

Совершенствование управления специальными авиационными работами в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом метеорологического обеспечения

В.Н. Бобров, А.В. Калач, А.С. Соловьев, В.А. Дурденко,

Воронежский институт ФСИИ России

Аннотация: В статье рассматривается решение задачи принятия управленческих решений при выполнении специальных авиационных работ в условиях чрезвычайных ситуаций, вызванных ландшафтными пожарами. С целью совершенствования принятия управленческих решений рассмотрено оптимальное использование метеорологической информации лицами, принимающими решения. В качестве критерия выбора оптимального решения используется вероятность выполнения специальных авиационных работ. Целевая функция представляется количеством формулировок прогноза фаз состояния погоды, вероятностей формулировок прогноза погоды и вероятностью выполнения специальных авиационных работ при соответствующей фазе погоды. Проведен анализ чувствительности математической модели задачи управления при различных входных параметрах, а также представлена характерная зависимость значений целевой функции от числа элементарных периодов. Полученные результаты предлагается использовать при планировании и организации полетов авиацией при выполнении специальных авиационных работ в условиях чрезвычайных ситуаций при ликвидации ландшафтных пожаров.

Ключевые слова: управление, метеорологическая информация, целевая функция, динамическое программирование, специальные авиационные работы, воздушное судно.

Введение

Метеорологическая информация имеет практическую значимость в процессе целенаправленного использования во всех сферах деятельности при принятии управленческих решений. Реальный эффект (экономический или другого характера), получаемый потребителем метеорологической информации, зависит не только от ее качества, но и от того, как эта информация используется при управлении [1].

Метеорологическая информация играет важную роль как в обеспечении безопасности полётов авиации, так и в повышении эффективности выполнения специальных авиационных работ (далее САР). Качество такой информации напрямую влияет на принимаемые решения

экипажами воздушных судов (далее ВС) и руководителем полётов, позволяя корректировать маршруты и эшелоны полётов ВС.

С целью совершенствования принятия управленческих решений при выполнении САР в условиях чрезвычайных ситуаций (далее ЧС) при ликвидации ландшафтных пожаров рассматривается оптимальное использование метеорологической информации [2, 3].

Материалы исследования

Задача формулируется следующим образом: авиационному подразделению требуется выполнить САР по тушению ландшафтного пожара. На выполнение САР отводится срок, в течение которого может быть выполнено n вылетов (n элементарных периодов). В распоряжении лица, принимающего решение (далее ЛПР), имеется определенное количество воздушных судов m . Полагается, что возможны потери ВС при выполнении авиационного пожаротушения в условиях ЧС. Специалист метеорологической службы предоставляет ЛПР на установленный промежуток времени прогностическую информацию о вариациях состояния погодных условий в заданном районе ЧС, обусловленной ландшафтным пожаром [4].

ЛПР должен, по данным прогностической информации, принять управленческое решение по определению числа воздушных судов для выполнения САР. ЛПР стремится установить оптимальное число воздушных судов, которое обеспечит максимальную вероятность выполнения САР.

В данном случае в качестве критерия выбора оптимального решения используется вероятность выполнения САР. Целевая функция представляется в следующем виде:

$$P_N(M) = \sum_{j=1}^J p_j P_N(M)_j$$

где J – количество формулировок прогноза фаз состояния погоды; p_j – вероятность j – й формулировки прогноза; $P_N(M)_j$ – вероятность выполнения САР при j – й фазе погоды.

Необходимо при этом ограничении $\sum_{j=1}^J p_j = 1$ максимизировать:

$$\sum_{j=1}^J p_j P_N(M)_j \quad (1)$$

Математическая модель задачи управления строится в терминах динамического программирования [5–7].

В качестве этапа n в динамической модели принимается вылет воздушных судов на выполнение задания (B) в рамках выполнения САР, $n=1, 2, \dots, N$, (заданный срок разбивается на N элементарных периодов – этапов), принимаемое решение на этапе, n – направление на задание i – воздушных судов [8, 9].

Допустимые задания: $0 \leq i \leq m_n$, где m_n – общее количество воздушных судов на этапе n . Рекуррентное соотношение динамического программирования [10, 11] представляется в виде:

$$P_N(M)_j = \max \left\{ p_{Bj} \left[(1 - q_1^i) + q_1^i - P_{n-1}(m_N - i) \right] + (1 - p_{Bj}) \sum_{k=0}^i q_i(k) P_{n-1}(m_N - k) \right\} \quad (2)$$

где p_{Bj} – вероятность осуществления благоприятных метеорологических условий для выполнения B при i – й формулировке прогноза, q_1^i – вероятность того, что будут потеряны i – воздушных судов при осуществлении B ; $1 - q_1^i$ – вероятность того, что не будет потеряно хотя бы одно воздушное судно в

условиях B ; $q_i(k)$ – вероятность того, что будут потеряны k из i воздушных судов в условиях B .

Для описания $q_i(k)$ применяется биномиальный закон распределения:

$$q_i(k) = \frac{i!}{k! (i - k)!} q_z^k (1 - q_z)^{i-k}, \quad k = 0, 1, \dots, i.$$

Полагается, что потеря ВС – события независимые, и задания выполняются на условии, что выполнено по крайней мере одним ВС.

Математическая модель определяется выражением (1) с подстановкой (2). Решение достигается многошаговым процессом. На каждом шаге решается подзадача принятия управленческого решения. Последовательные этапы связываются набором рекуррентных соотношений, вычислительные процедуры которых обеспечивают оптимальное решение задачи в целом при достижении последнего этапа [12].

Для решения поставленной задачи разработан программный комплекс, реализующий алгоритм принятия оптимального управленческого решения.

В данной задаче метеорологическая информация представляется в вероятностной форме. Однако потребитель получает категорический прогноз (количество ВС на выполнение задач в рамках выполнения САР по ликвидации ландшафтного пожара). Использование такого категорически-вероятностного прогноза обосновано в [12].

Решение задачи проведено для района г. Воронежа. На ретроспективном материале составлена матрица сопряженности сочетаний формулировок метеорологического прогноза и вариаций погодных условий, таблица № 1, где элементами n_B , $n_{\bar{B}}$ является число случаев фактического осуществления метеорологических условий B и метеорологических условий \bar{B} при различных формулировках прогноза фаз состояния погоды.

Таблица № 1

Матрица сопряженности сочетаний формулировок метеорологического прогноза и вариаций погодных условий

Число случаев осуществления B, \bar{B}	Сочетания формулировок прогнозов			
	1	2	3	4
n_B	56	57	180	355
$n_{\bar{B}}$	110	40	125	58

Фазы состояния погоды ($j = 1, 2, 3, 4$) представляют собой попарно несовместные события, образующие полную группу событий. Условия фактической погоды определяются сочетаниями значений (или градаций) метеорологических величин, определяющих условия выполнения конкретного задания в рамках выполнения САР (высота нижней границы облачности, дальность видимости, скорость и направление ветра, наличие опасного явления погоды и др.).

Значения n_B и $n_{\bar{B}}$ подсчитываются с учетом метеоминимума, установленного в соответствии с состоянием окружающей среды в условиях ЧС, вызванных ландшафтным пожаром, выполняемым заданием экипажем ВС на малой и предельно малой высоте.

Вероятности, входящие в (1) и (2), рассчитываются по следующим выражениям:

$$p_{Bj} = \frac{n_{Bj}}{n_{Bj} + n_{\bar{B}j}}, \quad p_i = \frac{n_{Bj} + n_{\bar{B}j}}{\sum_j (n_{Bj} + n_{\bar{B}j})}. \quad (3)$$

Некоторые результаты решения управленческой задачи при варьировании входных параметров представлены в таблице № 2, где дан наряд воздушных судов ($q_1=q_2=0,5$).

Таблица № 2

Результаты решения управленческой задачи

$M \backslash N$ J	12				8					4		
	1	3	5	9	1	3	5	7	9	1	3	5
1	12	6	0	0	8	5	0	0	0	4	0	0
2	12	6	0	0	8	0	0	0	0	4	0	0
3	12	7	7	6	8	5	5	5	5	4	4	4
4	12	6	0	0	8	5	0	0	0	4	3	0

В рамках исследования был проведен анализ чувствительности математической модели задачи управления при различных входных параметрах (M , N , q). На рис. представлена характерная зависимость значений целевой функции $P_N(M)$ от числа элементарных периодов N .

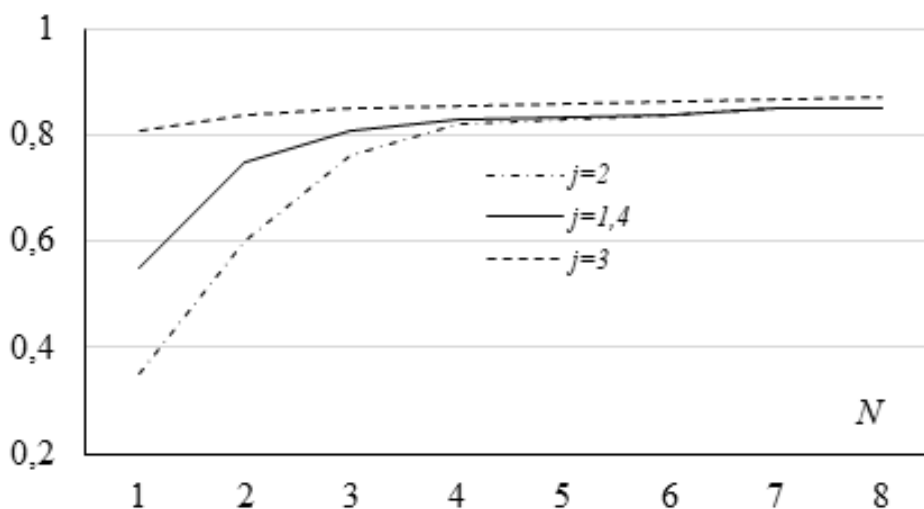


Рис. - Зависимость значений целевой функции $P_N(M)$ от числа элементарных периодов N , при значениях $M=8$, $q=0,5$

Из хода кривых, представленных на рис., видно, что с увеличением числа возможных вылетов ВС (N) величина $P_N(M)$ для разных формулировок прогноза выравнивается. Зависимость наблюдается для любого числа N и вероятности q , но при больших M значения $P_N(M)$ возрастает.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что для повышения эффективности выполнения специальных авиационных работ в условиях чрезвычайных ситуаций, обусловленных ландшафтными пожарами, высокую значимость имеет метеорологическая информация. Разработка оптимальных методов принятия управленческих решений основывается на построении математической модели, использующей методы динамического программирования. Предложенная модель позволяет учесть прогностическую информацию о состоянии погоды и риски потерь ВС в целях определения оптимального количества ВС для выполнения САР.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение количества возможных вылетов воздушных судов ведет к выравниванию значений целевой функции (вероятности успешного выполнения задания) независимо от формулировок прогноза. Это подтверждает важность планирования полетов с учетом длительного периода наблюдений и качественного анализа метеорологической обстановки в районе ЧС.

Разработанная методика и программное обеспечение позволяют повысить качество выполнения САР в условиях ЧС, минимизируя риски и обеспечивая безопасность полетов авиации. Предложенный подход позволит снизить затраты ресурсов и повысить эффективность ликвидации ЧС, обусловленной ландшафтными пожарами.

Результаты исследования могут использоваться авиацией Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) и авиацией Министерства по чрезвычайным ситуациям (МЧС) для оптимизации процессов планирования и их совместного оперативного реагирования на ландшафтные пожары в условиях ЧС.

Литература

1. Болелов Э.А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Том 21, № 5. С. 114 – 119.
2. Бобров В.Н., Калач А.В. Комплексный учет информации о состоянии атмосферы при обеспечении безопасности полетов авиации в экстремальных условиях // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2025. № 2(74). С. 8-15. – DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-8-15.
3. Пожаркова И.Н. Автоматизация обработки результатов численного моделирования развития пожара // Инженерный вестник Дона. 2025. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2025/9848.
4. Селезнев В.П. Метеорологическое обеспечение полетов. Москва: ЛИБРОКОМ, 2018. 190 с.
5. Богаткин О.Г., Еникеева В.Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. 2-е изд. Ленинград: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
6. Harvey M. Wagner Department of Administrative Science Yale University; Consultant to McKinsey and Company, Inc Principles of Operations Research With Applications to Managerial Decisions Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1969. 1096 с.
7. Шапкин А.С. Математические методы и модели исследования операций: Учебник. Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2019. 398 с.
8. Шалимов К.С. Графовая модель и алгоритм определения оптимального маршрута проведения поисково-спасательных работ // Инженерный вестник Дона. 2025. № 7. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n7y2025/10203.

9. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология: Учебное пособие для студентов вузов. Москва: Дрофа, 2004. 206 с.
10. Bertele U., Brioshi F. Nonserial dynamic programming. – N. Y.: Academic Press, 1972. – 235 p.
11. Cormen, Thomas H., Leiserson, Charles E., Rivest, Ronald L. Stein, Clifford. Introduction to Algorithms. – 2nd. – MIT Press and McGraw-Hill, 2001. – ISBN 0-262-53196-8. 1204 с.
12. Волконский И.Ю., Волконский Ю.Н. Оптимальная организация специализированного обеспечения прогнозами // Метеорология и гидрология. 1985, № 12, С. 12–19.

References

1. Bolelov E.A. Nauchnii Vestnik MGTU GA. 2018. Tom 21, № 5. pp. 114 – 119.
2. Bobrov V.N., Kalach A.V. Problemi upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 2(74). pp. 8-15. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-8-15.
3. Pojarkova I.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2025/9848.
4. Seleznev V.P. Meteorologicheskoe obespechenie poletov. [Meteorological support of flights] Moskva: LIBROKOM, 2018. 190 p.
5. Bogatkin O.G., Yenikeeva V.D. Analiz i prognoz pogodi dlya aviatsii. 2-e izd. [Weather analysis and forecast for aviation] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1992. 272 p.
6. Harvey M. Wagner Department of Administrative Science Yale University; Consultant to McKinsey and Company, Inc Principles of Operations Research With Applications to Managerial Decisions Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1969. 1096 p.

7. Shapkin A.S. Matematicheskie metodi i modeli issledovaniya operatsii: Uchebnik. [Mathematical methods and models of operations research] Moskva: Izdatelsko-torgovaya korporatsiya «Dashkov i K°», 2019. 398 p.
8. Shalimov K.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 7. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n7y2025/10203.
9. Venttsel Ye.S. Issledovanie operatsii. Zadachi, printsipi, metodologiya: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. [Operations Research. Objectives, Principles, and Methodology] Moskva: Drofa, 2004. 206 p.
10. Bertele U., Brioshi F. Nonserial dynamic programming. N. Y.: Academic Press, 1972. 235 p.
11. Cormen, Thomas H., Leiserson, Charles E., Rivest, Ronald L. Stein, Clifford. Introduction to Algorithms. 2nd. MIT Press and McGraw-Hill, 2001. ISBN 0-262-53196-8. 1204 p.
13. Volkonskii I.Yu., Volkonskii Yu.N. Meteorologiya i gidrologiya. 1985. № 12. pp. 12–19.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных

Дата поступления: 17.09.2025

Дата публикации: 29.10.2025