



Серия «Науки о Земле»  
2025. Т. 51. С. 80–90  
Онлайн-доступ к журналу:  
<http://izvestiameo.isu.ru/ru>

---

---

ИЗВЕСТИЯ  
Иркутского  
государственного  
университета

---

---

Научная статья

УДК 551.501

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.80>

## Методика расчета видимости у поверхности земли над равнинной местностью с учетом физико-географических условий

А. В. Степанов\*

*Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,  
г. Воронеж, Россия*

**Аннотация.** Отмечается необходимость разработки методики расчета видимости у поверхности земли над равнинной местностью с учетом характера подстилающей поверхности по данным нефелометров, установленных на автоматических дорожных метеорологических станциях, видеокамер и беспилотных воздушных судов с целью повышения эффективности, а также безопасности выполнения полетов межрегиональной авиации. Показывается важность решения задачи по восстановлению горизонтальной видимости у поверхности земли путем использования автоматических дорожных метеорологических станций, установленных вдоль автомобильных дорог и трасс, цифровых видеокамер, позволяющих получать информацию, принимаемую с беспилотных воздушных судов. Рассматриваются методики расчета и результаты. Делается вывод, что методика расчета видимости у поверхности земли позволяет учитывать влияние изменения рельефа равнинной местности, характера подстилающей поверхности, времени года, пространственно-временной изменчивости видимости у поверхности земли в различных типовых синоптических ситуациях. В случае использования цифровых видеокамер оценка видимости ориентиров производится при помощи оптико-электронной дальности видимости.

**Ключевые слова:** видимость у поверхности земли, метеорологическая оптическая дальность, относительное превышение рельефа, оптико-электронная дальность видимости.

---

**Для цитирования:** Степанов А. В. Методика расчета видимости у поверхности земли над равнинной местностью с учетом физико-географических условий // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 51. С. 80–90. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.80>

---

Original article

## Methodology for Calculating Visibility at the Surface of the Earth over Flat Terrain, Taking into Account Physical and Geographical Conditions

A. V. Stepanov\*

*Air Force Academy Named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, Voronezh,  
Russian Federation*

**Abstract.** It is noted that there is a need to develop a methodology for calculating visibility at the earth's surface over flat terrain, taking into account the nature of the underlying surface, based on data

---

© Степанов А. В., 2025

\* Полные сведения об авторе см. на последней странице статьи.  
For complete information about the author, see the last page of the article.

from nephelometers installed at automatic road meteorological stations, video cameras and unmanned aerial vehicles in order to improve the efficiency and safety of interregional aviation flights. The importance of solving the problem of restoring horizontal visibility at the earth's surface by using automatic road meteorological stations installed along highways and routes, digital video cameras that allow receiving information received from unmanned aerial vehicles is shown. Calculation methods and results are considered. It is concluded that the method for calculating visibility at the earth's surface allows one to take into account the influence of changes in the relief of flat terrain, the nature of the underlying surface, the time of year, and the spatial and temporal variability of visibility at the earth's surface in various typical synoptic situations. In the case of using digital video cameras, the visibility of landmarks is assessed using optical-electronic visibility range.

**Keywords:** visibility at the surface of the earth, meteorological optical range, relative elevation of relief, optical-electronic visibility range.

---

**For citation:** Stepanov A.V. Methodology for Calculating Visibility at the Surface of the Earth over Flat Terrain, Taking into Account Physical and Geographical Conditions. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 51, pp. 80-90. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.80> (in Russian)

---

## Введение

Физико-географические условия оказывают существенное влияние на безопасность, регулярность и эффективность полетов межрегиональной авиации на территории Российской Федерации, выполняемых на местных воздушных линиях (МВЛ), при проведении авиационных работ (АР) и в чрезвычайных ситуациях (ЧС) при выполнении поиска терпящих бедствие людей.

Возможность выполнения полетов под низкими облаками с привязкой к наземным ориентирам оценивается по видимости у поверхности земли, зависящей от высоты рельефа местности над уровнем моря и подстилающей поверхности в дневное время суток [Полетная видимость, 2013; Рацимор, 1987].

При этом возникает противоречие между требованиями, необходимыми для оценки видимости у поверхности земли на маршрутах МВЛ, в районах АР, ЧС и существующим научным аппаратом ее расчета, учитывающим высоту рельефа местности над уровнем моря и подстилающую поверхность в случае недостатка метеорологической информации [Полетная видимость, 2013].

Для разрешения противоречия необходимо разработать методику расчета видимости у поверхности земли с учетом физико-географических условий в случае, когда будет наблюдаться недостаток метеорологической информации [Полетная видимость, 2013; Шталь, 1962].

Поэтому целью работы является повышение эффективности, а также безопасности выполнения полетов межрегиональной авиации путем разработки методики расчета видимости у поверхности земли над равнинной местностью с учетом характера подстилающей поверхности по данным нефелометров, установленных на автоматических дорожных метеорологических станциях, видеокамер и беспилотных воздушных судов (БВС) в дневное время суток.

Для достижения цели необходимо решить задачу по восстановлению горизонтальной видимости у поверхности земли путем использования автоматических дорожных метеорологических станций («Кондор», «Иней»), установленных вдоль автомобильных дорог и трасс и позволяющих получать ряд метеорологических параметров, таких как температуру, температуру точки

росы и влажности воздуха, направление, скорость и порывы ветра, а также информацию о метеорологической оптической дальности ( $МОД_0$ ), которая интерпретируется как видимость у поверхности земли в дневное время суток [Horvath, 1981; Hansen, 2007; Vislocky, Fritsch, 1997].

Также для получения информации о видимости у поверхности земли можно использовать цифровые видеокамеры, позволяющие при помощи оптико-электронной дальности видимости (ОЭДВ) производить оценку видимости ориентиров-маркеров в дневное время суток [Jacobs, Maat, 2005].

В случае отсутствия всех вышеперечисленных средств для обеспечения полетов межрегиональной авиации в метеорологическом отношении возможно использование визуальной информации, получаемой с БВС.

### Методика расчета и результаты

1. При наличии данных о  $МОД_0$ , полученных с нефелометров, установленных на автоматических дорожных метеорологических станциях, расчет изменения видимости у поверхности земли над равнинной местностью ( $\Delta МОД_0$ ) производится по формуле:

$$\Delta МОД_0 = \pm d \cdot \Delta h, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – относительное изменение высоты рельефа равнинной местности, м;  $d$  – коэффициент, зависящий от типовой синоптической ситуации (ТСС).

Коэффициенты  $d$  в качестве примера для различных ТСС циклона (Zп) представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Влияние изменения высоты рельефа местности на  $МОД_0$  в различных ТСС Zп

ТСС Zп	Коэффициент $d$ для расчета $\Delta МОД_0$ в циклоне							
	Имеются лес и река		Леса и реки нет		Имеется лес, отсутствует река		Имеется река, отсутствует лес	
	Зима	Перех. период	Зима	Перех. период	Зима	Перех. период	Зима	Перех. период
Передняя часть Zп	9,2	11,2	7,7	9,7	8,6	10,2	5,2	9,3
Теплый сектор Zп	7,7	10,5	5,1	8,2	7,3	9,1	4,7	8,8
Центр Zп	7,3	10,1	4,8	7,8	6,7	8,9	4,3	8,6
Тыл Zп	11,2	12,4	10,1	12,1	10,2	11,8	8,4	10,6

Анализ табл. 1 показывает, что  $\Delta МОД_0$  наиболее подвержена изменению в переходный период в тылу Zп, когда имеется лес и река ( $d = 12,4$ ). Наименьшие изменения  $\Delta МОД_0$  – в центре Zп в зимний период, когда имеется река и отсутствует лесная растительность ( $d = 4,3$ ).

В табл. 2 представлен расчет достоверности изменения  $\Delta МОД_0$  в зависимости от изменения высоты рельефа местности в различных ТСС Zп по коэффициенту корреляции ( $r$ ), средней квадратической ( $\sigma$ ) и средней абсолютной ошибки ( $\eta$ ).

Таблица 2

Достоверность изменения  $\Delta МОД_0$  в зависимости от изменения высоты рельефа местности в различных ТСС Zn

ТСС Zn	В радиусе = 50 км			В радиусе = 100 км			В радиусе = 150 км		
	$r$	$\sigma$	$\eta$	$r$	$\sigma$	$\eta$	$r$	$\sigma$	$\eta$
Передняя часть Zn	0,83	260,2	208,1	0,77	272,5	217,6	0,74	296,4	236,8
Теплый сектор Zn	0,85	233,2	186,4	0,81	237,4	189,7	0,78	242,3	193,8
Центр Zn	0,87	200,2	159,3	0,82	223,4	178,4	0,79	238,5	191,1
Тыл Zn	0,79	315,6	252,5	0,75	331,3	265,4	0,71	351,3	281,4

Оценка достоверности позволяет сделать вывод, что с увеличением расстояния от исходного пункта производства измерений параметров атмосферы значения критериев успешности ухудшаются ( $r$  изменяется от 0,87 до 0,79 для центра Zn) [Reid, 1978; Исаев, 1988; Ковалев, 1988; Wilks, 2006].

При этом данную методику возможно использовать для расчета изменения  $\Delta МОД_0$  на расстоянии до 150 км от места установки нефелометра в дневное время суток [Полетная видимость, 2013; Hastie, Tibshirani, Friedman, 2001].

2. При отсутствии нефелометров на автоматических дорожных метеорологических станциях расчет  $МОД_0$  производится по уравнению:

$$МОД_0 = b_0 + b_1 \cdot h_{ум} + b_2 \cdot t + b_3 \cdot t_d + b_4 \cdot ff, \quad (2)$$

где  $h_{ум}$  – значение высоты рельефа над уровнем моря, м;  $t$  и  $t_d$  – температура воздуха и точки росы, °C;  $ff$  – скорость ветра в различных ТСС Zn, м/с.

Значения коэффициентов уравнения  $b_0 \dots b_4$  для различных ТСС Zn, когда имеются лес и река, в качестве примера приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты ( $b_0 \dots b_4$ ) для расчета  $МОД_0$  в различных ТСС Zn в зимний период (имеются лес и река)

ТСС Zn	Коэффициенты для расчета $МОД_0$				
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
Передняя часть Zn	2942	-7,4	60,1	58,2	109,4
Теплый сектор Zn	1832	-5,1	58,4	56,1	104,7
Центр Zn	1885	-5,3	57,8	55,8	104,2
Тыл Zn	3253	-9,2	72,3	70,2	112,8

Оценка достоверности расчета  $МОД_0$  была проведена по контрольной выборке, полученной по Московской, Липецкой и Воронежской областям с 2017 по 2022 г. (табл. 4) [Reid, 1978; Исаев, 1988; Ковалев, 1988; Wilks, 2006].

Оценка достоверности расчета  $МОД_0$  позволяет использовать полученную методику на расстоянии до 150 км от места установки автоматических дорожных метеорологических станций при отсутствии на них нефелометров в дневное время суток [Полетная видимость, 2013; Hastie, Tibshirani, Friedman, 2001].

Таблица 4

Достоверность расчета  $МОД_0$  в различных ТСС  $Z_n$  в зимний период (имеются лес и река) на расстоянии до 150 км

ТСС $Z_n$	Критерии успешности		
	$r$	$\sigma$	$\eta$
Передняя часть $Z_n$	0,88	256,3	204,8
Теплый сектор $Z_n$	0,92	171,4	137,4
Центр $Z_n$	0,93	191,4	153,1
Тыл $Z_n$	0,87	305,4	244,2

3. Для оценки видимости в исходном пункте производства измерений возможно использовать значения ОЭДВ ориентиров-маркеров по цифровым видекамерам, установленным вдоль автомобильных дорог и трасс в дневное время суток [Jacobs, Maat, 2005].

Оценка  $МОД_0$  основана на переходе от ОЭДВ к видимости, которую оценивает наблюдатель при помощи зрения в зависимости от фокусного расстояния цифровых видекамер. Коэффициент вычисляется по формуле:

$$C = \frac{f_{\text{глаз}}}{f_{\text{кам}}}, \quad (3)$$

где  $f_{\text{кам}}$  – фокусное расстояние цифровой камеры, м;  $f_{\text{глаз}}$  – фокусное расстояние глаза наблюдателя, м ( $f_{\text{глаз}} = 0,024$  м при зрении, равном 1).

Результаты расчетов  $МОД_0$  в зависимости от ОЭДВ в качестве примера представлены на рис. 1.

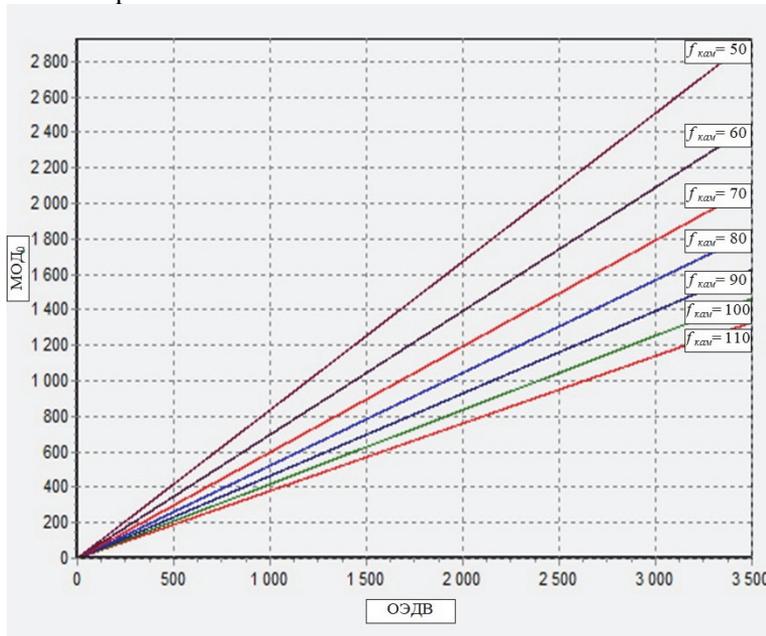


Рис. 1. Зависимость  $МОД_0$  от ОЭДВ видекамер с различными  $f_{\text{кам}}$ , установленных вдоль автомобильных дорог и трасс

Анализ рис. 1 показывает, что чем меньше фокусное расстояние цифровых камер, установленных вдоль автомобильных дорог и трасс, тем больше значения  $МОД_0$  и наоборот. Наибольшие значения наблюдаются при  $f_{кам} = 50$  мм, а наименьшие – при  $f_{кам} = 110$  мм.

Достоверность методики расчета  $МОД_0$  в зависимости от ОЭДВ цифровых видеокамер представлена в табл. 5 [Reid, 1978; Ковалев, 1988; Wilks, 2006].

Таблица 5

Достоверность методики расчета  $МОД_0$  по ОЭДВ цифровых видеокамер

Методика расчета $МОД_0$ по ОЭДВ	r	σ	η
	0,95	98,8	79,1

Значения критериев, по которым оценивается достоверность, позволяют сделать вывод о возможности использования методики расчета  $МОД_0$  по ОЭДВ видеокамер с различными  $f$  в дневное время суток [Reid, 1978; Исаев, 1988; Ковалев, 1988; Wilks, 2006].

4. С использованием БВС оценка  $МОД_0$  производится по следующему алгоритму.

Видимость в горизонтальном направлении ( $S_{mh}$ ) на высоте полета БВС ( $H_{пол БВС}$ ) будет иметь вид:

$$S_{mh} = C \cdot \frac{H_{пол БВС}}{tg\theta_0}, \tag{4}$$

где  $\theta_0$  – угол позиционирования цифровой видеокамеры БВС, °, представленный на рис. 2.

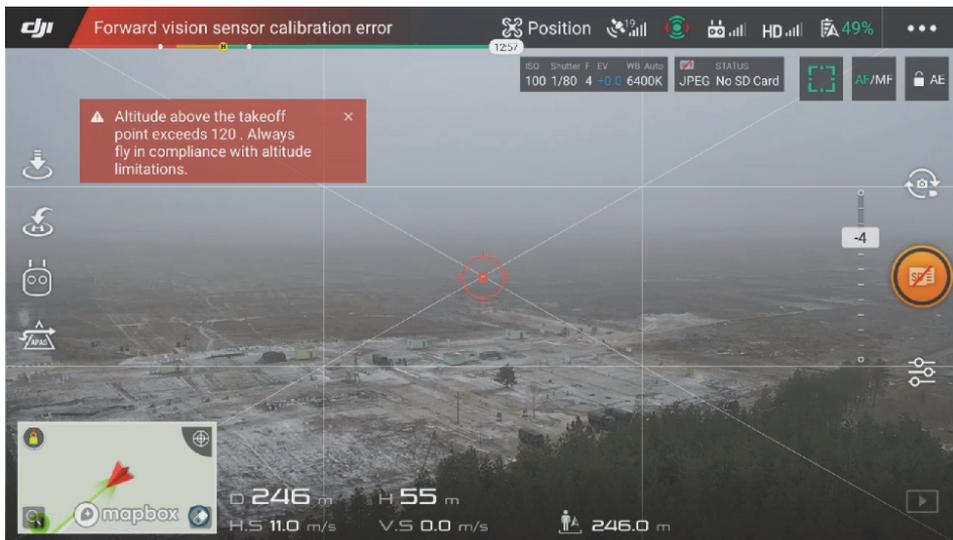


Рис. 2. Позиционирование цифровой видеокамеры БВС на  $H_{пол БВС}$

$МОД_0$  в зависимости от типа распределения горизонтальной видимости (ТРГВ) под низкими облаками рассчитывается по формулам (5)–(7) [Шаронов, 1947; Рацимор, 1987]:

для I ТРГВ:

$$МОД_0 = S_{mh} \frac{H_{ВНГО}^2 - 120 \cdot H_{пол\ БВС}^2 + 40 \cdot H_{ВНГО} \cdot H_{пол\ БВС}}{H_{ВНГО}^2 + 0,24 \cdot H_{пол\ БВС}^2 - 1,24 \cdot H_{ВНГО} \cdot H_{пол\ БВС}}, \quad (5)$$

для II ТРГВ:

$$МОД_0 = S_{mh} \frac{H_{ВНГО}^2 - 320 \cdot H_{пол\ БВС}^2 + 240 \cdot H_{ВНГО} \cdot H_{пол\ БВС}}{H_{ВНГО}^2 - 0,84 \cdot H_{пол\ БВС}^2 - 0,16 \cdot H_{ВНГО} \cdot H_{пол\ БВС}}, \quad (6)$$

для III ТРГВ:

$$МОД_0 = S_{mh}, \quad (7)$$

где  $H_{ВНГО}$  – высота нижней границы облаков (ВНГО), м.

ТРГВ определяется по ВНГО: для ВНГО I ТРГВ – до 150 м, для II ТРГВ – от 150 до 200 м, для III ТРГВ – свыше 200 м.

Учет влияния пространственной изменчивости  $МОД_0$  в зависимости от изменения высоты рельефа местности для центра Зп зимой при различных  $H_{ВНГО}$  в I ТРГВ [Janjic, 1982] представлен на рис. 3.

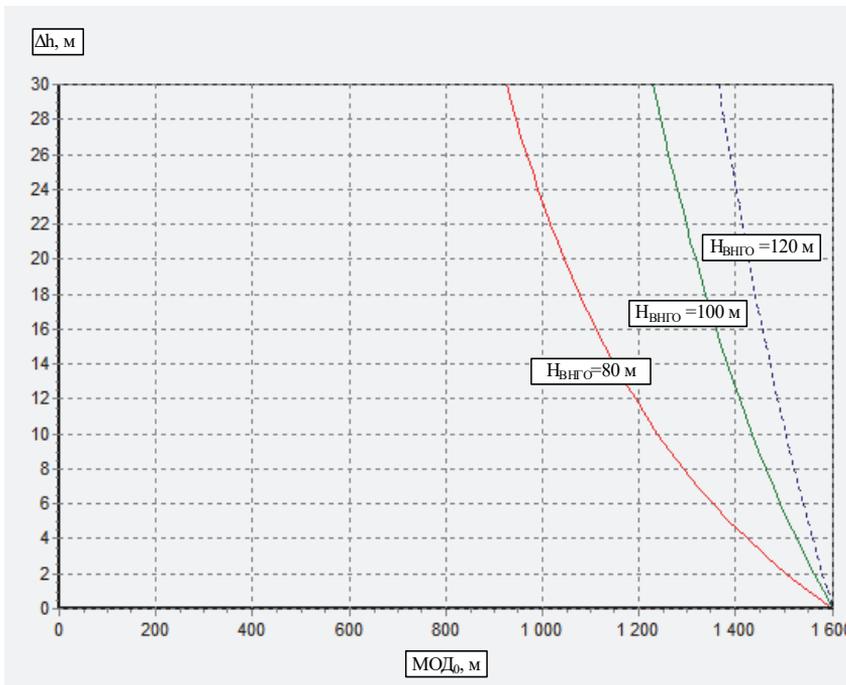


Рис. 3. Зависимость  $МОД_0$  при изменении рельефа равнинной местности для центра Зп зимой при различных  $H_{ВНГО}$  в I ТРГВ ( $H_{пол\ БВС} = 50$  м)

Анализ рис. 3 показывает, что значения  $H_{ВНГО}$  оказывают существенное влияние на значения  $МОД_0$  в зависимости от изменения рельефа равнинной местности в различных ТРГВ и ТСС Zn. При этом чем меньше значения  $H_{ВНГО}$ , тем сильнее изменяется  $МОД_0$ .

Достоверность методики расчета  $МОД_0$  с использованием БВС подтверждена данными летного эксперимента, проведенного в ВУНЦ ВВС «ВВА» для I–III ТРГВ (табл. 6).

Таблица 6

Достоверность методики расчета  $МОД_0$  с использованием БВС

Методика расчета $МОД_0$	I ТРГВ			II ТРГВ			III ТРГВ		
	$r$	$\sigma$	$\eta$	$r$	$\sigma$	$\eta$	$r$	$\sigma$	$\eta$
	0,96	98,3	77,2	0,94	108,4	86,7	0,90	288,6	229,8

Значения критериев, показывающих достоверность полученной методики, позволяют сделать вывод о возможности расчета  $МОД_0$  с использованием визуальной информации, получаемой с БВС в дневное время суток [Reid, 1978; Исаев, 1988; Ковалев, 1988; Wilks, 2006].

Для расчета возможных минимальных и максимальных значений  $МОД_0$  в различных ТСС Zn были получены характеристики временной изменчивости  $МОД_0$ .

Значения характеристик временной изменчивости  $МОД_0$  в ТСС Zn в зимний период в качестве примера представлены в табл. 7.

Таблица 7

Значения характеристик временной изменчивости  $МОД_0$  в ТСС Zn в зимний период

ТСС Zn	Характеристики изменчивости	Время, мин						
		0	30	60	90	120	150	180
Передняя часть Zn	$\overline{МОД_0}$ , м	3500	3600	3800	3700	3600	3500	3600
	$\sigma_{МОД}$ , м	1250	1300	1400	1350	1300	1250	1300
	$c_v$	0,36	0,36	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36
Теплый сектор Zn	$\overline{МОД_0}$ , м	2500	2800	3200	3000	2700	2600	2400
	$\sigma_{МОД}$ , м	810	850	990	970	830	820	810
	$c_v$	0,32	0,30	0,31	0,32	0,31	0,32	0,34
Центр Zn	$\overline{МОД_0}$ , м	2400	2600	3100	2900	2700	2400	2400
	$\sigma_{МОД}$ , м	750	820	980	860	830	810	810
	$c_v$	0,31	0,32	0,32	0,30	0,31	0,34	0,34
Тыл Zn	$\overline{МОД_0}$ , м	5100	4800	4900	5000	5200	5300	5400
	$\sigma_{МОД}$ , м	2400	2250	2200	2350	2450	2400	2450
	$c_v$	0,47	0,47	0,45	0,47	0,47	0,45	0,46

Расчет характеристик временной изменчивости  $МОД_0$  проводился по следующим формулам [Шакина, 1985].

Средние значения  $МОД_0$ :

$$\overline{МОД}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |МОД_i - МОД_0|, \quad (8)$$

где  $МОД_i$  – значение видимости в  $i$ -й момент времени, м;  $МОД_0$  – значение видимости в текущий момент времени, м.

Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{МОД}$ :

$$\sigma_{МОД} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta МОД_i - \Delta \overline{МОД}_0)^2}. \quad (9)$$

Коэффициент изменчивости  $c_v$ :

$$c_v = \frac{\sigma_{МОД}}{\overline{МОД}_0}. \quad (10)$$

Анализ табл. 7 показывает, что наибольшая временная изменчивость наблюдается в тыловой части Zn ( $c_v$  изменяется от 0,45 до 0,47), а наименьшая – в центре и теплом секторе Zn ( $c_v$  изменяется от 0,30 до 0,34).

Используя полученные данные, можно рассчитать предельные максимальные и минимальные значения  $МОД_0$  в различных ТСС [Шакина, 1985].

Согласно требованиям Международной организации гражданской авиации, точность измерений или наблюдений за видимостью для производства полетов на маршрутах МВЛ, в районах АР, ЧС составляет  $\pm 20\%$  от измеренного значения [Шакина, Иванова, 2016]. Разработанные методики расчета видимости у поверхности земли над равнинной местностью с учетом характера подстилающей поверхности в дневное время суток полностью удовлетворяют данному требованию.

### Заключение

Таким образом, разработанная методика расчета видимости у поверхности земли над равнинной местностью для дневного времени суток базируется на регрессионном анализе физической зависимости фокусного расстояния цифровых видеокамер и человеческого глаза, теории негоризонтальной видимости объектов (ориентиров) на земной поверхности и опыта воздушной навигации беспилотных воздушных судов, отличается от уже существующих с учетом физико-географических условий при метеорологическом обеспечении полетов межрегиональной авиации, выполняемых на МВЛ, при проведении АР, в случае возникновения ЧС, когда необходимо выполнение поиска терпящих бедствие людей, и позволяет определить  $МОД_0$  с учетом влияния ее естественной пространственно-временной изменчивости, изменения рельефа равнинной местности, характера подстилающей поверхности, времени года в различных ТСС в дневное время суток.

### Список литературы

Исаев А. А. Статистика в метеорологии и климатологии. М. : Моск. ун-т, 1988. 245 с.

- Ковалев В. А.* Видимость в атмосфере и ее определение. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 216 с. Полетная видимость : монография / В. В. Дорофеев, И. О. Бакланов, И. А. Жильчук [и др.]. Воронеж : ЦНТИ, 2013. 250 с.
- Рацимор М. Я.* Наклонная видимость. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 136 с.
- Шаронов В. В.* Измерение и расчет видимости далеких предметов. М. : Гостехиздат, 1947. 42 с.
- Шакина Н. П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 262 с.
- Шакина Н. П., Иванова А. Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М. : Триада лтд, 2016. 312 с.
- Шталь В. А.* Проблемы авиационной метеорологии. Л. : Гидрометиздат, 1962. 102 с.
- Hansen B.* A fuzzy logic-based analog forecasting system for ceiling and visibility // *Wea. Forecast.* 2007. Vol. 22. P. 1319–1330.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer, 2001. 533 p.
- Horvath H.* Atmospheric Visibility // *Atmosph. Environ.* 1981. Vol. 15. P. 11–15.
- Jacobs A., Maat N.* Numerical guidance methods for decision support in aviation meteorological forecasting // *Wea. Forecast.* 2005. Vol. 20. P. 82–100.
- Janjic Z.* A nonhydrostatic model based on a new approach // *Meteor. Atmos. Phys.* 1982. Vol. 82, N 1. P. 271–285.
- Reid J.* Verification of ceiling and visibility forecasts using the ranked probability score // *Atmos. Ocean.* 1978. Vol. 16. P. 177–186.
- Vislocky R., Fritsch J.* An automated, observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility // *Wea. Forecast.* 1997. Vol. 12. P. 31–43.
- Wilks D.* Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press, 2006. 648 p.

## References

- Isaev A.A. *Statistika v meteorologii i klimatologii*. [Statistics in meteorology and climatology]. Moscow, Moscow University Publ., 1988. 245 p. (in Russian)
- Kovalev V.A. *Vidimost v atmosfere i ee opredelenie* [Visibility in the atmosphere and its determination]. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1988, 216 p. (in Russian)
- Dorofeev V.V., Baklanov I.O., Zhilchuk I.A. et al. *Poletnaya vidimost* [Flight visibility]. Monograph. Voronezh, CNTI Publ., 2013, 250 p. (in Russian)
- Ratsimor M.Ya. *Naklonnaya vidimost* [Inclined visibility]. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1987, 136 p. (in Russian)
- Sharonov V.V. *Izmerenie i raschet vidimosti dalekikh predmetov*. [Measuring and calculating the visibility of distant objects]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1947, 42 p. (in Russian)
- Shakina N.P. *Dinamika atmosfernykh frontov i tsiklonov*. [Dynamics of atmospheric fronts and cyclones]. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1985, 262 p. (in Russian)
- Shakina N.P., Ivanova A.R. *Prognozirovanie meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii*. [Forecasting meteorological conditions for aviation]. Moscow, Triada Ltd Publ., 2016, 312 p. (in Russian)
- Shtal V.A. *Problemy aviatsionnoy meteorologii* [Problems of aviation meteorology]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1962, 102 p. (in Russian)
- Hansen B. A fuzzy logic-based analog forecasting system for ceiling and visibility. *Wea. Forecast.*, 2007, vol. 22, pp. 1319–1330.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. Springer, 2001, 533 p.
- Horvath H. Atmospheric Visibility. *Atmosph. Environ.*, 1981, vol. 15, pp. 11–15.
- Jacobs A., Maat N. Numerical guidance methods for decision support in aviation meteorological forecasting. *Wea. Forecast.*, 2005, vol. 20. pp. 82–100.
- Janjic Z. A nonhydrostatic model based on a new approach. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1982, vol. 82, no. 1, pp. 271–285.
- Reid J. Verification of ceiling and visibility forecasts using the ranked probability score. *Atmos. Ocean*, 1978, vol. 16. pp. 177–186.

Vislocky R.L., Fritsch J.M. An automated, observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility. *Wea. Forecast.*, 1997, vol. 12. pp. 31-43.

Wilks D. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press, 2006. 648 p.

#### Сведения об авторе

**Степанов Алексей Владимирович**

кандидат географических наук,  
докторант

Военно-воздушная академия им. профессора

Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина

394064, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков,

54а

e-mail: step\_al@mail.ru

#### Information about the author

**Stepanov Alexey Vladimirovich**

Candidate of Sciences (Geography),

Doctoral Student

Air Force Academy Named after Professor

N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin

54a, St. Bolshevikov st., Voronezh, 394064,

Russian Federation

e-mail: step\_al@mail.ru

Код научной специальности: **1.6.18**

Статья поступила в редакцию **12.08.2024**; одобрена после рецензирования **14.02.2025**; принята к публикации **10.03.2025**

The article was submitted **August, 12, 2024**; approved after reviewing **February, 14, 2025**; accepted for publication **March, 10, 2025**