

УДК 628.946

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1031-1040

## НЕПОРАЖАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НАПРАВЛЕННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ПРИБОРЫ СО СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ СЕНСОРАМИ

С.А. Ваганов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: sv.exciton@mail.ioffe.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 19.08.19, принята к печати 15.10.19  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Ваганов С.А. Непоражающее воздействие направленным оптическим излучением на приборы со светочувствительными сенсорами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 1031–1040. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1031-1040

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрены варианты построения средств постановки визуально-оптических помех непо-  
 ражающего действия в видимом диапазоне. Показано применение излучателей с источниками когерентного и некогер-  
 рентного излучений для противодействия визуально-оптическим и оптико-электронным каналам средств визирования,  
 наблюдения, извлечения и фиксации визуально-оптической информации. **Метод.** Приведены расчетные соотношения.  
 Аналитический расчет проиллюстрирован графически. Показан численный расчет облученности от энергетически  
 эквивалентных узконаправленных излучателей с источниками когерентного и некогерентного излучения при измене-  
 нии излучаемой мощности и ширины луча в диапазоне дистанций воздействия 100–2000 м. **Основные результаты.**  
 Получены количественные параметры создания облученности выше критериальных уровней функционального пора-  
 жения, подавления и снижения эффективности применения оптических приборов. Рассмотрено применение для этих  
 целей промышленно выпускаемых компактных твердотельных лазеров видимого спектра с диодной накачкой и мощных  
 малогабаритных короткодуговых ксеноновых ламп в металлокерамическом корпусе со встроенным внутренним отра-  
 жателем и вторичной формирующей оптической системой. Установлено соотношение между критериальными уров-  
 нями для подавляемого оптического прибора и диапазоном дистанций воздействия. Определены диапазоны изменения  
 излучаемой мощности источника и ширины луча на близких расстояниях для выполнения условия непо-  
 ражающего воздействия. **Практическая значимость.** Результаты сравнительного моделирования и полученные соотношения будут  
 полезны при разработке излучателей визуально-оптических помех непо-  
 ражающего действия на основе когерентных и некогерентных источников. Полученные соотношения могут использоваться для определения критериальных уровней  
 функционально-разнородного воздействия.

### Ключевые слова

когерентное оптическое излучение, некогерентное оптическое излучение, оптико-электронное противодействие, функци-  
 ональное подавление, функциональное поражение, снижение эффективности применения, непо-  
 ражающее воздействие, визуально-оптические помехи

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1031-1040

## NONDESTRUCTIVE EXPOSURE OF DIRECTED OPTICAL RADIATION ON DEVICES WITH LIGHT-SENSITIVE SENSORS

S.A. Vaganov

Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation  
 Corresponding author: sv.exciton@mail.ioffe.ru

### Article info

Received 19.08.19, accepted 15.10.19  
 Article in Russian

**For citation:** Vaganov S.A. Nondestructive exposure of directed optical radiation on devices with light-sensitive sensors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1031–1040 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1031-1040

### Abstract

**Subject of Research.** The paper considers the alternate design of nondestructive jamming in the visible light range. Two different  
 approaches utilizing coherent and incoherent light emitters are approved to suppress visual-optical and electro-optical channels

of equipment surveillance. **Method.** The design relations are examined and graphically illustrated. The numerical calculation of irradiance from energetically equivalent coherent and incoherent narrow beam emitters is performed in the range of exposure distances equal to 100–2000 m while changing radiated power and beam width. **Main Results.** The quantitative parameters are obtained for irradiance generation above the criterion levels of function destruction, suppression, and negation of applying optical devices. We analyze the usage of optical means for emitters with commercially available compact diode-pumped solid-state visible beam lasers and for emitters utilizing high intensity miniature cermet case short-arc xenon lamps with fixed integrated reflector enhanced with secondary forming optical system. The correlation between the criterion levels and the range of exposure distances is identified. The variation limits of the radiated power and the beam width are established at close distances to satisfy the condition of nondestructive effects. **Practical Relevance.** Comparative study results and the design relations might be useful for development of nondestructive visual-optical jammers utilizing coherent and incoherent emitters and for determination of function degradation criterion levels for multi-level exposure.

#### Keywords

coherent optical radiation, incoherent optical radiation, electro-optical countermeasures, function suppression, function destruction, function degradation, nondestructive exposure, visual optical jamming

### Введение

Высокая насыщенность всех видов человеческой деятельности разнообразными радиоэлектронными устройствами с оптико-электронными приборами приводит к тому, что информационный конфликт оптико-электронных систем, ранее проявлявшийся только в военном противоборстве в радиоэлектронной борьбе (РЭБ), распространяется в техническую сферу. Оптико-электронное противодействие (ОЭП) используется не только в вооруженном противостоянии, но и для предотвращения террористических атак и противоправных действий [1]. Назревает необходимость использования средств ОЭП для воспрепятствования незаконному и несанкционированному наблюдению, извлечению и фиксации визуально-оптической информации.

В наиболее частых конфликтных ситуациях воздействие на визуально-оптические и оптико-электронные средства должно быть не поражающим, а предназначенным для временного выведения из строя по аналогии с оружием нелетального действия.

На физическом уровне информационного конфликта [2] воздействие осуществляется оптическим излучением, создающим на светочувствительном сенсоре оптического прибора облученность  $E$  или энергетическую экспозицию  $H$  за время воздействия  $t$ . Воспользовавшись терминологией РЭБ, можно выделить следующие критериальные уровни воздействия на визуально-оптические и оптико-электронные средства (табл. 1).

Таблица 1. Критериальные уровни воздействия

Критериальный уровень	$E$	Эффект воздействия оптического излучения
Отсутствие эффектов	$E_{OЭ}$	$E < E_{OЭ}$ не вызывает эффектов
Снижение эффективности	$E_{CЭ}$	$E \geq E_{CЭ}$ снижает эффективность применения
Функциональное подавление	$E_{ПД}$	$E \geq E_{ПД}$ вызывает нарушение функционирования
Функциональное поражение	$E_{ПР}$	$E > E_{ПР}$ вызывает необратимые повреждения

Практически критериальные уровни воздействия на приоритетные или типовые подавляемые оптические приборы определяются расчетно-экспериментальными методами не на поверхности их сенсоров, а на входной апертуре их оптической системы.

Широко используемая классификация источников оптических помех по когерентности излучения часто приводит к противопоставлению возможностей воздействия помех от излучателей с источниками когерентного и некогерентного излучений, что оказывает влияние на выбор путей создания средств ОЭП [3]. Когерентные помехи радиодиапазона применяются в РЭБ для формирования фазовых ошибок и создаются несколькими источниками, разнесенными в пространстве [4, 5]. Для рассматриваемого в статье энергетического воздействия когерентность однолучевого источника оптического помехового излучения в большинстве случаев не существенна.

Целью работы является сравнение возможностей реализации непоражающего воздействия на оптические приборы узконаправленным оптическим излучением визуально-оптических помех, формируемых излучателями с источниками когерентного излучения на основе типичных современных компактных лазеров видимого диапазона и излучателями с источниками некогерентного излучения на основе мощных короткодуговых ксеноновых ламп.

### Параметры и допущения расчета

В качестве энергетической характеристики воздействия оптического излучения на оптический прибор рассматривается облученность  $E$  на входной апертуре прибора. Для сравнения возможных вариантов построения средств постановки визуально-оптических помех непоражающего действия видимого диапазона

произведен и проиллюстрирован графически численный расчет облученности  $E$  от узконаправленных излучателей с источниками когерентного и некогерентного излучений при изменении излучаемой мощности  $P$  и ширины луча  $\theta$ .

Расчет выполнен для отрезка расстояний от минимальной дистанции воздействия  $R_{\text{MIN}}$ , ближе которой  $R < R_{\text{MIN}}$  осуществлять дистанционное функциональное подавление оптическим излучением нецелесообразно, до максимальной дистанции воздействия  $R_{\text{MAX}}$ , в пределах которых  $R_{\text{MIN}}-R_{\text{MAX}}$  необходимо обеспечить подавление прибора, создав излучателем облученность не ниже уровня подавления  $E(R_{\text{MIN}} \leq R \leq R_{\text{MAX}}) \geq E_{\text{ПД}}$ .

В расчете приняты следующие допущения. Считается, что критериальные уровни облученности для функционального подавления оптического прибора когерентным и некогерентным излучениями совпадают и равны  $E_{\text{ПД}}$ . Уровни функционального поражения также совпадают и равны  $E_{\text{ПР}}$ .

На расстояниях  $R < R_{\text{MIN}}$  характеристики оптического излучения не рассматриваются, а на расстояниях  $R \geq R_{\text{MIN}}$  в расчетах пространственного распределения излучения в поперечном сечении луча не учитываются размеры выходных апертур излучателей.

Профиль лучей от излучателей с источниками когерентного и некогерентного излучений считается гауссовым, фронт волны плоским, при этом облученность в центре гауссова луча [6]:

$$E = 2P/S,$$

где  $P$  — общая излучаемая мощность,  $S = \pi \cdot r^2$  — площадь, покрываемая лучом с радиусом  $r$  в поперечном сечении.

Радиус луча  $r$  измеряется по уровню  $1/e^2$  от центра луча. На расстоянии  $R$  от излучателя, радиус луча  $r$  выражается через соответствующую ему угловую ширину луча  $\theta$  как  $r = R \cdot \tan(\theta/2)$ . В приближении малых углов  $\tan \theta = \theta$ , облученность в центре луча:

$$E(R, P, \theta) = \frac{8P}{\pi R^2 \theta^2}. \quad (1)$$

Для того чтобы создать на максимальной дистанции воздействия  $R_{\text{MAX}}$  облученность равную  $E_{\text{ПД}}$ , необходим излучатель с мощностью  $P_{\text{MAX}}$  и шириной луча  $\theta_{\text{MIN}}$ :

$$E_{\text{ПД}} = E(R_{\text{MAX}}, P_{\text{MAX}}, \theta_{\text{MIN}}) = \frac{8P_{\text{MAX}}}{\pi R_{\text{MAX}}^2 \theta_{\text{MIN}}^2}.$$

В численном расчете сравниваются изменение облученности  $E(R)$ , создаваемой излучателями при снижении излучаемой мощности ниже максимальной  $P_{\text{MAX}}$ , и увеличении, ширины луча больше минимальной  $\theta_{\text{MIN}}$ . Для излучателя с источником когерентного излучения мощность когерентного излучения  $P_{\text{К}}$  снижается ниже максимальной  $P_{\text{КMAX}} = P_0$ , а ширина луча  $\theta_{\text{К}}$  увеличивается больше минимальной  $\theta_{\text{КMIN}} = 1$  мрад. Для излучателя с источником некогерентного излучения мощность некогерентного излучения  $P_{\text{НК}}$  снижается ниже максимальной  $P_{\text{НКMAX}} = 100P_0$ , а ширина луча  $\theta_{\text{НК}}$  увеличивается больше минимальной  $\theta_{\text{НКMIN}} = 10\theta_{\text{КMIN}} = 0,57^\circ$ .

Для промышленно доступных излучателей с источниками когерентного излучения на основе твердотельных лазеров видимого диапазона мощностью 0,5–15 Вт с диодной накачкой [7] ширину луча  $\theta_{\text{К}} = 1$  мрад можно считать типичной. Используя источник некогерентного излучения на основе малогабаритной ксеноновой лампы с встроенным внутренним отражателем [8], узконаправленный луч с шириной, близкой к  $\theta_{\text{НК}} = 0,57^\circ$ , может быть сформирован при помощи расширяющего телескопа с 8–10-кратным увеличением.

На всех графиках, иллюстрирующих расчеты, значения облученности приведены к уровню функционального подавления  $E_{\text{ПД}}$ .

Для непоражающего воздействия в диапазоне дистанций  $R_{\text{MIN}}-R_{\text{MAX}}$  облученность от излучателей не должна превышать уровень функционального поражения  $E(R_{\text{MIN}} \leq R \leq R_{\text{MAX}}) \leq E_{\text{ПР}}$ .

В численном расчете рассматривается оптический прибор, для которого соотношение между уровнями его функционального поражения и подавления  $E_{\text{ПР}}/E_{\text{ПД}} = 25$ . Условиями применения средств постановки визуально-оптических помех заданы минимальная дистанция воздействия  $R_{\text{MIN}} = 100$  м и максимальная дистанция воздействия  $R_{\text{MAX}} = 2000$  м. Кроме уровней поражения  $E_{\text{ПР}}$  и подавления  $E_{\text{ПД}}$ , для лучшей визуализации данных расчета на графиках рисунков отмечено несколько уровней  $E_M$ , значения которых выбраны сопряженными с уровнем подавления как  $E_M = E_{\text{ПД}}/4^M$ ,  $M = 0, 1, \dots, 4$ . Значение облученности  $E_0 = E_{\text{ПД}}$ . Для обобщения результатов расчета при рассмотрении функционально-разноуровневых воздействий значения  $E_M$  могут быть использованы в качестве примера, как критериальные уровни снижения эффективности применения оптического прибора.

Потери в атмосфере при распространении оптического излучения до оптического прибора не учитываются.

**Зависимость облученности от расстояния**

При рассмотренных параметрах и допущениях расчета, излучатели с источником когерентного  $\theta_K = 1$  мрад,  $P_K = P_0$  и некогерентного  $\theta_{HK} = 0,57^\circ$ ,  $P_{HK} = 100P_0$  излучений создают на одном и том же расстоянии  $R$  одинаковую облученность  $E(R)$ , в приближении малых углов  $\theta$  обратно пропорциональную квадрату расстояния  $R$ . Графики расчетных зависимостей облученности  $E(R,P)$  для излучателя с источником когерентного излучения с шириной луча  $\theta_K = 1$  мрад и излучателя с источником некогерентного излучения с шириной луча  $\theta_{HK} = 0,57^\circ$  при снижении излучаемой мощности  $P_K$  и  $P_{HK}$  приведены на рис. 1.

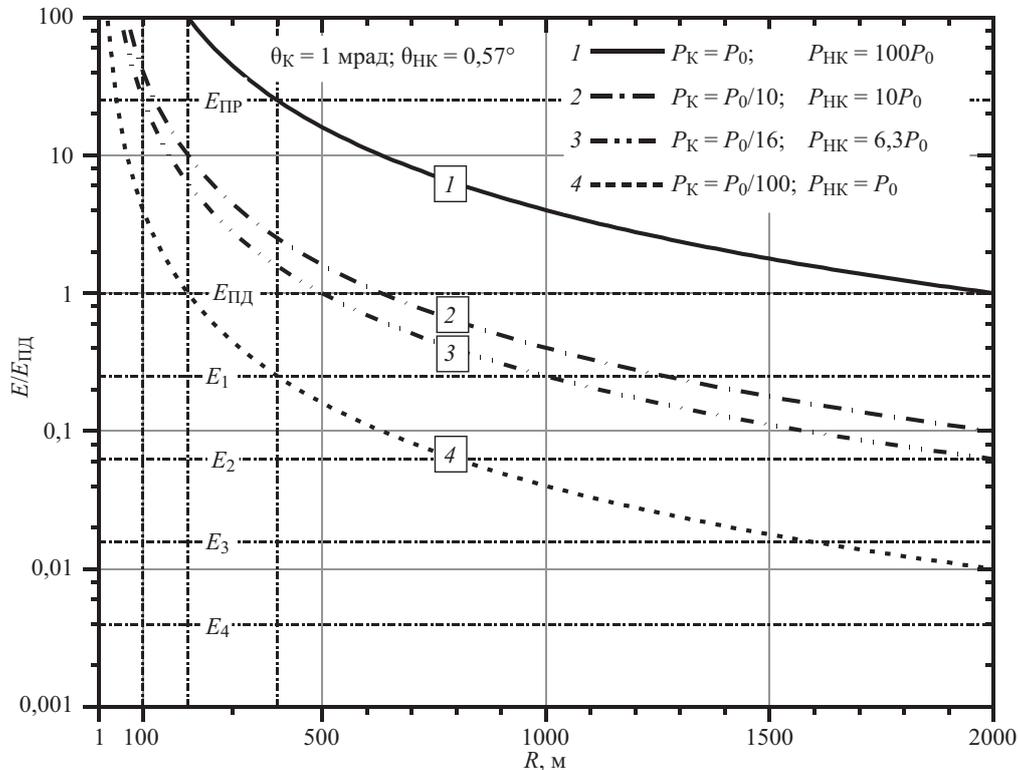


Рис. 1. Графики расчетных зависимостей облученности  $E(R,P)$  для излучателя с источником когерентного излучения с шириной луча  $\theta_K = 1$  мрад и излучателя с источником некогерентного излучения с шириной луча  $\theta_{HK} = 0,57^\circ$  при изменении излучаемой мощности  $P_K$  и  $P_{HK}$ . Горизонтальными штрихпунктирными линиями показаны уровни  $E_{ПР}$  и  $E_{ПД}$ , вертикальными — расстояния 100, 200, 400 м

Для рассматриваемых  $E_{ПР}/E_{ПД} = 25$ ,  $E(R_{МАХ} = 2000 \text{ м}) = E_{ПД}$ ,  $P_K = P_0$ ,  $P_{HK} = 100P_0$ , если прибор расположен ближе  $R < 400$  м, произойдет его поражение  $E(R < 400 \text{ м}) > E_{ПР}$  (график 1, рис. 1). Чтобы не допустить поражения прибора на расстояниях  $100 \text{ м} \leq R \leq 400 \text{ м}$ , необходимо, чтобы облученность на его входной апертуре была не выше уровня поражения  $E(100 \text{ м} \leq R \leq 400 \text{ м}) \leq E_{ПР}$ . Уменьшить облученность можно, например, снижением излучаемой мощности. Так, например, снижение излучаемой мощности в 16 раз  $P_K = P_0/16$ ,  $P_{HK} = 100P_0/16$  обеспечит на расстояниях  $100 \text{ м} \leq R \leq 500 \text{ м}$  непоражающее подавление  $E_{ПД} \leq E(100 \text{ м} \leq R \leq 500 \text{ м}) < E_{ПР}$  (график 3, рис. 1).

**Зависимость облученности и диаметра луча от его угловой ширины**

Сравнительные графики расчетных зависимостей облученности  $E = E(R,\theta)$  от излучателей с источниками когерентного и некогерентного излучений при неизменной излучаемой мощности  $P_K = P_0$  и  $P_{HK} = 100P_0$  и десятикратном увеличении ширины луча  $\theta_K$  и  $\theta_{HK}$  приведены на рис. 2. Соответствующие графики расчетных зависимостей диаметра луча  $d = d(R,\theta)$  на рис. 3.

Для рассмотренного диапазона изменения ширины луча расчетные зависимости облученности от излучателей с источниками когерентного и некогерентного излучений практически совпадают, и в приближении малых углов облученность  $E(R,\theta)$  обратно пропорциональна квадрату угловой ширины луча  $\theta$ .

Расширяя луч, можно снизить облученность до требуемых значений  $E_{ПД} \leq E(R) \leq E_{ПР}$ . Так, в рассмотренном в предыдущем разделе примере, для того чтобы не допустить поражения оптического прибора на расстояниях  $100 \text{ м} \leq R \leq 400 \text{ м}$  вместо снижения излучаемой мощности  $P$  в 16 раз можно расширить луч в 4 раза (график 3, рис. 2).

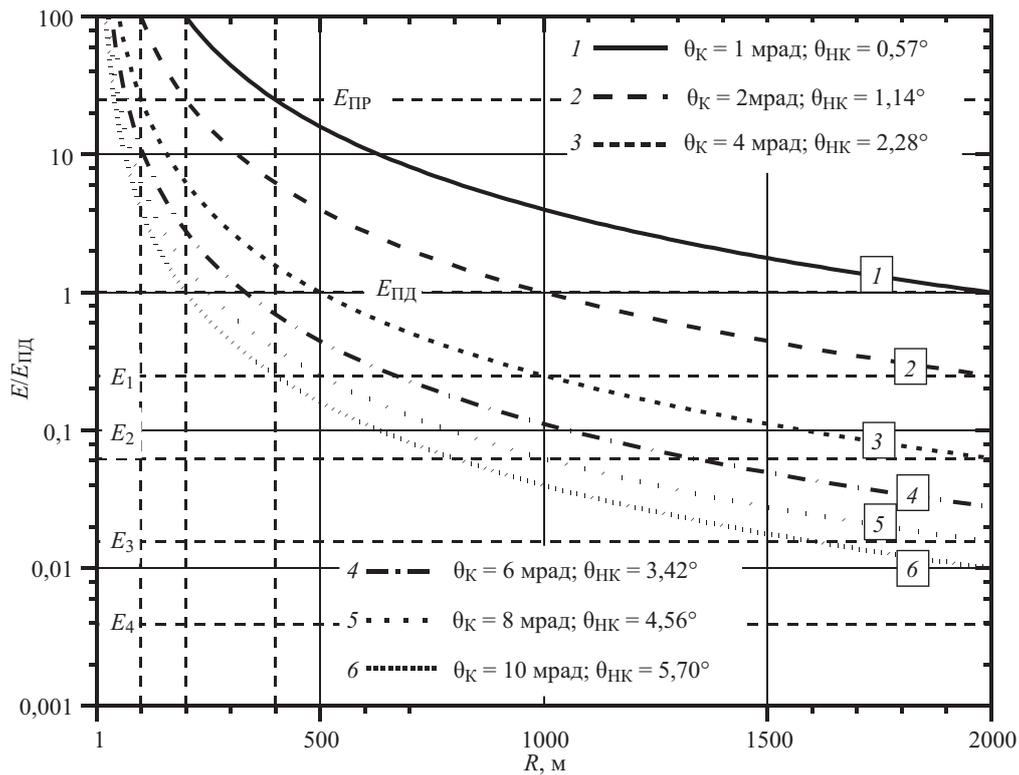


Рис. 2. Графики расчетных зависимостей облученности  $E = E(R, \theta)$  от излучателей с источниками когерентного и некогерентного излучений при неизменной излучаемой мощности  $P_K = P_0$  и  $P_{HK} = 100P_0$  и десятикратном увеличении ширины луча  $\theta_K$  и  $\theta_{HK}$ . Горизонтальными штрихпунктирными линиями показаны уровни  $E_{PP}$ ,  $E_{PPD}$ , вертикальными — расстояния 100, 200, 400 м

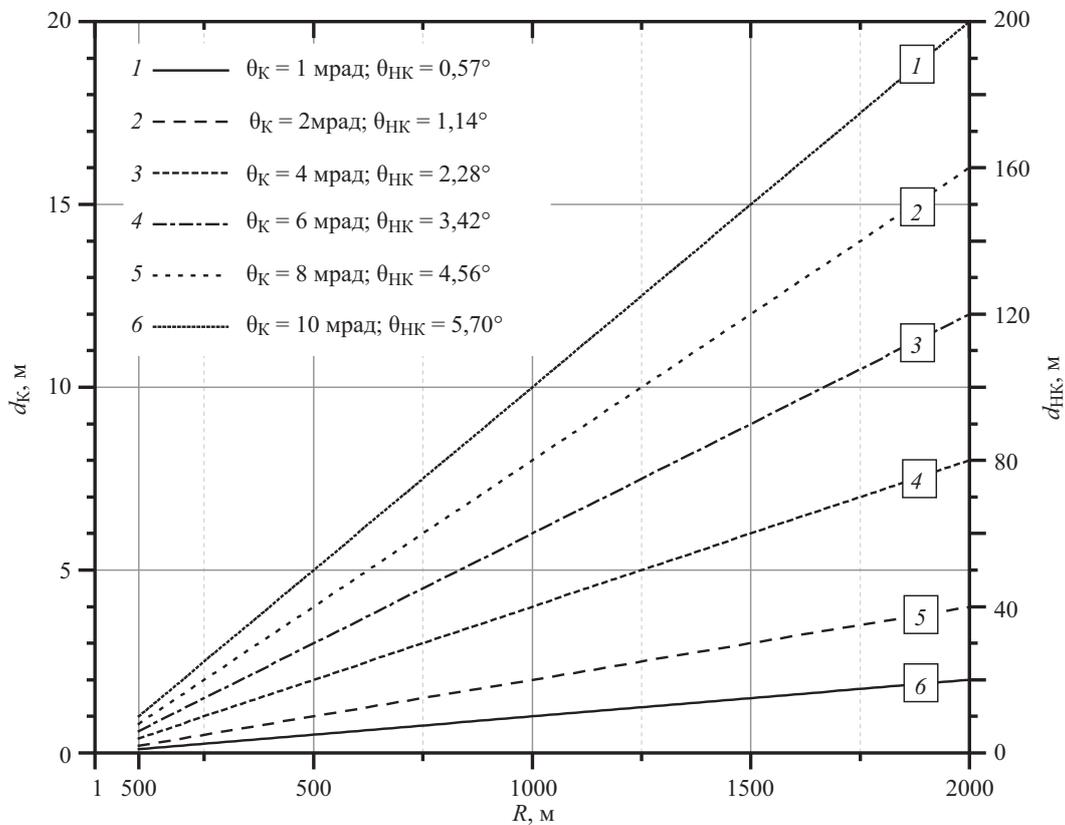


Рис. 3. Графики расчетных зависимостей диаметра луча излучателя с источниками когерентного  $d_K(R, \theta_K)$  (ось ординат слева) и некогерентного излучений  $d_{HK}(R, \theta_{HK})$  (ось ординат справа) при десятикратном увеличении ширины луча  $\theta_K$  и  $\theta_{HK}$

В приближении малых углов  $\tan\theta = \theta$  диаметр луча пропорционален расстоянию:

$$d(R, \theta) = R\theta.$$

На минимальной дистанции воздействия  $R_{\text{MIN}} = 100$  м для излучателя с источником когерентного излучения с шириной луча  $\theta_{\text{К}} = 1$  мрад диаметр луча  $d_{\text{К}} = 0,1$  м (график 1, рис. 3), что сопоставимо с размером входной апертуры типичных подавляемых оптических приборов. Для излучателя с источником некогерентного излучения с шириной луча  $\theta_{\text{НК}} = 0,57^\circ$  диаметр луча на том же расстоянии  $d_{\text{НК}} = 1$  м. На максимальной дистанции воздействия  $R_{\text{MAX}} = 2000$  м диаметры лучей  $d_{\text{К}} = 2$  м,  $d_{\text{НК}} = 20$  м.

### Обсуждение результатов.

#### Параметры средств непоражающего воздействия оптическим излучением

Рассмотренные в расчете излучатели с источниками когерентного и некогерентного излучения энергетически эквивалентны и создают на расстоянии  $R$  одинаковую облученность  $E_{\text{К}}(R, P_{\text{К}}, \theta_{\text{К}}) = E_{\text{НК}}(R, P_{\text{НК}}, \theta_{\text{НК}})$ . С учетом (1) условие энергетической эквивалентности в приближении малых углов  $\tan\theta = \theta$  может быть записано как:

$$\frac{P_{\text{К}}}{\theta_{\text{К}}^2} = \frac{P_{\text{НК}}}{\theta_{\text{НК}}^2}.$$

В отличие от типичных задач РЭБ, для решения которых, при наличии возможности в ОЭП всегда предпочтительней обеспечить поражение оптико-электронных средств противника вместо их временного подавления, непоражающее воздействие допускает только временные обратимые нарушения функционирования подавляемого оптического прибора. Поэтому облученность на входной апертуре прибора во всем диапазоне дистанций воздействия  $R_{\text{MIN}}-R_{\text{MAX}}$  должна быть не ниже уровня подавления, но не выше уровня поражения  $E_{\text{ПД}} \leq E(R_{\text{MIN}} \leq R \leq R_{\text{MAX}}) \leq E_{\text{ПР}}$ .

Чтобы подавить прибор на расстоянии  $R_{\text{MAX}}$  источником создается облученность  $E(R_{\text{MAX}}) = E_{\text{ПД}}$ , чтобы не произошло поражение прибора на расстоянии  $R_{\text{MIN}}$ , облученность не должна превышать уровень поражения  $E(R_{\text{MIN}}) \leq E_{\text{ПР}}$ , что с учетом монотонности (1) приводит к неравенству:

$$\sqrt{\frac{E_{\text{ПР}}}{E_{\text{ПД}}}} \geq \frac{R_{\text{MAX}}}{R_{\text{MIN}}},$$

при выполнении которого излучателем с неизменной излучаемой мощностью  $P$  и шириной луча  $\theta$  возможно осуществить подавление оптического прибора без его поражения во всем диапазоне дистанций воздействия  $R_{\text{MIN}}-R_{\text{MAX}}$ .

Для оптического прибора с соотношением  $E_{\text{ПР}}/E_{\text{ПД}}$ , используя (1), можно определить дистанцию его поражения  $R_{\text{ПР}}$  излучателем с мощностью  $P$  и шириной луча  $\theta$ :

$$R_{\text{ПР}} = \sqrt{\frac{8P}{\pi E_{\text{ПР}} \theta^2}},$$

ближе которой произойдет его поражение  $E(R < R_{\text{ПР}}, P, \theta) > E_{\text{ПР}}$ .

Для большинства применений ОЭП желаемая минимальная дистанция воздействия  $R_{\text{MIN}}$ , как правило, меньше дистанции поражения  $R_{\text{ПР}}$ , поэтому на малых дистанциях воздействия  $R < R_{\text{ПР}}$ , чтобы не допустить поражения прибора интенсивным оптическим излучением, необходимо снижать излучаемую мощность  $P$ , либо увеличить ширину луча  $\theta$ .

Также, используя монотонность (1), из выражений для облученности  $E(R_{\text{MAX}}) = E_{\text{ПД}}$ , и  $E(R_{\text{MIN}}) = E_{\text{ПР}}$  можно получить диапазон снижения излучаемой мощности, который требуется обеспечить в излучателе, чтобы не допустить поражения прибора при неизменной ширине луча  $\theta$ :

$$\frac{P_{\text{MAX}}}{P_{\text{MIN}}} = \frac{R_{\text{MAX}}^2 E_{\text{ПД}}}{R_{\text{MIN}}^2 E_{\text{ПР}}}, \quad (2)$$

и диапазон расширения ширины луча при неизменной излучаемой мощности  $P$

$$\frac{\theta_{\text{MAX}}}{\theta_{\text{MIN}}} = \frac{R_{\text{MAX}}}{R_{\text{MIN}}} \sqrt{\frac{E_{\text{ПД}}}{E_{\text{ПР}}}}. \quad (3)$$

Чтобы на расстояниях  $R_{\text{MIN}} \leq R \leq R_{\text{ПР}}$  эффект непоражающего воздействия был максимален, облученность можно поддерживать на постоянном уровне  $E(R_{\text{MIN}} \leq R \leq R_{\text{ПР}}) = E_{\text{ПР}}$ . Для этого, при неизменной излучаемой мощности  $P$ , площадь  $S$ , покрываемая лучом с радиусом  $r$  в поперечном сечении луча, должна быть постоянной на расстояниях  $R \leq R_{\text{ПР}}$ , что достигается расширением луча:

$$\theta = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{8P}{\pi E_{\text{ПР}}}} \quad (4)$$

Постоянный уровень облученности  $E(R \leq R_{\text{ПР}}) = E_{\text{ПР}}$ , согласно (1), можно также создавать при неизменной ширине луча  $\theta$ , снижая излучаемую мощность:

$$P = R^2 \frac{\pi E_{\text{ПР}} \theta^2}{8}$$

Например, для оптического прибора с соотношением  $E_{\text{ПР}}/E_{\text{ПД}} = 25$  и  $E(R_{\text{МАХ}}) = E_{\text{ПД}}$ , создаваемой на дистанции  $R_{\text{МАХ}} = 2000$  м излучателем с источником некогерентного излучения  $\theta_{\text{НК}} = 0,570^\circ$  и  $P_{\text{НК}} = 100P_0$ , дистанция поражения прибора  $R_{\text{ПР}} = 400$  м. Расширение луча на расстояниях  $100 \text{ м} \leq R \leq 400 \text{ м}$ , согласно (4), поддерживает облученность на постоянном уровне  $E(100 \text{ м} \leq R \leq 400 \text{ м}) = E_{\text{ПР}}$  (горизонтальная часть графика 1, рис. 4).

Если в диапазоне дистанций  $R_{\text{МИН}} - R_{\text{МАХ}}$  не требуется поддерживать максимально возможную облученность, то для непоражающего подавления  $E_{\text{ПД}} \leq E(R) \leq E_{\text{ПР}}$  излучаемую мощность или ширину луча можно изменять дискретно на выбранной одной или на нескольких дистанциях воздействия. Например, для излучателя с источником некогерентного излучения  $\theta_{\text{НК}} = 0,570^\circ$ ,  $P_{\text{НК}} = 100P_0$  на расстояниях  $40 \text{ м} \leq R \leq 200 \text{ м}$  непоражающее подавление прибора обеспечивается 10-кратным расширением луча до  $\theta_{\text{НК}} = 5,70^\circ$  (сплошная спадающая часть графика 4, рис. 4), на расстояниях  $200 \text{ м} \leq R \leq 1000 \text{ м}$  расширением луча в 2 раза до  $\theta_{\text{НК}} = 1,14^\circ$  (сплошная спадающая часть графика 2, рис. 4), на расстояниях  $400 \text{ м} \leq R \leq 2000 \text{ м}$  необходимо использовать луч с  $\theta_{\text{НК}} = 0,57^\circ$  (спадающая часть графика 1, рис. 4).

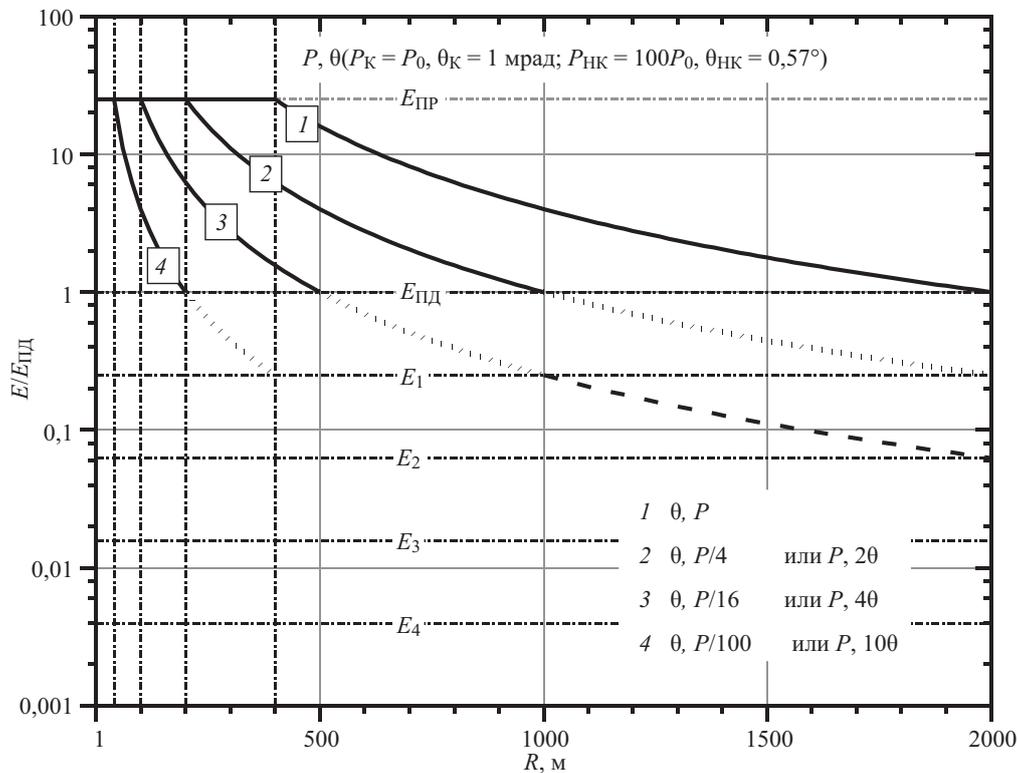


Рис. 4. Иллюстрация вариантов снижения облученности для обеспечения непоражающего воздействия  $E_{\text{ПД}} \leq E(R, P, \theta) \leq E_{\text{ПР}}$  на расстояниях  $R < R_{\text{ПР}}$  уменьшением излучаемой мощности  $P$  или увеличением ширины луча  $\theta$ . Горизонтальная часть графиков иллюстрирует способ снижения облученности, при котором ее значение поддерживается постоянным. На спадающей части графика 1 изображена расчетная зависимость облученности от излучателя с источником когерентного излучения мощностью  $P_{\text{НК}} = 100P_0$  при ширине луча  $\theta_{\text{НК}} = 0,57^\circ$ , графика 2 — при  $\theta_{\text{НК}} = 1,14^\circ$ , графика 3 — при  $\theta_{\text{НК}} = 2,28^\circ$ , графика 4 при  $\theta_{\text{НК}} = 5,70^\circ$ . Горизонтальными штрихпунктирными линиями показаны уровни  $E_{\text{ПР}}$ ,  $E_{\text{ПД}}$ , вертикальными — расстояния 40, 100, 200, 400 м. Пунктирной линией выделены участки графиков  $E \leq E_{\text{ПД}}$ , штриховой —  $E \leq E_1$

#### Особенности построения средств непоражающего воздействия оптическим излучением на оптические приборы со светочувствительным сенсором

Для задач РЭБ традиционно стремятся увеличить максимальную дистанцию воздействия, используя доступный мощный источник излучения предельно сузив ширину луча так, чтобы создаваемая облу-

ченность была не ниже уровня функционального подавления [9] или уровня снижения эффективности применения.

Несмотря на то что на больших расстояниях диаметр луча рассматриваемого в расчете излучателя с источником когерентного излучения с шириной луча  $\theta_K = 1$  мрад намного больше входной апертуры типичных подавляемых оптических приборов, требуемая точность наведения луча очень высока. Точности наведения 1 мрад соответствует одно деление прицельной сетки оптических прицелов (1 тысячная = 1,0472 мрад), что также сопоставимо с максимальным позиционным разрешением высокотехнологичных опорно-поворотных устройств [10]. Для энергетически эквивалентного излучателя с источником некогерентного излучения применимы более доступные и менее прецизионные опорно-поворотные устройства с точностью позиционирования  $\pm 0,1^\circ$ .

Оптические излучатели с широким лучом можно использовать для секторной защиты объекта от потенциальных угроз с малых расстояний, наводя луч по центру угрожающего сектора. При использовании узконаправленных излучателей необходимы данные о точном местоположении подавляемых оптических приборов. Предельно узкий луч малоприменим на близких расстояниях из-за малого диаметра луча и высоких требований к точности наведения.

Если подавление прибора в результате воздействия на него оптического излучения наступает за время воздействия  $t$ , а эффект подавления продолжается в течение времени  $T$  после окончания воздействия, то, сканируя лучом в пространстве в течение времени последствия  $T$ , можно увеличить покрываемую лучом площадь  $S = 2\pi \cdot r \cdot T/t$ , компенсировав недостаточную точность наведения.

Для непоражающего воздействия с рассмотренными в расчете значениями  $R_{\text{MIN}} = 100$  м,  $R_{\text{MAX}} = 2000$  м,  $E_{\text{ГПР}}/E_0 = 25$  диапазон изменения излучаемой мощности (2)  $P_{\text{MAX}}/P_{\text{MIN}} = 16$ , диапазон изменения ширины луча (3)  $\theta_{\text{MAX}}/\theta_{\text{MIN}} = 4$ .

В мощных твердотельных лазерах видимого диапазона с преобразованием частоты в нелинейном оптическом кристалле при 16-кратном изменении выходной мощности необходимы специальные технические решения для устранения влияния изменения мощности накачки на оптические свойства нелинейного кристалла из-за эффекта тепловой линзы.

Мощные короткодуговые ксеноновые лампы в металлокерамическом корпусе не допускают такой диапазон изменения выходной мощности в режиме постоянного тока [11], но в режиме импульсной модуляции изменением скважности можно достичь до 100-кратного изменения средней мощности.

Для формирования луча постоянного диаметра (4) (горизонтальная часть графиков рис. 4) необходим панкратический объектив с дополнительными подвижными оптическими элементами, которые вносят дополнительные оптические потери. Требования к осветительным объективам менее жесткие, чем к съёмочным фотографическим объективам, поэтому они проще и дешевле. Однако для применений с дистанционным наведением луча по внешнему целеуказанию необходимо использовать прецизионные объективы, чтобы уменьшить смещение линии визирования при изменении ширины луча, что существенно усложняет конструкцию и увеличивает стоимость особенно при использовании объективов с большой выходной апертурой для излучателей с источником некогерентного излучения.

Используя дискретный способ расширения луча можно существенно упростить и удешевить оптическую систему излучателя.

Для некоторых типов оптических приборов критериальные уровни функционального подавления в определенных участках видимого спектра ниже, чем в других. Поэтому использование монохроматического оптического излучения когерентных источников с длиной волны из этих участков более эффективно, чем полихроматическое излучение некогерентных источников.

При разработке средств непоражающего воздействия очень важно правильно определить необходимые и достаточные критериальные уровни функционально-разноразноуровневых воздействий на типовые подавляемые приборы с учетом их возможностей выполнять свои функции на разных расстояниях.

Например, если расстояние  $R$  является предельным для идентификации объекта системой видения, в которой используется оптический прибор с матричным сенсором, подавляемый при облученности  $E(R)$ , то на расстоянии  $2R$ , используя тот же прибор, система видения сможет выполнять только функцию различения объекта вне зависимости от интенсивности воздействия на него оптическим излучением. Линейное разрешение изображения наблюдаемого объекта на матричном сенсоре на расстоянии  $2R$  уменьшается в 2 раза, что по современным критериям визуального восприятия [12], уточняющих эмпирические критерии Джонсона [13, 14], соответствует ухудшению видения объекта с уровня «идентификация», при котором различается 8 периодов эквивалентной миры, до уровня «различение», при котором различается только 4 периода.

Аналогично, если оптический прибор для улучшения качества выполнения им своей функции снабдить оптической системой с увеличенной кратностью, то облученность его сенсора возрастет пропорционально квадрату повышения кратности (при той же числовой апертуре). Поэтому критериальные уровни, экспериментально установленные для оптического прибора на малых дистанциях, часто являются завышенными для больших дистанций воздействия.

### Заключение

Сравнительный численный расчет демонстрирует, что функциональное подавление оптических приборов на дистанциях 100–2000 м может осуществляться как излучателями с источниками когерентного излучения на основе промышленно выпускаемых твердотельных лазеров с диодной накачкой, так и энергетически эквивалентными узконаправленными излучателями с источниками некогерентного излучения на основе мощных короткодуговых ксеноновых ламп в металлокерамическом корпусе со встроенным внутренним отражателем, снабженных вторичной формирующей оптической системой.

Сформулированное условие энергетической эквивалентности позволяет при выборе путей построения средств функционального подавления визуально-оптическими помехами использовать как когерентное, так и некогерентное излучение, формируемое излучателями с источниками, наиболее подходящими по условиям применения.

Для подавляемого оптического прибора, для которого известны значения облученности уровней функционального поражения и подавления, установлено соотношение между ними и максимальной и минимальной дистанциями воздействия, при выполнении которого воздействие на прибор оптического излучения не приводит к его поражению.

Для случаев, когда это соотношение не выполняется, определена дистанция поражения, ближе которой, если не уменьшить создаваемую излучателем облученность, произойдет поражение прибора. Рассмотрены варианты уменьшения облученности снижением излучаемой мощности и расширением луча. Для каждого варианта получено выражение для диапазона снижения излучаемой мощности или диапазона расширения ширины луча, условия которого необходимо учитывать при выборе источников и оптической системы излучателя, чтобы не допустить поражения подавляемых оптических приборов.

Получены выражения для поддержания облученности ближе дистанции поражения на максимальном уровне снижением излучаемой мощности или расширением луча, которые могут быть использованы при проектировании комплексов визуально-оптических помех для создания наибольшего эффекта непоражающего воздействия, на основании данных о расстоянии до подавляемого прибора, получаемых от устройств определения дальности (дальномеров).

С учетом полученных в расчете соотношений отмечены особенности использования в средствах постановки визуально-оптических помех источников когерентного излучения на основе твердотельных лазеров с нелинейным преобразованием частоты и источников некогерентного излучения на основе ксеноновых ламп в металлокерамическом корпусе.

Полученные результаты будут полезны при разработке излучателей визуально-оптических помех непоражающего действия.

### Литература

1. Платонов А.А., Ваганов С.А. Корабельная станция визуально-оптических помех для защиты кораблей «Грач» // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации. 2016: Тематический сборник. 2016. Вып. 4. Ч. 2. С. 137.
2. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения / Под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2013. 232 с.
3. Щербakov Г.Н., Попов В.И., Русин П.В., Щелкун Д.М., Рычков А.В., Верёвкин А.С., Проценко О.П., Голодов А.В. Возможные пути создания оптического канала мобильной комплексной установки нелетального действия // Специальная техника. 2016. № 1. С. 42–49.
4. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. 2-е изд., пер. и доп. М.: Воениздат, 1989. 354 с.
5. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Под ред. В.Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. 424 с.
6. Smith W.J. *Modern optical engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill, 2000. 617 p.
7. Волков В.Г. Твердотельные лазеры с накачкой мощными лазерными диодами, используемые в системах обеспечения безопасности // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 142–181.
8. Королёв Т.К., Платонов А.А., Ваганов С.А. Формирование высокоинтенсивных импульсных некогерентных визуально-оптических сигналов в диапазоне 0,35–2,5 мкм // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 47–51. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-47-51
9. Yang H.X., Li Z.M., Chen F.M., Wu Z.Q. Study on the engineering factors of jamming effect of the laser blinding and com-

### References

1. Platonov A.A., Vaganov S.A. Visual disturbance shipboard station for protection of «Grach» ships. *Electronic warfare in the Armed Forces of the Russian Federation*, 2016, no. 4, part 2, pp. 137. (in Russian)
2. *Information conflict models of search and detection tools* / Ed. by Yu.L. Koziratckii. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013, 232 p. (in Russian)
3. Shcherbakov G.N., Popov V.I., Rusin P.V., Shchelkun D.M., Rychkov A.V., Verevkin A.S., Protsenko O.P., Golodov A.V. Possible ways to create an optical channel for mobile combined non-lethal system. *Special'naja tehnika*, 2016, no. 1, pp. 42–49. (in Russian)
4. Paliy A.I. *Electronic warfare*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Voenizdat Publ., 1989, 354 p. (in Russian)
5. *Modern electronic warfare. Methodology issues* / Ed. by V.G. Radzievskii. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 424 p. (in Russian)
6. Smith W.J. *Modern optical engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill, 2000, 617 p.
7. Volkov V.G. Solid-state lasers with high-power laser diodes pumping used in security systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 142–181. (in Russian)
8. Korolev T.K., Platonov A.A., Vaganov S.A. Generation of high-intensity pulse incoherent visual optical signals in 0.35–2.5  $\mu\text{m}$  spectral range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 47–51. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-47-51
9. Yang H.X., Li Z.M., Chen F.M., Wu Z.Q. Study on the engineering factors of jamming effect of the laser blinding and computer simulation. *Proc. International Conference on Computer Science*

- puter simulation // Proc. International Conference on Computer Science and Software Engineering (CSSE 2008). 2008. P. 134–137. doi: 10.1109/CSSE.2008.466
10. Gerbracht L., Moncino K. Accuracy and precision rule pan-tilt positioners in critical camera applications // *Laser Focus World*. 2017. V. 53. N 4. P. 42–44.
  11. Cermax lamp engineering guide. 1998 [Электронный ресурс]. URL: [http://prolight.info/pdf\\_specs/PE\\_CermaxLampEngineering.pdf](http://prolight.info/pdf_specs/PE_CermaxLampEngineering.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения: 22.10.2019).
  12. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 480 с.
  13. Johnson J. Analysis of image forming systems (Johnson's Criteria) // Image Intensifier Symposium, Warfare Vision Branch. Electrical Engineering Department, U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, October 6-7, 1958. P. 249–273.
  14. Biberman L.M. Perception of displayed information. New York: Plenum Press, 1973. 345 p.

#### Авторы

**Ваганов Сергей Анатольевич** — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Scopus ID: 8874638700, ORCID ID: 0000-0001-5059-8563, sv.exciton@mail.ioffe.ru

#### Authors

**Sergei A. Vaganov** — PhD, Scientific Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Scopus ID: 8874638700, ORCID ID: 0000-0001-5059-8563, sv.exciton@mail.ioffe.ru