

# Вероятностная модель поиска и обнаружения наземных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов в условиях нерегулярных воздействий внешней среды

И.Е. Кузнецов<sup>1</sup>, А.А. Кузнецов<sup>1</sup>, И.О. Бакланов<sup>1</sup>, О.В. Страшко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия, 394064

**Аннотация.** Предлагается модель поиска и обнаружения наземных объектов в условиях нерегулярных воздействий внешней среды с использованием беспилотных летательных аппаратов, основанная на вероятностно-стохастическом подходе и позволяющая осуществлять оценку качества выполнения задач разведки с учетом влияния наиболее значимых метеовеличин и явлений погоды.

## 1. Введение

Эффективность и безопасность функционирования беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) в процессе решения задач поиска и обнаружения различного рода объектов существенно зависит от учета нерегулярных воздействий внешней среды. Одним из факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на БпЛА в районе взлета (посадки), на маршруте полета и в зоне выполнения поставленной задачи, являются метеоусловия [1]. На сегодняшний день в процессе планирования и применения БпЛА имеет место противоречие между требованиями лица, принимающего решение, к качеству оценки влияния метеофакторов и возможностями существующего научно-методического аппарата [2]. Уменьшить негативное влияние указанного противоречия предлагается путем построения модели поиска и обнаружения наземных объектов в сложных метеоусловиях с использованием беспилотных летательных аппаратов, основанной на вероятностно-стохастическом подходе и позволяющей осуществлять оценку качества выполнения задач разведки с учетом влияния наиболее значимых метеовеличин и явлений погоды.

## 2. Модель поиска и обнаружения наземных объектов в сложных метеоусловиях с использованием БпЛА

Результативность использования БпЛА для решения задач воздушной разведки можно оценить с использованием показателя – вероятность выполнения поставленной задачи [3]. С учетом метеоусловий эту вероятность можно представить в виде:

$$P_{ВЗР}^{МУ} = P_o^{МУ} \cdot P_{ук}^{МУ} \cdot P_{поо}^{МУ} \cdot P_{инф}, \quad (1)$$

где  $P_o^{МУ}$  – вероятность своевременного появления БпЛА над объектом разведки, позволяющая застать объект в заданном районе, с учетом ожидаемых метеоусловий;  $P_{ук}^{МУ}$  – вероятность

установления контакта с объектом разведки в ожидаемых метеоусловиях;  $P_{\text{поо}}^{\text{му}}$  – вероятность попадания объекта разведки в область обзора аппаратуры целевой нагрузки БПЛА в ожидаемых метеоусловиях;  $P_{\text{инф}}$  – вероятность своевременной доставки информации потребителю.

Если ведение воздушной разведки предполагается осуществлять в нескольких районах, то для расчета вероятности выполнения задачи предлагается использовать выражение вида [4]:

$$P_{\text{взр}}^K = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - P_{\text{взр}j}^{\text{му}}), \quad (2)$$

где  $K$  – количество районов разведки.

Вероятность своевременного появления БПЛА над объектом разведки в сложных метеоусловиях предлагается определять с использованием выражений:

$$P_o^{\text{му}} = \frac{1}{1 + T_{\text{вых}}^{\text{му}} / T_{\text{ож}}}, \quad (3)$$

$$T_{\text{вых}}^{\text{му}} = t_{\text{пост.зад.}} + t_{\text{подг.}} + t_{\text{пол.}} + t_{\text{СМУ}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{вых}}^{\text{му}}$  – время выхода БПЛА в район выполнения задачи с учетом влияния метеоусловий;  $T_{\text{ож}}$  – среднее время пребывания объекта поиска на месте;  $t_{\text{пост.зад.}}$  – время постановки задачи на вылет;  $t_{\text{подг.}}$  – время подготовки БПЛА к вылету;  $t_{\text{пол.}} = \frac{l}{V_{\text{БнЛА}}}$  – время полета БПЛА к району разведки;  $t_{\text{СМУ}}$  – продолжительность воздействия на БПЛА опасных метеофакторов, связанных со сложными метеоусловиями в рассматриваемом районе;  $S_p$  – площадь района разведки;  $l$  – расстояние до района разведки;  $V_{\text{БнЛА}}$  – скорость полета БПЛА.

Вероятность установления контакта с объектом поиска в ожидаемых метеоусловиях ( $P_{\text{ук}}^{\text{му}}$ ) зависит от способа патрулирования БПЛА в районе разведки.

Если траектория движения БПЛА выбирается случайным образом (осуществляется случайный поиск), то вероятность установления контакта с целью  $P_{\text{ук.сл.}}^{\text{му}}$  можно определить с использованием следующих выражений:

$$P_{\text{ук.сл.}}^{\text{му}} = 1 - \exp\left(-\frac{S_{\text{обс}} - S_{\text{СМУ}}}{S_p}\right), \quad (5)$$

$$S_{\text{обс}} = t_{\text{БнЛА}}^{\text{ср}} B V_{\text{БнЛА}}, \quad (6)$$

$$S_{\text{СМУ}} = 0,1 \cdot N_{\text{обл}} \cdot S_p, \quad (7)$$

где  $S_{\text{обс}}$  – площадь района, обследованная с помощью БПЛА;  $S_{\text{СМУ}}$  – площадь района разведки, закрытая зонами со сложными метеоусловиями;  $t_{\text{БнЛА}}^{\text{ср}}$  – среднее время разведки БПЛА в одном районе;  $B$  – ширина полосы обзора аппаратуры целевой нагрузки БПЛА;  $V_{\text{БнЛА}}$  – скорость полета БПЛА;  $N_{\text{обл}}$  – количество облачности, влияющей на применение БПЛА;  $S_p$  – площадь района разведки.

Если порядок разведки задан, то вероятность установления контакта с объектом поиска ( $P_{\text{ук.зад.}}^{\text{му}}$ ) в сложных метеоусловиях предлагается определять с использованием выражения:

$$P_{\text{ук.зад.}}^{\text{му}} = \min\left\{\frac{S_{\text{обс}} - S_{\text{СМУ}}}{S_p}, 1\right\}. \quad (8)$$

Если известно, что объект разведки является подвижным, то для определения вероятности установления контакта с ним ( $P_{\text{ук.подв.}}^{\text{му}}$ ) предлагается использовать выражение:

$$P_{\text{ук.подв.}}^{\text{му}} = \frac{t_{\text{об}}}{t_{\text{БнЛА}}^{\text{ср}}}, \quad (9)$$

где  $t_{об}$  – время пребывания объекта в районе поиска;  $t_{БпЛА}^{cp}$  – среднее время разведки БпЛА в заданном районе.

Для определения вероятности попадания одиночного объекта разведки в область обзора аппаратуры целевой нагрузки БпЛА предлагается использовать выражение [5]:

$$P_{поо} = \frac{S_{обз}}{S_{п}}, \quad (9)$$

где  $S_{обз}$  – площадь обзора аппаратуры целевой нагрузки БпЛА в одном вылете;  $S_{п}$  – полная площадь земной поверхности, на которой выполняется задача по поиску объекта.

Вероятность своевременной доставки информации потребителю с требуемой точностью  $P_{инф}$  будет определяться по формуле [4]:

$$P_{инф} = e^{-vT_{ОДП}}, v = \frac{1}{T_{ож}}, \quad (10)$$

где  $v$  – показатель подвижности объекта,  $T_{ОДП}$  – среднее время обработки и доставки информации потребителю.

Если поиск объекта осуществляет группа БпЛА в составе  $N$  единиц, то вероятность выполнения поставленной задачи группой определяется выражением [6]:

$$P_{ВзР}^{2p} = 1 - \left(1 - P_{ВзР_1}^{my}\right)^N, \quad (11)$$

где  $P_{ВзР_1}^{my}$  – вероятность выполнения поставленной задачи одним БпЛА.

Таким образом, разработанная модель позволяет рассчитать вероятность выполнения задачи поиска и обнаружения наземных объектов с использованием БпЛА в различных поисковых ситуациях в сложных метеоусловиях.

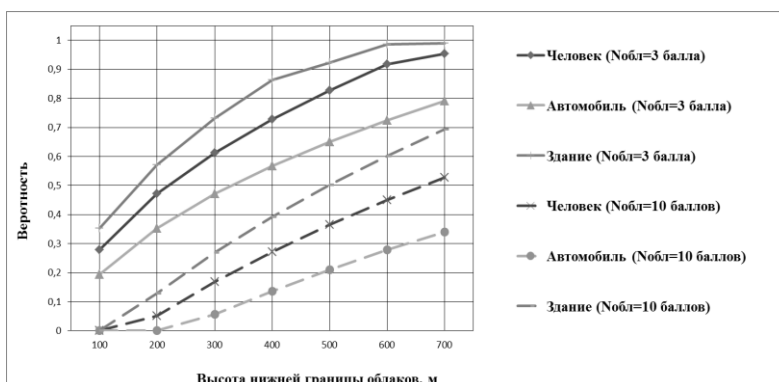
### 3. Оценка эффективности

Для оценки эффективности предлагаемой модели в ходе исследования был проведен численный эксперимент. В качестве исходных данных использовались материалы аэросиноптических наблюдений за период 2008-2018 гг. для территории Краснодарского края. Выбор данной территории был обусловлен физико-географическими особенностями и климатическим разнообразием в распределении погодно-климатических факторов. Кроме этого, в этом районе в последнее время наметился значительный рост опасных метеоусловий, оказывающих доминирующее влияние на эффективность функционирования БпЛА.

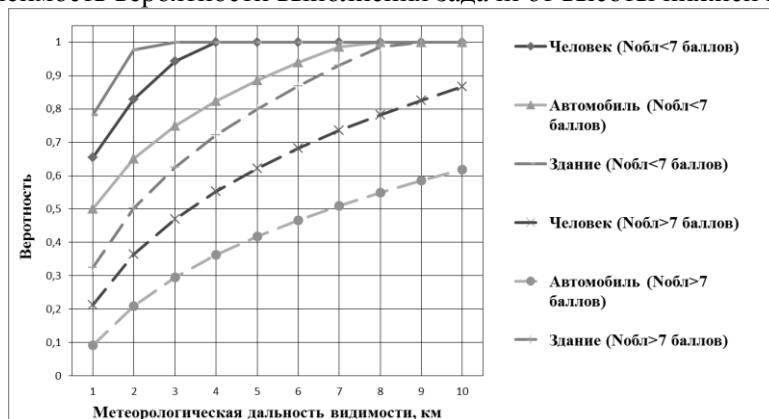
В соответствии с условиями эксперимента, БпЛА необходимо выполнить воздушную разведку в районе  $S_p$  размером  $10 \times 10$  км. В эксперименте рассматривался БпЛА малой дальности. Применение разработанной модели осуществлено для одного из самых сложных случаев видов поисковой ситуации – закономерного поиска в заданном районе, когда район поиска делится на последовательно просматриваемые участки, а БпЛА движется по заранее определенной траектории.

В качестве неподвижного объекта разведки было рассмотрено одиночно стоящее здание. Направление движения подвижных объектов в эксперименте было принято перпендикулярно рубежу поиска, что обеспечивало их наименьшее время нахождения в зоне поиска. Для определения среднего времени пребывания объекта на месте  $T_{ож}$  в эксперименте были рассмотрены: человек со средней скоростью движения 5 км/ч и автомобиль со средней скоростью 80 км/ч. Кроме этого, на время численного эксперимента принято: уровень подготовки операторов БпЛА – отличный; время постановки задачи  $t_{пост.зад.} = 10$  мин; время подготовки БпЛА к старту  $t_{подг.} = 40$  мин; время обработки и доставки информации потребителю  $T_{ОДП} = 15$  мин; полнота и достоверность полученной информации (правильно вскрыто и определено элементов объектов) не менее 90%.

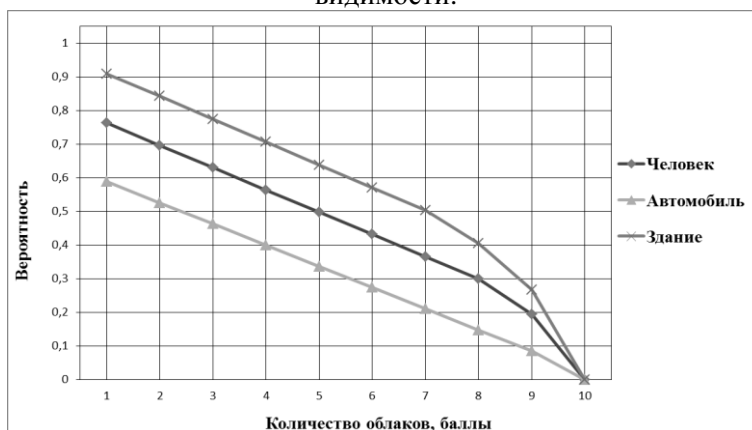
Результаты численного эксперимента представлены на рисунках 1 – 3.



**Рисунок 1.** Зависимость вероятности выполнения задачи от высоты нижней границы облаков.



**Рисунок 2.** Зависимость вероятности выполнения задачи от метеорологической дальности видимости.



**Рисунок 3.** Зависимость вероятности выполнения задачи от количества зон со сложными метеоусловиями.

Таким образом, в ходе исследования была построена математическая модель, позволяющая количественно оценить вероятность выполнения задачи поиска и обнаружения наземных объектов в сложных метеоусловиях с использованием беспилотных летательных аппаратов на основе данных фактических и прогностических метеоусловий.

#### 4. Заключение

Проведенное формализованное описание процесса моделирования позволяет количественно оценить эффективность применения БПЛА в сложных метеоусловиях для целей разведки. Вероятность выполнения поставленной задачи представляет собой численную величину, которая отражает цели функционирования БПЛА при ведении воздушной разведки и степень выполнения возложенных на БПЛА задач.

Результаты численного эксперимента свидетельствуют о том, что применение разработанной вероятностной модели для оценки возможности выполнения поставленной задачи способствует увеличению эффективности применения БпЛА для территории Краснодарского края в среднем на 32 – 34% путем учета ожидаемых метеоусловий, в то время как применение традиционных подходов, учитывающих их опосредованно, для рассмотренной территории составляет 26 – 28%. Это говорит о возможности использования предлагаемой модели в оперативной практике применения БпЛА в сложных метеоусловиях.

## 5. Литература

- [1] Кузнецов, И.Е. Методика учета влияния метеофакторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа / И.Е. Кузнецов, О.В. Страшко, А.В. Мельников, Е.А. Рогозин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2018. – Т. 45, № 2. – С. 134-149.
- [2] Страшко, О. В. Структурно-логическая модель метеообеспечения беспилотных летательных аппаратов при ограниченной метеоинформации / О.В. Страшко, И.Е. Кузнецов, Г.И. Мазуров, Д.А. Гуськов // Естественные и технические науки: сборник статей. – 2018. – Т. 12, № 126. – С. 201-207.
- [3] Моисеев, В.С. Основы теории создания и применения информационных беспилотных авиационных комплексов (Серия «Современная прикладная математика и информатика») / В.С. Моисеев, Д.С. Гущина, Г.В. Моисеев – Казань: Изд-во МОиН РТ, 2010. – 196 с.
- [4] Болховитинов, О.В. Боевые авиационные комплексы и их эффективность – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.
- [5] Ростопчин, В.В. Применение цифровых оптических систем для беспилотных летательных аппаратов / В.В. Ростопчин, М.Л. Дмитриев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.avia.ru/author/a39.shtml](http://www.avia.ru/author/a39.shtml).
- [6] Волгин, Н.С. Исследование операций. Часть 1: учебное пособие – СПб.: Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского союза Н.Г. Кузнецова, 1999. – 366 с.

## The stochastic model of search and detection of ground objects using unmanned aerial vehicles under conditions of irregular influence of the environment

I.E. Kuznetsov<sup>1</sup>, A.A. Kuznetsov<sup>1</sup>, I.O. Baklanov<sup>1</sup>, O.V. Strashko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy, Starykh Bolshevikov str. 54A, Voronezh, Russia, 394064

**Abstract.** The paper proposes the model of search and detection of ground objects under the conditions of irregular influence of the environment with the use of unmanned aerial vehicles. The model is based on the probabilistic-stochastic approach and allows to assess the quality of reconnaissance missions taking into account the influence of the most significant meteorological values and weather phenomena.