

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОИСКА–ОБНАРУЖЕНИЯ–РАСПОЗНАВАНИЯ ПО ТЕПЛОВИЗИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ КАЧЕСТВОМ¹

© 2020 г. Л. В. Вишнякова^a, В. Я. Ким^a, К. В. Обросов^a,
Н. К. Обросова^{b,*}, А. И. Родионов^a

^a ФГУП ГосНИИАС, Москва, Россия

^b ВЦ ФИЦ ИУ РАН, МГУ ф-т ВМК, Москва, Россия

*e-mail: nobrosova@ya.ru

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.

После доработки 26.06.2020 г.

Принята к публикации 27.07.2020 г.

Предложен алгоритм динамической модели поиска–обнаружения–распознавания объектов с помощью бортовых тепловизионных систем, работающих в диапазонах длин волн 3–5 и 8–12 мкм, и приведены основные результаты моделирования при действии по наземным объектам с анализом влияния основных факторов на вероятностно-дальностные характеристики системы “сцена–оптическая трасса–тепловизионный канал–человек” при изменяющемся качестве изображения в процессе поиска из-за сближения носителя с объектом.

DOI: 10.31857/S0002338820060128

Введение. Выполнение полетного задания при поисково-спасательных операциях, десантировании грузов, пожаротушении и т.п. ночью или в сложных метеоусловиях часто связано с использованием обзорно-прицельной тепловизионной системы (ТПС) как средства поиска и пеленгации наземных или надводных объектов. Для этого летчик самолета или оператор беспилотного летательного аппарата (БЛА) должен найти объект на фоне подстилающей поверхности (ПП) по тепловизионному изображению, определить его форму и ориентацию, отнести к определенному классу или подклассу, установить тип объекта, оценить его состояние и т.п., т.е. провести вскрытие объекта на некотором уровне детализации его образа. Одной из основных задач при этом является своевременное обнаружение и распознавание объекта при сближении с ним. Прогнозирование соответствующих вероятностно-дальностных характеристик методами моделирования процессов поиска и вскрытия объекта позволяет правильно выбрать параметры аппаратуры, определить логику взаимодействия человека–оператора с информационно-управляющим полем кабины, оптимизировать высоту и скорость полета, выработать требования к априорным данным по местоположению объекта и его отличительным признакам, рассчитать необходимый состав и взаимодействие группы летательных аппаратов (ЛА), участвующих в операции, оценить эффективность применения ЛА для достижения желаемого результата. Отличительной особенностью оценки вероятностно-дальностных характеристик при таком применении ТПС является существенное влияние изменений тепловизионного (ТП) изображения во время поиска, обнаружения и распознавания объекта. Все известные модели [1–5] не предполагают изменение изображения во время поиска, обнаружения, распознавания и не позволяют проводить многофакторный анализ эффективности применения ТПС на ЛА при сближении с наземными или надводными объектами. Динамическими модели в указанных работах названы только в связи с тем, что в них определяется зависимость вероятности вскрытия от времени случайного поиска объекта взором оператора на экране при условии воспроизведения на нем фиксированного (например, запомненного) изображения сцены. Такие модели адекватны реальности только в случае малых скоростей сближения носителя с объектом.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00949-а (разделы 1, 2, 4); № 19-29-06077-мк (раздел 3)).

1. Постановка задачи. Необходимо разработать математическую модель, адекватную динамике зрительного восприятия меняющегося ТП изображения и принятия решений об обнаружении и распознавании объекта в процессе сближения с ним. Такую модель будем называть динамической моделью поиска–обнаружения–распознавания. Модель должна формировать вероятностно-дальностные характеристики обнаружения–распознавания и допускать ее включение в общую модель операций с учетом влияния следующих факторов:

- уменьшение дальности до искомого объекта и, следовательно, постепенное улучшение линейного разрешения на его поверхности;
- увеличение коэффициентов пропускания атмосферой излучений объекта и фона и, следовательно, нарастание отношения сигнала к шуму в процессе поиска;
- быстрое уменьшение разности протяженностей оптических трасс “объект-ТПС” и “фон за объектом-ТПС”, что приводит к существенной вариабельности контрастов на контуре объекта (часто с изменением их знака во время поиска);
- увеличение наблюдаемой площади искомого объекта из-за уменьшения степени загромождения его другими объектами и рельефом местности;
- возможные изменения условий освещенности объекта во время поиска.

С помощью динамической модели поиска–обнаружения распознавания должен быть проведен сравнительный анализ применения существующих и перспективных ТПС, а также влияние погодных условий, освещенности объекта солнечным излучением в рабочих диапазонах длин волн ТПС на статистические характеристики дальностей обнаружения и распознавания наземных объектов типа транспортных средств.

2. Динамика зрительного восприятия и концепция построения динамической модели поиска объекта. Вскрытию объекта по его тепловизионному изображению предшествует зрительный поиск, т.е. процесс, направленный на устранение пространственной неопределенности изображения искомого объекта независимо от того, какая решается задача: обнаружения или распознавания. При обнаружении этот процесс связан с макродвижениями глаз (саккадическими движениями), которые происходят сознательно с целью фиксации оперативного фoveального поля зрения, размер которого [6] составляет 1.2° , на каких-либо точках для анализа наиболее информативных участков изображения: углах, крутых изгибах и т.п. [7]. Таким образом, поиск осуществляется путем скачкообразных макродвижений глаз, чередующихся с фиксированными остановками. При фиксации точки взгляда оба глаза делают неосознанные микродвижения (тремор, дрейф и маленькие скачки), при которых происходит прием и обработка оптического изображения на сетчатке. Группы фоторецепторов сетчатки объединяются в морфологические и функциональные образования, так называемые рецептивные поля (РП). Время, в течение которого поглощается падающий на РП световой поток, называют временем инерции зрения. Время инерции не должно превышать время фиксации и находится в пределах 0.01–0.03 с [7].

В момент фиксации взгляда совместная работа рецепторов дает возможность воспринять изображение. Затем большая часть волокон зрительного нерва прекращает передачу информации в мозг, передаются только сигналы об изменениях освещенности сетчатки. В подкорке и корковом центре мозга происходит окончательная обработка зрительной информации, связанная с разделением сигналов от различных РП, их декодированием, формированием и запечатлением зрительных образов, а также управлением зрительным процессом, включая движения глаз и фиксации. При этом в высших отделах зрительной системы производится выделение (детектирование) элементарных (генетически закрепленных) и сложных (условно рефлекторных) признаков объектов [8]. Известны детекторы отрезков прямых, дуг и углов, контраста, цвета, направления движения, скорости и т.п. [9, 10]. Наибольшую роль при сравнении зрительных образов объектов играет их форма [10, 11]. Этап выделения минимального числа элементарных признаков часто называют этапом обнаружения (*detection*), а процесс накопления их достаточного количества для принятия решения о принадлежности объекта к определенному классу называют этапом распознавания (*recognition*) [12, 13]. В дальнейшем все переменные с верхним индексом *det* относятся к обнаружению, а переменные с верхним индексом *rec* – к распознаванию. Зрительная система при обнаружении и распознавании работает аналогично оптимальному приемнику, минимизирующему вероятность ошибки второго рода, при условии, что вероятность ошибки первого рода не больше заданной величины (критерий Неймана–Пирсона) [10, 11, 14]. При яркостях фона больше 3 кд/м^2 время фиксации взгляда на точке внимания при обнаружении [7, 15] составляет не менее 0.2 с, а при распознавании – 0.3–0.8 с. Этап обнаружения, начинающийся при появлении объекта в пределах поля зрения, всегда предполагает поиск, т.е. не-

сколько фиксаций взгляда. Поэтому его продолжительность составляет 2–8 с даже в случае хорошего качества изображения.

Зрительный анализатор работает как многоуровневая самонастраивающаяся система принятия решений, включающая прямые и обратные связи [6, 7, 16]. Саккадические движения глаз обеспечивают рассмотрение всего изображения путем последовательного введения в фoveальное поле зрения привлечших внимание локальных контрастов (областей интереса, ОИ) и принятых решений о необходимости дальнейшего поиска. Положения локальных контрастов и принятые решения запоминаются, влияя на движение глаз при дальнейшем поиске. Поэтому вероятность обнаружения объекта $P^{\text{det}}(t)$ можно рассматривать как реакцию некоторой динамической системы на входное воздействие, которое определяется объективно существующим качеством изображения. Мерой качества в текущий момент времени t может служить максимальная вероятность обнаружения объекта Q^{det} по зафиксированному в момент времени t изображению, т.е. запомненному с помощью “стоп-кадра” и предъявленному оператору на неограниченное время. Если качество изображения Q^{det} с течением времени не изменяется, то $\lim_{t \rightarrow \infty} P^{\text{det}}(t) = Q^{\text{det}}$, что и предполагают существующие модели [3, 5], в которых вместо Q^{det} используется обозначение $P^{\text{det}}(\infty)$. В рассматриваемой ситуации величина Q^{det} изменяется, так как она зависит от дальности до объекта и от углов его визирования, которые меняются при движении носителя ТПС. Поэтому значение Q^{det} опосредованно зависит от времени $Q^{\text{det}} = Q^{\text{det}}(t)$, а величина $P^{\text{det}}(t)$, как в любой следящей динамической системе, в каждый момент времени t на интервале Δt имеет приращение $\Delta P^{\text{det}}(t)$, которое формируется сигналом рассогласования и динамикой зрительного анализатора. Если качество изображения непрерывно улучшается, т.е. $Q^{\text{det}}(t)$ – возрастающая функция, то вероятность обнаружения $P^{\text{det}}(t)$, увеличиваясь, остается меньше $Q^{\text{det}}(t)$. Однако возможны ситуации, когда в процессе сближения с объектом существует такой диапазон дальностей до него, в котором качество изображения ухудшается при уменьшении расстояния между носителем и объектом. В этом диапазоне вероятность $Q^{\text{det}}(t)$ с течением времени уменьшается и может стать меньше динамически достигнутой за время t вероятности обнаружения $P^{\text{det}}(t)$. Тогда приращения вероятности $P^{\text{det}}(t)$ не происходит, но накопленная вероятность сохраняется из-за запомненных положений локальных контрастов, попавших в фoveальное поле зрения в моменты его фиксации. В связи с этим в модели используется функция Хевисайда² $\theta(Q^{\text{det}}(t) - P^{\text{det}}(t))$, не допускающая уменьшения накопленной вероятности обнаружения.

Примером временного ухудшения качества изображения и, следовательно, аномального поведения условной вероятности $Q^{\text{det}}(t)$ в процессе сближения с объектом является уменьшение воспринимаемого ТПС абсолютного значения теплового контраста объект-фон. Падение такого теплового контраста происходит в условиях визирования объекта и поверхности земли по настильным оптическим трассам через атмосферную дымку со значительным рассеянием лучистых потоков, так как при этом происходит быстрое уменьшение яркости дымки, наблюдаемой над контуром за объектом, из-за уменьшения расстояния от контура объекта до поверхности земли при горизонтальном маловысотном полете. Во время дальнейшего полета абсолютный контраст увеличивается, так как уменьшается дальность до объекта и, следовательно, уменьшается ослабление контрастов в атмосфере на оптических трассах “объект-ТПС”.

Вероятность $Q^{\text{det}}(t)$ опосредованно зависит от времени, являясь функцией большого числа параметров внешних условий и технических характеристик информационного канала “ТПС – зрительный анализатор оператора” (см. разд. 3). Величину $Q^{\text{det}}(t)$ следует рассматривать как входной сигнал для модели формирования вероятности $P^{\text{det}}(t)$. Из теории поиска с учетом изложенного выше следует, что на предельно малых интервалах времени Δt приращение вероятности обнаружения соответствует выражению

$$\Delta P^{\text{det}}(t) = \frac{\Delta t}{\tau_{\text{det}}} [Q^{\text{det}}(t) - P^{\text{det}}(t)] \theta(Q^{\text{det}}(t) - P^{\text{det}}(t)), \quad (2.1)$$

²Функция Хевисайда имеет вид $\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$

где $\tau^{\text{det}}(t)$ – среднее время поиска объекта по его изображению, сформированному в момент времени t , которое зависит от сложности фона [3, 17]:

$$\tau^{\text{det}}(t) = \begin{cases} 3 - 2.2Q^{\text{det}}(t) & \text{при умеренной сложности фона,} \\ 4 - 2.65Q^{\text{det}}(t) & \text{при пестром фоне.} \end{cases} \quad (2.2)$$

Среднее время поиска $\tau^{\text{det}}(t)$ зависит от вероятности $Q^{\text{det}}(t)$, т.е. от качества изображения и, следовательно, изменяется в процессе сближения с объектом. Вероятности вскрытия объекта $Q^{\text{det}}(t)$, $Q^{\text{rec}}(t)$ будем далее называть предельными вероятностями обнаружения и распознавания соответственно, а $P^{\text{det}}(t)$, $P^{\text{rec}}(t)$ – динамическими вероятностями обнаружения и распознавания.

Обнаружение является результатом зрительного поиска, эффективность которого определяется зависимостью вероятности правильного обнаружения объекта (с учетом вероятности попадания его изображения в фoveальное поле зрения) от времени (т.е., от числа саккадических движений и фиксаций взгляда). Известные модели для прогнозирования этой зависимости построены в предположении неизменности изображения во время в значительной степени случайного процесса поиска [3–5].

При неизменном изображении, т.е. когда $Q^{\text{det}}(t) = P^{\text{det}}(\infty)$, а $\tau^{\text{det}}(t) = \tau^{\text{det}} = \text{const}$, из (2.1) следует экспериментально проверенная зависимость

$$P^{\text{det}}(t) = P^{\text{det}}(\infty) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau^{\text{det}}}\right) \right), \quad (2.3)$$

которая используется в задачах прогнозирования вероятности обнаружения в случае поиска объектов с помощью неподвижной тепловизионной или телевизионной систем [3, 5]. Применение ТПС на борту ЛА, как правило, связано со значительными изменениями изображения в процессе поиска из-за движения ЛА относительно объекта, так как при этом меняются линейное разрешение на объекте, локальные контрасты на его контуре и коэффициенты пропускания лучистой энергии на трассах “объект – ТПС” и “фон – ТПС”. Поэтому, формула (2.3) не адекватна процессу поиска наземного объекта с помощью воздушной ТПС и необходимо в процессе моделирования движения ЛА все время пересчитывать значения $Q^{\text{det}}(t)$, $\tau^{\text{det}}(t)$ и решать соответствующее выражению (2.1) дифференциальное уравнение

$$\frac{dP^{\text{det}}(t)}{dt} = \frac{Q^{\text{det}}(t) - P^{\text{det}}(t)}{\tau^{\text{det}}(t)} \theta(Q^{\text{det}}(t) - P^{\text{det}}(t)) \quad (2.4)$$

с начальным условием $P^{\text{det}}(0) = 0$ и переменными во времени и зависящими друг от друга величинами $Q^{\text{det}}(t)$ и $\tau^{\text{det}}(t)$ (см. (2.2)), которые в каждый фиксированный момент времени не зависят от предыстории и определяются текущими значениями следующих геометрических и физических параметров:

- значениями параметров профиля (контура) объекта в картинной плоскости,
- дальностями до объекта и фона за ним,
- высотой полета ЛА,
- температурами и коэффициентами излучения объекта и фона (наблюдаемых в окрестности контура объекта),
- метеорологической дальностью видимости (МДВ),
- влажностью и температурой воздуха,
- типом осадков,
- энергетической освещенности Солнцем объекта и фона,
- параметрами облачности,
- степенью заслоненности искомого объекта другими объектами (деревьями, домами, и т.п.).

Динамическая вероятность $P^{\text{det}}(t)$ является решением дифференциального уравнения (2.4), в котором величины $Q^{\text{det}}(t)$ и $\tau^{\text{det}}(t)$ с учетом (2.2) рассчитываются как сложные функции перечис-

ленных параметров, зависящих от времени. Если поиск начинается в момент времени $t = 0$, то уравнение (2.4) решается при начальном условии $P^{\det}(0) = 0$.

При численном решении методом Эйлера дифференциального уравнения (2.4) на i -м шаге, соответствующем временному дискрету Δt , определяется динамическая вероятность обнаружения $P_i^{\det} = P^{\det}(t_i)$ объекта на интервале времени $t \in (0, t_i)$ с использованием рекуррентных формул

$$\begin{cases} \Delta P_i^{\det} = \Delta t \left[\frac{Q_{i-1}^{\det} - P_{i-1}^{\det}}{\tau_{i-1}^{\det}} \right] \theta(Q_{i-1}^{\det} - P_{i-1}^{\det}), & i = 1, 2, \dots, \\ P_i^{\det} = P_{i-1}^{\det} + \Delta P_i^{\det}, \end{cases} \quad (2.5)$$

где i – номер шага моделирования обнаружения, $P_0^{\det} = 0$, $\Delta P_i^{\det} = \Delta P^{\det}(t_i)$ – приращение динамической вероятности обнаружения на i -м шаге, $Q_{i-1}^{\det} = Q^{\det}(t_{i-1})$, $\tau_{i-1}^{\det} = \tau^{\det}(t_{i-1})$ – предельная вероятность обнаружения и среднее время поиска объекта, определенные для момента времени t_{i-1} , являющиеся функциями значений перечисленных выше геометрических и физических параметров, рассчитанных для момента времени t_{i-1} .

В процессе моделирования каждого полета расчеты значений последовательности $\{P_i^{\det}\}$ по формулам (2.5) прекращаются на шаге, в котором появляется случайное событие “объект обнаружен”, т.е. происходит последняя фиксация взгляда. Такой шаг [18] определяется путем априорного задания значения случайной величины X , равномерно распределенной в интервале от 0 до 1, и сравнения с ним текущего значения P_i^{\det} . Объект считается обнаруженным при первом, в процессе рекуррентной процедуры, появлении неравенства $X < P_i^{\det}$. На этом шаге регистрируется дальность обнаружения объекта D^{\det} и начинается цикл процесса распознавания, который на j -м шаге описывается рекуррентной процедурой оценки вероятности P_j^{rec} , аналогичной выражениям (2.5), (2.2), но при другом начальном условии и со значительно меньшим средним временем принятия решения, без использования функции Хевисайда, так как неравенство $Q^{\text{rec}}(t) < P^{\text{rec}}(t)$ почти всегда не выполняется. Алгоритм расчета динамической вероятности распознавания на j -м шаге моделирования распознавания имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta P_j^{\text{rec}} = \frac{\Delta t}{\tau_{j-1}^{\text{rec}}} (Q_{j-1}^{\text{rec}} - P_{j-1}^{\text{rec}}), & j = 1, 2, \dots, \\ P_j^{\text{rec}} = P_{j-1}^{\text{rec}} + \Delta P_j^{\text{rec}}, \end{cases} \quad (2.6)$$

где $\tau_{j-1}^{\text{rec}} = 1 - 0.7Q_{j-1}^{\text{rec}}$ – среднее время распознавания, рассчитанное для шага $(j - 1)$, Q_{j-1}^{rec} – предельная вероятность распознавания объекта без ограничения на время наблюдения изображения, которое сформировано ТПС в момент времени, соответствующий $(j - 1)$ -му шагу.

Эта процедура начинается во время последней фиксации взгляда еще на этапе обнаружения (при широком поле зрения ТПС) в процессе улучшения качества изображения из-за сближения с объектом, поэтому начальным условием ($j = 0$) для процесса (2.6) можно считать равенство $P_0^{\text{rec}} = Q_0^{\text{rec}}$, где Q_0^{rec} – предельная вероятность распознавания по широкому полю зрения в момент последней фиксации взгляда при поиске объекта. После этого оператор совмещает центр прицельного перекрестия с объектом, включает автосопровождение и часто переключает ТПС на более узкое поле зрения, скачком улучшая качество изображения, т.е. увеличивая Q_{j-1}^{rec} в выражении (2.6) на шаге цикла распознавания, соответствующем интервалу 2–5 с после принятия решения об обнаружении объекта. В случае попадания в поле зрения нескольких объектов, похожих на искомый, возможно повторение циклов обнаружения и распознавания, однако это, как правило, происходит только при достаточно малых скоростях полета (десятки метров в секунду). При моделировании номер шага, соответствующий моменту распознавания, определяется так же, как и при обнаружении, путем сравнения величины P_j^{rec} с априорно заданным значением случайной величины Y , равномерно распределено от 0 до 1. При этом регистрируется дальность распознавания D^{rec} .

3. Модель формирования предельной вероятности вскрытия объекта при настильном зондировании. На каждом шаге моделирования процессов поиска–обнаружения–распознавания при сближении с объектом необходим расчет предельной вероятности его вскрытия, которая является вероятностью обнаружения или распознавания при условии, что изображение не изменяется и время его анализа не ограничено. Предельная вероятность рассчитывается для того качества изображения, которое соответствует дальности до объекта на i -м шаге моделирования. В соответствии с современной операциональной моделью ТПС [5, 17] предельная вероятность вскрытия объекта на i -м шаге моделирования Q_i , т.е. вероятность его обнаружения или распознавания при визуальном дешифрировании ТП изображения без ограничений на время наблюдения, выражается формулами:

$$Q_i = 1 - \exp\left(-0.7\left(\frac{\lambda h}{2CA_i}\right)^2\right), \tag{3.1}$$

где $A_i = \frac{D_i \delta}{2x_i}$,

$$x_i = \min\left[0.75; 0.59\left(\sqrt{1 + 0.78 \ln \frac{m_i}{0.3}} - 1\right)\right],$$

$$m_i = \frac{|\Delta T_{Ri}| \tau_{ai} r a \delta}{\Delta T \delta_0 \Delta a},$$

$$r = \sqrt{\frac{1 + \exp\left(-\frac{1}{FT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{1}{FT}\right)}}.$$

При этом использованы следующие обозначения: h – критический размер объекта, корень квадратный из его видимой площади, м; $\gamma \in (0.65, 1.5)$ – коэффициент квалификации оператора; C – число различимых с вероятностью 0.5 периодов эквивалентной мира Джонсона, приходящихся на критический размер объекта; число C соответствует определенному уровню вскрытия объекта, в том числе обнаружению или распознаванию, с вероятностью 0.5 (критерий Джонсона); D_i – дальность, м, до объекта в момент времени, соответствующий i -му шагу; A_i – линейное разрешение на объекте, м, при дальности D_i ; δ – эффективное значение элементарного поля зрения ТПС, мрад, учитывающее весь ее информационный тракт, включая зрительный анализатор человека; x_i – относительная частота эквивалентной мира на i -м шаге; m_i – отношение сигнал/шум на i -м шаге; ΔT_{Ri} – тепловой (радиационный) контраст Дойла, определенный по верхней части контура объекта на i -м шаге модели; τ_{ai} – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне ТПС на трассе длиной D_i ; r – коэффициент, учитывающий временное накопление сигнала в смежных кадрах; ΔT – разность температур, эквивалентная шуму, К; δ_0 – элементарное поле зрения, мрад; F – частота кадров, Гц; $T \in (0.05, 0.07)$ – постоянная времени глаза, с; $a, \Delta a$ – размер чувствительного элемента и шаг матрицы фотоприемника, мкм.

Эквивалентная мира Джонсона является виртуальным полосовым узором с радиационной температурой полос, равной среднему абсолютному контрасту объекта. Число C различимых с вероятностью 0.5 периодов (полос) такой мира соответствует определенному уровню вскрытия, в том числе обнаружению или распознаванию. В данной работе использованы следующие данные [19, 20]:

$C = 1.5$ – обнаружение неподвижного объекта на фоне со средней неоднородностью (поле, луг, лес, море); при этом может определяться ориентация объектов (грубо различаются ракурсы);

$C = 2.5$ – перекрестие прицела может быть совмещено с объектом с достаточной точностью для пеленгации (стандарт США);

$C = 4$ – распознавание, т.е. может быть определен класс объекта (автомобиль, автобус, человек, фургон, пикап и т.п.).

В предлагаемой модели для расчета теплового контраста Дойла [3, 17] ΔT_R производятся следующие действия.

1. Разбиение образа объекта в картинной плоскости вертикальными линиями на семь равных по горизонтали долей (число семь соответствует подробности описания объекта при распознавании и гарантирует требуемую детальность при обнаружении).

2. Назначение их высот $\{h_k\}_{k=\overline{1,7}}$ и коэффициентов излучения $\{\varepsilon_k\}_{k=\overline{1,7}}$.

3. Оценка температурных контрастов объект-фон по верхней части контура $\{\Delta T_{ki}\}_{k=\overline{1,7}}$.

4. Расчет для каждой из семи долей объекта радиационного контраста по формулам:

$$\Delta T_{Rki} = \Delta T_k^{ob} \varepsilon_k^{ob} - (1 - \varepsilon_k^{ob})(\eta^{ob} - \zeta E^{ob}) + (1 - \varepsilon)(\eta - \zeta E) - [(1 - \varepsilon)(\eta - \zeta E) + \Delta T_a] \left(1 - \frac{\tau_{aki}^*}{\tau_{ai}}\right), \quad (3.2)$$

где

$$\frac{\tau_{aki}^*}{\tau_{ai}} = \exp \left[-\beta_{ai} \frac{h_k}{\left(\frac{H_i}{D_i}\right) - \operatorname{tg} \beta \sqrt{1 - \left(\frac{H_i}{D_i}\right)^2}} \right];$$

$$\beta_{ai} = \sigma^{scat} K_{pi}^{scat} + \begin{cases} 0.5 \sigma^{abs} \sqrt{\frac{K_i^{abs}}{D_i}}, & \text{если } \lambda \in (3,5), \\ \sigma^{abs} K_i^{abs}, & \text{если } \lambda \in (8,12); \end{cases}$$

$$\sigma^{scat} = \begin{cases} \frac{(2.26 - 0.49 \ln S_M)}{S_M}, & \text{если } \lambda \in (3,5), \text{ без осадков,} \\ \frac{(1.66 - 0.35 \ln S_M)}{S_M}, & \text{если } \lambda \in (8,12), \text{ без осадков,} \\ 3.9 \frac{K}{S_M} & \text{при осадках } (K = 1.06; 1.22; 1.37; 1, \text{ если морось, дождь, снег, туман}); \end{cases}$$

$$\sigma^{abs} = \begin{cases} 0.15 \ln \frac{W}{217} + 1.2, & \text{если } \lambda \in (3,5), \\ 0.05 + 0.015W, & \text{если } \lambda \in (8,12); \end{cases}$$

$$K_i^{scat} = \frac{1.2}{H_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{H_i}{1.2}\right) \right];$$

$$K_i^{abs} = \frac{2.2}{H_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{H_i}{2.2}\right) \right].$$

При этом использованы следующие обозначения: ΔT_k^{ob} – разность температур k -й доли объекта и наблюдаемого над ней участка поверхности фона, К; $\varepsilon_k^{ob}, \varepsilon$ – коэффициенты излучения k -й доли объекта и фона соответственно; η^{ob}, η – коэффициенты, учитывающие вид облачности, тип местности и т.п. (использованы таблицы значений, приведенные в [5]); $\zeta E^{ob}, \zeta E$ – облученности Солнцем наблюдаемых поверхностей объекта и фона с учетом коэффициента использования излучения в рабочем диапазоне длин волн, Вт/м²; ΔT_a – разность температур воздуха и фона, К; τ_{ai}, τ_{aki}^* – коэффициенты пропускания атмосферных трасс “объект – ТПС” и “фон – ТПС над k -й долей объекта” в момент времени, соответствующий i -му шагу модели; β_{ai} – показатель ослабления излучения на i -м шаге модели по наклонной трассе “объект – ТПС”; λ – длина волны излучений, мкм; h_k – высота наблюдаемой k -й доли объекта, км; β – угол наклона рельефа наблюдаемой местности (фона) за объектом на интервале минимальных дальностей до возможных оптических контактов с фоном; H_i – высота полета над уровнем объекта на i -м шаге, км;

Таблица 1

H_i , км	ΔT_a , °C				
	-10	-6	-2	+2	+6
1.1	0.71	0.56	0.4	0.26	0.12
0.81	0.8	0.63	0.46	0.3	0.13
0.64	0.9	0.7	0.51	0.33	0.15
0.38	1.0	0.8	0.52	0.37	0.16
0.32	1.3	0.9	0.66	0.42	0.19

D_i – текущая дальность до объекта, км; $\sigma^{scat}, \sigma^{abs}$ – показатели рассеяния (scattering) и поглощения (absorption) излучений на горизонтальных приземных атмосферных трассах (т.е. при $H = 0$); K_i^{scat}, K_i^{abs} – поправочные коэффициенты при увеличении высоты полета для рассеяния и поглощения, км⁻¹; S_M – МДВ, км; W – абсолютная влажность воздуха, г/м³.

Выражения, входящие в (3.2), соответствуют формулам в работах [5, 21–23] или получены путем их преобразований.

После определения на i -м шаге значений тепловых контрастов $\{\Delta T_{Rki}\}$, $k = \overline{1,7}$, рассчитывается контраст Дойла объекта [3, 17] по формулам:

$$\begin{cases} \Delta T_{Ri} = \sqrt{(\overline{\Delta T_{Ri}})^2 + \frac{1}{6} \sum_{k=1}^7 (\Delta T_{Rki} - \overline{\Delta T_{Ri}})^2}, \\ \overline{\Delta T_{Ri}} = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^7 \Delta T_{Rki}. \end{cases} \quad (3.3)$$

На входном зрачке ТПС (Infrared Systems – IRS) кажущийся тепловой контраст объекта имеет вид

$$\Delta T_{Ri}^{IRS} = \Delta T_{Ri} \tau_{ai}, \quad (3.4)$$

где

$$\tau_{ai} = \exp \left[-\sigma^{scat} K_i^{scat} D_i - \sigma_i^* \right], \quad \sigma_i^* = \begin{cases} \sigma^{abs} \sqrt{K_i^{abs} D_i}, & \text{если } \lambda \in (3,5), \\ \sigma^{abs} K_i^{abs} D_i, & \text{если } \lambda \in (8,12). \end{cases}$$

Используемая в разд. 3 модель (3.1)–(3.4) отличается от известных введением явной зависимости приращений δT_{Rki} радиационных контрастов объекта ΔT_{Rki} от угла уклона местности β , и, следовательно, от рельефа местности за объектом на удалении от него 0–500 м

$$\delta T_{Rki} = [(1 - \varepsilon)(\eta - \zeta E) + \Delta T_a] \left(1 - \frac{\tau_{aki}^*}{\tau_{ai}} \right).$$

Если объектами выступают автомобили, то полезно учитывать, что уклоны дорог для движения с максимальной скоростью 60 км/ч не могут быть больше 70 промилле, т.е. $\max \beta = 7.2^\circ$ (СНиП 2.05.02-85 М., 2004). Приращения δT_{Rki} , которое является третьим слагаемым в выражении для ΔT_{Rki} в (3.2), позволяют оценивать при моделировании степень влияния на эквивалентный тепловой контраст объекта следующих факторов: рельефа местности, разности температур воздуха и фона ΔT_a , высот выделенных частей объекта $\{h_k\}_{k=\overline{1,7}}$, отношения высоты полета к дальности до объекта H_i/D_i и коэффициентов условий применения $\eta, \zeta E, \beta_{ai}$. В табл. 1 в качестве примера даны значения $|\delta T_{Rki}|$ при различных высотах полета H_i и разностях температур воздуха и поверхности земли ΔT_a . Эти значения рассчитаны для случая, когда внешние условия применения ТПС имеют следующие параметры:

- угол уклона местности, наблюдаемой за объектом, $\beta = 10^\circ$ (т.е. уклон 17.6 промилле);
- протяженность уклона 200 м;

- диапазон длин волн $\lambda \in (3, 5)$;
- максимальная высота объекта 2.5 м;
- МДВ $S_M = 5$ км;
- влажность воздуха $W = 10.4$ г/м³;
- коэффициент излучения фона $\varepsilon = 0.82$ (зеленая растительность);
- средняя (5-бальная) кучевая облачность $\eta = 12$;
- высота Солнца 45°, т.е. $\zeta E = 63$ Вт/м².

Из табл. 1 следует, что при настильных углах визирования ненагретого объекта на нем могут возникать дополнительные тепловые контрасты δT_{Rki} , соизмеримые с естественными разностями температур объекта и поверхности земли ΔT_k^{ob} . Сближение ЛА с объектом при некоторых уклонах местности может приводить к таким изменениям дополнительных тепловых контрастов, при которых наблюдаются аномальные участки зависимости предельной вероятности обнаружения от дальности до объекта. Поэтому в динамической модели необходимо определять вероятности обнаружения и распознавания с учетом этих дополнительных тепловых контрастов.

4. Результаты моделирования. Статистические оценки вероятностно-дальностных характеристик поиска и вскрытия объекта были получены путем моделирования процессов обнаружения и распознавания при тысячекратном повторении полета для каждого набора параметров внешних условий. В каждом полете при сближении с объектом моделировалась следующая последовательность этапов.

1. Формирование начальных условий поиска, т.е. выставка такого угла наклона поля зрения к горизонту, при котором возможно различение крупных объектов или элементов местности по их ТП изображениям в верхней части поля зрения.

2. Поиск объектов в полосе, захватываемой широким полем зрения ТПС на подстилающей поверхности.

3. Обнаружение искомого объекта по широкому полю зрения и пеленгация, т.е. совмещение центра прицельного перекрестия с изображением объекта (при этом возможно принятие решения об обнаружении объекта по его расположению в группе, если он является элементом группы однотипных наблюдаемых объектов с известным взаимным расположением, например, колонны транспортных средств).

4. Попытка распознать объект по изображению с использованием широкого поля зрения.

5. Переход на узкое поле зрения (увеличение фокусного расстояния объектива).

6. Распознавание объекта в процессе его автосопровождения узким полем зрения и точная пеленгация с принятием решения об объекте по конфигурации образа в результате зрительного анализа ТП-изображения, а также регистрация его координат.

На каждом этапе для скорости полета 200 м/с (максимальной для малых высот) моделировались зрительные процессы с учетом изменяющегося качества изображения и временные задержки реакции исполнения принятых решений.

При использовании полей зрения $5.2 \times 3.9^\circ$ и $2.67 \times 2^\circ$ (при относительном отверстии объективов 1:1.4) и выпускаемых в России с 2019 г. матрицах 640×480 чувствительных элементов получены оценки математических ожиданий дальностей обнаружения \bar{D}^{\det} , км, и распознавания \bar{D}^{rec} , км, с вероятностями более 0.95, а также соответствующие средние квадратические отклонения дальностей σ^{\det} , км, и σ^{rec} , км, при погодных условиях с МДВ $S_M = 5$ км и влажностью $W = 10.4$ г/м³, которые являются нижней границей 80% погод в средних широтах. Результаты представлены в табл. 2 в виде отношений интервалов дальностей обнаружения к интервалам дальностей распознавания $(\bar{D}^{\det} \pm 2\sigma^{\det}) / (\bar{D}^{\text{rec}} \pm 2\sigma^{\text{rec}})$ при решении задачи поиска объекта на полосе шириной 400 м. Объект при некоторых ракурсах имеет габаритные размеры в проекции на картинную плоскость 3×6 м с изменяющимися по контуру высотами, м: $h_1 = 1.4$; $h_2 = 1.6$; $h_3 = 2.2$; $h_4 = 2.3$; $h_5 = 2.5$; $h_6 = 2.5$; $h_7 = 1.4$. Аналогичными параметрами обладают многие транспортные средства (грузовики, автобусы, фургоны и т. п.).

Моделировалось использование фотонных (с криогенным охлаждением) и микроболометрических (без охлаждения) ТПС, работающих в диапазоне длин волн 3–5 мкм с шумовой температурой $\Delta T = 0.02$ К и в диапазоне 8–12 мкм – с $\Delta T = 0.1$ К [24].

Таблица 2

λ , мкм	ε^{ob}	Ночь	День	
		$\Delta T^{ob} = 1^\circ\text{C}$	объект в тени, $\Delta T^{ob} = 1^\circ\text{C}$	объект нагрет солнцем, $\Delta T^{ob} = 6^\circ\text{C}$
3–5	0.74	4.5 ± 1.6	4.8 ± 1.3	6.2 ± 1.4
		3.2 ± 1.5	3.6 ± 1.6	4.9 ± 1.7
8–12	0.93	4 ± 1.1	4 ± 1.1	5.8 ± 1.3
		3 ± 1.3	3 ± 1.3	4.5 ± 1.5

Данные табл. 2 соответствуют высотам полета 300–700 м и следующим параметрам внешних условий применения ТПС:

– фоном служит зеленая растительность летом с коэффициентом излучения:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.86, & \text{если } \lambda \in (3, 5), \\ 0.91, & \text{если } \lambda \in (8, 12); \end{cases}$$

– разность температур воздуха и поверхности земли $\Delta T_a = -2$ К (воздух обычно холоднее поверхности);

– 5-балльная кучевая облачность $\eta = 13$, $\eta^{ob} = 4$;

– уклон местности за объектом $|\beta| < 3.2^\circ$.

Средние разности температур объект–фон соответствуют стоящим транспортным средствам с выключенными двигателями, т.е. без внутренних источников тепла (рассчитываются в модели).

Использованные значения параметров внешних условий и температурных контрастов являются результатом исследований ГИПО г. Казань [23, 25]. Выбранные для моделирования коэффициенты излучения фона 0.86 и 0.91 соответствуют не только зелени, но и асфальту, снегу и песку, т.е. данные табл. 2 можно рассматривать как оценки дальностей для большинства случаев применения ТПС. Указанные выше поля зрения $5.2 \times 3.9^\circ$ и $2.67 \times 2^\circ$ являются результатом максимизации ширины полосы мониторинга при ограничениях на минимально допустимую дальность распознавания ($\min D^{rec} \geq 1.5$ км) для заданных внешних условий. Такое ограничение связано с величиной отношения грузов при десантировании с малых высот полета.

Таблица 2 свидетельствует о том, что (несмотря на известное значительное влияние отраженной лучистой энергии на яркостное поле объекта в диапазоне 3–5 мкм) сквозные динамические характеристики вскрытия объектов с учетом всех факторов слабо зависят от естественной облученности объекта и фона. Исключением являются маловероятные и краткосрочные ситуации, возникающие при восходе и заходе Солнца, которые в данной работе не рассматривались. Однако опосредованное влияние естественной облученности в виде увеличения температурных контрастов (из-за отличия поглощения излучений объектом и фоном) оказывает сильное влияние на динамические характеристики (см. колонку табл. 2 “объект нагрет солнцем”). В рассматриваемых условиях применения ТПС такое же улучшение динамических характеристик вскрытия происходит при увеличении размеров матрицы с 640×480 до 1024×768 чувствительных элементов. Моделирование показало, что использование перспективных матриц приводит к следующим изменениям улучшения статистик дальностей (по сравнению с табл. 2) в виде $(\bar{D}^{det} \pm 2\sigma^{det}) / (\bar{D}^{rec} \pm 2\sigma^{rec})$:

1) ночью при $\Delta T^{ob} = 1^\circ\text{C}$:

$$\frac{6.24 \pm 1.62}{4.93 \pm 2}, \quad \text{если } \lambda \in (3, 5),$$

$$\frac{6.18 \pm 1.66}{4.87 \pm 2}, \quad \text{если } \lambda \in (8, 12);$$

2) днем при $\Delta T^{ob} = 1^\circ\text{C}$:

$$\frac{6.43 \pm 1.4}{5.26 \pm 1.88}, \quad \text{если } \lambda \in (3, 5),$$

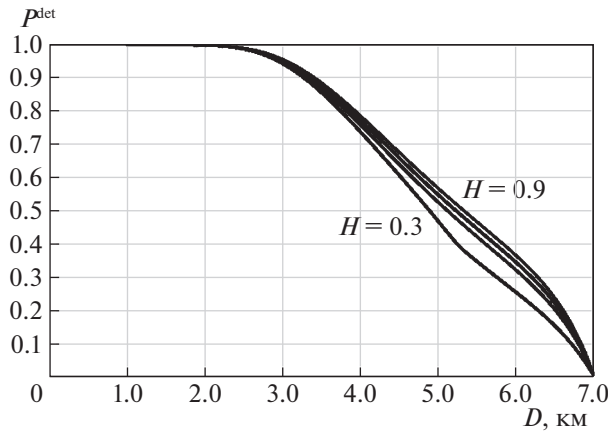


Рис. 1. Вероятностно-дальностные характеристики обнаружения при априорно заданных координатах объекта

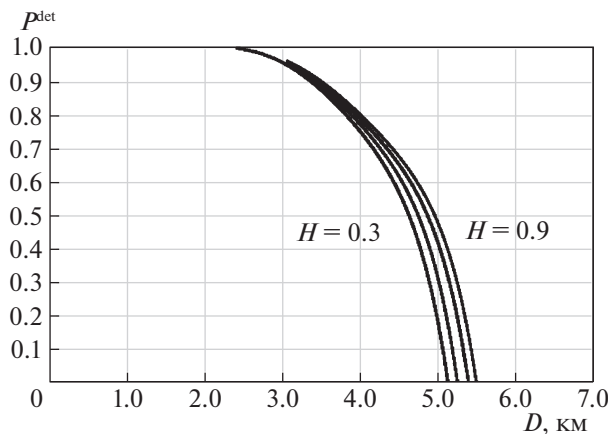


Рис. 2. Вероятностно-дальностные характеристики обнаружения при поиске объекта на полосе шириной 300–400 м

$$\frac{6.18 \pm 1.66}{4.87 \pm 2}, \text{ если } \lambda \in (8, 12).$$

Заметное улучшение вероятностно-дальностных характеристик по сравнению с данными табл. 2 происходит при внешнем целеуказании со средней квадратической ошибкой (СКО) меньше 100 м. Это следует из сравнения графиков зависимостей динамических вероятностей обнаружения (P^{det}) на дальностях, которые превышают значения на оси абсцисс (D), от этих значений (рис. 1, 2). Графики построены для высот полета $H = 0.3; 0.5; 0.7; 0.9$ км при МДВ 4 км. На рис. 1 приведены динамические вероятностно-дальностные характеристики обнаружения для случая программного сопровождения априорно заданных с СКО 75 м координат объекта в момент времени, когда носитель находится на расстоянии 7 км от объекта. На рис. 2 вероятностно-дальностные характеристики соответствуют поиску-обнаружению объекта при мониторинге полосы на ПП шириной 300–400 м. Дальности при значении $P^{\text{det}} = 0$ соответствуют моменту входа объекта в пределы поля зрения, которое в процессе поиска и обнаружения не меняет своей ориентации в инерциальном пространстве при движении носителя.

Качество изображений, формируемых ТПС по сравнению с телевизионными системами значительно меньше зависит от прозрачности атмосферы. На рис. 3 показано комплексное влияние МДВ S_M и освещенности прямыми солнечными лучами $\zeta E^{ob} \in \{0; 7; 14; 21\}$ Вт/м² на среднюю дальность обнаружения \bar{D}^{det} в диапазоне длин волн 3–5 мкм.

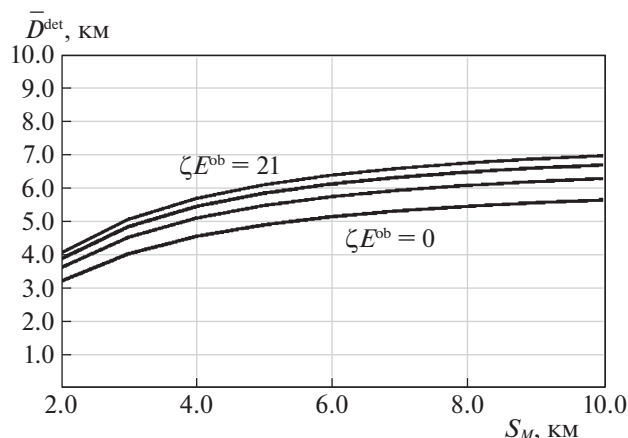


Рис. 3. Средние дальности обнаружения как функции МДВ при различных освещенностях объекта

Из графиков на рис. 3 следует, что при МДВ больше 5 км (80% погодных условий в средних широтах) изменение средних дальностей обнаружения при диапазоне $\lambda \in (3, 5)$ из-за МДВ в 1.5 раза меньше, чем из-за возможных вариаций прямой солнечной засветки. При работе в диапазоне $\lambda \in (8, 12)$ влияние МДВ на средние дальности обнаружения существенно меньше, а прямая солнечная засветка практически не оказывает влияния.

Заключение. В статье предложена динамическая модель процессов поиска–обнаружения–распознавания объектов с помощью ТПС. Модель позволяет прогнозировать соответствующие вероятностно-дальностные характеристики при изменении качества изображений из-за сближения носителя с объектом в различных погодных условиях. Результаты моделирования свидетельствуют о высокой эффективности применения ТПС при использовании в них последних отечественных достижений в области создания матричных приемников излучений. Модель может быть применена при выборе параметров аппаратуры, оптимизации высоты и скорости полета носителя, определении требований к априорным данным по местоположению объекта и его отличительным признакам, расчете необходимого состава группы ЛА и оценки эффективности их применения для достижения желаемого результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Witus G., Gerhard G., Ellis R.D.* Contrast Model for Three-dimensional Vehicles in Natural Lighting and Search Performance Analysis // *Optical Engineering*. 2001. V. 40. № 9. P. 1858–1868.
2. *Friedman M.H.* Fundamental Search Relationships and Their Application to Field Regard Search, Search by Multiple Observers Search from Moving Vehicle and Multitarget Search // *Optical Engineering*. 2013. V. 52. № 4. P. 1107–1117.
3. *Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006.
4. *Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л.* Компьютерные имитационные модели помех поля боя // *Оборонная техника*. 2012. № 4–5.
5. *Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л.* Оценка и повышение эффективности применения тепловизионных приборов наземного базирования в динамическом режиме работы // *Оборонная техника*. 2015. № 7. С. 49–63.
6. *Шехтер М.С.* Психологические проблемы узнавания. М.: Просвещение, 1967.
7. *Луизов А.В.* Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
8. *Рубахин В.Ф.* Психологические основы обработки первичной информации. Л.: Наука, 1974.
9. *Восприятие. Механизмы и модели: пер. с англ. / Под ред. Ю. Алексеенко.* М.: Мир, 1974.
10. *Красильников Н.Н.* Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения. М.: Радио и связь, 1986.
11. *Левшин В.Л.* Биокрибернетические оптико-электронные устройства автоматического распознавания изображений. М.: Машиностроение, 1987.
12. *Евсикова Л.Г.* Пороговые контрасты зрительной системы // *Опт.-мех. пром-сть*. 1983. № 9. С. 49–53.

13. Зрительное восприятие изображений. Сер. Обработка оптических изображений: Метод. Пособие // Тр. ГОИ им. С.И. Вавилова. 1990. Вып. 10. 46 с.
14. *Хорев А.А.* Теоретические основы оценки возможностей технических средств разведки: монография. М.: МО РФ, 2000.
15. *Травникова Н.П.* Эффективность визуального поиска. М.: Машиностроение, 1986.
16. *Хорев А.А.* Оценка возможностей визуально-оптической разведки // Специальная техника. 2010. № 6. С. 44–54.
17. *Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л.* Оптимизация движения носителя поисковой воздушной тепловизионной аппаратуры // Оборонная техника. 2014. № 1–2. С. 41–51.
18. *Венцель Е.С.* Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972.
19. *Gerald C. Holst* Electro-Optical Imaging System Performance, Fifth edition. N.Y.: JCD Publishing and SPIE Press, 2008. V. PM187.
20. *Воробьев А.Л., Журик Ю.П., Краснов А.М., Кудимов А.В.* Методика вероятностного анализа процесса наблюдения в цифровых тепловизионных системах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т. 13. № 8. С. 67–81.
21. *Volimer M., Mollman K.* Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. N.Y.: Wiley, 2010.
22. *Алеев Г.М., Иванов В.П., Овсянников В.А.* Несканирующие тепловизионные приборы. Основы теории и расчета. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2004.
23. *Иванов В.П.* Прикладная оптика атмосферы. Казань: Новое знание, 2000.
24. *Кулакова Н.Н., Мишин С.В.* Анализ результатов расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионной системы по двум методикам // Котненант. 2015. Т. 14. № 1. С. 49–53.
25. *Филиппов В.Л.* Учет вариаций “оптической погоды” при обосновании тактико-технических характеристик оптико-электронных систем // Оборонная техника. 2007. № 1–2. С. 13–21.