

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ВОЗДУШНОЙ НАВИГАЦИИ В ТЕМНОЕ ВРЕМЯ СУТОК

В. В. Дорофеев, В. И. Ковалев, В. В. Аристов

Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 01.02.2010 г.

Аннотация. В работе излагаются основные направления и предлагается метод определения наклонной полётной дальности видимости самосветящихся и несамосветящихся ориентиров в тёмное время суток

Ключевые слова: воздушная навигация, дальность видимости, ночь.

Abstract. In work are stated main trends and is offered method of the determination to tilted flight range to visibility selfluminous and not selfluminous landmark at dark time of the day.

Key words. Air navigation, visibility range, night.

Обеспечение безопасности визуальных полетов авиации на малых и предельно малых высотах в темное время суток, выполняемых по правилам визуальных полетов (ПВП), зависит от многих факторов обусловленных внешней средой, среди которых, значительную роль играет наклонная полетная дальность видимости (НПДВ).

При рассмотрении дальности видимости в темное время суток различают два вида задач: определение дальности видимости несамосветящихся объектов и определение дальности видимости самосветящихся объектов [1].

Задача определения НПДВ самосветящихся и несамосветящихся ориентиров, для обеспечения визуальных полетов в темное время суток, до сих пор не решена. Она особенно актуальна в современных условиях, в связи с развитием авиации общего назначения, летающей по ПВП, и особенно для полетов военной авиации [2].

Для оценки возможности выполнения визуальных полетов в темное время суток необходима фактическая и прогностическая информация не только о высоте нижней границы облаков (ВНГО) и метеорологической дальности видимости (МДВ), а прежде всего о НПДВ самосветящихся и несамосветящихся ориентиров (объектов) [3].

В настоящее время отсутствуют средства измерения и надежные методики, позволяющие оценивать НПДВ в темное время суток. Это

связано с тем, что реальная горизонтальная дальность видимости (РГДВ) и НПДВ, в отличие от дневных условий, в основном зависит от естественной освещенности объекта и ландшафта местности, на которую проецируется ориентир. Прозрачность атмосферы (выраженная через МДВ или метеорологическую оптическую дальность видимости (МОДВ), которые определяются метеослужбой) играет второстепенную роль. Естественная освещенность зависит от фазы Луны, количества баллов и плотности облачности. Поэтому при определении НПДВ необходимо учитывать связь естественной освещенности и прозрачности атмосферы с НПДВ для различных поверхностей несамосветящихся, одиночных и групповых самосветящихся ориентиров, с учетом условий воздушной навигации для различных типов распределения прозрачности атмосферы с высотой.

Целью работы является разработка математического метода расчета НПДВ для оценки условий воздушной навигации в темное время суток.

Все факторы, от которых зависит дальность видимости, действуют совместно, поэтому их необходимо учитывать в комплексе.

Основным фактором, влияющим на дальность видимости как самосветящихся, так и несамосветящихся объектов (ориентиров) в темное время суток, является естественная освещенность. Низкая освещенность снижает остроту зрения, увеличивает порог контрастной чувствительности глаза, нарушает цветовое

восприятие, ограничивает видимость ориентиров и создает психологическое напряжение у летчика, сказывающееся на качестве выдерживания режима полета и решения задач самолетовождения [3].

Дальность видимости несамосветящихся объектов в темное время суток, так же как и в светлое, определяется контрастом объекта на фоне местности и порогом контрастной чувствительности глаза для узнавания ориентира. Порог контрастной чувствительности глаза сильно меняется (растет) в темное время суток и зависит, в первую очередь, от естественной освещенности.

Дальность видимости самосветящихся объектов зависит только от трех параметров, зная которые можно вычислить дальность видимости огня определенной мощности (лампы накаливания мощностью 60 Вт): объемного показателя ослабления света в атмосфере (прозрачность атмосферы); силы света огня; порога обнаружения белого огня.

В ночное время главным фактором, определяющим НПДВ самосветящихся объектов, является порог обнаружения белого огня. Он зависит от количества огней (одиночный и групповые) и сильно меняется в зависимости от естественной освещенности.

Особое влияние на естественную освещенность в темное время суток оказывает количество баллов и форма облачности, которые обладают большой временной изменчивостью и зависят от типовой синоптической ситуации. Определены 3 класса облачности, для которых проводились расчеты (градации облачности: 0—2, 3—5, 6—8, 9—10 баллов):

1. Облака слабой плотности, к которым отнесли: перистые, перисто-слоистые и перистокучевые.

2. Облака средней плотности, к которым отнесли: кучевые, слоисто-кучевые мощностью менее 300 м, слоистые мощностью менее 100 м, высокослоистые и высококучевые.

3. Облака сильной плотности, к которым отнесли: кучево-дождевые, мощно-кучевые, слоисто-кучевые, дождевые, слоистые мощностью более 100 м, и слоисто-кучевые мощностью более 300 м.

В расчетах наложение нескольких слоев облачного покрова слабой и средней плотности отождествляется с облачностью сильной плотности.

Особое влияние на НПДВ оказывают явления погоды (дождь, снег, морось), их действие сказывается на образовании пленки, на лобовом стекле ВС. При расчете необходимо вносить коэффициент, определенный экспериментально.

Геометрические характеристики влияют только на дальность видимости несамосветящихся объектов, так как самосветящиеся ориентиры мы воспринимаем как белый свет точечного источника [2].

Существуют 3 типа ландшафта местности, определяющие контраст объекта (ориентира) и фона. Он определяется временем года. Первый тип ландшафта соответствует заснеженному ландшафту местности, второй тип ландшафта – мертвой растительности, третий тип ландшафта – зеленой растительности. Взаимная смена типов ландшафта местности зависит от географического района.

Геометрические характеристики и состояние зрения наблюдателя оказывают существенное влияние на НПДВ. Геометрические характеристики, а именно угловой размер несамосветящегося объекта, должны быть больше остроты зрения наблюдателя. Нормальная острота зрения человека ночью (5°) больше, чем днем (20°) в 15 раз.

Несамосветящиеся объекты по виду поверхности делятся на матовые и на глянцевые. К матовым поверхностям относят: лес, горы, железные дороги и т.д. К глянцевым относят: реки, озера, ВПП после дождя и т.д. Как показывает практика, дальность обнаружения глянцевых объектов больше, чем матовых.

Все выше перечисленные факторы определяют РГДВ, от которой зависит НПДВ самосветящихся и несамосветящихся ориентиров.

Условия воздушной навигации определяются также путевой скоростью (зависящей от направления и скорости ветра на высоте полета) и высотой полета ВС. Они учитываются при определении НПДВ углом визирования. Психологические факторы зависят от уровня подготовки летчика, его снаряжения, условий обзора из кабины ВС и учитываются временем аккомодации. При определении НПДВ необходимо учитывать тип распределения РГДВ с высотой, так как при равенстве всех влияющих факторов для различных типов распределения РГДВ, НПДВ существенно различна.

Из всех выше перечисленных факторов на-

именее исследованным является естественная освещенность в темное время суток. Естественная освещенность зависит от облачного покрова. Автором был проведен анализ временной изменчивости облачного покрова в типовых синоптических ситуациях в темное время суток. Это позволило оценить изменчивость естественной освещенности.

Анализ изменчивости проведен по статистическим характеристикам: непрерывной продолжительности и повторяемости количества баллов и плотности облачного покрова в темное время суток.

Количество и форма облаков являются наиболее изменчивыми характеристиками. Их повторяемость была рассчитана на основе данных визуальных наблюдений за количеством и формой облачного покрова.

Исследования проводились в типовых синоптических ситуациях (в которых выполнялись визуальные полеты в темное время суток) циклона (Zn): передняя часть циклона, центр циклона, теплый сектор циклона, тыловая часть циклона и антициклона (Az): гребень антициклона, западная периферия антициклона и восточная периферия антициклона.

В качестве примера на рисунке 1, представлена повторяемость непрерывной продолжительности количества баллов облачности сильной и слабой плотности, в тылу циклона. Из представленных рисунков видно, что в течение темного времени суток облачность в тыловой части циклона имеет тенденцию к разрушению.

В результате проведенного исследования, можно говорить о рассеивании облачности слабой плотности через 3–5 часов (с вероятностью 80%), а сильной и средней – через 5–7 часов, после наступления темного времени суток. Наибольшая повторяемость непрерывной продолжительности баллов облачности наблюдается в теплом секторе циклона зимой и весной, в тылу циклона – весной, в теплом секторе циклона – летом.

Та же тенденция выявлена при исследовании непрерывной продолжительности количества баллов облачности в типовых синоптических ситуациях антициклона. Это позволяет сделать вывод об изменчивости естественной освещенности (с течением времени облачность рассеивается, а естественная освещенность улучшается).

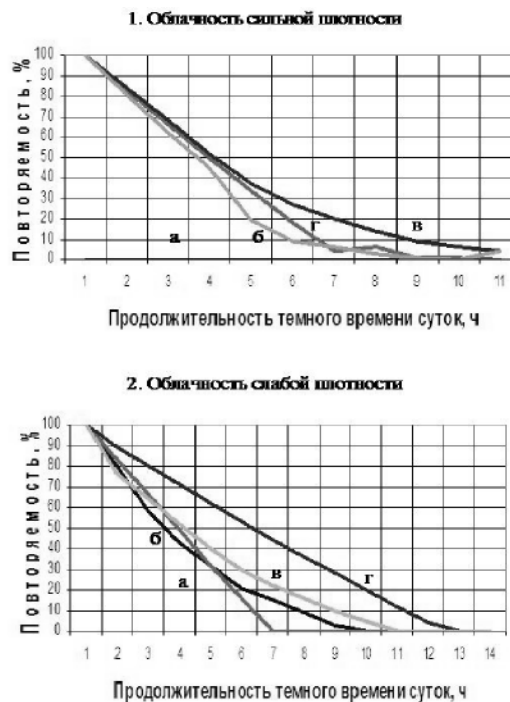


Рис. 1. Повторяемость (%) непрерывной продолжительности количества баллов облачности в тылу циклона в осенний период. а) 0–2 бала б) 3–5 баллов в) 6–8 баллов г) 9–10 баллов

Естественная освещенность связана с фазой Луны. На основании работ Шаронова В.А. [3], были получены значения естественной освещенности, в зависимости от фазы Луны с учетом количества и плотности облаков, сведенные в таблицу 1.

Из таблицы 1 видно, что естественная освещенность при разных фазах Луны, плотности и количестве баллов облачности, может совпадать.

Исследования повторяемости количества баллов облачности различной плотности (ВНГО и форма) позволили получить повторяемости естественной освещенности в типовых синоптических ситуациях. В качестве примера представлены повторяемости естественной освещенности в типовых синоптических ситуациях циклона (таблицы 2 и 3).

Из таблиц 2, 3 видно, что минимальная освещенность ночью соответствует передней части и центру циклона, а максимальная - тылу циклона. Самый наихудший по освещенности в темное время суток - зимний период, а наилучший - летний или весенний. Из этого следует, что на протяжении всего года естественная освещенность меняется и сильно зависит от типа синоптической ситуации.

Таблица 1

Естественная освещенность (Лм) в зависимости от фазы Луны, количества и плотности облаков

Количество и форма облаков		Слабой плотности				Средней плотности				Сильной плотности			
		0—2 б	3—5 б	6—8 б	9—10б	0—2 б	3—5 б	6—8 б	9—10б	0—2 б	3—5 б	6—8 б	9—10б
Фаза луны	1 фаза (новолуние)	0,1·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,7·10 ⁻⁹	0,7·10 ⁻⁹	0,1·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,7·10 ⁻⁹	0,7·10 ⁻⁹	0,1·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,7·10 ⁻⁹	0,7·10 ⁻⁹
	2 фаза	0,4·10 ⁻⁸	0,4·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,4·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,7·10 ⁻⁹	0,4·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,7·10 ⁻⁹
	3 фаза	0,14·10 ⁻⁷	0,14·10 ⁻⁷	0,4·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,14·10 ⁻⁷	0,4·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,14·10 ⁻⁷	0,4·10 ⁻⁸	0,1·10 ⁻⁸	0,7·10 ⁻⁹
	4 фаза (полнолуние)	0,3·10 ⁻⁷	0,3·10 ⁻⁷	0,14·10 ⁻⁷	0,4·10 ⁻⁸	0,3·10 ⁻⁷	0,14·10 ⁻⁷	0,4·10 ⁻⁸	0,4·10 ⁻⁸	0,3·10 ⁻⁷	0,14·10 ⁻⁷	0,1·10 ⁻⁸	0,7·10 ⁻⁹

Таблица 2

Повторяемость (%) естественной освещенности в типовых синоптических ситуациях циклона в зимний и летний период

Освещенность (Лм)	Зимний период				Летний период			
	теплый сектор Zп	центр Zп	тыл Zп	передняя часть Zп	теплый сектор Zп	центр Zп	тыл Zп	передняя часть Zп
0,3·10 ⁻⁷	5	7	26	3	16	9	28	6
0,14·10 ⁻⁷	15	12	22	10	23	20	24	17
0,4·10 ⁻⁸	28	15	14	18	27	19	15	21
0,1·10 ⁻⁸	20	23	18	26	19	22	17	23
0,7·10 ⁻⁹	32	43	20	43	15	30	16	33

Таблица 3

Повторяемость (%) освещенности в типовых синоптических ситуациях циклона в весенний и осенний период

Освещенность (Лм)	Весенний период				Осенний период			
	теплый сектор Zп	центр Zп	тыл Zп	передняя часть Zп	теплый сектор Zп	центр Zп	тыл Zп	передняя часть Zп
0,3·10 ⁻⁷	12	8	30	9	10	6	35	5
0,14·10 ⁻⁷	23	17	22	26	25	15	23	14
0,4·10 ⁻⁸	25	24	20	18	22	21	16	25
0,1·10 ⁻⁸	17	23	16	25	19	24	17	17
0,7·10 ⁻⁹	22	28	12	22	24	34	9	39

В методе расчета НПДВ в темное время с высоты полета, комплексно учитывались факторы, влияющих на дальность видимости, для пяти основных типов распределения горизонтальной дальности видимости с высотой.

НПДВ в темное время суток для заданной высоты полета рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$(3) \quad S_{p.нк} = \frac{H_{пол}}{\cos \theta \cdot \int_0^{H_{пол}} \frac{1/\epsilon}{S_{mh}} dh} \ln \left[1 + \left(\frac{K_0}{\epsilon} - 1 \right) \frac{B_{\phi}}{B} \right],$$

где $H_{пол}$ – высота полета ВС, м; K_0 – первоначальный, неискаженный дымкой контраст между объектом и фоном ($K_0 \leq 1$); B_{ϕ} – истинная яркость фона, т.е. яркость, неискаженная атмосферной дымкой; B – коэффициент, характеризующий состояние яркостного «насыщения» слоя помутнения; ϵ – порог контрастной чувствительности глаза, зависит от естественной освещенности и ландшафта местности; θ – угол визирования, град.; dh – слои, характеризующие распределение горизонтальной видимости с высотой, м; S_{mh} – РГДВ на высоте полета, которая зависит от РГДВ у земли, ВНГО и типа вертикального распределения РГДВ, м.

Типы вертикального распределения РГДВ (ТОМ) в подоблачных слоях определялись по значениям ВНГО (ВВ) и МОДВ (МДВ), форме облачности [2].

Влияние путевой скорости (скорости ВС, направления, скорости ветра и угла сноса – α) и высоты полета ВС на НПДВ в формуле 3 учитывается углом визирования, который определяется по формуле:

$$\theta = \theta_0 + 57,3 \frac{W \cdot t}{H_{пол}} \sin \theta_0 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0 \cdot \cos^2 \alpha}, \quad (4)$$

где t – среднее время аккомодации (в среднем 2,5 с), затрачиваемое на обнаружение большинства объектов (ориентиров), с; W – путевая скорость полета ВС, м/с; $H_{пол}$ – высота полета ВС, м; θ_0 – минимальный угол визирования зависящий от типа вертикального распределения РГДВ и скорости полета ВС, °; α – угол сноса, град.

Результаты расчета НПДВ, в качестве примера, для IV типа распределения РГДВ представлены на рисунке 2. Из представленного рисунка видно, что НПДВ несамосветящихся объектов существенно зависит от естественной освещенности.

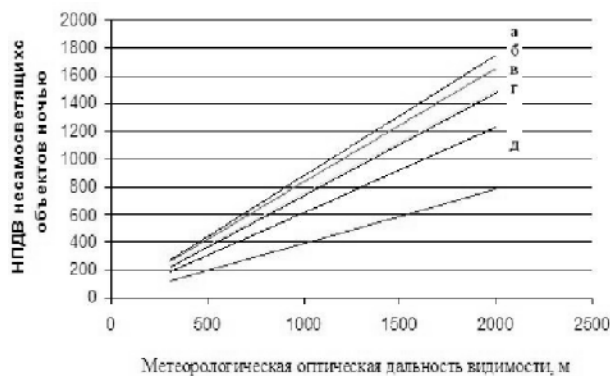


Рис. 2. Зависимость НПДВ несамосветящихся матовых объектов от реальной горизонтальной дальности видимости при различной освещенности (ВНГО = 450м, Н = 250м; W = 200 км/ч; K = 0,7) для IV ТОМ. а) $E=0,3 \cdot 10^{-7}$ Лм. б) $E=0,14 \cdot 10^{-7}$ Лм. в) $E=0,4 \cdot 10^{-8}$ Лм. г) $E=0,1 \cdot 10^{-8}$ Лм. д) $E=0,7 \cdot 10^{-9}$ Лм

Расчетные значения НПДВ показывают, что в I–V ТОМ НПДВ всегда меньше РГДВ. Например, при МОДВ равной 1000 м НПДВ, в зависимости от естественной освещенности, будет 400–800 м.

Метод расчета НПДВ основан на расчетах диаграмм видимости огней ненаправленного действия в различных типах распределения РГДВ с высотой.

При определении дальности видимости групповых самосветящихся объектов решались 2 задачи: первая - обнаружение группового огня (световое пятно) и вторая – определение дальности видимости опознавания объекта как группового огня. При расчете дальности видимости обнаружения самосветящихся объектов, они рассматривались как групповые огни с учетом интерференции света суммарной мощностью 100, 1000, 100000 ламп по 60 Вт. Это соответствует мелкому, среднему и большому населенному пункту соответственно. Для этих граничных условий строились диаграммы видимости при различных типах распределения РГДВ с высотой, и рассчитывалась НПДВ с учетом условий воздушной навигации.

В качестве примера, на рисунках 3, 4 приведены графики зависимости НПДВ для одиночного и группового огня в темное время суток. Из рисунка 3 видно, что для I, II и III типов распределения РГДВ с высотой (ТОМ) НПДВ всегда меньше МОДВ и РГДВ. При IV и V типе

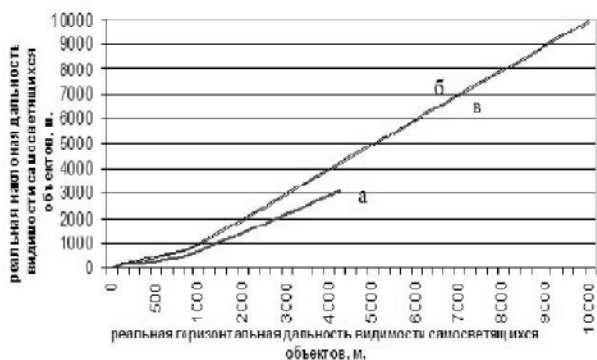


Рис. 3. Зависимость НПДВ одиночного огня от РГДВ (путевая скорость ВС 100 км/ч, высота полета ВС 200 м). а) I, II и III ТОМ; б) IV ТОМ; в) V ТОМ



Рис. 4. Зависимость НПДВ самосветящегося объекта от РГДВ при различной естественной освещенности (путевая скорость ВС 100 км/ч, высота полета ВС 200 м, ВНГО 800 м, IV ТОМ). а) $E=0,3 \cdot 10^{-7}$ Лм. б) $E=0,14 \cdot 10^{-7}$ Лм. в) $E=0,4 \cdot 10^{-8}$ Лм. г) $E=0,1 \cdot 10^{-8}$ Лм. д) $E=0,7 \cdot 10^{-9}$ Лм

Таблица 4

Значения критериев успешности (r, σ, η) расчета НПДВ несамосветящихся объектов ночью

Фазы луны	I, II и III ТОМ						IV ТОМ						V ТОМ					
	Матовые			Глянцевые			Матовые			Глянцевые			Матовые			Глянцевые		
	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$
Полнолуние	0,96	33	24	0,97	45	29	0,92	45	35	0,96	71	54	0,90	77	53	0,92	90	69
3/4 Луны	0,91	39	26	0,95	48	32	0,88	55	39	0,93	68	50	0,88	83	58	0,88	93	73
1/2 Луны	0,88	41	33	0,94	51	36	0,85	59	42	0,91	65	46	0,85	89	61	0,93	98	76
новолуние	0,85	48	36	0,90	55	38	0,81	62	46	0,88	60	41	0,81	91	64	0,85	104	81

Значения критериев успешности (r, σ, η) расчета НПДВ самосветящихся объектов ночью

Фазы луны	I, II и III ТОМ						IV ТОМ						V ТОМ					
	Одиночные			Групповые			Одиночные			Групповые			Одиночные			Групповые		
	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$	r	$\sigma, м$	$\eta, м$
Полнолуние	0,90	102	84	0,89	93	76	0,95	124	98	0,93	116	87	0,91	146	116	0,87	133	107
3/4 Луны	0,86	108	88	0,84	98	79	0,94	126	104	0,90	120	93	0,88	148	121	0,86	139	110
1/2 Луны	0,84	111	92	0,82	100	82	0,90	133	108	0,88	121	100	0,86	156	129	0,82	142	115
Новолуние	0,83	115	96	0,8	106	89	0,89	137	115	0,85	126	105	0,81	162	132	0,80	148	124

Из данных таблиц 4 и 5 видно, что полученные значения критериев успешности показывают на возможность использования предложенных методик расчета НПДВ.

Расчетные значения НПДВ самосветящихся объектов всегда меньше РГДВ во всех пяти типах распределения горизонтальной видимости с высотой, и не превышают 3000 м. Расчетные значения НПДВ самосветящихся объектов в I, II и III типах распределения горизонтальной дальности видимости с высотой меньше, а в IV и V типах – больше или равно РГДВ (МДВ). Расчетные значения НПДВ обнаружения групповых огней больше распознавания, при всех равных факторах.

Предложенная методика впервые позволяет оценивать соответствие метеорологических условий выполнению визуальных полетов в темное время суток над равнинной местностью, по данным метеорологических наблюдений.

Дорофеев В. В. — профессор ВАИУ (Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)), доктор географических наук, профессор. 394005, г. Воронеж, ул. 60 лет ВЛКСМ, д. 15 кв. 96. Тел. (4732) 66-28-45

Ковалёв В. И. — преподаватель ВАИУ (Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)), кандидат географических наук. 394036, г. Воронеж, ул. Б. Манежная, д. 2, кв. 51. Тел. (4732) 65-43-62 (slavko50@mail.ru)

Таким образом, на основании проведенных исследований, разработана методика сверхкраткосрочного прогноза НПДВ в темное время суток в интересах обеспечения безопасности, регулярности и эффективности полетов авиации по ПВП.

Внедрение результатов работы в оперативную практику военных, гражданских авиационных метеорологических станций обеспечит эффективность, безопасность и регулярность визуальных полетов авиации на малых и предельно малых высотах в темное время суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берёзкин В.М. Дальность видимости как объект метеорологических наблюдений. – Л. Гидрометеоиздат 1949. — 98 с.
2. Дорофеев В.В. Наклонная дальность видимости. – Монография, Воронеж: ВВВАИУ, 2007. – 209 с.
3. Шаронов В.В. Свет и цвет. — М.: Государственное издание физико-математической литературы, 1961. – 311 с.

Dorofeyev V.V. Professor, the doctor of geographical sciences, the professor. Military aviation engineering university (Voronezh)

Kovalyov V. I teacher, the candidate of geographical sciences. Military aviation engineering university (Voronezh).

Аристов В. В. Соискатель ВАИУ (Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)). 394036, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, д. 54^а.

Aristov V.V. Competitor. Military aviation engineering university (Voronezh)