шум. Так как шум на выходе ТК при определении ее чувствительности  $\Delta E_0$  обусловлен лишь темновым шумом (в основном это шум считывания), отношение сигнал/шум  $m_0$  при аттестации ТК равно (см., например, [6])

$$m_0 = \frac{N_{\phi 0}}{\sqrt{N_t}}; N_{\phi 0} = \frac{10^{-12} r_0 \tau_0 \lambda_m \eta_m t_0 a^2 \int_{\Delta\lambda} E_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{B_0 h c}; B_0 = \frac{4}{\omega_0^2} + 1, \quad (1)$$

где  $N_{\phi 0}$  — дисперсия фотонного шума, численно равная полезному сигналу от объекта, электрон;  $N_t$  — дисперсия темнового шума, электрон;  $E_0(\lambda)$  — спектральная плотность облученности объекта от эталонного излучателя, Вт/(м<sup>2</sup>·мкм);  $S(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность фотоприемника;  $\lambda_m$  — длина волны, для которой  $S(\lambda_m) = \max$ , мкм;  $\eta_m$  — квантовая эффективность фотоприемника на длине волны  $\lambda_m$ ;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^{14}$  мкм/с — скорость света;

$t_0$  — время накопления зарядов при аттестации ТК, с;  $a$  — размер чувствительного элемента фотоприемника, мкм;  $\omega_0$  — относительное отверстие объектива при аттестации ТК (обычно 1:1,4);  $\tau_0$  — коэффициент пропускания объектива в диапазоне  $\Delta\lambda$ ;  $r_0$  — коэффициент яркости объекта в диапазоне  $\Delta\lambda$  при аттестации ТК (обычно  $r_0 = 0,75$ ).

Графики относительной спектральной плотности облученности земли от Солнца  $E(\lambda)$ , относительной спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника  $S(\lambda)$  и кривой видности глаза  $V(\lambda)$  представлены на рис. 1, кривые 1–3 соответственно.

Учитывая соотношения

$$\Delta E_0 = 683 \int_0^\infty E_0(\lambda) V(\lambda) d\lambda; \lambda_m \eta_m \int_{\Delta\lambda} E_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda = \eta \int_{\Delta\lambda} \lambda E_0(\lambda) d\lambda,$$

где  $V(\lambda)$  — кривая видности (относительная спектральная чувствительность) глаза;  $\eta$  — средняя квантовая эффективность фотоприемника в диапазоне  $\Delta\lambda$ , выражение (1) для  $N_{\phi 0}$  перепишем в виде

$$N_{\phi 0} = \frac{10^{-12} \Delta E_0 r_0 \beta_0 \tau_0 \eta t_0 a^2}{683 B_0 h c}; \beta_0 = \int_{\Delta\lambda} \lambda E_0(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty E_0(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Тогда искомое среднеквадратическое значение темнового шума  $\sqrt{N_t} = N_{\phi 0}/m_0$ , это обычно величина порядка 10 электрон.

Иногда значение  $\sqrt{N_t}$  приводится непосредственно в спецификации ТК, и для расчетов предпочтительно использовать именно его, поскольку условия аттестации ТК (тип и температура эталонного источника излучения, способ определения — с учетом или без учета влияния фотонного шума и отсекающего ИК спектрального фильтра — и величина нормированного отношения сигнал/шум, время накопления, относительное отверстие объектива) не стандартизованы и могут варьироваться [9], что нередко обусловлено стремлением производителей искусственно улучшить в рекламных целях чувствительность ТК, не повышая их реальной эффективности.

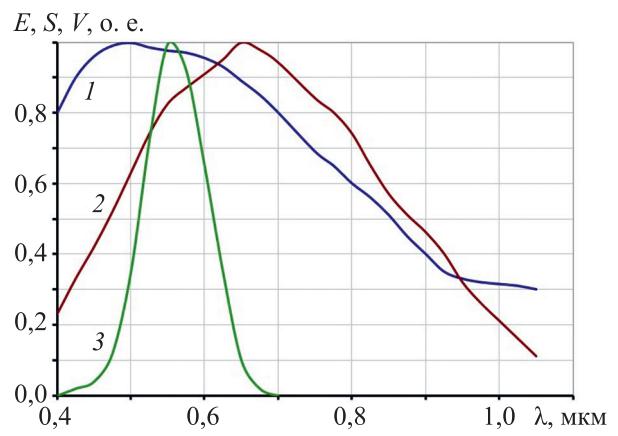


Рис. 1

Таблица 1

Условия	$E_{\text{ЕНО}}$ , лк
Сумерки	1–10
Лунная безоблачная ночь	$10^{-1}$ –1
Лунная облачная ночь	$10^{-2}$ – $10^{-1}$
Безлунная звездная ночь	$10^{-3}$ – $10^{-2}$
Безлунная облачная ночь	$10^{-4}$ – $10^{-3}$

При эксплуатации современных черно-белых ТК с высококачественными фотоприемниками в темное время суток рабочая естественная ночная освещенность (ЕНО)  $E_{\text{ЕНО}}$  местности близка к 0,02–0,05 лк, однако при использовании специальных „ночных“ режимов работы, предусматривающих суммирование сигналов в смежных элементах фотоприемника и/или в смежных кадрах и увеличение времени накопления зарядов, а также применение в ТК объективов с высоким относительным отверстием, она может достигать до  $10^{-4}$  лк [10], что обеспечивает работу ТК при ЕНО в безлунную облачную ночь (табл. 1).

Значения ЕНО подвержены значительным колебаниям, поэтому важной характеристикой  $E_{\text{ЕНО}}$  является функция распределения  $F(E_{\text{ЕНО}})$  — вероятность того, что текущее значение  $E_{\text{ЕНО}}$  не превысит заданного. Среднегодовые значения этой функции для средней полосы России составляют:  $F(10^{-4}) = 0,01$ ,  $F(10^{-3}) = 0,2$ ,  $F(10^{-2}) = 0,75$ ,  $F(10^{-1}) = 0,95$ .

Дисперсия фотонного шума ТК  $N_{\Phi}$  в ночное время суток в реальных условиях применения определяется формулой, аналогичной (2):

$$N_{\Phi} = \frac{10^{-12} E_{\text{ЕНО}} r \tau_a \beta_{\text{ЕНО}} \eta t a^2}{683 B h c}; B = \frac{4}{\omega^2} + 1; \beta_{\text{ЕНО}} = \int_{\Delta\lambda} \lambda E_{\text{ЕНО}}(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda; \quad (3)$$

$$r_{\text{об}} = \int_{\Delta\lambda} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) r_{\text{об}}(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda; r = \int_{\Delta\lambda} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) r(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где  $E_{\text{ЕНО}}(\lambda)$  — относительная спектральная плотность ЕНО;  $\tau_a$  — коэффициент пропускания атмосферы на трассе до объекта в диапазоне  $\Delta\lambda$ ;  $t$  — фактическое время накопления зарядов, с;  $\omega$  — фактическое относительное отверстие объектива ТК.

Зависимости  $E_{\text{ЕНО}}(\lambda)$  в различных условиях приведены на рис. 2 [11]: 1 — безлунная ночь; 2 — лунная ночь, облачно; 3 — лунная ночь, ясно; 4 — сумерки. Рассчитанные по формулам (2) и (3) значения  $\beta_0$  (при  $T$ , равном 2856 и 3200 К) и  $\beta_{\text{ЕНО}}$  (для зависимостей 1–4 рис. 2) представлены в табл. 2.

Фотонный шум ТК при наблюдении объектов через слой атмосферы, в том числе в ночное время суток, увеличивает дымку, обусловленная рассеянием излучения. Для инженерных оценок ее влияния целесообразно воспользоваться понятием „коэффициент погоды“  $w$ , который определяется как [12]

$$w = \pi \int_{\Delta\lambda} L_d(\lambda) V(\lambda) d\lambda / \int_{\Delta\lambda} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где  $L_d(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической яркости пригоризонтной дымки, Вт/(м<sup>2</sup>·ср·мкм);  $E(\lambda)$  — спектральная плотность облученности земной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·мкм).

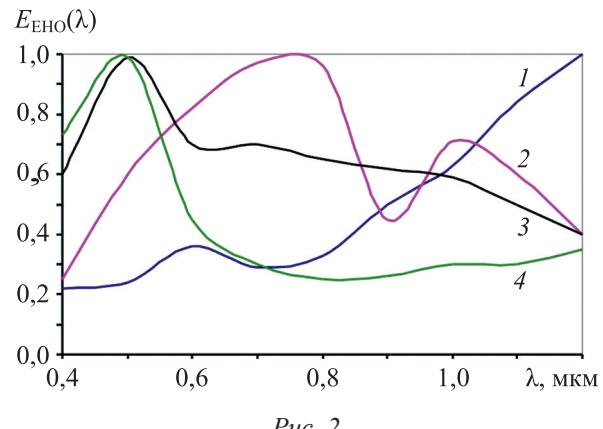


Рис. 2

Таблица 2

$\Delta\lambda$ , мкм	$\beta_0$ (2856 К)	$\beta_0$ (3200 К)	$\beta_{\text{ЕНО}} (1)$	$\beta_{\text{ЕНО}} (2)$	$\beta_{\text{ЕНО}} (3)$	$\beta_{\text{ЕНО}} (4)$
0,4–0,7	1,5	1,5	1,9	1,7	1,5	1,0
0,7–1,1	7,9	6,4	7,5	3,6	2,7	1,4
0,4–1,1	9,4	7,9	9,4	5,3	4,2	2,4

Значения  $w$  в сумерках и ночью, практически не зависящие от направления визирования, приведены в табл. 3 [12].

Таблица 3

Сезон	Коэффициент $w$ в темное время суток			
	Сплошная низкая облачность			Звездное небо
	Сумерки	Лунная ночь	Безлунная ночь	
Лето	0,56	0,58	0,61	0,85
Зима	0,95	0,90	0,97	1,0

Отношение энергетической яркости дымки  $L_a$  в направлении визирования объекта к энергетической яркости пригоризонтной дымки  $L_d$  равно  $L_a/L_d = 1 - \tau_a$  [13]. Следовательно, с учетом (5), дисперсия фотонного шума ТК, обусловленного дымкой  $N_d$ , будет определяться формулой

$$N_d = \frac{10^{-12} E_{\text{ЕНО}} w \tau_o (1 - \tau_a) \beta_d \eta t a^2}{683 B h c}; \beta_d = \int_{\Delta\lambda} \lambda L_d(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty L_d(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

В ночное время суток зависимости  $L_d(\lambda)$  и  $E_{\text{ЕНО}}(\lambda)$  качественно схожи, поэтому можно принять  $\beta_d = \beta_{\text{ЕНО}}$ . Тогда, пренебрегая незначительным пространственным шумом фотоприемника, обусловленным остаточной (после коррекции) неоднородностью чувствительности его элементов, находим дисперсию суммарного шума:  $N_\Sigma = N_\Phi + N_d + N_t$ .

Спектральные коэффициенты отражения (для диффузных отражателей они совпадают со спектральными коэффициентами яркости) многих естественных и антропогенных объектов, в том числе зарубежной военной техники, можно найти, например, в [11]; см. также [14–16] и электронную библиотеку спектров Aster [17].

Выходное отношение сигнал/шум  $m$  ТК „в точке“ (т. е. без учета пространственно-временного интегрирования видеосигналов), соответствующее протяженному объекту, составляет

$$m = \frac{10^{-12} E_{\text{ЕНО}} |\Delta r| \tau_o \tau_a \beta_{\text{ЕНО}} \eta t a^2}{683 B h c \sqrt{N_\Sigma}}, \Delta r = r_{\text{oб}} - r. \quad (7)$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a$  в (3), (6) и (7) для наклонных трасс в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, в которых доминирует аэрозольное рассеяние излучения, можно оценить по формуле (например, [6])

$$\begin{aligned} \tau_a &= \exp(-3,91 K(0,55/\lambda_0)^{1,3} D/S_m); K = h_0 [1 - \exp(-H/h_0)]/H; \\ D &= H/\sin|\psi|; h_0 = 0,78 + 0,038 S_m, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $D$  — длина трассы, км;  $K$  — коэффициент приведения данной трассы к эквивалентной приземной горизонтальной;  $H$  — высота расположения ТК, км;  $\lambda_0$  — средняя длина волны диапазона  $\Delta\lambda$ , мкм;  $S_m$  — метеорологическая дальность видимости, км;  $\psi \leq 0$  — угол места объекта (от горизонта).

Для горизонтальных приземных трасс  $K = 1$ .

Важнейшей характеристикой ТК, определяющей ее разрешающую способность, является функция передачи модуляции  $K(v)$ , являющаяся произведением функций передачи модуляции всех компонентов информационного тракта ТК. Однако в спецификации ТК указываются параметры не всех ее компонентов, определяющих данную функцию, что препятствует прямому расчету. Тем не менее для оценки функции  $K(v)$  можно использовать тот факт, что она хорошо описывается гауссовой зависимостью с параметром  $\sigma$ , мрад:  $K(v) = \exp(-2\pi^2\sigma^2v^2)$ , где  $v$  — угловая частота, мрад $^{-1}$ .

При анализе ТК, как и тепловизионных приборов, целесообразно использовать вместо  $\sigma$  более обозримый параметр — эффективное элементарное поле зрения  $\delta$ , мрад, связанное с

с соотношением  $\delta = \sigma/0,55$  и, значит, в отличие от номинального элементарного поля зрения, также зависящее от всего информационного тракта ТК.

Между тем разрешающую способность ТК  $R$ , лин, принято оценивать максимальным числом укладывающихся в высоту изображения черных и белых полос (линий) стандартной периодической, имеющей единичный относительный яркостный контраст миры, разрешаемой оператором при оптимальных условиях освещения миры и наблюдения ее изображения [8,18,19]. Отсюда вытекает, что

$$R = 2n_k \delta_0 v_m / \kappa; \delta_0 = a/f; \kappa = a/\Delta a, \quad (9)$$

где  $n_k$  — число элементов фотоприемника по высоте кадра;  $\delta_0$  — элементарное поле зрения, мрад;  $v_m$  — максимальная угловая частота разрешаемой миры, мрад<sup>-1</sup>;  $f$  — фокусное расстояние объектива, мм;  $\kappa$  — коэффициент заполнения фотоприемника по одной координате;  $\Delta a$  — шаг (период) элементов фотоприемника, мкм.

Можно считать [18], что значение  $v_m$  является корнем уравнения  $K(v_m) = 0,2$ , откуда следует  $v_m = 0,5/\delta$ . Тогда, учитывая (9), получаем оценочное выражение для эффективного элементарного поля зрения ТК:

$$\delta = n_k \delta_0 / \kappa R. \quad (10)$$

Следует отметить, что величина  $R$  для конкретной ТК не является строго постоянной, она зависит от степени диафрагмирования объектива, определяющей размер его кружка рассеяния, и некоторых других факторов [19].

Наиболее популярной в мире операциональной моделью видовых оптико-электронных систем, в том числе ТК, является модель NVTherm Центра ночного видения и электронных датчиков (США) [6]. Эта модель, определяющая вероятность  $P$  вскрытия объектов, хорошо описывается следующим выражением, учитывающим дополнительный существенный фактор — квалификацию оператора:

$$P = 1 - \exp[-0,7(\gamma h_{ob}/2AC)^2], \quad (11)$$

где  $h_{ob}$  — критический размер объекта — корень квадратный из его видимой площади, м;  $A$  — разрешение на местности, м, — полупериод эквивалентной яркостной миры, разрешаемой с вероятностью 0,5;  $C$  — критерий Джонсона, в среднем равный 1 при обнаружении, 3 — при классификации (распознавании класса) и 6 — при идентификации (распознавании типа) объекта;  $\gamma = 0,65\dots1,5$  — показатель квалификации оператора (от низкой до высокой соответственно).

Введем для ТК понятие „яркостно-частотная характеристика“ (ЯЧХ) — зависимость разности коэффициентов яркости полос стандартной яркостной миры с соотношением размеров полос 7:1 и фона от ее угловой частоты, при которой эта мири разрешается по ее изображению с вероятностью 0,5. ЯЧХ является, по сути, неким аналогом температурно-частотной характеристики тепловизионных приборов. Для ТК, работающих в шумограниченном режиме, применима следующая аппроксимация относительной эквивалентной ЯЧХ  $Y(x)$ , общей для всех образцов ТК (для  $x > 0,15$ ) [7]:

$$Y(x) = mq\kappa\delta/\delta_0 = 2,6x/K(x) \approx 0,26\exp(3,7x^2 + 4,35x), \quad (12)$$

где  $x = v\delta = D\delta/2A$  — относительная частота миры;  $q$  — коэффициент, учитывающий визуальное накопление видеосигналов в смежных кадрах ТК;  $\kappa$  — коэффициент, учитывающий различие длины полос стандартной и эквивалентной миры.

Принимая, что для ТК рабочей является высокочастотная ветвь ЯЧХ, которой соответствует сравнительно небольшая длина изображения полос этих мири, не превышающая области пространственного интегрирования визуальных сигналов глазом оператора, и учитывая, что длина полос стандартной миры составляет  $7A$ , а эквивалентной —  $h_{ob}$ , получаем:  $\kappa = (h_{ob}/7A)^{1/2}$ .

Коэффициент  $q$  в (12) составляет [7]

$$q = \sqrt{[1 + \exp(-1/Ft_{\text{пл}})]/[1 - \exp(-1/Ft_{\text{пл}})]}; t_{\text{пл}} = 0,019 + 0,078/L'^{0,17},$$

где  $F$  — частота кадров, Гц;  $t_{\text{пл}}$  — постоянная времени глаза оператора, с;  $L'$  — средняя яркость изображения, комфортная для оператора, кд/м<sup>2</sup> (по [6]  $L' = 100$  кд/м<sup>2</sup> при дешифрировании изображения на свету,  $L' = 3 \dots 30$  кд/м<sup>2</sup> — в полутьме,  $L' = 0,3 \dots 1$  кд/м<sup>2</sup> — в темноте).

Результирующее, с учетом турбулентности атмосферы, элементарное поле зрения  $\delta_{\Sigma}$ , мрад, которое и следует использовать вместо  $\delta$ , определяется как [7]

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta^2 + \delta_{\text{T}}^2}; \quad (13)$$

$$\delta_{\text{T}} = 2,6 \cdot 10^6 C_{n\Sigma}^{0,6} D^{0,6} / \lambda_0^{0,2}; C_{n\Sigma} = 2,67 \cdot 10^{-8} C_n [0,375 + 0,75(10^4 H^{4/3} - 1)] / H^{8/3}, \quad (14)$$

где  $\delta_{\text{T}}$  — эквивалентное элементарное поле зрения турбулентности, мрад;  $C_n$  — структурная характеристика атмосферы на высоте 1 м, м<sup>-2/3</sup>.

Средние  $C_{n\text{ср}}$ , максимальные  $C_{n\text{max}}$  и минимальные  $C_{n\text{min}}$  (для значений функции распределения 0,5, 0,95 и 0,05 соответственно) значения  $C_n$ , полученные по данным работы [20], приведены в табл. 4.

При  $H >> 0,001$  км имеем  $C_{n\Sigma} = 2 \cdot 10^{-4} C_n / H^{4/3}$  и влиянием турбулентности можно пренебречь:  $\delta_{\text{T}} = 0$ . Для приземных трасс ( $H = 0,001$  км)  $C_{n\Sigma} = C_n$ .

Тогда, решая уравнение (12) относительно  $x$ , получаем выражение для разрешения на местности А:

$$A = \frac{D\delta_{\Sigma}}{2x} = \frac{0,85D\delta_{\Sigma}}{\sqrt{1 + 0,78\ln(mq\kappa\delta_{\Sigma}/0,26\delta_0)} - 1}. \quad (15)$$

Поскольку коэффициент  $\epsilon$  зависит от разрешения на местности, его приходится искать методом последовательных приближений.

Рассмотрим далее оценку разрешения на местности при работе ТК в контрастно-ограниченном режиме. Интегральная облученность горизонтальной земной поверхности прямой солнечной радиацией  $E_{\text{n}}$ , Вт/м<sup>2</sup>, определяется как

$$E_{\text{n}} = \tau_{\text{обл}} E_s^* \sinh s; E_s^* = \frac{E_s}{1 + 0,43m_s}; m_s = \min(1/\sinh s, 35), \quad (16)$$

где  $E_s = 1370$  Вт/м<sup>2</sup> — солнечная постоянная (облученность перпендикулярной площадки вне атмосферы);  $s$  — высота Солнца над горизонтом, ...°;  $m_s$  — оптическая масса атмосферы в направлении Солнца;  $\tau_{\text{обл}}$  — коэффициент пропускания облачностью прямого солнечного излучения (табл. 5).

Таблица 4

Условия	$C_{n\text{ср}}, \text{м}^{-2/3}$		$C_{n\text{max}}, \text{м}^{-2/3}$		$C_{n\text{min}}, \text{м}^{-2/3}$	
	День	Ночь, утро, вечер	День	Ночь, утро, вечер	День	Ночь, утро, вечер
Центральная Европа (лето)	$5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-15}$
Центральная Европа (зима)	$4 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-15}$
Пустынная зона (лето)	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$7 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-15}$
Пустынная зона (зима)	$4 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-14}$	$8 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-16}$
Субарктика (лето, зима)	$5 \cdot 10^{-14}$	$6 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-15}$	$6 \cdot 10^{-15}$

П р и м е ч а н и е. Значения  $C_{n\text{max}}$  могут быть достигнуты в ясную погоду при высокой температуре и низкой влажности воздуха, безветрии и сухой земной поверхности, а значения  $C_{n\text{min}}$  — при сплошной облачности, низкой температуре и высокой влажности воздуха, сильном ветре и мокрой земной поверхности.

Таблица 5

Форма облаков	$\tau_{\text{обл}}$ при $h_s, \dots^\circ$					
	≤10	15	20	30	40	50
Перистые	0	0,18	0,33	0,54	0,71	0,82
Высоко-кучевые	0	0	0	0	0,14	0,28
Слоистые	0	0	0	0	0	0

Для расчета  $\sinh_s$  известно выражение [21]

$$\sinh_s = \sin\varphi \sin\delta_s - \cos\varphi \cos\delta_s \cos\left(\frac{360t_m}{t_c}\right); \delta_s = 23,5 \sin\left[\frac{360}{365}(d - 81)\right], \quad (17)$$

где  $\varphi$  — географическая широта местоположения объекта,  $\dots^\circ$ ;  $\delta_s$  — склонение Солнца, зависящее от порядкового номера  $d$  дня года (начиная с 1 января),  $\dots^\circ$ ;  $t_m$  — местное время, ч;  $t_c = 24$  ч — длительность солнечных суток.

Интегральная облученность фона рассеянной солнечной радиацией  $E_p$ , Вт/м<sup>2</sup>, оценивается по приближенной формуле, полученной с учетом результатов [21]:

$$E_p = 0,15E_s^*[\tau_{\text{обл}}(1 - n/10) + \vartheta n/10)], \quad (18)$$

где  $n$  — балльность облачности ( $n = 0 \dots 10$ );  $\vartheta$  — коэффициент, учитывающий наличие облачности для рассеянного излучения (табл. 6).

При оценке облученности достаточно компактных объектов целесообразно представлять их в виде эквивалентного шара, площадь сечения которого равна видимой площади объекта. Так как объекты обычно покрыты матовой эмалью, их отражение можно считать диффузным. Тогда средние облученности объекта прямой  $E_{\text{п.об}}$ , Вт/м<sup>2</sup>, и рассеянной  $E_{\text{р.об}}$ , Вт/м<sup>2</sup>, солнечной радиацией, усредненные по площади проекции всей видимой поверхности шара, составляют [22]

$$E_{\text{п.об}} = \frac{2E_s^*\tau_{\text{обл}}}{3\pi} (\sin\alpha_s - \alpha_s \cos\alpha_s); \alpha_s = \arccos(\cosh_s \cos\psi \cos\theta_s + \sinh_s \sin\psi); \quad (19)$$

$$E_{\text{р.об}} = 0,5[E_p + \rho_s(E_p + E_{\text{п}}) - (2/3)\sin\psi(E_p - \rho_s(E_p + E_{\text{п}}))], \quad (20)$$

где  $\alpha_s$  — угол между линией визирования объекта и направлением на Солнце, рад ( $\alpha_s = 0 \dots \pi$ );  $\theta_s$  — солнечный азимут — угол между проекцией на местность линии визирования и плоскостью солнечного вертикала ( $\theta_s = 0 \dots \pi$ );  $\rho_s$  — альбедо местности для солнечного облучения, в среднем равное 0,2 (трава, листва), 0,3 (грунт, песок) и 0,8 (снег).

Таблица 6

Форма облаков	$\vartheta$ при $h_s, \dots^\circ$								
	2,5	5	10	15	20	25	30	40	50
Перистые	2	2	1,5	1,8	1,8	2,2	2,1	2,2	2,5
Перисто-слоистые	3	2	2	2	2,2	2,7	2,7	3	3,5
Высоко-кучевые	3	2	1,5	2,2	2,5	3	3,1	3,4	3,9
Высоко-слоистые	2	2	1,5	1,8	2	2,3	2,4	2,6	3
Слоисто-кучевые	0	0,5	0,7	1,2	1,5	2	2	2,4	2,9
Слоистые	1	2	0,7	0,8	1	1,2	1,3	1,4	1,6
Слоисто-дождевые	—	0,5	0,5	0,8	0,85	1	1	1	1,2
Кучево-дождевые	—	—	1	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7

Формула (20) учитывает, в том числе, отраженное от земной поверхности прямое и рассеянное солнечное излучение. В отсутствие облачности объект и близлежащий фон могут быть затенены, в частности, окружающими предметами, и, значит, суммарные облученности объекта  $E_{\Sigma\text{об}}$  и фона  $E_{\Sigma}$  будут равны

$$E_{\Sigma\text{об}} = \alpha E_{\pi,\text{об}} + E_{\pi,\text{об}}; E_{\Sigma} = \alpha E_{\pi} + E_{\pi}, \quad (21)$$

где коэффициент  $\alpha = 1$  для объекта и окружающего его фона на солнце и  $\alpha = 0$  — в тени.

Тогда эффективная разность интегральных коэффициентов яркости объекта и фона будет определяться как

$$\Delta r_{\text{ЭФ}} = r_{\text{об}}(E_{\Sigma\text{об}}/E_{\Sigma}) - r, \quad (22)$$

где  $r_{\text{об}}$  и  $r$  рассчитываются по (4) при замене  $E_{\text{ЕНО}}(\lambda)$  на относительную спектральную плотность облученности местности от Солнца  $E(\lambda)$  (см. рис. 1).

При дешифрировании изображений, формируемых ТК при работе в контрастно-ограниченном режиме, имеет значение функция порогового контраста  $M(v')$  — зависимость минимального еще обнаруживаемого глазом оператора контраста  $M = (L'_{\max} - L'_{\min})/(L'_{\max} + L'_{\min})$ , где  $L'_{\max}$ ,  $L'_{\min}$  — максимальное и минимальное значения яркости соответственно, изображения разрешаемой синусоидальной миры от ее угловой частоты. Для функции  $M(v')$  известно эмпирическое выражение (например, [6])

$$M(v') = \frac{(1 + 0,7/L')^{0,2}[1 + 12/w'(1 + v'/3)^2]}{540v'\exp(-bv')\sqrt{1 + 0,06\exp(bv')}}, \quad b = 0,3(1 + 100/L')^{0,15},$$

где  $v'$  — угловая частота миры в пространстве изображений,  $1/\dots^{\circ}$ ;  $w'$  — угловой размер изображения миры,  $\dots^{\circ}$ .

Взаимосвязь частоты  $v'$  и соответствующей угловой частоты  $v$  в пространстве предметов определяется соотношением

$$v' = 17,45v/\Gamma; \Gamma = \kappa\Delta\delta'/\delta_0,$$

где  $\Gamma$  — видимое увеличение ТК — отношение угловых размеров изображения объекта и самого объекта;  $\Delta\delta'$  — угловой размер элемента изображения, мрад, соответствующий шагу элементов фотоприемника; далее принимаем оптимальное значение [23]  $\Delta\delta' = 0,95$  мрад.

Функция порогового контраста  $M(v')$  для рабочего интервала угловых частот  $v' = 5\dots15\ 1^{\circ}$ , соответствующего оптимальному видимому увеличению ТК, типовых значений углового размера изображения эквивалентной миры  $w'$  и средней яркости изображения  $L'$  достаточно хорошо аппроксимируется формулой  $M(v') = \mu \exp(\xi v'^2)$  с параметрами  $\mu$  и  $\xi$ , зависящими от значений  $w'$  и  $L'$ . Для средних угловых размеров изображения миры  $w'$ , равных 0,15, 0,5 и  $1^{\circ}$ , соответствующих обнаружению, классификации и идентификации объектов, параметры  $\mu$  и  $\xi$  при различных значениях средней яркости изображения  $L'$  принимают значения, приведенные в табл. 7.

Таблица 7

Задача вскрытия	Параметр	$L'$ , кд/м <sup>2</sup>					
		0,6	1	3	10	30	100
Обнаружение	$\mu$	0,090	0,075	0,053	0,036	0,026	0,021
	$\xi$	0,005	0,004	0,0025	0,0015	0,00096	0,0006
Классификация	$\mu$	0,032	0,027	0,019	0,014	0,010	0,0084
	$\xi$	0,0062	0,0052	0,0036	0,0026	0,0018	0,0015
Идентификация	$\mu$	0,019	0,016	0,012	0,008	0,0053	0,0042
	$\xi$	0,0075	0,0065	0,0049	0,0035	0,0028	0,0023

Таким образом, относительную ЯЧХ  $Y(x)$  можно описать формулой [7]

$$Y(x) = \frac{|\Delta r_{\text{эф}}| \tau_a K_m}{\Delta r_m} = \frac{\pi M(x)}{4K(x)} = \frac{\pi \mu}{4} \exp \left[ \left( \left( \frac{305\xi}{\Gamma^2 \delta^2} \right) + 6 \right) x^2 \right]; K_m = \frac{L'_2 - L'_1}{L'_2 + L'_1}, \quad (23)$$

где  $\Delta r_m$  — диапазон регистрируемой разности коэффициентов яркости, соответствующий рабочему диапазону яркости монитора  $\Delta L'_m = L'_2 - L'_1$ , кд/м<sup>2</sup>;  $K_m$  — коэффициент сохранения контраста для протяженного объекта, определяемый диапазоном  $\Delta L'_m$ , обычно близкий к 0,95.

Значение  $\Delta r_m$  при поиске и обнаружении объектов, возможно расположенных на горбах и впадинах яркостных фоновых неоднородностей, должно, по аналогии с тепловизионными приборами [6], составлять  $\Delta r_m = \max(\Delta r_{\text{max}}, 6|\Delta r_{\text{эф}}|)$ , где  $\Delta r_{\text{max}}$  — максимальный перепад интегральных коэффициентов яркости фоновых неоднородностей в диапазоне  $\Delta \lambda$ .

Тогда, решая уравнение (23) относительно  $x$ , находим выражение для разрешения на местности  $A$ :

$$A = \frac{D\delta_\Sigma}{2x} = D\delta_\Sigma \left[ \frac{1,5 + 85\xi\delta_0^2/(\kappa\delta_\Sigma)^2}{\ln(1,2|\Delta r_{\text{эф}}|\tau_a/\Delta r_m\mu)} \right]^{1/2}. \quad (24)$$

При вскрытии объекта с известным местоположением, в том числе при распознавании уже обнаруженного объекта, фоновые неоднородности роли практически не играют и оператор может подобрать яркость и контраст изображения объектов так, чтобы диапазон  $\Delta r_m$  принял оптимальное значение [6]:  $\Delta r_m = 6|\Delta r_{\text{эф}}|\tau_a$ . Тогда вместо (24) получаем

$$A = D\delta_\Sigma \sqrt{\frac{1,5 + 85\xi\delta_0^2/(\kappa\delta_\Sigma)^2}{\ln(0,2/\mu)}}. \quad (25)$$

Поскольку контраст изображения объекта здесь остается постоянным независимо от значений  $\Delta r_{\text{эф}}$  и  $\tau_a$ , разрешение на местности ТК, работающих в контрастно-ограниченном режиме, от них также не зависит. Если не известно, в каком режиме — контрастно-ограниченном или шумограниченном — работает ТК, то следует рассчитать разрешение на местности для обоих вариантов и выбрать из них наибольшее. Найденные по (15), (24) или (25) значения  $A$  определяют согласно (11) вероятность вскрытия объекта.

**Пример.** Требуется оценить посредством внутрикабинной ТК, работающей в видимом диапазоне спектра, вероятность обнаружения и классификации оператором, имеющим среднюю квалификацию, вертолета с критическим размером  $h_{\text{об}} = 3$  м, покрытого зеленой эмалью, находящегося на лугу (коэффициенты яркости  $r_{\text{об}} = 0,1$  и  $r = 0,07$ ) и наблюдаемого в безоблачную погоду 30 мая в 15 ч в районе Москвы с дистанции  $D = 3$  км при боковой подсветке Солнцем и метеорологической дальности видимости  $S_m = 20$  км. ТК установлена на высоте  $H = 10$  м = 0,01 км, использует фотоприемник формата  $768 \times 576$  элементов с коэффициентом заполнения  $\kappa = 0,9$ , имеет элементарное поле зрения  $\delta_0 = 0,1$  мрад и разрешающую способность  $R = 400$  лин. Расчет производим в следующем порядке:

- по формуле (17) для номера дня года  $d = 150$  находим склонение Солнца  $\delta_s = 22^\circ$  и для широты Москвы  $\phi = 56^\circ$  его высоту  $h_s = 42^\circ$ ;
- по формулам (16) и (18) рассчитываем облученность фона прямой и рассеянной солнечной радиацией  $E_p = 558$  Вт/м<sup>2</sup>,  $E_p = 125$  Вт/м<sup>2</sup> и по формуле (21) его суммарную облученность  $E_\Sigma = 683$  Вт/м<sup>2</sup>;
- по формуле (19) для угла места объекта  $\psi \approx 0$  и солнечного азимута  $\theta_s = 90^\circ$  рассчитываем угол между линией визирования и направлением на Солнце  $\alpha_s = 90^\circ = 1,57$  рад;
- по формулам (19) и (20) рассчитываем для альбедо фона  $\rho_s = 0,2$  облученность объекта прямой и рассеянной солнечной радиацией  $E_{\text{п.об}} = 177$  Вт/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{р.об}} = 131$  Вт/м<sup>2</sup> и по формуле (21) его суммарную облученность  $E_{\Sigma\text{об}} = 308$  Вт/м<sup>2</sup>;

— по формуле (22) рассчитываем эффективную разность коэффициентов яркости объекта и фона  $\Delta r_{\text{эф}} = -0,025$  и по формуле (10) эффективное элементарное поле зрения  $\delta = 0,16$  мрад;

— установив по табл. 4 среднее значение структурной характеристики атмосферы  $C_n = 5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ , рассчитываем по формуле (14) для средней длины волны  $\lambda_0 = 0,55 \text{ мкм}$  эквивалентное элементарное поле зрения турбулентности  $\delta_t = 0,056$  мрад и по формуле (13) результирующее элементарное поле зрения  $\delta_\Sigma = 0,17$  мрад;

— по формуле (8) рассчитываем коэффициент пропускания атмосферы на трассе  $\tau_a = 0,56$ ;

— приняв среднюю яркость изображения  $L' = 30 \text{ кд/м}^2$ , устанавливаем по табл. 7 параметры  $\mu = 0,026$ ,  $\xi = 0,000096$  при обнаружении объекта и  $\mu = 0,01$ ,  $\xi = 0,0018$  при его классификации;

— приняв для участка местности (луга) диапазон регистрируемой разности коэффициентов яркости  $\Delta r_m = 0,2$ , рассчитываем по формулам (24) и (25) разрешение на местности при обнаружении объекта  $A = 0,58 \text{ м}$  и его классификации  $A = 0,37 \text{ м}$ ;

— приняв показатель квалификации оператора  $\gamma = 1$ , рассчитываем по формуле (11) для критерия Джонсона  $C = 1$  вероятность обнаружения объекта  $P = 1$  и для  $C = 3$  вероятность его классификации  $P = 0,72$ .

**Заключение.** Предложенная операциональная модель ТК воздушного и наземного базирования обеспечивает получение расчетных оценок вероятности обнаружения и распознавания объектов местности при работе ТК в зависимости от уровня естественной освещенности местности как в шумоограниченном, так и контрастно-ограниченном режиме. Эта модель учитывает все существенные факторы, от которых зависит эффективность ТК, и концептуально схожа с операциональной моделью современных цифровых тепловизионных приборов, что обуславливает возможность сопоставления соответствующих оценок вероятности вскрытия наземных объектов телевизионным и тепловизионным каналами оптико-электронной системы, которое необходимо для корректного прогнозирования эффективности всего комплекса аппаратуры наблюдения в широком диапазоне условий его применения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смелков В. М. Экспресс-расчет дальности наблюдения телевизионной системы // Специальная техника. 2004. № 5. С. 13–16.
2. Шипунов А. Г., Семашкин Е. Н., Володикова Е. В. Дальность действия телевизионного канала с матричным фотоприемником // Оборонная техника. 2006. № 5–6. С. 78–81.
3. Дунаев А. С., Шлычков В. И. Расчет дальности наблюдения для активно-импульсной телевизионной системы // Оптич. журн. 2005. Т. 72, № 4. С. 48–51.
4. Гриневич А. В. Особенности расчета дальности действия телевизионной системы в ночном режиме // Оптич. журн. 2004. Т. 71, № 10. С. 63–65.
5. Волков В. Г., Кощавцев Н. Ф. Модель расчета дальности действия низкоуровневого телевизионного оптико-электронного прибора наблюдения // Оптич. журн. 1996. Т. 63, № 6. С. 53–55.
6. Holst G. Electro-optical imaging system performance. SPIE press, 2003. 442 p.
7. Балоев В. А., Ильин Г. И., Овсянников В. А., Филиппов В. Л. Эффективность, помехозащищенность и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем. Казань: Изд-во КГТУ, 2015. 424 с.
8. Пустынский И. Н., Кирличенко Ю. Р. К оценке чувствительности и разрешающей способности телевизионных датчиков // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 11. С. 5–9.
9. Вахромеева О. С., Манцоветов А. А., Шиманская К. А. Характеристики чувствительности телевизионных камер на матричных приборах с зарядовой связью // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2004. № 4. С. 25–35.
10. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Видение и безопасность. М.: Изд-во РАЕН, 2009. 840 с.
11. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. М.: Физматлит, 2014. 276 с.
12. Грязин Г. Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства: системы телевидения. Л.: Машиностроение, 1988. 224 с.
13. Соколов Б. З. Расчет спектральной яркости дневной атмосферы Земли // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 40–43.
14. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 272 с.

15. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
16. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
17. <http://speclib.jpl.nasa.gov>.
18. Бычков А. Н. О влиянии частотно-контрастной характеристики объектива и спектрального состава источника излучения на разрешающую способность телевизионного датчика // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 52–55.
19. Куликов А. Н. Реальная разрешающая способность телевизионной камеры // Специальная техника. 2002. № 2. С. 20–26.
20. Richardson P., Driggers R. Atmospheric turbulence effects on 3-rd generation FLIR performance // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6207. P. 620706-1–620706-11.
21. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 751 с.
22. Овсянников В. А., Овсянников Я. В. Оценка контрастной силы излучения воздушных объектов для наземной телевизионной аппаратуры // Авиакосмическое приборостроение. 2022. № 2. С. 3–12. DOI: 10.25791/aviakosmos.2.2022.1263.
23. Holst G. Optimum viewing distance for target acquisition // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9452. P. 94520K-1–94520K-7.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Владимир Александрович Овсянников**

— д-р техн. наук; Государственный институт прикладной оптики;

гл. научный сотрудник; E-mail: gipo@shvabe.com; jar\_ovs@mail.ru

**Ярослав Владимирович Овсянников**

— Государственный институт прикладной оптики; инженер-программист; E-mail: gipo@shvabe.com

Поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 23.07.2024.

### REFERENCES

1. Smelkov V.M. *Spetsial'naya tekhnika*, 2004, no. 5, pp. 13–16. (in Russ.)
2. Shipunov A.G., Semashkin E.N., Volodikova E.V. *Oboronchnaya tekhnika*, 2006, no. 5–6, pp. 78–81. (in Russ.)
3. Dynaev A.S. and Shlichkov V.I. *Journal of Optical Technology*, 2005, no. 4(72), pp. 330–333.
4. Grinkevich A.V. *Journal of Optical Technology*, 2004, no. 10(71), pp. 699–701.
5. Volkov V.G., Koshchavtsev N.F. *Opticheskii Zhurnal*, 1996, no. 6(63), pp. 53–55. (in Russ.)
6. Holst G. *Electro-optical imaging system performance*, US, SPIE press, 2003, 442 p.
7. Baloev V.A., Ilyin G.I., Ovsyannikov V.A., Filippov V.L. *Effektivnost', pomekhozashchishchennost' i pomekhoustoichivost' vidovykh optiko-elektronnykh system* (Efficiency, Noise Immunity and Noise Stability of Species-Specific Optical-Electronic Systems), Kazan, 2015, 424 p. (in Russ.)
8. Pustynsky I.N., Kirpichenko Yu.R. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 11(48), pp. 5–9. (in Russ.)
9. Vakhromeeva O.S., Mantsvetov A.A., Shimanskaya K.A. *Izv. vuzov. Radioelektronika*, 2004, no. 4, pp. 25–35. (in Russ.)
10. Geykhman I.L., Volkov V.G. *Videniye i bezopasnost'* (Vision and Safety), Moscow, 2009, 840 p. (in Russ.)
11. Gruzevich Yu.K. *Optiko-elektronnyye pribory nochnogo videniya* (Optoelectronic Night Vision Devices), Moscow, 2014, 276 p. (in Russ.)
12. Gryazin G.N. *Optiko-elektronnyye sistemy dlya obzora prostranstva: sistemy televideniya* (Optical-electronic Systems for Space Surveillance: Television System), Leningrad, 1988, 224 p. (in Russ.)
13. Sokolov B.Z. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2001, no. 9, pp. 40–43. (in Russ.)
14. Krinov E.L. *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovaniy* (Spectral Reflectivity of Natural Formations), Moscow, 1947, 272 p. (in Russ.)
15. Novitsky L.A., Stepanov B.M. *Opticheskiye svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh. Spravochnik* (Optical Properties of Materials at Low Temperatures. Handbook), Moscow, 1980, 224 p. (in Russ.)
16. Zuev V.E., Kabanov M.V. *Perenos opticheskikh signalov v zemnoy atmosfere* (Transfer of Optical Signals in the Earth's Atmosphere), Moscow, 1977, 368 p. (in Russ.)
17. <http://speclib.jpl.nasa.gov>.
18. Bychkov A.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 5(51), pp. 52–55. (in Russ.)
19. Kulikov A.N. *Spetsial'naya tekhnika*, 2002, no. 2, pp. 20–26. (in Russ.)
20. Richardson P., Driggers R. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6207, pp. 620706-1–620706-11.
21. Matveev L.T. *Kurs obshchey meteorologii* (General Meteorology Course), Leningrad, 1984, 751 p. (in Russ.)
22. Ovsyannikov V.A., Ovsyannikov Ya.V. *Aerospace Instrument-Making*, 2022, no. 2, pp. 3–12, DOI: 10.25791/aviakosmos.2.2022.1263. (in Russ.)
23. Holst G. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9452, pp. 94520K-1–94520K-7.

**DATA ON AUTHORS**

**Vladimir A. Ovsyannikov**

— Dr. Sci.; State Institute of Applied Optics; Chief Researcher;  
E-mail: gipo@shvabe.com; jar\_ovs@mail.ru

**Yaroslav V. Ovsyannikov**

— State Institute of Applied Optics; Engineer-Programmer;  
E-mail: gipo@shvabe.com

Received 28.03.2024; approved after reviewing 21.05.2024; accepted for publication 23.07.2024.