

УДК 621.96

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ БЕСПИЛОТНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В.В. Михайлов, А.В. Самсонов

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье рассматриваются вопросы эффективности применения беспилотных летательных аппаратов при решении задач воздушной разведки оперативно-тактического масштаба в условиях метеорологической неопределенности. Построена математическая модель поддержки принятия метеозависимых решений путем рационального выбора варианта использования беспилотных летательных аппаратов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БЛА, ВОЗДУШНАЯ РАЗВЕДКА, МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ, ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.

Разведывательный комплекс с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) представляет собой метеозависимую авиационную систему (АС), эффективность функционирования которой зависит от полноты и адекватности учета метеоусловий [1].

В настоящее время имеет место противоречие между требованиями к учету влияния на БЛА по направлениям и районам выполнения задач воздушной разведки (ВР) метеорологических факторов и соответствующих им возможностей существующего научно-методического аппарата (НМА).

Разрешение указанного противоречия предлагается осуществить путем построения метеозависимой модели поддержки принятия решений путем рационального выбора варианта использования БЛА.

При этом предполагается.

На вооружении беспилотных разведывательных комплексов состоят БЛА различных типов. Необходимо осуществить поиск объектов противника в заданных районах. Метеорологические, географические и другие условия поиска в указанных районах различны. БЛА, обнаруживший объект противника в своем районе, переводится в другой, где поиск еще продолжается. Все объекты должны быть обнаружены не позднее момента времени T .

Формализация представленной задачи состоит в следующем.

К выполнению поиска объектов противника привлекаются беспилотные разведывательные комплексы, на вооружении которых имеется N БЛА, каждый из которых характеризуется комплексным параметром:

$$q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iL}), \forall i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где i – тип БЛА; $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iL}$ – количественные и качественные характеристики i -го типа БЛА: поисковые возможности, дальность действия, средства ведения разведки, скорость полета, степень метеозависимости при осуществлении поиска, надежность обеспечения наведения на противника ударных сил и время наведения, скрытность ведения поиска, потребные эксплуатационные ресурсы и т.д.

Территория ведения поиска разбита на M районов, в которых находится D объектов противника. Метеорологические, географические и другие условия поиска в указанных районах различны. В каждом районе имеется по одному объекту, на поиск которого направляется по одному БЛА. При обнаружении объекта в своем районе (факт его идентификации однозначен и достоверен), БЛА переводится в район, где поиск еще продолжается. Необходимо реализовать такую поддержку принятия решения по перераспределению БЛА в условиях метеорологической неопределенности, чтобы все объекты противника были обнаружены не позднее момента времени T .

В общем случае структура системы поиска объектов противника представляет собой иерархию S уровней, каждый из которых содержит ряд состояний поисковой ситуации в момент времени $t \in [0, T]$.

Число состояний системы должно обеспечивать [2]:

- марковское представление процесса поиска (отсутствие последействия и ординарность процесса);
- определение вероятностных характеристик, необходимых для вычисления показателей эффективности.

Отсутствие последействия при поиске означает, что возможность обнаружения объекта после момента времени t зависит только от факта его необнаружения к этому моменту и не зависит от того, как система функционировала до момента t и осуществлялся ли поиск вообще.

Под ординарность процесса поиска понимается, что за бесконечно малый промежуток времени dt может либо состояться одно обнаружение, либо не состояться ни одного обнаружения объекта [2].

За время dt система способна перейти из состояния A_{s-1j}^{s-1} в A_{sj}^s с определенной интенсивностью, которая по своей природе есть математическое ожидание некоторых событий в единицу времени.

Интенсивности переходов в модели отражают важные особенности процесса поиска: типы БЛА и объектов поиска, состав и свойства поисковой аппаратуры, способы ведения поиска, географические и метеорологические условия и др.

Направления переходов системы за время dt должны отражать условия поиска. При этом с математической точки зрения все переходы системы за время dt должны составлять полную группу несовместных событий [2].

Учитывая вышеизложенное, первый уровень системы поиска отражает состояния, содержащие все варианты начального распределения N БЛА по M районам, количество которых, согласно комбинаторному анализу, определяется как количество размещений из N элементов по M в каждом [3]:

$$H_N^M = N(N-1)(N-2)\dots(N-M+1) = \frac{N!}{(N-M)!} = Z^{(1)} \quad (2)$$

Каждому состоянию A_{sj}^s присваивается комплексный индекс:

$$A_{sj}^s (\eta_1 \mu_1, \dots, \eta_m \mu_m), \quad \forall j = \overline{1, J}, \forall m = \overline{1, M}, \quad (3)$$

где $\eta_1 \mu_1, \dots, \eta_m \mu_m$ – комплексный индекс, описывающий j -е состояние s уровня поиска, в котором η принимает значения: 0, 1 – выполняется поиск объекта, объект найден соответственно; μ принимает значения: 1, 2, ..., N и показывает какой БЛА осуществляет поиск в m -ом районе в j -ом состоянии; m – порядковый номер района и БЛА при начальном распределении (2).

Состояния второго уровня A_{2j}^2 отражают факт обнаружения объекта только в одном из районов, следовательно, количество таких состояний будет:

$$Z^{(2)} = (I_N^M \cdot M)^{(2)} \quad (4)$$

Вероятность обнаружения объектов противника во всех районах в один момент времени t пренебрежимо мала, поэтому не рассматривается.

Из каждого состояния второго уровня, строятся все комбинации перераспределения БЛА, обнаружившего в своем районе объект, по районам, где поиск еще продолжается. Следовательно, количество таких состояний, образующих третий уровень, составит:

$$Z^{(3)} = (I_N^M \cdot M) \cdot (M-1)^{(3)} \quad (5)$$

Совокупность комбинаций, отражающих выявление второго объекта в одном из оставшихся районов, образует четвертый уровень поиска, количество состояний которого определяется как:

$$Z^{(4)} = \left((I_N^M \cdot M) \cdot (M - 2) \right)^{(4)} \quad (6)$$

Таким образом, выражение, для определения количества состояний со второго уровня по $s - 1$, имеет вид:

$$Z^{(2,3,\dots,s-1)} = \left((I_N^M \cdot M) \cdot (M - \alpha) \right)^{(2,3,\dots,s-1)}, \quad (7)$$

где α – количество районов не участвующих в распределении БЛА (в этих районах объекты были обнаружены на предыдущих уровнях поиска).

Последний s уровень содержит состояния отражающие факт обнаружения всех объектов. Количество таких состояний соответствует $Z^{(1)}$.

Необходимо отметить следующее, при достижении $(M - \alpha) = 2$ (т.е. остается два района, где поиск продолжается), последующие два уровня будут содержать одинаковое количество состояний, равное удвоенному количеству состояний уровня для которого $(M - \alpha) = 2$:

$$Z^{s-1} = Z^{s-2} = 2Z^{s-3} = 2 \left((I_N^M \cdot M) \cdot (M - \alpha) \right)^{s-3} \quad (8)$$

Нетрудно заметить, что структура системы поиска объектов противника представляет собой чередование уровней распределения (перераспределения) БЛА и обнаружения одного из объектов.

Таким образом, при выполнении N БЛА метеозависимой задачи поиска D объектов противника в M районах (при условии, что в каждом районе находится по одному объекту), совокупность всех состояний системы поиска составит:

$$\begin{aligned} Z^{(1,2,\dots,s)} &= \left(I_N^M \right)^{(1)} + \left(I_N^M \cdot M \right)^{(2)} + \\ &+ \left(\left(I_N^M \cdot M \right) \cdot (M - 1) \right)^{(3)} + \\ &+ \left(\left(I_N^M \cdot M \right) \cdot (M - 2) \right)^{(4)} + \\ &+ \dots + 2 \cdot \left(\left(I_N^M \cdot M \right) \cdot (M - \alpha) \right)^{(s-2)} + \\ &+ 2 \cdot \left(\left(I_N^M \cdot M \right) \cdot (M - \alpha) \right)^{(s-1)} + \left(I_N^M \right)^{(s)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Полная совокупность состояний системы образует граф процесса поиска, опираясь на который, и располагая соответствующими статистическими данными, вычисляются интенсивности $a_{j,j}^{s-1,s}$ перехода системы из j -го состояния $s - 1$ уровня поиска в j -е состояние s уровня поиска за время dt . В работе [4] приводится более подробное описание данной процедуры.

В момент времени $t =]0, T]$ система находится в состоянии $A_{sj}^s(\eta_1\mu_1, \dots, \eta_m\mu_m)$ с вероятностью $P_{sj}^s(t)$, а при $t = 0$:

$$P_{1j}^1(0) = 1, \quad \sum_{s=2, j=1}^{s,J} P_{sj}^s(0) = 0. \quad (10)$$

Опираясь на подходы теории вероятностей [4], по графу процесса поиска разрабатывается система дифференциальных уравнений (СДУ). При этом необходимо заострить внимание, что дифференциаль-

ные уравнения состояний, описывающие перераспределение БЛА, учитывают потребное на это время, определяемое из скоростных характеристик БЛА и протяженности пути перехода из одного района в другой и выражающееся как плотность потока прибытия БЛА:

$$\beta_{xy} = \frac{1}{t_{xy}}, \forall x, y \in M, \tag{11}$$

где $\overline{t_{xy}}$ – математическое ожидание времени перехода БЛА из района x в район y .

Для состояний A_{2j}^2 выражение (10) будет отражать влияние на ведение поиска потребного времени прибытия БЛА в район из пункта запуска (для этого случая $x \notin M$).

Вводя допущение, что наведение ударных сил и поражение объектов достоверно и одинаково по временным параметрам во всех случаях применения БЛА, показателем эффективности U выполнения метеозависимой задачи является вероятность $P_{1,2,\dots,d}^{(v)}(T)$ обнаружения разведывательными БЛА всех объектов противника к моменту времени T :

$$U^{(v)}(T) = P_{1,2,\dots,d}^{(v)}(T), \forall v = \overline{1, V}, \forall d = \overline{1, D}, \tag{12}$$

где v – вариант использования разведывательных БЛА.

В качестве дополнительных показателей эффективности целесообразно использовать вероятности обнаружения к моменту времени T объекта противника лишь в одном районе:

$$\begin{aligned} U_{1}^{(v)}(T) &= P_{1}^{(v)}(T), \\ U_{2}^{(v)}(T) &= P_{2}^{(v)}(T), \\ &\dots\dots\dots \\ U_{d}^{(v)}(T) &= P_{d}^{(v)}(T). \end{aligned} \tag{13}$$

Расчеты следует произвести для всех вариантов использования БЛА и получить графики зависимости показателей эффективности от времени.

Полученные результаты математического моделирования поисковой ситуации позволяют получить сравнительную оценку эффективности применения БЛА для различных вариантов их распределения. В свою очередь, в условиях выполнения метеозависимой задачи оперативно-тактической разведки это позволяет повысить качество поддержки принятия метеозависимых решений.

В качестве примера, построение математической модели поиска выполним для размерности $N = M = D = 3$.

Возможность нахождения в районах поиска ложных целей в рамках данной работы не рассматривается. Первый уровень процесса поиска, согласно выражению (2) содержит 6 комбинаций, а всего состояний (выражение (9)) при данной размерности поисковой ситуации составит 205. Рассмотрим одну из шести комбинаций начального распределения БЛА по районам. Все соответствующие ей уровни поиска, содержащие соответствующие состояния, образуют поисковый граф, который представлен на рис. 1.

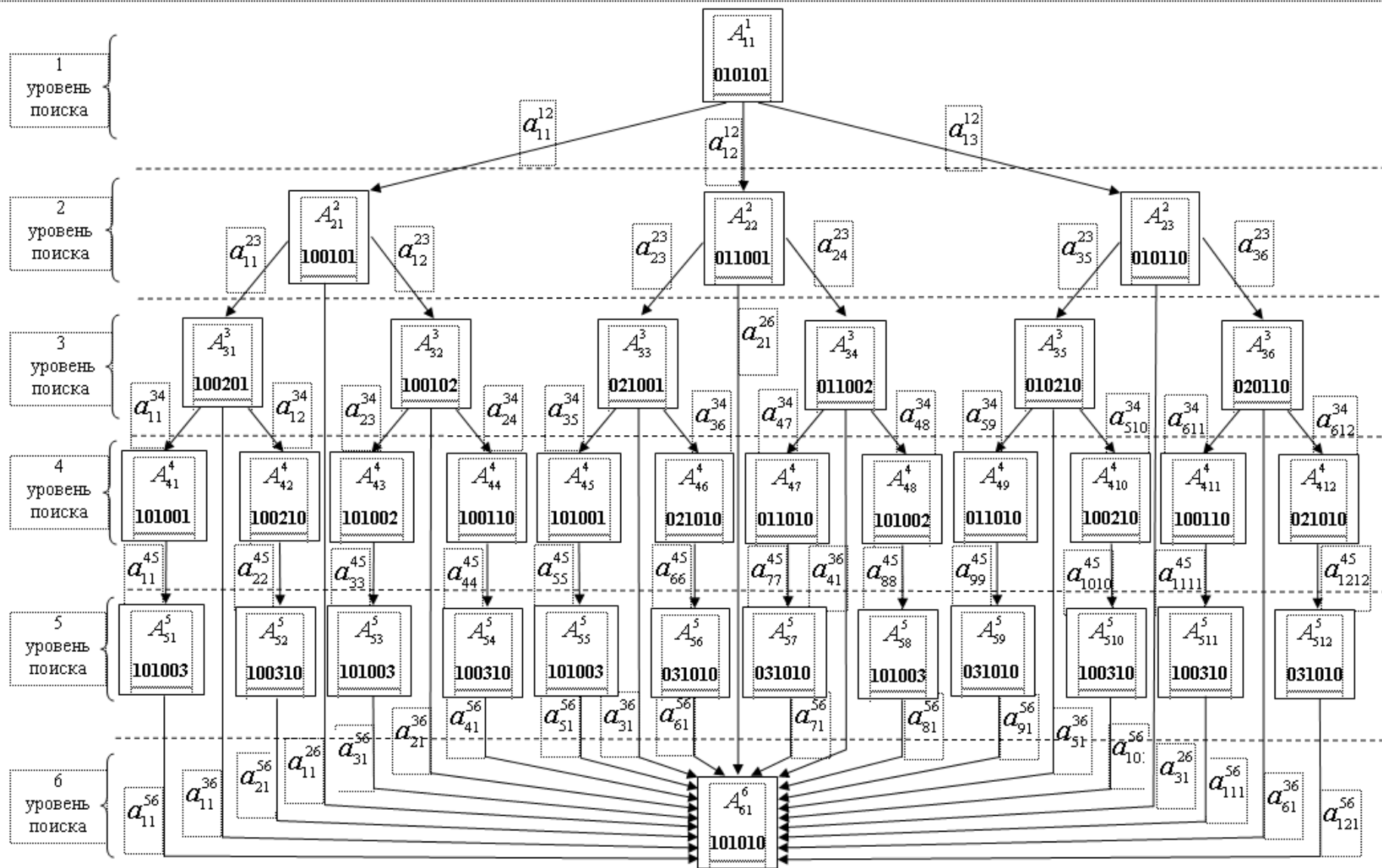


Рисунок 1 – Процесс поиска для $N=M=D=3$ (1 из 6 распределений БЛА; индексы m опущены)

Опираясь на построенный граф, и обозначив $\frac{dP}{dt}$ через \dot{P} , система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 P_{11}^{\cdot 1} &= - (a_{11}^{12} + a_{12}^{12} + a_{13}^{12}) P_{11}^1, \\
 P_{21}^{\cdot 2} &= - (a_{11}^{23} + a_{12}^{23}) P_{21}^2 + a_{11}^{12} P_{11}^1 + \beta_{01}, \\
 P_{22}^{\cdot 2} &= - (a_{23}^{23} + a_{24}^{23}) P_{22}^2 + a_{12}^{12} P_{11}^1 + \beta_{02}, \\
 P_{23}^{\cdot 2} &= - (a_{35}^{23} + a_{36}^{23}) P_{23}^2 + a_{13}^{12} P_{11}^1 + \beta_{03}, \\
 P_{11}^{\cdot 3} &= - (a_{11}^{34} + a_{11}^{36} + a_{12}^{34}) P_{31}^3 + a_{11}^{23} P_{21}^2 + \beta_{12}, \\
 P_{32}^{\cdot 3} &= - (a_{23}^{34} + a_{21}^{36} + a_{24}^{34}) P_{32}^3 + a_{12}^{23} P_{21}^2 + \beta_{13}, \\
 P_{33}^{\cdot 3} &= - (a_{35}^{34} + a_{31}^{36} + a_{36}^{34}) P_{33}^3 + a_{23}^{23} P_{22}^2 + \beta_{21}, \\
 P_{34}^{\cdot 3} &= - (a_{47}^{34} + a_{41}^{36} + a_{48}^{34}) P_{34}^3 + a_{24}^{23} P_{22}^2 + \beta_{23}, \\
 P_{35}^{\cdot 3} &= - (a_{59}^{34} + a_{51}^{36} + a_{510}^{34}) P_{34}^3 + a_{35}^{23} P_{23}^2 + \beta_{32}, \\
 P_{36}^{\cdot 3} &= - (a_{611}^{34} + a_{61}^{36} + a_{612}^{34}) P_{36}^3 + a_{36}^{23} P_{23}^2 + \beta_{31}, \\
 P_{41}^{\cdot 4} &= - a_{11}^{45} P_{41}^4 + (a_{11}^{34} + a_{11}^{36} + a_{12}^{34}) P_{31}^3, \\
 P_{42}^{\cdot 4} &= - a_{22}^{45} P_{42}^4 + (a_{11}^{34} + a_{11}^{36} + a_{12}^{34}) P_{31}^3, \\
 P_{43}^{\cdot 4} &= - a_{33}^{45} P_{43}^4 + (a_{23}^{34} + a_{21}^{36} + a_{24}^{34}) P_{32}^3, \\
 P_{44}^{\cdot 4} &= - a_{44}^{45} P_{44}^4 + (a_{23}^{34} + a_{21}^{36} + a_{24}^{34}) P_{32}^3, \\
 P_{45}^{\cdot 4} &= - a_{55}^{45} P_{45}^4 + (a_{35}^{34} + a_{31}^{36} + a_{36}^{34}) P_{33}^3, \\
 P_{46}^{\cdot 4} &= - a_{66}^{45} P_{46}^4 + (a_{35}^{34} + a_{31}^{36} + a_{36}^{34}) P_{33}^3, \\
 P_{47}^{\cdot 4} &= - a_{77}^{45} P_{47}^4 + (a_{47}^{34} + a_{41}^{36} + a_{48}^{34}) P_{34}^3, \\
 P_{48}^{\cdot 4} &= - a_{88}^{45} P_{48}^4 + (a_{47}^{34} + a_{41}^{36} + a_{48}^{34}) P_{34}^3, \\
 P_{49}^{\cdot 4} &= - a_{99}^{45} P_{49}^4 + (a_{59}^{34} + a_{51}^{36} + a_{510}^{34}) P_{35}^3, \\
 P_{410}^{\cdot 4} &= - a_{1010}^{45} P_{410}^4 + (a_{59}^{34} + a_{51}^{36} + a_{510}^{34}) P_{35}^3, \\
 P_{411}^{\cdot 4} &= - a_{1111}^{45} P_{411}^4 + (a_{611}^{34} + a_{61}^{36} + a_{612}^{34}) P_{36}^3, \\
 P_{412}^{\cdot 4} &= - a_{1212}^{45} P_{412}^4 + (a_{611}^{34} + a_{61}^{36} + a_{612}^{34}) P_{36}^3, \\
 P_{51}^{\cdot 5} &= - a_{11}^{56} P_{51}^5 + a_{11}^{45} P_{41}^4 + \beta_{23}, \\
 P_{52}^{\cdot 5} &= - a_{21}^{56} P_{52}^5 + a_{22}^{45} P_{42}^4 + \beta_{32},
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{P}_{53}^5 &= -a_{31}^{56} P_{53}^5 + a_{33}^{45} P_{43}^4 + \beta_{23} , \\
 \dot{P}_{54}^5 &= -a_{41}^{56} P_{54}^5 + a_{44}^{45} P_{44}^4 + \beta_{32} , \\
 \dot{P}_{55}^5 &= -a_{51}^{56} P_{55}^5 + a_{55}^{45} P_{45}^4 + \beta_{13} , \\
 \dot{P}_{56}^5 &= -a_{61}^{56} P_{56}^5 + a_{66}^{45} P_{46}^4 + \beta_{31} , \\
 \dot{P}_{57}^5 &= -a_{71}^{56} P_{57}^5 + a_{77}^{45} P_{47}^4 + \beta_{31} , \\
 \dot{P}_{58}^5 &= -a_{81}^{56} P_{58}^5 + a_{88}^{45} P_{48}^4 + \beta_{13} , \\
 \dot{P}_{59}^5 &= -a_{91}^{56} P_{59}^5 + a_{99}^{45} P_{49}^4 + \beta_{21} , \\
 \dot{P}_{510}^5 &= -a_{101}^{56} P_{510}^5 + a_{1010}^{45} P_{410}^4 + \beta_{12} , \\
 \dot{P}_{511}^5 &= -a_{111}^{56} P_{511}^5 + a_{1111}^{45} P_{411}^4 + \beta_{12} , \\
 \dot{P}_{512}^5 &= -a_{121}^{56} P_{512}^5 + a_{1212}^{45} P_{412}^4 + \beta_{21} , \\
 \dot{P}_{61}^6 &= 1 - \dot{P}_{51}^5 - \dot{P}_{52}^5 - \dot{P}_{53}^5 - \dot{P}_{54}^5 - \dot{P}_{55}^5 - \\
 &- \dot{P}_{56}^5 - \dot{P}_{57}^5 - \dot{P}_{58}^5 - \dot{P}_{59}^5 - \dot{P}_{510}^5 - \dot{P}_{511}^5 - \dot{P}_{512}^5 .
 \end{aligned}$$

В этом случае для основного показателя эффективности (11) имеем 12 вариантов применения БЛА ($\nu=12$), а для дополнительных показателей эффективности (12) $\nu=9$. Тогда выражения для основного и дополнительных показателей эффективности примут вид:

$$\begin{aligned}
 U^{(1)}(T) &= P_{21}^2(T) + P_{31}^3(T) + P_{41}^4(T) + P_{51}^5(T), \\
 U^{(2)}(T) &= P_{21}^2(T) + P_{31}^3(T) + P_{42}^4(T) + P_{52}^5(T), \\
 U^{(3)}(T) &= P_{21}^2(T) + P_{32}^3(T) + P_{43}^4(T) + P_{53}^5(T), \\
 U^{(4)}(T) &= P_{21}^2(T) + P_{32}^3(T) + P_{44}^4(T) + P_{54}^5(T), \\
 U^{(5)}(T) &= P_{22}^2(T) + P_{33}^3(T) + P_{45}^4(T) + P_{55}^5(T), \\
 U^{(6)}(T) &= P_{22}^2(T) + P_{33}^3(T) + P_{46}^4(T) + P_{56}^5(T), \quad (15) \\
 U^{(7)}(T) &= P_{22}^2(T) + P_{34}^3(T) + P_{47}^4(T) + P_{57}^5(T), \\
 U^{(8)}(T) &= P_{22}^2(T) + P_{34}^3(T) + P_{48}^4(T) + P_{58}^5(T), \\
 U^{(9)}(T) &= P_{23}^2(T) + P_{35}^3(T) + P_{49}^4(T) + P_{59}^5(T), \\
 U^{(10)}(T) &= P_{23}^2(T) + P_{35}^3(T) + P_{410}^4(T) + P_{510}^5(T), \\
 U^{(11)}(T) &= P_{23}^2(T) + P_{36}^3(T) + P_{411}^4(T) + P_{511}^5(T), \\
 U^{(12)}(T) &= P_{23}^2(T) + P_{36}^3(T) + P_{412}^4(T) + P_{512}^5(T).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_1^{(1)}(T) &= P_{21}^2(T) + P_{31}^3(T), \\
U_1^{(2)}(T) &= P_{21}^2(T), \\
U_1^{(3)}(T) &= P_{21}^2(T) + P_{32}^3(T), \\
U_2^{(4)}(T) &= P_{22}^2(T) + P_{33}^3(T), \\
U_2^{(5)}(T) &= P_{22}^2(T), \\
U_2^{(6)}(T) &= P_{22}^2(T) + P_{34}^3(T), \\
U_3^{(7)}(T) &= P_{23}^2(T) + P_{45}^4(T), \\
U_3^{(8)}(T) &= P_{23}^2(T), \\
U_3^{(9)}(T) &= P_{23}^2(T) + P_{36}^3(T).
\end{aligned} \tag{16}$$

Построенная СДУ решается с применением специализированного программного обеспечения и по полученным результатам расчетов для всех вариантов использования БЛА строятся графики зависимости показателей эффективности от времени.

Аналогичные расчеты выполняются и для оставшихся 5 комбинаций (состояния $A_{12}^1, A_{13}^1, A_{14}^1, A_{15}^1, A_{16}^1$) первого уровня поиска (начального распределения БЛА по районам).

Таким образом, полученные результаты моделирования позволяют:

- построить графики зависимости показателей эффективности от времени;
- сравнить эффективность различных вариантов применения БЛА (как с перераспределением, так и без);
- учитывать негативное влияние неблагоприятных метеорологических факторов, путем изменения в большую сторону значения времени перевода БЛА в другой район;
- осуществить поддержку принятия метеозависимых решений, путем рационального выбора варианта выполнения задач ВР с применением БЛА.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF INCREASING THE EFFICIENCY AERIAL RECONNAISSANCE UNMANNED SYSTEMS IN THE UNDER UNCERTAINTY WEATHER

V.V. Mikhailov, A.V. Samsonov

The article examines the effectiveness of UAVs in solving air reconnaissance tactical scale in conditions meteorological uncertainty. A mathematical model to support decision making meteorodependent. As well rational choice of the use of unmanned aerial vehicles.

KEYWORDS: AIR RECONNAISSANCE, METEOROLOGICAL UNCERTAINTY, DECISION.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев М.Г., Михайлов В.В. Управление организационно-технической системой в условиях метеорологической неопределенности: Монография. Воронеж: Изд-во Воронежского ВВАИУ (военного института), 2006, 147с.
2. Волгин Н.С. Исследование операций. Ч.2. Санкт-Петербург, Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова, 1999, 334с.
3. Виленкин Н.Я., Виленкин А.Н., Виленкин П.А. Комбинаторика. - М.: ФИМА, МЦНМО, 2006, 400с.
4. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. - М., Высш. шк., 2004, 404с.