

УДК 551.510

## МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОСТОЯННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

*Дорофеев В. В.<sup>1</sup>, Насонов А. А.<sup>2</sup>, Степанов А. В.<sup>3</sup>, Гоцев Д. В.<sup>4</sup>, Нечаев В. Н.<sup>5</sup>*

*<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация  
E-mail: <sup>2</sup>alexeynasonov@list.ru*

В статье предлагается модель восстановления метеорологических условий (высоты нижней границы облачности, высоты верхней границы облачности, горизонтальной видимости у земли и полётной видимости) по данным измерениям прозрачности атмосферы с помощью нефелометра установленного на беспилотный летательный аппарат.

**Ключевые слова:** прозрачность атмосферы, беспилотные летательные аппараты, поисково-спасательные работы, потерпевшие бедствие, малогабаритный нефелометр.

### ВВЕДЕНИЕ

Территория Российской Федерации обширна и достаточно разнообразна по своим физико-географическим и климатическим условиям. В статье рассмотрены Регионы Сибири и Дальнего Востока, находящиеся в различных физико-географических и климатических условиях. В последние годы на территориях данных регионов увеличилась повторяемость стихийных, разрушительных, природных и природно-антропогенных явлений, приводящих к достаточно серьёзным разрушениям и уничтожениям материальных ценностей, а также гибели людей. Это обуславливает необходимость совершенствования поисково-спасательных работ (ПСР) с применением авиации, так как авиация в этих регионах является практически единственным оперативным средством поиска и спасения терпящих и потерпевших бедствие объектов и людей [1].

Отличительной особенностью метеорологического обеспечения и оценки метеорологических условий Сибири и Дальнего Востока осложняется протяжённостью имеющих территорий этих регионов, а также частичным (на некоторых участках полным) отсутствием метеорологических станций. Использование воздушных судов (ВС) для выполнения ПСР в условиях полного отсутствия (не достаточного количества) метеорологической информации является затруднительной и сложной задачей. В отдельных случаях отсутствие метеорологической информации является главной причиной частичного или полного исключения применения авиации для выполнения задач по поиску и спасанию потерпевших бедствие объектов (экипаж, пассажиры, ВС) [2, 3]. Ландшафт местности определяет метеорологические условия регионов, тем самым влияет на метеорологическое обеспечение полётов и их безопасность в целом [4]. Существующие в настоящее время методы оценки погодных условий с редкой сетью метеорологических наблюдений являются приближенными и не учитывают в

должной степени неоднородности подстилающей поверхности и ландшафта местности. Это обусловлено несовершенством научно-методического аппарата по оценке метеорологических условий над неосвещенной полностью, либо с редкой сетью наблюдений в метеорологическом отношении территорий.

Несовершенство научно-методического аппарата оценки метеорологических условий на неосвещенной в метеорологическом отношении территории обуславливает противоречие, заключающееся в том, что метеорологические условия на не освещенной в метеорологическом отношении территории приходится отождествлять с климатическими условиями. Противоречие требует решения научной задачи по совершенствованию научно-методического аппарата оценки метеорологических условий над неосвещенной в метеорологическом отношении территориями. Основной метеорологической величиной определяющей условия возможности выполнения авиационных и поисково-спасательных работ является прозрачность атмосферы (ПА). ПА — объективная характеристика условий видимости, которая не зависит от явлений погоды, времени суток и времени года. ПА позволяет определить метеорологическую оптическую дальность (МОД), метеорологическую дальность видимости у земли (МДВ), высоту нижней границы облаков (ВНГО) и высоту верхней границы облаков (ВВГО).

Разрешение противоречия возможно реализовать с помощью применения беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Установка на современные БПЛА открытой архитектуры портативного нефелометра позволит проводить измерения прозрачности атмосферы на неосвещенной в метеорологическом отношении территории.

Поэтому целью работы является повышение качества метеорологического обеспечения ПСР путем разработки модели восстановления метеорологических условий над неосвещенной территорией с использованием БПЛА.

Цель достигается решением следующих задач:

1. Разработка модели оценки прозрачности атмосферы по применению малогабаритного нефелометра на БПЛА.
2. Конструкторское предложение в модернизации использования полезной нагрузки БПЛА.

### **МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

Решение задачи по восстановлению метеорологических условий и измерению значений прозрачности атмосферы реализуется математической моделью, которая описывается системой линейных уравнений и имеет вид:

$$\begin{cases} \tau_1 = Ah_1^2 + Bh_1 + \tau_0 \\ \tau_2 = Ah_2^2 + Bh_2 + \tau_0, \\ \tau_3 = Ah_3^2 + Bh_3 + \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

**МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НАД  
ТЕРРИТОРИЕЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОСТОЯННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

где  $h_1, h_2, h_3$  — высоты, на которых измеряется ПА, (м);  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  — измеренная ПА, (%);  $\tau_0$  — ПА у земли, (%).

Решая систему уравнений, находим  $\tau_0$  — ПА у земли и коэффициенты  $A$  и  $B$ .

Для решения системы 3-х линейных уравнений (1), где  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, h_1, h_2, h_3$  — известные величины, а  $\tau_0, A$  и  $B$  — переменные, которые необходимо найти, используется правило Крамера. Найдем определитель третьего порядка (определитель системы —  $\Delta$ )

$$\Delta = \begin{vmatrix} h_1^2 & h_1 & \tau_0 \\ h_2^2 & h_2 & \tau_0 \\ h_3^2 & h_3 & \tau_0 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

Составим еще три определителя следующим образом: заменим в определителе  $\Delta$  последовательно 1, 2 и 3 столбцы столбцом свободных членов  $\tau_1, \tau_2$  и  $\tau_3$ . Тогда согласно теореме Крамера, если определитель  $\Delta \neq 0$ , то рассматриваемая система имеет одно и только одно решение, причем

$$A = \frac{\Delta_1}{\Delta}, B = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \tau_0 = \frac{\Delta_3}{\Delta}. \quad (3)$$

Тогда при условии постоянства дискретности измерений по высоте, т.е.  $h_1 - h_2 = h_2 - h_3$  и условия  $h_1 > h_2 > h_3$  получаем:

$$A = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\tau_1 - 2\tau_2 + 2\tau_3}{h_1^2 - 2h_2^2 + h_3^2}, \quad (4)$$

$$B = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{1}{h_1 - h_2} \cdot \frac{h_1^2(\tau_2 - \tau_3) + h_2^2(\tau_3 - \tau_1) + h_3^2(\tau_1 - \tau_2)}{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2}, \quad (5)$$

и  $\tau_0$ , выражая из первого уравнения системы

$$\tau_0 = \tau_1 - Ah_1^2 - Bh_1. \quad (6)$$

ПА в наклонном направлении ( $\tau_{\text{нак}}$ ) определяется по формуле:

$$\tau_{\text{нак}} = \frac{H_{\text{пол}}}{\cos Q \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon} \cdot \int_0^{H_{\text{пол}}} \frac{dh}{Ah^2 + Bh + \tau_0}}, \quad (7)$$

где  $H_{пол}$  — высота полета (м);  $Q$  — угол визирования, который зависит от высоты полета БЛА ( $^{\circ}$ ).

Выражение (7) может иметь 3 решения:

1. При  $B^2 > 4A\tau_0$ :

$$\tau_{нак} = \frac{H_{пол}\sqrt{B^2 - 4A\tau_0}}{\cos Q \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon} \cdot \ln \frac{H_{пол}(B + \sqrt{B^2 - 4A\tau_0}) + 2\tau_0}{H_{пол}(B - \sqrt{B^2 - 4A\tau_0}) + 2\tau_0}} \quad (8)$$

2. При  $B^2 < 4A\tau_0$ :

$$\tau_{нак} = \frac{H_{пол}\sqrt{4A\tau_0 - B^2}}{\cos Q \cdot 2\ln \frac{1}{\varepsilon} \cdot \operatorname{arctg} \frac{H_{пол}\sqrt{4A\tau_0 - B^2}}{BH_{пол} + 2\tau_0}} \quad (9)$$

где

$$\operatorname{arctg} \frac{H_{пол}\sqrt{4A\tau_0 - B^2}}{BH_{пол} + 2\tau_0} \quad (10)$$

выражается в радианах.

3. При  $B^2 = 4A\tau_0$ :

$$\tau_{нак} = \frac{(2AH_{пол} + B)B}{\cos Q \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon}} \quad (11)$$

$$Q = \operatorname{arctg} \frac{H_{пол}}{\tau_n} \quad (12)$$

где  $H_{пол}$  — высота полета БЛА (м);  $\tau_n$  — прозрачность атмосферы на высоте полета (%).

Математическая модель расчёта ПА у земли  $\tau_0$  позволяет определить МОД и МДВ у земли, а ПА в наклонном направлении ( $\tau_{нак}$ ) позволяет определить полетную дальность видимости (ПДВ) путем перерасчета ее в МОД с учетом угла визирования, зависящего от путевой скорости ( $W$ ), коэффициента аккомодации ( $t$ ), высоты полета

## МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОСТОЯННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

$H_{\text{пол}}$  и курсового угла наблюдения ( $\alpha$ ). При этом вместо  $Q$  подставляется переменная  $Q'$ , которая вычисляется по формуле (13):

$$Q' = Q + 57,3 \frac{Wt}{H_{\text{пол}}} \sin Q \sqrt{1 + \cos^2 Q \cdot \cos^2 \alpha} \quad (13)$$

Используя математическую модель [5], можно определить ПДВ для любого ВС.

Для полной оценки метеорологических условий над неосвещённой в метеорологическом отношении территорией определяются МДВ, ВНГО, ВВГО, ПДВ путем расчета МОД по формулам. За ВНГО и ВВГО принимается высота, где МОД принимает значение, равное 80 м или менее [5].

Таким образом, по измеренным значениям ПА можно восстановить метеорологические условия по маршруту полёта к месту стихийного бедствия и к району выполнения поисковых и спасательных операций.

Полученная восстановленная метеорологическая информация с помощью БПЛА над неосвещённой или территорией с редкой метеорологической сетью предоставляет возможность руководителю ПСР оценить метеорологические условия необходимые для эффективного проведения поисковых и спасательных работ. Конструкторское предложение в модернизации по использованию полезной нагрузки БПЛА заключается в том, что для измерения ПА предлагается установить на БПЛА (рис. 1) нефелометр [6] со следующими характеристиками масса около 4–5 кг и габаритные размеры порядка 50\*25\*10 см, что позволит без ограничений применить его на БПЛА [7].



Рис. 1. Малогабаритный нефелометр.

Оснащение БПЛА малогабаритным нефелометром позволит измерять прозрачность атмосферы и оценивать МОД, МДВ, ВНГО, ВВГО, тип распределения ПА (видимости) с высотой под облаками, тем самым предоставляя возможность по оценке полетной и наклонной видимости над неосвещённой в метеорологическом отношении территорией (рис. 2).

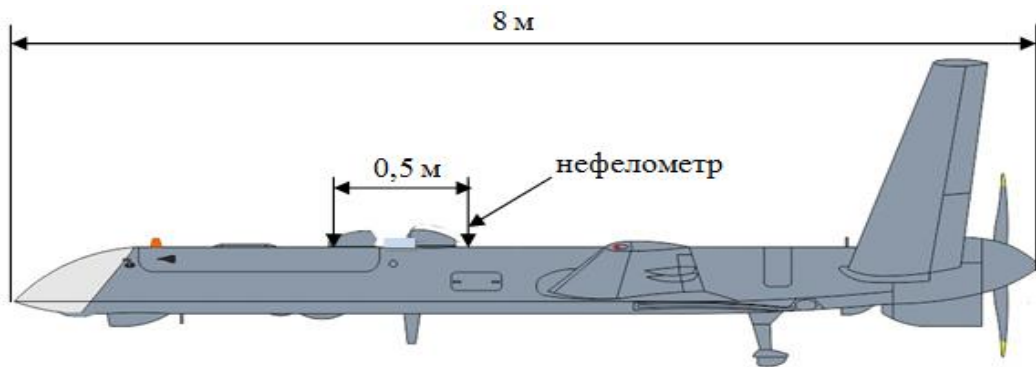


Рис. 2. Перспективный комплекс БПЛА для оценки прозрачности атмосферы над неосвещённой в метеорологическом отношении территории.

Алгоритм по восстановлению метеорологических условий по применению комплекса БПЛА с изменённым конструктивным решением, возможно представить в виде модульной схемы с открытой архитектурой (рис. 3) [7].

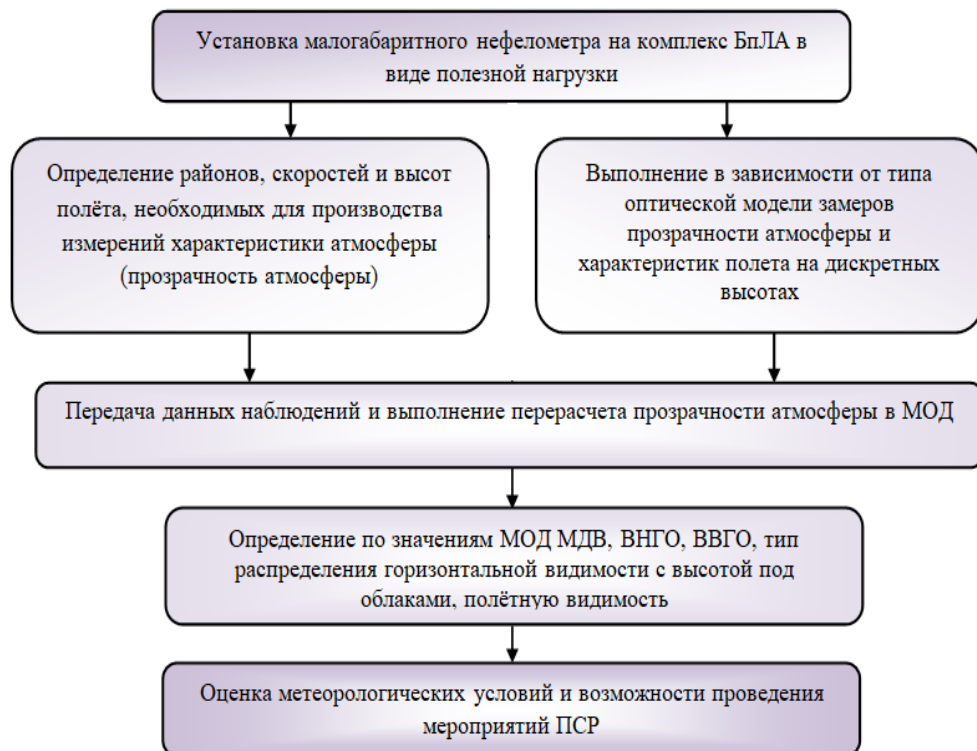


Рис. 3. Алгоритм применения БПЛА с использованием малогабаритного нефелометра [7].

## ВЫВОДЫ

Реализация данной модели восстановления метеорологических условий над неосвещенной территорией позволит оценивать метеорологические условия для решения следующих задач:

- для выполнения авиационных работ и полётов на местных воздушных линиях восстановить на неосвещённой территории метеорологические условия (МОД, МДВ, ВНГО, ВВГО, полётная дальность видимости);
- обеспечить безопасное выполнение полётов по правилам визуальных полётов под низкими облаками и ниже нижнего эшелона;
- возможность выполнением ПСР при отсутствии метеорологической информации над неосвещённой территорией в метеорологическом отношении.
- повысить регулярность, эффективность и безопасность выполнения полётов над территориями Сибири и Дальнего Востока.

## Список литературы

1. Информационно-аналитическое агентство «Восток» [Электронный ресурс] URL: <https://www.eastrussia.ru/news/dalniy-vostok-i-sibir-bolshe-vsego-stradayut-ot-prirodnikh-kataklizmov/> (дата обращения: 23.06.2021).
2. Федеральные авиационные правила производства полетов государственной авиации Российской Федерации (ФАППП ГА-2004). М: Воениздат, 2004. 336 с.
3. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95). М.: Транспорт, 1995. 204 с.
4. Мильков Ф.Н. Физическая география. Учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Издательство воронежского университета, 1986. 8 с.
5. Дорофеев В.В., Нахмансон Г.С. Наклонная дальность видимости. Монография. Воронеж, ВВАИУ (ВИ), 2007. С.102–118.
6. Метеорологические датчики [Электронный ресурс] URL: [http://www.meteosensor.ru/catalog/datchiki\\_vidimosti/vs2k\\_umb\\_datchik\\_vidimosti/](http://www.meteosensor.ru/catalog/datchiki_vidimosti/vs2k_umb_datchik_vidimosti/) (дата обращения 24.06.2021).
7. Военный энциклопедический словарь. [Электронный ресурс] URL: <http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=13939@morfDictionar> (дата обращения 24.06.2021).

## MODEL OF RESTORATION OF METEOROLOGICAL CONDITIONS OVER THE TERRITORY IN THE ABSENCE OF CONSTANT OBSERVATIONS

*Dorofeev V. V.<sup>1</sup>, Nasonov A. A.<sup>2</sup>, Stepanov A. V.<sup>3</sup>, Gotsev D. V.<sup>4</sup>, Nechaev V. N.<sup>5</sup>*

*<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Military Training and Research Center of the Air Force " Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation  
E-mail: <sup>2</sup>alexeynasonov@list.ru*

The article proposes a model for restoring meteorological conditions (the height of the lower cloud boundary, the height of the upper cloud boundary, horizontal visibility near the ground

and flight visibility) based on measurements of atmospheric transparency using a nephelometer installed on an unmanned aerial vehicle.

The territory of the Russian Federation is vast and quite diverse in its physical, geographical and climatic conditions. The article considers the regions of Siberia and the Far East located in different physical, geographical and climatic conditions. In recent years, the frequency of natural, destructive, natural and natural-anthropogenic phenomena has increased in the territories of these regions, leading to quite serious destruction and destruction of material values, as well as the death of people. This makes it necessary to improve search and rescue operations with the use of aviation, since aviation in these regions is practically the only operational means of searching and rescuing objects and people in distress.

A distinctive feature of meteorological support and assessment of meteorological conditions in Siberia and the Far East is complicated by the length of the existing territories of these regions, as well as the partial (in some areas complete) absence of meteorological stations. The use of aircraft (VS) to perform the SRP in the conditions of complete absence (not enough) meteorological information is a difficult and complex task. In some cases, the lack of meteorological information is the main reason for the partial or complete exclusion of the use of aviation to perform tasks for the search and rescue of objects in distress (crew, passengers, aircraft). The terrain determines the meteorological conditions of the regions, thereby affecting the meteorological support of flights and their safety in general. The currently existing methods for assessing weather conditions with a rare network of meteorological observations are approximate and do not take into account the heterogeneity of the underlying surface and the landscape of the area to the proper extent. This is due to the imperfection of the scientific and methodological apparatus for assessing meteorological conditions over an area that is completely unlit, or with a rare network of observations in meteorological terms.

The imperfection of the scientific and methodological apparatus for assessing meteorological conditions in a meteorologically unlit territory causes a contradiction, which consists in the fact that meteorological conditions in a meteorologically unlit territory have to be identified with climatic conditions. The contradiction requires the solution of the scientific task of improving the scientific and methodological apparatus for assessing meteorological conditions over a meteorologically unlit territory. The main meteorological value determining the conditions for the possibility of performing aviation and search and rescue operations is the transparency of the atmosphere (PA). PA is an objective characteristic of visibility conditions that does not depend on weather phenomena, time of day and time of year. The PA allows you to determine the meteorological optical range (MOD), the meteorological visibility range near the earth (MDV), the height of the lower cloud boundary (VNGO) and the height of the upper cloud boundary (VVGO).

**Keywords:** transparency of the atmosphere, unmanned aerial vehicles, search and rescue operations, victims of disaster, small-sized nephelometer.

#### References

1. Informacionno-analiticheskoe agentstvo «Vostok» [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.eastrussia.ru/news/dalnij-vostok-i-sibir-bolshe-vsego-stradayut-ot-prirodnikh-kataklizmov/> (data obrashhenija: 23.06.2021). (in Russian)



## МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОСТОЯННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

---

2. Federal'nye aviacionnye pravila proizvodstva poletov gosudarstvennoj aviacii Rossijskoj Federacii (FAPPP GA-2004). M: Voenizdat, 2004. 336 p. (in Russian)
3. Nastavlenie po meteorologicheskomu obespecheniju grazhdanskoj aviacii Rossii (NMO GA-95). M.: Transport, 1995. 204 p. (in Russian)
4. Mil'kov F. N. Fizicheskaja geografija. Uchenie o landshafte i geograficheskaja zonal'nost'. Voronezh: Izdatel'stvo voronezhskogo universiteta, 1986. 8 p. (in Russian)
5. Dorofeev V. V., Nahmanson G. S. Naklonnaja dal'nost' vidimosti. Monografija. Voronezh, VVAIU (VI), 2007. pp. 102–118. (in Russian)
6. Meteorologicheskie datchiki [Elektronnyj resurs] URL: [http://www.meteosensor.ru/catalog/datchiki\\_vidimosti/vs2k\\_umb\\_datchik\\_vidimosti/](http://www.meteosensor.ru/catalog/datchiki_vidimosti/vs2k_umb_datchik_vidimosti/) (data obrashhenija 24.06.2021). (in Russian)
7. Voennyj jenciklopedicheskij slovar'. [Elektronnyj resurs] URL: <http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=13939@morfDictionar> (data obrashhenija 24.06.2021). (in Russian)

*Поступила в редакцию 29.06.2021 г.*