

Труды МАИ. 2022. № 122
Trudy MAI, 2022, no. 122

Научная статья
УДК 303.732: [629.73+355.404; 355.46]
DOI: [10.34759/trd-2022-122-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-16)

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЦЕНАРИЕВ ВЕДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ ИНТЕГРИРОВАННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННО- РАСПРЕДЕЛЕННЫМ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫМ АВИАЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Александр Владиславович Ананьев^{1✉},

Кирилл Сергеевич Иванников²

¹ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Воронеж, Россия

²Научно-производственное предприятие «Радар ммс»,

Санкт-Петербург, Россия

sasha303_75@mail.ru[✉]

Аннотация. Важное значение для обеспечения безопасности государства имеет применение пилотируемых комплексов воздушного мониторинга (разведки) в интересах оперативного принятия стратегических решений. Однако, применение таких комплексов зачастую осуществляется в экстремальных условиях, обусловленных климатическими (сложными метеорологическими) условиями, разрушающими воздействиями техногенных катастроф, опасностью применения средств противовоздушной обороны незаконными вооруженными формированиями,

условиями ведения боевых действий и т.д.

В связи с этим, в статье предложен интегрированный пространственно-распределенный разведывательный авиационный комплекс, который в отличие от известных, включает в свой состав беспилотные летательные аппараты, состоящие под управлением бортовых операторов, находящихся непосредственно на пилотируемом авиационном комплексе ведения и управления разведкой (воздушным мониторингом).

Порядок применения такого комплекса рассмотрен для наиболее сложного случая: ведения воздушной разведки в условиях боевых действий при вскрытии наземной обстановки в два этапа. На первом этапе, при условии возможности радиоприема сигналов, например, радиосигнала бедствия, радиосигналов объектов разведки и т.д., ведется пассивная радио и радиотехническая разведка с использованием технических возможностей бортовых датчиков пилотируемого воздушного судна. На втором этапе осуществляется доразведка и разведка объектов интереса с использованием оптикоэлектронных и других средств, размещенных на беспилотниках.

Предлагая модернизацию элемента системы воздушной разведки (мониторинга) и, основываясь на системном подходе, важно понимать, как повлияет предложенное решение на вышестоящую систему – исполнительную, в частном случае – ударную. Для этого была разработана динамическая модель процесса разведывательно-ударных действий, представляющая собой граф состояний, с указанием временных и вероятностных параметров. В статье показано решение

системы уравнений, составленных на основе графа состояний в виде временных зависимостей вероятностей состояний.

Предложенная модель обладает значительной общностью и может быть распространена на широкий спектр задач воздушного мониторинга в экстремальных условиях.

Ключевые слова: интегрированный разведывательный авиационный комплекс, группы беспилотных летательных аппаратов, марковский случайный процесс

Для цитирования: Ананьев А.В., Иванников К.С. Динамическая модель оценки эффективности сценариев ведения воздушной разведки интегрированным пространственно-распределенным разведывательным авиационным комплексом // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-16)

A DYNAMIC MODEL FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF SCENARIOS FOR CONDUCTING AERIAL RECONNAISSANCE BY AN INTEGRATED SPATIALLY DISTRIBUTED RECONNAISSANCE AVIATION COMPLEX

Alexander V. Anan'ev¹, **Kirill S. Ivannikov²**

¹MESC Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin»,

Voronezh, Russia

²Joint-stock company «Scientific and production enterprise «Radar-mms»,

Saint Petersburg, Russia

¹sasha303_75@mail.ru

Abstract. Aerial monitoring (reconnaissance) piloted complexes application in the interest of operational strategic decision-making is of great importance for the State security ensuring. However, such complexes employing is often performed in extreme conditions stipulated by climatic (severe meteorological) conditions, the destructive effects of man-made disasters, the danger of air defense means employing by unlawful armed formations, conditions of armed hostilities waging, etc.

In this regard, the article proposes an integrated spatially distributed reconnaissance aviation complex, which, unlike the known ones, includes unmanned aerial vehicles, controlled by the onboard operators situated directly on the manned aircraft for waging and controlling reconnaissance (by air monitoring).

Application procedure of such complex has been considered for the most difficult case, namely aerial reconnaissance waging under conditions of armed hostilities while the ground situation disclosure two stages. At the first stage, under condition of radio signals receiving possibility, such as radio dis-tress signal, radio signals of the survey targets etc., passive radio and radio-technical reconnaissance is being waged with the technical capabilities of the piloted aircraft onboard sensors. At the second stage, supplementary reconnaissance and reconnaissance of the objects of interest is being performed by the optoelectronic and other means positioned on the unmanned aerial vehicles.

When proposing modernization of the aerial reconnaissance (monitoring) and basing on the system approach, it is important to apprehend how the solution being proposed will affect the system of a higher rank, namely executive, or, in a particular case, striking. For this, a dynamic model of the reconnaissance-strike actions process was developed. It

represents a state graph with time and probabilistic parameters indication. The article shows the equations system solution based on the states graph in the form states probabilities time dependences. The article demonstrates the solution of the system of equations, which are formed on the basis of the state graph in the form of time dependencies of the probability states.

The proposed model wields significant commonality and may be propagated on the wide spectrum.

Keywords: integrated reconnaissance aviation complex, unmanned aerial vehicles groups, Markov random process

For citation: Anan'ev A.V., Ivannikov K.S. A dynamic model for assessing the effectiveness of scenarios for conducting aerial reconnaissance by an integrated spatially distributed reconnaissance aviation complex. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-16)

Мировая практика [1, 2] свидетельствует о наращивании передовыми государствами потенциала воздушной разведки. Важность воздушной разведки (воздушного мониторинга) обусловлена необходимостью обеспечения безопасности государства за счет применения пилотируемых комплексов воздушной разведки в интересах оперативного принятия стратегических решений. Однако, такие комплексы очень уязвимы к разрушающим воздействиям сопутствующим экстремальным условиям ведения воздушной разведки.

Альтернативными средствами для ведения воздушной разведки являются

беспилотные летательные аппараты (БпЛА), повышения эффективности применения которых достигают за счет объединения в группы [3-5]. Однако в настоящее время и в перспективе пилотируемые комплексы, в том числе воздушного мониторинга (разведки) не целесообразно полностью заменять на БпЛА по ряду причин. Во-первых, несмотря на технологический прогресс, обеспечивающий повышение возможностей бортовой обработки данных и приближающееся время сильного интеллекта, необходимо сохранить супервизорное управление робототехническими системами, что будет эффективнее при нахождении человека в воздухе. Во-вторых, существует целый ряд физически непреодолимых причин, в том числе ограниченность радиочастотного спектра каналов телеметрии и управления полезными нагрузками БпЛА, рациональность применения в экстремальных условиях малоразмерных дешевых БпЛА, обладающих низкими летно-техническими характеристиками и т.д.

В связи с изложенным, авторами статьи предлагается интегрированный пространственно-распределенный разведывательный авиационный комплекс (далее – ИПРРАК), который в отличие от известных, включает в свой состав беспилотные летательные аппараты, состоящие под управлением бортовых операторов, находящихся непосредственно на пилотируемом авиационном комплексе ведения и управления разведкой, при этом предусмотрен информационный обмен с исполнительными системами.

Порядок работы такого комплекса при вскрытии наземной обстановки предлагается осуществлять в два этапа. На первом этапе, при условии возможности

радиоприема сигналов, например, радиосигнала бедствия, радиосигналов объектов разведки и т.д., ведется пассивная радио и радиотехническая разведка с использованием технических возможностей бортовых датчиков пилотируемого воздушного судна. На втором этапе осуществляется доразведка и разведка объектов интереса с использованием оптикоэлектронных и других средств, размещенных на беспилотниках.

Объективную оценку эффективности функционирования ИПРРАК с позиций системного подхода необходимо производить понимая функциональное назначение надсистемы. Надсистемой ИПРРАК является комплекс, в интересах которого он функционирует. В качестве надсистемы ИПРРАК могут выступать системы мониторинга чрезвычайных ситуаций, мониторинга и управления сложными инженерными системами, системы обеспечения поисково-спасательных работ, разведывательно-ударные системы специального назначения и др.

В известных источниках, которые могут быть использованы для оценки ИПРРАК рассмотрены следующие вопросы. Прежде всего, уделено внимание планированию, оптимизации и рациональному управлению полета БпЛА [3, 4, 6, 8-10], вопросы эффективности и конфигурации систем управления [11, 12] и обособленно комплексы воздушного мониторинга [1, 2].

Анализируя приведенные источники, можно резюмировать, что для оценки эффективности ИПРРАК нет стройного изложения порядка ведения воздушного мониторинга (разведывательных действий), на основании которого можно обоснованно составить математическую модель учитывающую динамику проведения

отдельных этапов воздушной разведки в экстремальных условиях и позволяющую найти аналитическое или численное решение по поиску заданной вероятности вскрытия обстановки для последующего исполнительного действия.

Разработка динамической модели

Рассмотрим наиболее сложный случай – ведение воздушной разведки в условиях процесса ведения боевых действий, как наиболее динамичного и весьма непредсказуемого. Именно это позволяет сделать заключение о том, что для математического моделирования процесса осуществления цикла боевых действий, в том числе и при разведке, в динамике ее развития целесообразно применять математический аппарат марковских случайных процессов с непрерывным временем [13, 14].

Для моделирования разведывательных (поисковых) действий на основе теории марковских процессов, необходимо обосновать условие того, чтобы переходы случайного процесса, описывающего этапы разведывательных (поисковых) действий из каждого транзитивного состояния в другие состояния, происходили вследствие некоторого потока событий с интенсивностью λ , различного для каждого состояния, который связан со средним временем T пребывания случайным процессом в предыдущем состоянии перед переходом в последующее состояние, которые являются обратными величинами: $\lambda=1/T$. Поток событий, приводящий к смене состояний должен быть потоком Пуассона [15].

Согласно работе [15], пуассоновские и близкие к ним по структуре потоки событий встречаются в ходе ведения боевых действий наиболее часто. Это связано с

тем, что при моделировании процессов ведения боевых действий, чаще всего идет наложение (суммирование) потоков событий различной природы или их случайное разрежение, при этом события, составляющие эти потоки, являются независимыми. Это позволяет обоснованно использовать марковские процессы с дискретным состоянием и непрерывным временем для динамического описания процесса боевых действий, и, в частности, для разведывательно-ударных действий [15-17].

Кроме этого, для простоты условимся считать, что интенсивности переходных потоков событий λ_{ij} , где i – номер состояния, из которого осуществляется переход, а j – номер состояния, в который осуществляется переход, являются стационарными. Если же нужно рассматривать нестационарный поток Пуассона с интенсивностью $\lambda_i(t)$, то на временном интервале проведения военной разведывательной операции от t_1 до t_2 , можно использовать среднюю интенсивность для этого временного интервала:

$$\lambda_{ij} = \int_{t_1}^{t_2} t \cdot \lambda_{ij}(t) dt.$$

Перечисленные аргументы дают основания использовать случайные марковские процессы с дискретным состоянием и непрерывным временем для моделирования данной задачи.

Для этих целей опишем процесс проведения боевой операции. Он включает в себя несколько стадий:

а) пилотируемый авиационный комплекс из состава ИППРАК в зоне дежурства выполняет разведывательный полет;

б) БпЛА-р в зоне доразведки;

в) разведывательно-ударные БпЛА средней дальности выполняют

демонстративные действия, обеспечивая включение РЛС ПВО противника;

г) ударные многофункциональные авиационные комплексы (МАК) находятся в положении дежурства «на земле»;

д) поставленная задача была выполнена за определенное время, либо поставленная задача не выполнена из-за ее срыва на некотором этапе.

При математическом моделировании задачи осуществления разведки, необходимо учитывать следующие допущения.

1. Процесс математической формализации разведки и уничтожения противника является марковским, то есть его переходы между состояниями основаны на потоках событий без последствий и могут быть описаны как потоки Пуассона.

2. В случае присутствия объекта разведки в зоне радиотехнической разведки (РТР) его вскрытие средствами пилотируемого авиационного комплекса и состава ИППРАК однозначно наступает по результатам пролета полосы разведки;

3. Вероятность распознавания при повторных циклах доразведки БПЛА с датчиком i -го типа ($i=1, 2, 3$) остается неизменной;

4. Срыв доразведки с использованием БПЛА приводит к срыву выполнения задачи.

На основе данных допущений и исходя из смены проведения операции, можно составить следующий граф состояний случайного процесса ведения разведывательной операции, который изображен на рис. 1.

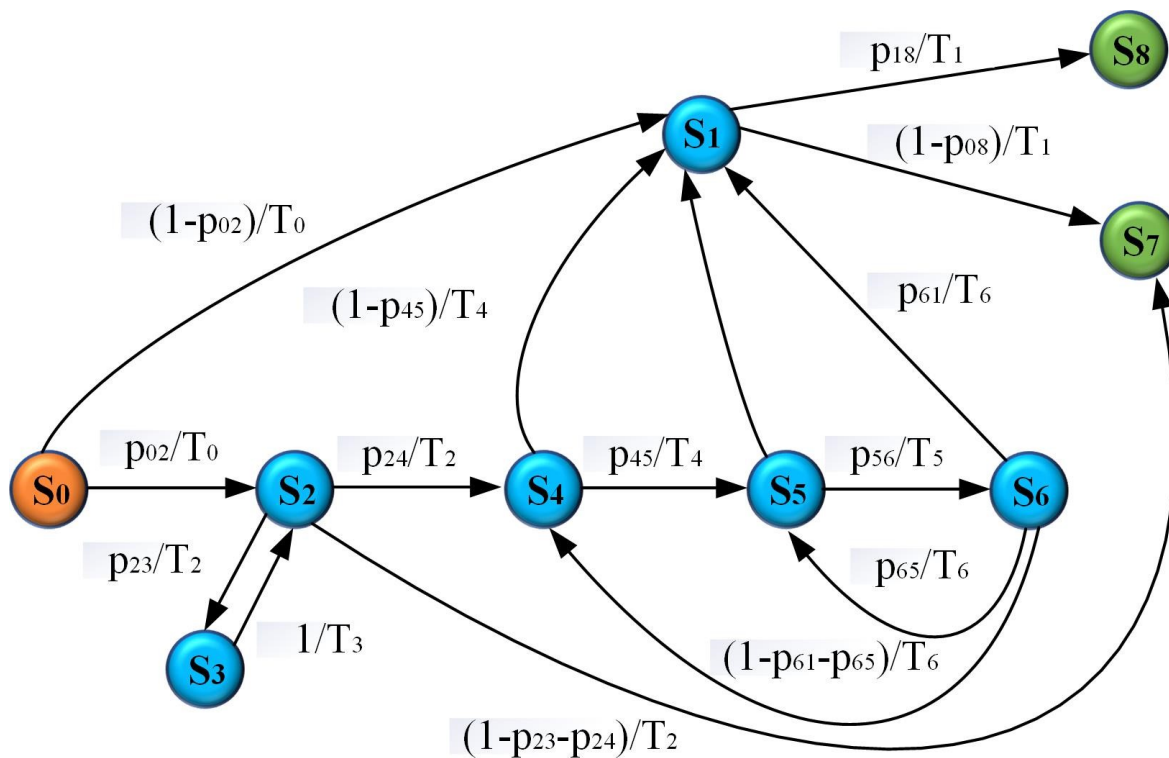


Рисунок 1 – Граф состояний случайного процесса

Приведем пояснения к графу состояний, изображенному на рис. 1. В соответствии и планом осуществления разведывательной операции, случайный процесс, его описывающий имеет следующие состояния:

S_0 – начальное состояние модели, в котором пилотируемый авиационный комплекс из состава ИППРАК, находясь в зоне дежурства в воздухе (ЗДВ), выполняет разведывательный полет с использованием средств РТР с максимальным временем обнаружения объекта, среднее время нахождения в этом состоянии составляет $T_0=30$ мин;

S_1 – объект вскрыт средствами РТР пилотируемого авиационного комплекса из состава ИППРАК при этом вероятность распознавания и точность определения координат не менее заданных (т.е. достаточна для эффективного применения АСП

экипажами МАК), принимается решение на поражение вскрытого объекта, осуществляется взлет ударных МАК и полет на рубеж ввода в бой в течение среднего времени $T_1=15$ мин;

S_2 – объект вскрыт средствами РТР пилотируемого авиационного комплекса из состава ИППРАК при этом вероятность распознавания и точность определения координат менее заданных (т.е. недостаточна для эффективного применения АСП экипажами МАК), принимается решение на доразведку вскрытого объекта с использованием БПЛА разведывательного типа (БПЛА_р), выполняется формирование и передача автоматизированного целеуказания (АЦУ) расчетам БПЛА_р, полет группы БПЛА_р в указанный квадрат в течении времени $T_2=10$ мин;

S_3 – принятие решение на повторный цикл доразведки группой БПЛА (повторный облет группой) $T_3=10$ мин;

S_4 – над объектом доразведки выполняется пролет, получение и обработка данных с датчика БПЛА_р 1-го типа в течение времени $T_4=3$ мин;

S_5 – над объектом доразведки выполняется пролет, получение и обработка данных с датчика БПЛА_р 2-го типа в течение времени $T_5=3$ мин;

S_6 – над объектом доразведки выполняется пролет, получение и обработка данных с датчика БПЛА_р 3-го типа в течение времени $T_6=3$ мин;

S_7 – срыв авиаудара, невыполнение боевой задачи;

S_8 – конечное состояние модели, которому соответствует нанесение авиаудара по объекту разведки, с последующим контролем результатов, выполнение боевой задачи.

Вероятности переходов между состояний, которые приведены на графе, определяются исходя из опыта проведения подобных операций, а также на основании экспертного оценивания, их можно определить следующим образом: $p_{02}=0,6$; $p_{18}=0,95$; $p_{23}=0,05$; $p_{24}=0,9$; $p_{45}=0,4$; $p_{56}=0,3$; $p_{61}=0,8$; $p_{65}=0,1$.

Для получения вероятностных показателей случайного процесса в их динамической интерпретации, необходимо вычислить временные зависимости вероятностей каждого состояния: $P_i(t)$, $i = 0, 1, \dots, 8$, которые имеют смысл вероятность того, что в момент времени t случайный процесс будет находиться в состоянии S_i . Исходными данными для такого расчета будет служить матрица интенсивностей переходных потоков λ_{ij} , $i=0, 1, \dots, 8$; $j=0, 1, \dots, 8$, которая приведена в таблице 1, а также условие того, что в начальный момент времени случайный процесс находился в состоянии S_0 .

Таблица 1 – Матрица интенсивностей переходных потоков случайного процесса

Состояния	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
S_0	0	$(1-p_{02})/T_0$	p_{02}/T_0	0	0	0	0	0	0
S_1	0	0	0	0	0	0	0	$(1-p_{18})/T_1$	p_{18}/T_1
S_2		0	0	p_{23}/T_2	p_{24}/T_2		0	$(1-p_{23}-p_{24})/T_2$	0
S_3			$1/T_3$	0	0		0	0	0
S_4	0	$(1-p_{45})/T_4$			0	p_{45}/T_4	0	0	0

S ₅	(1-p ₅₆)/T ₅			0	0	0	p ₅₆ /T ₅		
S ₆	p ₆₁ /T ₆	0	0	0	(1-p ₆₁ - p ₆₅)/T ₆	p ₆₅ /T ₆	0	0	0
S ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S ₈	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Численное решение системы уравнений на основе графа состояний

На основании матрицы интенсивностей переходных потоков из таблицы 1, составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова [13] вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\frac{P_0(t)}{T_0}; \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{(1-p_{02})P_0(t)}{T_0} + \frac{(1-p_{45})P_4(t)}{T_4} + \frac{(1-p_{56})P_5(t)}{T_5} + \frac{p_{61}P_6(t)}{T_6} - \frac{P_1(t)}{T_1}; \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{p_{02}P_0(t)}{T_0} + \frac{P_3(t)}{T_3} - \frac{P_2(t)}{T_2}; \quad \frac{dP_3(t)}{dt} = \frac{p_{23}P_2(t)}{T_2} - \frac{P_3(t)}{T_3}; \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \frac{p_{24}P_2(t)}{T_2} + \frac{(1-p_{61}-p_{65})P_6(t)}{T_6} - \frac{P_4(t)}{T_4}; \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \frac{p_{45}P_4(t)}{T_4} + \frac{p_{65}P_6(t)}{T_6} - \frac{P_5(t)}{T_5}; \quad \frac{dP_6(t)}{dt} = \frac{p_{56}P_5(t)}{T_5} - \frac{P_6(t)}{T_6}; \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \frac{(1-p_{23}-p_{24})P_2(t)}{T_2} + \frac{(1-p_{18})P_1(t)}{T_1}; \quad \frac{dP_8(t)}{dt} = \frac{p_{18}P_1(t)}{T_1}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Система дифференциальных уравнений (1) является однородной и вырожденной [13], поэтому из нее можно удалить одно (любое) уравнение, заменив

его условием нормировки: $\sum_{i=0}^8 P_i(t) = 1$. Сделаем это со вторым уравнением, получив

невырожденную систему дифференциальных уравнений Колмогорова вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\frac{P_0(t)}{T_0}; \quad \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{p_{02}P_0(t)}{T_0} + \frac{P_3(t)}{T_3} - \frac{P_2(t)}{T_2}; \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \frac{p_{23}P_2(t)}{T_2} - \frac{P_3(t)}{T_3}; \quad \frac{dP_4(t)}{dt} = \frac{p_{24}P_2(t)}{T_2} + \frac{(1-p_{61}-p_{65})P_6(t)}{T_6} - \frac{P_4(t)}{T_4}; \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \frac{p_{45}P_4(t)}{T_4} + \frac{p_{65}P_6(t)}{T_6} - \frac{P_5(t)}{T_5}; \quad \frac{dP_6(t)}{dt} = \frac{p_{56}P_5(t)}{T_5} - \frac{P_6(t)}{T_6}; \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \frac{(1-p_{23}-p_{24})P_2(t)}{T_2} + \frac{(1-p_{18})P_1(t)}{T_1}; \quad \frac{dP_8(t)}{dt} = \frac{p_{18}P_1(t)}{T_1}; \quad \sum_{i=0}^8 P_i(t) = 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

Система (2) дополняется начальными условиями, заключающимися в том, что в начальный момент времени система находилась в состоянии S_0 :

$$P_0(0) = 1; P_i(0) = 0; i = 1, 2, \dots, 8. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) представляют собой систему линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [18], которую можно решать методом собственных значений и собственных векторов [19], либо численными методами. Учитывая большое число уравнений, рационально использовать численные методы, а именно, методы решения систем дифференциальных уравнений Адамса – Башфорта, а если система уравнений окажется жесткой, лучше использовать метод BDF, использующий формулы обратного дифференцирования [19]. Систему (2) с ограничениями (3) удалось решить методом Адамса – Башфорта с использованием пакетов математического моделирования.

Приведем результаты численного решения (2) и (3) в виде временных зависимостей вероятностей состояний. Такие зависимости представлены на рис. 2-4. Временные интервалы были взяты до 120 минут.

На рис. 2 приведены вероятности трех ключевых состояний: S_8 , соответствующему успешному выполнению поставленной задачи, S_7 , которое соответствует противоположному событию – срыву задачи, и S_1 , промежуточное состояние, которое позволяет не проводить доразведку и оперативно решить поставленную задачу.

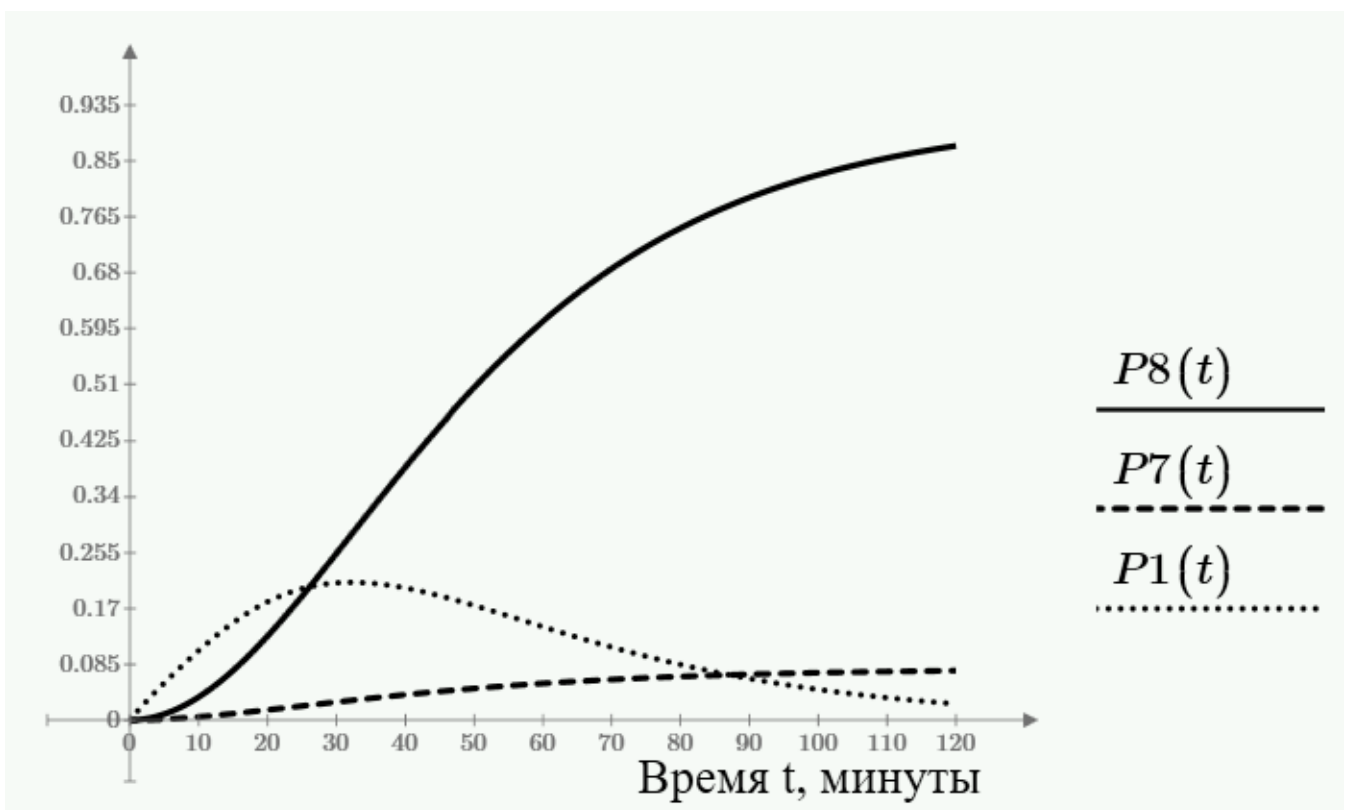


Рисунок 2. Вероятностные зависимости от времени состояний S_8 , S_7 и S_1

Также интересны состояния случайного процесса, которые соответствуют именно состояниям проведения доразведки. Эти состояния промежуточные, но они

способствуют достижения поставленной цели. Вероятности состояний S_4 , S_5 и S_6 , которые динамически меняются по времени, приведены на рис. 3.

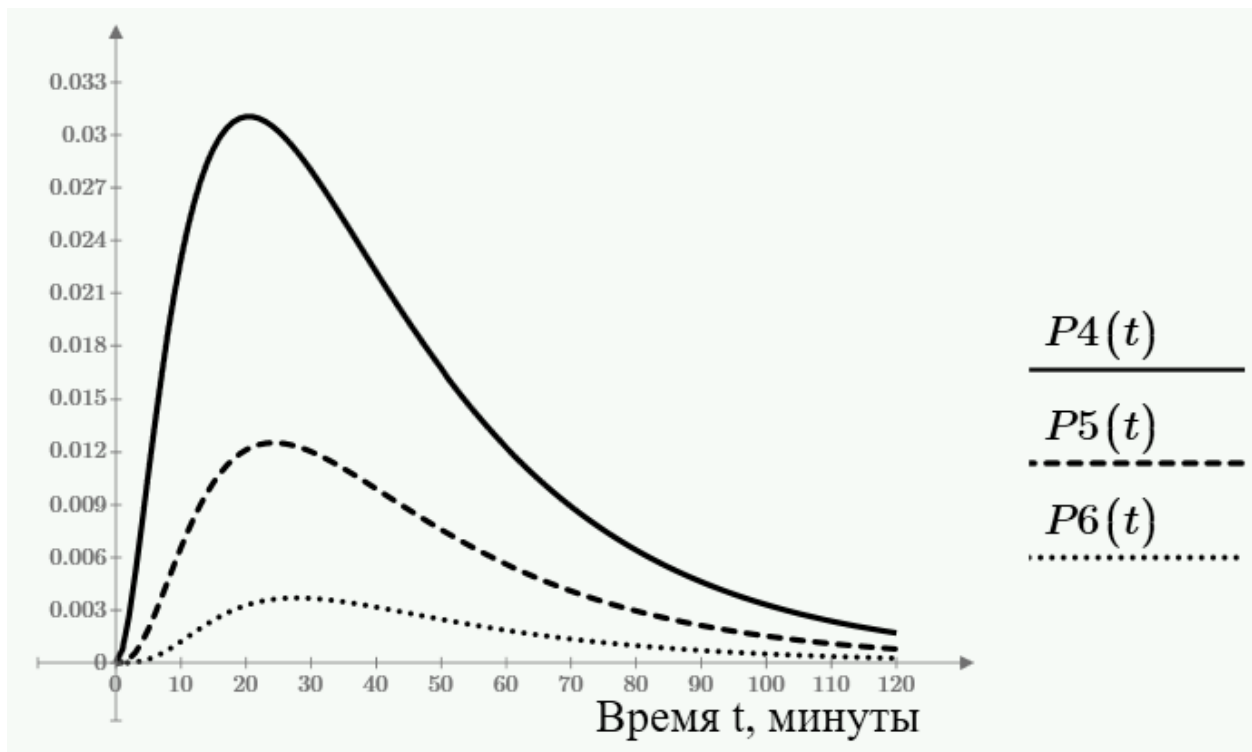


Рисунок 3 – Вероятностные зависимости от времени состояний S_4 , S_5 и S_6

Кроме этого, данная модель позволит оценить вероятности начальных состояний случайного процесса: S_0 , S_2 и S_3 . Приведем график вероятностных зависимостей этих состояний, однако, ограничим время по оси абсцисс до 60 минут, учитывая то, что данные состояния случайного процесса являются начальными. Этот график приведен на рис. 4.

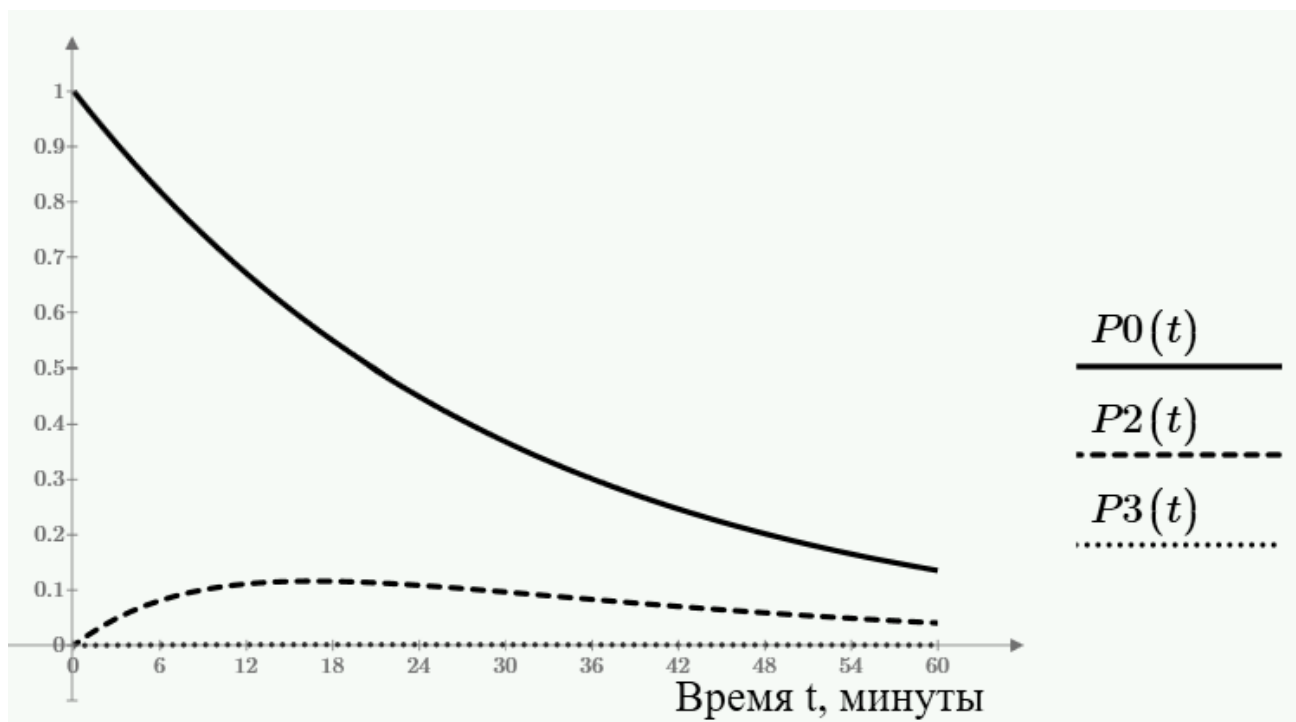


Рисунок 4 – Вероятностные зависимости от времени состояний S_0 , S_2 и S_3

Из графиков рис. 4 видно, что данные вероятности быстро стремятся к нулю, что подтверждает адекватность вероятностных оценок, полученных по модели, основанной на марковских случайных процессах. При этом, вероятность состояния S_3 оказывается близкой к нулевой, что соответствует концепции математической модели.

Выводы

В статье разработан полноценный граф состояний, с указанием временных и вероятностных параметров с использованием которого получены временные зависимости вероятностей состояний, то есть разработана полноценная динамическая модель, позволяющая оценить эффективность разведывательной (поисковой) системы с позиций надсистемы: ударных средств (поисково-спасательных средств).

Описанная математическая модель позволяет рассчитать финальные вероятности основных состояний системы для типового сценария. Так, например, если авиационный удар, исключающего приближение на допустимое расстояние противника, потребует не более полутора часов, то согласно зависимостям на рис. 2 такое событие произойдет с вероятностью порядка 0,75.

Предложенная модель обладает значимой общностью и может быть, например, распространена на прибытие поисково-спасательных команд к терпящим бедствие на море людям. При этом время действий, как вариант, может быть ограничено временем выживания людей в зависимости от температуры воды.

Возможно также дальнейшее развитие математической модели, которое заключается во введении дополнительных промежуточных состояний или снятии принятых ограничений, в том числе повышении гибкости РТР и учета динамики изменения вероятности в комплексировании.

Разработанная модель обладает практической значимостью, так временные интервалы могут быть рассчитаны с учетом территориальной привязки к районам ведения воздушного мониторинга.

Список источников

1. Афонин И.Е., Макаренко С.И., Петров С.В. Описательная модель комплексов разведки, используемых для вскрытия системы воздушно-космической обороны и целеуказания при нанесении удара средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 190-214. DOI:

[10.24411/2410-9916-2021-10108](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2021-10108)

2. Белов С.Г., Крайлюк А.Д., Меркулов В.И., Чернов В.С. Информационные системы пилотируемых комплексов стратегической воздушной разведки США // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 8. С. 46-59. DOI: [10.18127/j20700784-201908-04](https://doi.org/10.18127/j20700784-201908-04)

3. Гончаренко В.И., Желтов С.Ю., Князь В.А., Лебедев Г.Н., Михайлин Д.А., Царева О.Ю. Интеллектуальная система планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов при наблюдении наземных мобильных объектов на заданной территории // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2021. № 3. С. 39-56. DOI: [10.31857/S0002338821030057](https://doi.org/10.31857/S0002338821030057)

4. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами: В 2-х кн. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА: Монография. - М.: Радиотехника, 2016. Кн. 1. - 512 с.

5. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35507>

6. Ивашова Н.Д., Михайлин Д.А., Чернякова М.Е., Шаныгин С.В. Нейросетевое решение задачи оперативного планирования маршрутного полета беспилотных летательных аппаратов и назначение времени наблюдения наземных объектов с помощью нечеткой логики при отображении этих результатов на экране компьютера до вылета // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102223>

7. Лебедев Г.Н., Мирзоян Л.А., Ефимов А.В. Выбор многоальтернативных маршрутов полета беспилотного летательного аппарата при наблюдении трассы и наземных точечных объектов на этапе планирования полета // Труды МАИ. 2011. № 48. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=27150>
8. Лебедев Г.Н., Румакина А.В. Система логического управления обхода препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=61905>
9. Верба В.С., Меркулов В.И., Михеев В.А. Оптимизация группового управления беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. (Москва, 17-20 июня 2019): сборник трудов. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 279-284. DOI: [10.25728/vspu.2019.0279](https://doi.org/10.25728/vspu.2019.0279)
10. Иванов Д.Я. Формирование строя группой беспилотных летательных аппаратов при решении задач мониторинга // Известия ЮФУ. Серия: Технические науки. 2012. № 4 (129). С. 219-224.
11. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение // Известия ЮФУ. Серия: Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 29–44.
12. Мельник Э.В., Клименко А.Б., Иванов Д.Я. Модель задачи распределения вычислительной нагрузки для информационно-управляющих систем на базе концепции туманных вычислений // Известия Тульского государственного

университета. Серия: Технические науки. 2018. № 2. С. 174-187.

13. Вентцель Е.С. Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 1998. - 354 с.

14. Маталыцкий М.А. Элементы теории случайных процессов. – Гродно: ГрГУ, 2004. - 326 с.

15. Алексеев О.Г., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Марковские модели боя. – М.: МО СССР, 1985. – 85 с.

16. Козлитин С.Н., Козирацкий Ю.Л., Будников С.А. Моделирование совместного применения средств радиоэлектронной борьбы и огневого поражения в интересах повышения эффективности борьбы за превосходство в управлении // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 49-73.

17. Ананьев А.В., Рыбалко А.Г., Иванников К.С., Клевцов Р.П. Динамическая модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса // Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119975>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-18](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-18)

18. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. - М.: МЦНМО, 2012. – 344 с.

19. Агафонов С.А. Дифференциальные уравнения. – М.: МГТУ, 2011. – 347 с.

20. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 2006. – 631 с.

References

1. Afonin I.E., Makarenko S.I., Petrov S.V. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2021, no. 1, pp. 190-214. DOI: [10.24411/2410-9916-2021-10108](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2021-10108)
2. Belov S.G., Krailyuk A.D., Merkulov V.I., Chernov V.S. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2019, no. 8, pp. 46-59. DOI: [10.18127/j20700784-201908-04](https://doi.org/10.18127/j20700784-201908-04)
3. Goncharenko V.I., Zheltov S.Yu., Knyaz' V.A., Lebedev G.N., Mikhailin D.A., Tsareva O.Yu. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2021, no. 3, pp. 39-56. DOI: [10.31857/S0002338821030057](https://doi.org/10.31857/S0002338821030057)
4. Verba V.S., Tatarskii B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami: V 2-kh kn. Printsipy postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA* (Unmanned aerial systems. Principles of development and of application specifics of complexes with UAV), Moscow, Radiotekhnika, 2016, vol. 1, 512 p.
5. Kim N.V., Krylov I.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 62. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35507>
6. Ivashova N.D., Mikhailin D.A., Chernyakova M.E., Shanygin S.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102223>
7. Lebedev G.N., Mirzoyan L.A., Efimov A.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 48, URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=27150>
8. Lebedev G.N., Rumakina A.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=61905>

9. Verba V.S., Merkulov V.I., Mikheev V.A. *XIII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019*, Moscow, Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2019, pp. 279-284. DOI: [10.25728/vspu.2019.0279](https://doi.org/10.25728/vspu.2019.0279)
10. Ivanov D.Ya. *Izvestiya YuFU. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 4 (129), pp. 219-224.
11. Evdokimenkov V.N., Krasil'shchikov M.N., Sebryakov G.G. *Izvestiya YuFU. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 1 (174), pp. 29–44.
12. Mel'nik E.V., Klimenko A.B., Ivanov D.Ya. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 2, pp. 174-187.
13. Venttsel' E.S. Ovcharov L.A. *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* (Random process theory and its engineering applications), Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 354 p.
14. Matalytskii M.A. *Elementy teorii sluchainykh protsessov* (Elements of Random Process Theory), Grodno, GrGU, 2004, 326 p.
15. Alekseev O.G., Anisimov V.G., Anisimov E.G. *Markovskie modeli boya* (Markov combat models), Moscow, Voenizdat, 1985, 85 p.
16. Kozlitin S.N., Koziratskii Yu.L., Budnikov S.A. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2020, no. 1, pp. 49-73.
17. Anan'ev A.V., Rybalko A.G., Ivannikov K.S., Klevtsov R.P. *Trudy MAI*, 2020, no. 115. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119975>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-18](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-18)
18. Arnol'd V.I. *Obyknovennye differentsial'nye uravneniya* (Ordinary differential equations), Moscow, MTsNMO, 2012, 344. p.

19. Agafonov S.A. *Differentsial'nye uravneniya* (Differential equations), Moscow, MGTU, 2011, 347 p.

20. Bakhvalov N.S. *Chislennyye metody* (Numerical Methods), Moscow, Nauka, 2006, 347 p.

Статья поступила в редакцию 13.01.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2022; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 13.01.2022; approved after reviewing on 31.01.2022; accepted for publication on 21.02.2022.