

УДК 910.1

**МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТА (ОРИЕНТИРА)
У ЗЕМЛИ ПО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ВИДИМОСТИ
С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Дорофеев В. В.¹, Степанов А. В.², Насонов А. А.³

*^{1,2,3}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
E-mail: ³alexeynasonov@list.ru*

В статье предлагается модель восстановления метеорологических оптической дальности видимости объектов на земной поверхности по данным с камеры беспилотного воздушного судна (квадрокоптерного типа).

Ключевые слова: метеорологическая оптическая дальность видимости, беспилотное воздушное судно, оптико-электронная система, тип распределения горизонтальной видимости с высотой.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспилотные воздушные суда (БВС) являются средством воздушной разведки по обнаружению на земной поверхности объектов (ориентиров) [1]. Используемая оптико-электронная система (ОЭС) (цифровая камера) БВС позволяет обнаруживать и опознавать объекты (ориентиры), находящиеся на земле. Однако по цифровому изображению с использованием различных объективов невозможно оценить метеорологическую оптическую дальность (МОД₀) видимости объекта (ориентира) в горизонтальном направлении у земли [1, 3, 4, 5, 6].

Поскольку МОД₀ не связана с визуальным наблюдением каких-либо объектов, а зависит только от прозрачности атмосферы (показателя ослабления), то она применима в любое время суток для оценки прозрачности атмосферы и расчетов дальности видимости реальных объектов в горизонтальном направлении [1, 3, 4, 5, 6].

Применение БВС для оценки МОД₀ в настоящее время невозможно из-за противоречия между видимостью объекта (ориентира) на земле и оптико-электронной дальностью видимости (ОЭДВ) объекта (ориентира).

Противоречие требует решения научной задачи о выявлении взаимосвязи между МОД₀ объекта (ориентира) на земле и ОЭДВ БВС.

Поэтому целью статьи является построение математической модели расчета МОД₀ объекта (ориентира) у земли с использованием информации ОЭС, получаемой с БВС для различных типов распределения горизонтальной видимости с высотой (ТРГВ) при для нулевой путевой скорости полета БВС квадрокоптерного типа при зависании его в воздухе.

ТРГВ зависит от высоты, формы и структуры нижней границы облаков, наличия и характера атмосферного помутнения в подоблачном слое, явлений погоды и видимости в них. В статье рассматриваются три основные ТРГВ, которые

классифицируются сочетаниями ВНГО (высота нижней границы облачности) и МДВ (метеорологическая дальность видимости) при различных явлениях погоды (дымка, снег, дождь, морось): для **I ТРГВ** – $ВНГО \leq 150$ м, $1 < МДВ \leq 3$ км; для **II ТРГВ** – $150 < ВНГО \leq 200$ м, $1 < МДВ \leq 4$ км; для **III ТРГВ** – $ВНГО > 200$ м, $4 < МДВ \leq 10$ км [5].

МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТА (ОРИЕНТИРА) У ЗЕМЛИ

Математическая модель построена на зависимостях фокусного расстояния ОЭДВ и фокусного расстояния глаза оператора БВС.

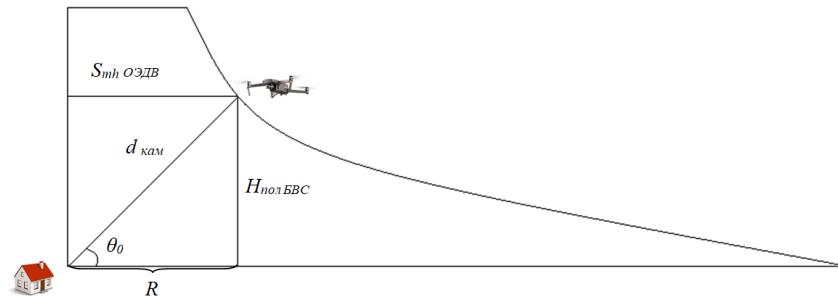


Рис. 1. Определение дальности обнаружения (R) объекта (ориентира) с помощью ОЭС БВС (цифровой камеры).

Составлено авторами.

Как видно из рисунка 1, горизонтальная ОЭДВ ($S_{mh \text{ ОЭДВ}}$) на высоте полета равна:

$$S_{mh \text{ ОЭДВ}} = \frac{H_{\text{полБВС}}}{\text{tg} \theta}, \quad (1)$$

где $H_{\text{полБВС}}$ — высота полёта беспилотного воздушного судна.

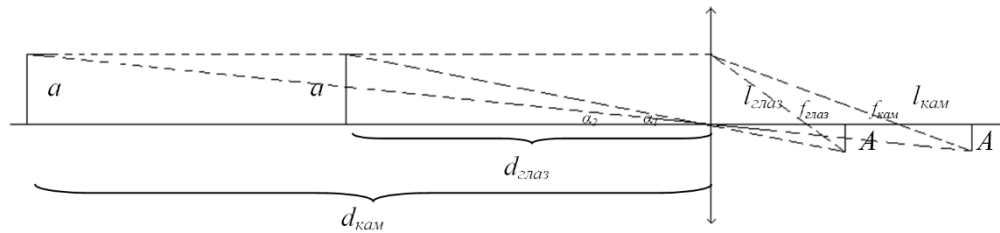


Рис. 2. Определение соотношения расстояний до объекта и фокусов цифровой камеры и человеческого глаза.

Составлено авторами.

**МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТА (ОРИЕНТИРА) У ЗЕМЛИ ПО ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННОЙ ВИДИМОСТИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Из формулы тонкой линзы (2) [1,3,4] и рис. 2 (используется для объяснения правил построения изображений) следует, что:

$$\frac{1}{f_{\text{глаз}}} = \frac{1}{d_{\text{глаз}}} + \frac{1}{l_{\text{глаз}}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{глаз}}$ — фокусное расстояние глаза (м), $d_{\text{глаз}}$ — расстояние от предмета до глаза (м), $l_{\text{глаз}}$ — расстояние от изображения до глаза (м).

$$a = d_{\text{глаз}} \cdot \text{tg}\alpha_1 \quad (3)$$

$$d_{\text{глаз}} = \frac{a}{\text{tg}\alpha_1} \quad (4)$$

$$A = l_{\text{глаз}} \cdot \text{tg}\alpha_1 \quad (5)$$

$$l_{\text{глаз}} = \frac{A}{\text{tg}\alpha_1} \quad (6)$$

$$\frac{1}{f_{\text{кам}}} = \frac{1}{d_{\text{кам}}} + \frac{1}{l_{\text{кам}}}, \quad (7)$$

где $f_{\text{кам}}$ — фокусное расстояние камеры (м), $d_{\text{кам}}$ — расстояние от предмета до камеры (м), $l_{\text{кам}}$ — расстояние от изображения до камеры (м).

$$a = d_{\text{кам}} \cdot \text{tg}\alpha_2 \quad (8)$$

$$d_{\text{кам}} = \frac{a}{\text{tg}\alpha_2} \quad (9)$$

$$A = l_{\text{кам}} \cdot \text{tg}\alpha_2 \quad (10)$$

$$l_{\text{кам}} = \frac{A}{\text{tg}\alpha_2} \quad (11)$$

$$\frac{1}{f_{\text{глаз}}} = \frac{1}{d_{\text{глаз}}} + \frac{\text{tg}\alpha_1}{A} = \frac{A + d_{\text{глаз}} \cdot \text{tg}\alpha_1}{d_{\text{глаз}} \cdot A} = \frac{A + \frac{a}{\text{tg}\alpha_1} \cdot \text{tg}\alpha_1}{d_{\text{глаз}} \cdot A} = \frac{A + a}{d_{\text{глаз}} \cdot A} \quad (12)$$

$$\frac{1}{f_{\text{кам}}} = \frac{1}{d_{\text{кам}}} + \frac{\text{tg}\alpha_2}{A} = \frac{A + d_{\text{кам}} \cdot \text{tg}\alpha_2}{d_{\text{кам}} \cdot A} = \frac{A + \frac{a}{d_{\text{кам}}} \cdot \text{tg}\alpha_2}{d_{\text{кам}} \cdot A} = \frac{A + a}{d_{\text{кам}} \cdot A} \quad (13)$$

Для человеческого глаза:

$$d_{\text{глаз}} = f_{\text{глаз}} \frac{A + a}{A} \quad (14)$$

Для камеры:

$$d_{\text{кам}} = f_{\text{кам}} \frac{A + a}{A} \quad (15)$$

Построение модели восстановления МОД₀ у земли основано на коэффициенте перехода от ОЭДВ к видимости человеческим глазом в зависимости от фокусного расстояния, который вычисляется по формуле:

$$C = \frac{d_{\text{глаз}}}{d_{\text{кам}}} = \frac{f_{\text{глаз}}}{f_{\text{кам}}}, \quad (16)$$

где $f_{\text{кам}}$ — фокусное расстояние камеры БВС, м; $f_{\text{глаз}}$ — фокусное расстояние человеческого глаза, м ($f_{\text{глаз}} = 0,024$ м) [6].

Следовательно, горизонтальная видимость S_{mh0} на высоте полета будет иметь вид:

$$S_{mh_0} = C \cdot S_{mh\text{ОЭДВ}} \quad (17)$$

где $S_{mh\text{ОЭДВ}}$ — оптико-электронная дальность видимости на высоте полёта беспилотного воздушного судна.

МОД₀ у земли в зависимости от ТРГВ под облаками рассчитывается по формулам 4–6 [3, 5]:

для I ТРГВ:

$$\text{МОД}_0 = \frac{S_{mh} \text{ВНГО}^2 - 1,5 \cdot S_{mh} \cdot H_{\text{полБВС}}^2 + 0,5 \cdot S_{mh} \cdot \text{ВНГО} \cdot H_{\text{полБВС}}}{\text{ВНГО}^2 + 0,24 \cdot H_{\text{полБВС}}^2 - 1,24 \cdot \text{ВНГО} \cdot H_{\text{полБВС}}} \quad (18)$$

для II ТРГВ:

МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТА (ОРИЕНТИРА) У ЗЕМЛИ ПО ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННОЙ ВИДИМОСТИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

$$МОД_0 = \frac{S_{mh} \cdot ВНГО^2 - 4 \cdot S_{mh} \cdot H_{пол\ БВС}^2 + 3 \cdot S_{mh} \cdot ВНГО \cdot H_{пол\ БВС}}{ВНГО^2 - 0,84 \cdot H_{пол\ БВС}^2 - 0,16 \cdot ВНГО \cdot H_{пол\ БВС}} \quad (19)$$

для III ТРГВ:

$$МОД_0 = S_{mh_0} \cdot \quad (20)$$

Результаты расчетов $МОД_0$ в зависимости от ОЭДВ на высоте полета БВС по математической модели в качестве примера представлены на рис. 3–5.

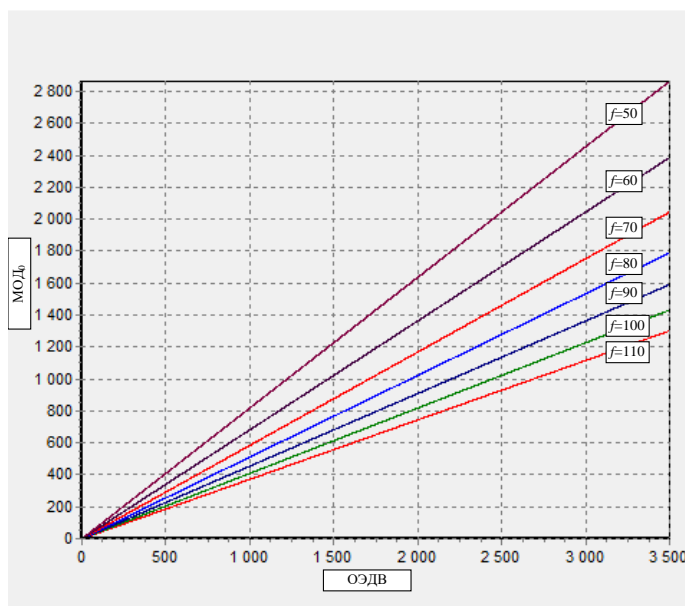


Рис. 3. Зависимость $МОД_0$ у земли от ОЭДВ камер с различными фокусными расстояниями f , установленными на БВС квадрокоптерного типа в I ТРГВ ($R = 1000$ м, $H_{пол\ БВС} = 50$ м).

Составлено авторами.

Анализ рисунков 3–5 показывает, что наибольшие значения $МОД_0$ наблюдаются при наименьшем фокусном расстоянии камеры БВС ($f = 50$ мм). А наименьшие значения при $f = 110$ мм при одинаковых расстояниях ($R = 1000$ м) до объекта и высоте полета ($H_{пол\ БВС} = 50$ м) для всех типов ТРГВ.

В различных ТРДВ при одинаковых фокусных расстояниях f камеры БВС $МОД_0$ различны. Наименьшие значения наблюдаются в I ТРГВ, а наибольшие — в III ТРГВ, что не противоречит и согласуется с исследованиями [3, 4, 5, 6].

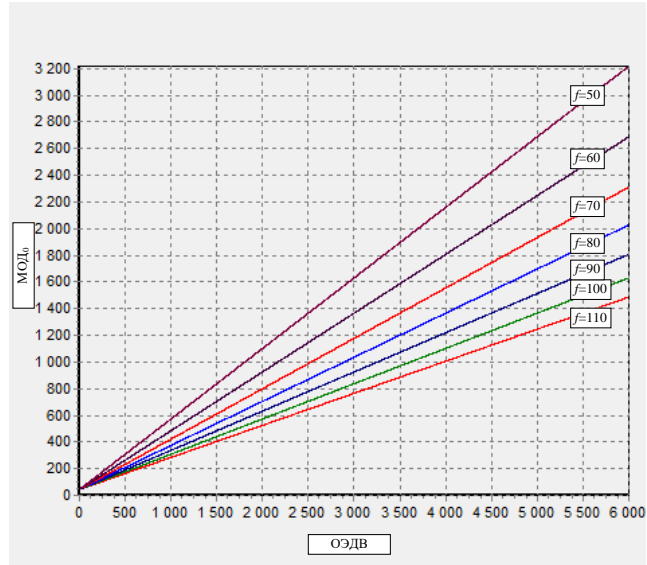


Рис. 4. Зависимость $МОД_0$ у земли от ОЭДВ камер с различными фокусными расстояниями f , установленными на БВС квадрокоптерного типа во II ТРГВ ($R = 1000$ м, $H_{пол\ БВС} = 50$ м).

Составлено авторами.

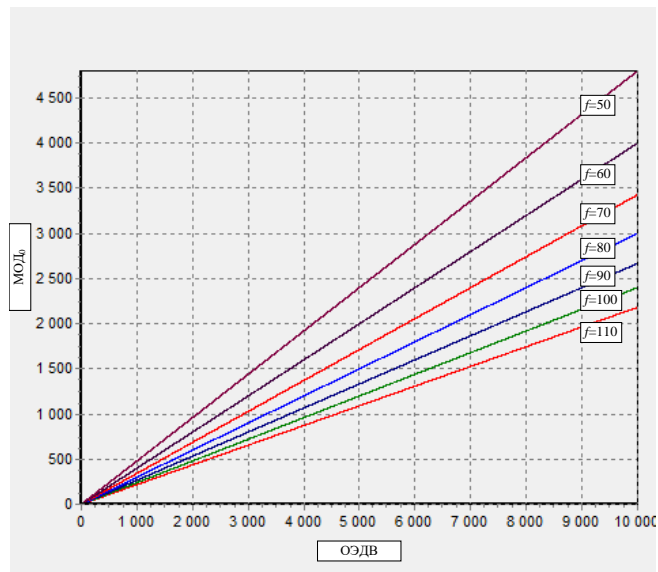


Рис. 5. Зависимость $МОД_0$ у земли от ОЭДВ камер с различными фокусными расстояниями f , установленными на БВС квадрокоптерного типа в III ТРГВ ($R = 1000$ м, $H_{пол\ БВС} = 50$ м).

Составлено авторами.

МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТА (ОРИЕНТИРА) У ЗЕМЛИ ПО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ВИДИМОСТИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Оценка достоверности модели восстановления значений $МОД_0$ проведена по полетному эксперименту, который проводился на базе ВУНЦ ВВС «ВВА» в ноябре 2022 года. Тип БВС: квадрокоптер DJI Mavic 2 pro, фокусное расстояние камеры составляет 28 мм ($C = 0,86$).

Эксперимент проходил по следующему алгоритму:

1. Определение $ВНГО_{ОЭДВ}$ (взлет БВС над точкой, камера направлена под углом 90° , осуществляли подъем до высоты, когда изображение объекта под БВС будет «туманиться» рис. 6).



Рис. 6. Определение $ВНГО_{ОЭДВ}$

2. Пересчет значений $ВНГО_{ОЭДВ}$ для видимости человеческим глазом:

$$ВНГО = C \cdot ВНГО_{ОЭДВ} \quad (21)$$

где C – фокусное расстояние глаза.

3. Снижение на высоту поиска объекта (ориентира).

4. Проведение поиска и опознания выбранного для оценки $МОД_0$ объекта (ориентира).

5. Полет назад на текущей высоте до тех пор, пока объект (ориентир) не начнет «туманиться», определение угла визирования камеры.

6. Расчет $МОД_0$ у земли по построенной модели и сравнение полученных значений с видимостью у земли.

В представленном эксперименте результат прямого измерения $ВНГО$ составил: $ВНГО = 124 \pm 2$ м; $H_{пол\ БВС} = 54 \pm 1$ м; угла визирования камеры $\theta_0 = 4,4 \pm 0,9^\circ$ при $\alpha = 0,95$. Число измерений параметров — 5. Коэффициент Стьюдента составил 2,8. Число степеней свободы — 4.



Рис. 7. ОЭДВ объекта (ориентира) на высоте поиска

Результат косвенного измерения $S_{mh\text{ ОЭДВ}} = 771 \pm 14$ м при $\varepsilon = 10\%$.

Для оценки успешности методики расчета используются следующие критерии [3]:

1. Коэффициент корреляции между рассчитанными и фактическими значениями $МОД_0$ (при $r = 1$ наблюдается функциональная зависимость, при $r = 0$ — связи нет, $r > 0,5$ — значимый коэффициент):

$$r = \frac{(\overline{\vartheta_p - \vartheta_p})(\overline{\vartheta_\phi - \vartheta_\phi})}{\sqrt{(\overline{\vartheta_p - \vartheta_p})^2} \sqrt{(\overline{\vartheta_\phi - \vartheta_\phi})^2}}, \quad (22)$$

где ϑ_p и ϑ_ϕ — расчетное и фактическое значения элемента ϑ , $\overline{\vartheta_p}$ и $\overline{\vartheta_\phi}$ — соответствующие средние значения.

2. Средняя абсолютная η или средняя квадратическая σ ошибки расчета. Эти ошибки рассчитываются по формулам:

$$\eta = |\overline{\vartheta_p - \vartheta_\phi}|, \quad (23)$$

$$\sigma = \sqrt{(\overline{\vartheta_p - \vartheta_\phi})^2}. \quad (24)$$

Длина выборки фактических и рассчитанных значений $МОД_0$ составила 120 случаев, а контрольной — 60 случаев при $\alpha = 0,95$ для I–III ТРВД.

Значения критериев успешности модели восстановления $МОД_0$ у земли по данным летного эксперимента для I–III ТРВД представлены в таблице 1.

МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТА (ОРИЕНТИРА) У ЗЕМЛИ ПО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ВИДИМОСТИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Таблица 1.

Значения критериев успешности (r — коэффициент корреляции между измеренным и расчетным значением, σ — средняя квадратическая ошибка, η — средняя абсолютная ошибка) модели восстановления МОД₀ у земли (по данным летного эксперимента)

Модель восстановления МОД ₀ у земли	Критерии успешности								
	I ТРВД			II ТРВД			III ТРВД		
	r	σ	η	r	σ	η	r	σ	η
	0,96	98,3	77,2	0,94	108,4	86,7	0,90	288,6	229,8

Составлено авторами.

Значения критериев успешности показывают на возможность использования построенной модели для восстановления МОД₀ у земли [3].

ВЫВОДЫ

Таким образом, модель восстановления МОД₀ у земли, базирующаяся на теории негоризонтальной видимости, отличается от существующих использованием преобразованных данных ОЭС БВС и позволяет определить тип вертикального распределения видимости, ВНГО и МОД₀ у земли.

Перспективным направлением применения модели восстановления МОД₀ у земли является построение модели видимости объектов наземной поверхности с учетом высоты и скорости полета ВС, линейных размеров, яркостного контраста объекта (ориентира).

Список литературы

1. Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Никишков П.Я., Солонин А.С. Видимость для аэронавигации. СПб.:РГГМУ, 2012. 332 с.
2. Временные правила производства полетов беспилотных летательных аппаратов Министерства обороны Российской Федерации. М.: Министерство обороны, 2013. 50 с.
3. Дорофеев В.В., Нахмансон Г.С., Жильчук И.А., Ковалёв В.И. Видимость в атмосфере для авиационных целей. Монография. Воронеж, ВАИУ, 2010, 250 с.
4. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометеиздат, 1988, 216 с
5. Рацимор М.Я. Наклонная видимость. Метод. Пособие для специалистов ГАМЦ, ЗАМЦ, АМЦ и АМСГ. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. 136 с.
6. Horvath H. Atmospheric Visibility. Atmosph. Environ., 1981, v. 15, pp. 11–5.

**MODEL OF RECOVERY OF METEOROLOGICAL OPTICAL VISIBILITY
RANGE OF OBJECT (REFERENCE) NEAR THE GROUND FROM OPTO-
ELECTRONIC VISIBILITY FROM UNMANNED AIRCRAFT**

Dorofeev V. V.¹, Nasonov A. A.², Stepanov A. V.³

*^{1,2,3}Military Training and Research Center of the Air Force " Air Force Academy named after
Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin»
E-mail: ³alexeynasonov@list.ru*

Currently, unmanned aerial vehicles (UAVs) are aerial reconnaissance means for detecting objects (landmarks) on the earth's surface. Used optoelectronic system (OES) (digital camera) BVS allows you to detect and identify objects (landmarks) located on the ground. However, it is impossible to estimate the meteorological optical range (MOD0) of visibility of an object (landmark) in the horizontal direction near the ground from a digital image using various lenses.

Since MOD0 is not related to the visual observation of any objects, but depends only on the transparency of the atmosphere (attenuation index), it is applicable at any time of the day to assess the transparency of the atmosphere and calculate the visibility range of real objects in the horizontal direction.

The use of UA to estimate MOD0 is currently not possible due to the contradiction between the visibility of the object (landmark) on the ground and the optical-electronic range of visibility (OERD) of the object (landmark).

The contradiction requires solving the scientific problem of identifying the relationship between the MOD0 of an object (landmark) on the ground and the UAE GEEF.

Therefore, the purpose of the article is to build a mathematical model for calculating the MOD0 of an object (landmark) near the ground using the information of the OES obtained from the UA for various types of horizontal visibility distribution with height (TRGV) at $W=0$ (zero ground speed of the quadcopter type UA during hovering in the air).

The mathematical model is built on the dependences of the focal length of the OEDE and the focal length of the eye of the UA operator.

The construction of the MOD0 reconstruction model at the ground is based on the conversion factor (C) from EDV to visibility with the human eye, depending on the focal length.

In different turbojet engines with the same focal lengths f , the cameras of the BVS MOD0 are different. The smallest values are observed in TRGV I, and the largest values are observed in TRGV III, which does not contradict and is consistent with studies.

The assessment of the reliability of the model for restoring the values of MOD0 was carried out on the basis of a flight experiment, which was carried out on the basis of the VUNC Air Force "VVA" in November 2022.

The MOD0 recovery model near the ground, based on the theory of non-horizontal visibility, differs from the existing ones by using the converted data of the UES OES and allows you to determine the type of vertical visibility distribution, VNGO and MOD0 near the ground.

МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТА (ОРИЕНТИРА) У ЗЕМЛИ ПО ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННОЙ ВИДИМОСТИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Keywords: meteorological optical range of visibility, unmanned aerial vehicle, optical-electronic system, type of horizontal visibility distribution with height.

References

1. Bazlova T.A., Bocharnikov N.V., Nikishkov P.YA., Solonin A.S. Vidimost' dlya aeronavigacii. SPb.: RGGMU, 2012. 332 p.
2. Vremennye pravila proizvodstva poletov bespilotnyh letatel'nyh apparatov Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii. M.: Ministerstvo oborony, 2013. 50 p.
3. Dorofeev V.V., Nahmanson G.S., ZHil'chuk I.A., Kovalyov V.I. Vidimost' v atmosfere dlya aviacionnyh celej. Monografiya. Voronezh, VAIU, 2010, 250 p.
4. Kovalev V.A. Vidimost' v atmosfere i ee opredelenie. L.: Gidrometeoizdat, 1988, 216 p.
5. Racimor M.YA. Naklonnaya vidimost'. Metod. Posobie dlya specialistov GAMC, ZAMC, AMC i AMSG. – L.: Gidrometeoizdat, 1987. 136 p.
6. Horvath H. Atmospheric Visibility. Atmosph. Environ., 1981, v. 15, pp. 11–5.

Поступила в редакцию 25.05.2023 г.