

DOI: 10.17516/1999-494X-0357

УДК 519.213

Methodology for Estimating the Probability of Obtaining Data About an Object Using Optoelectronic Systems of Unmanned Aerial Vehicles

**Vitaliy S. Svishcho^a, Andrey I. Uvarov^{*a},
Vjacheslav U. Falileev^a and Yuri Y. Gromov^b**

*^aMilitary Training and Research Center of the Air Force
«Air Force Academy ft. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»*

Voronezh, Russian Federation

*^bInstitute of Automation
and Information Technologies of TSTU
Tambov, Russian Federation*

Received 11.09.2021, received in revised form 25.09.2021, accepted 22.10.2021

Abstract. The article presents a method for estimating the probability of obtaining data about an object using optoelectronic means of unmanned aerial vehicles. The optimal heights of the use of unmanned aerial vehicles depending on weather conditions are considered. Numerical estimates of the dependence of the characteristics of optoelectronic devices on the factors affecting their use are obtained. The actual period of the use of unmanned aerial vehicles to increase the probability of obtaining data about the object is determined. Graphs of the use of optoelectronic devices of different wavelength ranges, taking into account the time interval, are constructed.

Keywords: aircraft, unmanned aerial vehicle, probability, optoelectronic systems, focal length.

Citation: Svishcho V. S., Uvarov A. I., Falileev V. U., Gromov Y. Y. Methodology for estimating the probability of obtaining data about an object using optoelectronic systems of unmanned aerial vehicles, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(7), 803–811. DOI: 10.17516/1999-494X-0357

Методика оценки вероятности добывания данных об объекте с использованием оптико-электронных систем беспилотных летательных аппаратов

В. С. Свищо^а, А. И. Уваров^а,
В. Ю. Фалилеев^а, Ю. Ю. Громов^б

^аВоенный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Российская Федерация, Воронеж

^бИнститут автоматизации и информационных технологий (ИТАИТ)
Российская Федерация, Тамбов

Аннотация. Представлена методика оценки вероятности добывания данных об объекте с использованием оптико-электронных средств беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены оптимальные высоты применения беспилотных летательных аппаратов в зависимости от погодных условий. Получены численные оценки зависимости характеристик оптико-электронных средств от факторов, влияющих на их использование. Определен актуальный период использования беспилотных летательных аппаратов для повышения вероятности добывания данных об объекте. Построены графики использования оптико-электронных средств разного диапазона длин волн с учетом интервала времени.

Ключевые слова: летательный аппарат, беспилотный летательный аппарат, вероятность, оптико-электронная система, фокусное расстояние.

Цитирование: Свищо, В. С. Методика оценки вероятности добывания данных об объекте с использованием оптико-электронных систем беспилотных летательных аппаратов / В. С. Свищо, А. И. Уваров, В. Ю. Фалилеев, Ю. Ю. Громов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(7). С. 803–811. DOI: 10.17516/1999-494X-0357

Наличие широкого диапазона применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), способных выполнять сверхдальние и сверхвысотные полеты, обеспечивает большое разнообразие в выборе оптико-электронных систем (ОЭС), играющих одну из главных ролей в получении информации об объектах интереса [1].

В основном на современных БПЛА устанавливаются гиросtabilизированные оптико-электронные системы, которые могут включать в себя телевизионные и инфракрасные камеры. Использование данных камер способствует повышению информативности получаемого изображения и дает возможность более точного определения координат объекта интереса [2].

На изображениях, полученных в видимом диапазоне, объекты интереса опознаются по совокупности опознавательных признаков, которые формируются в зависимости от интенсивности излучения солнечного света, времени суток, освещенности, атмосферных условий, степени маскировки и характера местности.

Особенностью изображений, полученных в тепловом инфракрасном диапазоне, считается интенсивность теплового излучения объекта. Также преимуществом съемки в инфракрасном диапазоне является возможность обнаружения объектов за счет различий в их излучательной способности в отсутствие естественного освещения. Однако следует отметить, что в ночное

время природные и антропогенные объекты имеют иные соотношения интенсивности теплового излучения, нежели в дневное [3].

Целью данной статьи служит рассмотрение и анализ погодных условий и факторов, оказывающих существенное влияние на работу бортовых оптико-электронных систем, осуществляющих мониторинг местности с оценкой вероятности добывания информации об объектах интереса.

Повышение вероятности обнаружения малозаметных техногенных объектов достигается использованием на БпЛА многоспектральных оптико-электронных систем (МОЭС), обеспечивающих совместную обработку полей яркостей в различных диапазонах длин волн [4].

Определение метеорологических условий и факторов, влияющих на работу ОЭС, будем анализировать на основе вероятности добывания данных об объекте.

В зависимости от применяемых ОЭС, степени применения маскировочных средств, учета ложных объектов, атмосферных условий, времени суток можно определить вероятность добывания данных об объекте для различных типов датчиков (P_d) и произвести расчет данных на основании выражения

$$P_{di} = P_{vi} \cdot P_{обнi} \cdot P_{расi} \cdot (1 - Q_{пасi}), \quad (1)$$

где P_{di} – вероятность добывания данных об объекте при использовании ОЭС i -го спектрального диапазона; P_{vi} – вероятность выхода на объект (район); $P_{обнi}$ – вероятность обнаружения объекта; $P_{расi}$ – вероятность получения требуемых разведывательных данных с заданной точностью; $Q_{пасi}$ – вероятность пассивного противодействия противника.

Под индексом i будем рассматривать ОЭС разного диапазона, при $i=1$ понимаем фотоприемник видимого диапазона, под $i=2$ – фотоприемник инфракрасного диапазона, под $i=3$ – фотоприемник совместной обработки изображений видимого и инфракрасного спектров.

P_{vi} – вероятность выхода на объект при использовании i -го датчика оценим как произведение вероятностей:

$$P_{vi} = P_{взлi} \cdot P_{мршi}, \quad (2)$$

где $P_{взлi}$ – вероятность взлета летательного аппарата; $P_{мршi}$ – вероятность полета летательного аппарата по заданному маршруту до момента выхода на объект. Использование ОЭС i -го спектрального диапазона не оказывает влияния на вероятность P_{vi} . Обобщенное выражение для оценки вероятности выхода на объект имеет следующий вид:

$$P_v = P_{взл} \cdot P_{мрш}, \quad (3)$$

где $P_{взл}$ зависит от метеорологических условий, к которым относится фактический ветер у земли. В качестве показателя эффективности скрытного полета летательного аппарата (ЛА) целесообразно выбрать интервал времени от момента входа ЛА в зону обнаружения обзорного радиолокатора до момента первого обнаружения ЛА [5], где $P_{мрш}$ примем равной 0,99.

Для анализа интересующих нас условий использованы данные ежечасных наблюдений на аэропорту «Астрахань» г. Астрахани за период с 2015 по 2019 год. Наблюдения производились инструментально (с использованием аппаратуры «ДВО-2», «ЛИНГО-1М», «ЛИНГОМ-2») и по данным, полученным с борта самолетов [6].

Для аэропорта «Астрахань» ветры западного и восточного направлений практически совпадают с направлением ВПП, с курсом 81° и 261° . Северные и южные ветры перпендикулярны ВПП. Преобладающим направлением ветра является восточное, составляющее 29 % от общего числа случаев. Реже всего наблюдаются ветры южного и юго-западного направлений (5–6 %).

Среднегодовая скорость ветра 5,7 м/с, среднемесячная наименьшая скорость ветра 4,2 м/с, среднемесячная наибольшая скорость ветра 8,4 м/с.

Для расчета вероятности взлета ЛА обратимся к количеству дней с ветром более 15 м/с. Оценку вероятности взлета произведем через количественное соотношение событий:

$$P_{\text{взл}} = 1 - \frac{N_{\text{ср}}}{n}, \quad (4)$$

где $N_{\text{ср}}$ – среднее число дней с ветром более 15 м/с; n – количество дней в данном месяце. Вероятности взлета ЛА по месяцам в зависимости от скорости ветра приведены в табл. 1.

Рассмотрев значения вероятности взлета ЛА, зависящего от скорости ветра, можно сделать вывод о том, что благоприятным периодом года являются месяцы январь и июнь, а с меньшей необходимостью нужно использовать летательные аппараты в марте и апреле.

Вероятность обнаружения объекта ($P_{\text{обн}}$) зависит от высоты применения и типа ОЭС, проницаемости атмосферы и освещенности. На основе данных параметров получим следующее выражение для расчета вероятности обнаружения объекта, которое имеет вид

$$P_{\text{обн}i} = P_{\text{Н}i} \cdot P_{\text{Е}i}, \quad (5)$$

где $P_{\text{Н}i}$ – вероятность обнаружения объекта ОЭС в зависимости от высот использования БпЛА; $P_{\text{Е}i}$ – вероятность использования ОЭС в зависимости от времени суток.

Качество ведения воздушной разведки ОЭС зависит от многих характеристик, в том числе и разрешения датчика на местности. Проведем расчет фокусного расстояния (угла зрения камер) для обеспечения одинакового разрешения на местности применяемых ОЭС БпЛА.

Эффективное обнаружение объекта при помощи ОЭС, установленных на БпЛА «Элерон», возможно вести на высоте 300 м; на БпЛА «Орлан» – 900 м; на БпЛА «Форпост» – 2000 м. На возможность получения достоверных данных при использовании ОЭС оказывает влия-

Таблица 1. Вероятности взлета ЛА в зависимости от скорости ветра

Table 1. The probability of an aircraft taking off depending on the wind speed

Число дней	Месяц											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Среднее число дней с ветром, имеющим скорость более 15 м/с ($N_{\text{ср}}$)	0,2	0,6	2,8	3,8	0,6	0,4	0,6	1,6	1,2	1	0,8	1,8
Вероятность взлета ЛА ($P_{\text{взл}}$)	0,993	0,978	0,909	0,873	0,980	0,986	0,980	0,946	0,961	0,966	0,973	0,941

ние высота нижней границы облаков. На основе метеорологических наблюдений в аэропорту "Астрахань» г. Астрахани [6] вероятность обнаружения объекта на высотах 300, 900, 2000 м оценивалась в соответствии с выражением

$$P_{Hi} = 1 - P_{обл}, \quad (6)$$

где $P_{обл}$ – вероятность повторяемости высоты нижней границы облаков ниже указанных пределов. Значения вероятностей P_{Hi} приведены в табл. 2.

Из анализа данных табл. 2 следует, что на высоте не более 300 м $P_{H1} = 100$ % в июле и августе, а в декабре $P_{H1} = 28$ %. На высоте не более 900 м P_{H2} составляет от 98 до 99 % в августе и сентябре, а наименьшая $P_{H2} = 16$ % соответствует декабрю. На высотах не более 2000 м $P_{H3} = 90$ % в августе и сентябре, а наименьшая $P_{H3} = 26$ % приходится на декабрь. Значения P_{Hi} зависят от использования БПЛА на разных высотах, но не зависят от используемых типов ОЭС.

Большое число спектральных каналов и высокое спектральное разрешение приводят к значительной информационной избыточности, поэтому на одном из этапов производится выделение информативного набора спектральных признаков. Для этих целей используется метод главных компонент (РСА) или его модификации (блочный РСА и метод минимизации шумовых помех), позволяющий на порядок сократить число спектральных признаков без существенного снижения качества классификации [7].

На вероятность обнаружения объекта значительное влияние оказывает освещенность местности. На основе данных по продолжительности светового дня и ночи [6] значения вероятностей использования БПЛА в зависимости от времени суток представлены в табл. 3.

Вероятность эффективного использования ОЭС в светлое время суток

Таблица 2. Вероятность обнаружения объекта в зависимости от высот использования беспилотного летательного аппарата

Table 2. The probability of detecting an object depending on the height of the use of an unmanned aerial vehicle

Вероятность (%)	Месяц											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Вероятность появления высоты облаков менее 300 м ($P_{обл}$)	24,2	11,6	11,7	6,2	1,2	0,4	0,0	0,0	0,4	8,1	24,2	61,4
Вероятность обнаружения объекта при высоте 300 м (P_{H1})	75,8	88,4	88,3	93,7	98,8	99,6	100	100	99,6	91,9	75,8	28,6
Вероятность появления высоты облаков менее 900 м ($P_{обл}$)	69,4	44,9	51,7	15,7	14,5	10,8	3,6	1,2	0,8	29,1	62,1	83,1
Вероятность обнаружения объекта при высоте 900 м (P_{H2})	30,6	54,1	48,3	84,3	85,5	89,2	96,4	98,8	99,2	70,9	37,9	16,9
Вероятность появления высоты облаков менее 2000 м ($P_{обл}$)	70,7	44,9	54,7	19,1	23,0	24,1	19,3	9,7	8,4	29,5	64,1	83,1
Вероятность обнаружения объекта при высоте 2000 м (P_{H3})	29,3	55,1	45,3	80,9	77	75,9	80,7	90,3	91,6	70,5	35,9	16,9

$$P_{E_{дi}} = \frac{Q_c}{Q_d}, \quad (7)$$

где Q_c – время полных суток; Q_d – средняя продолжительность светового дня.

Вероятность эффективного использования ОЭС в темное время суток

$$P_{E_{ни}} = \frac{Q_c}{Q_n}, \quad (8)$$

где Q_c – время полных суток; Q_n – средняя продолжительность темного времени суток.

Из анализа данных табл. 3 следует, что эффективное использование ОЭС в светлое время суток максимально возможно с мая по июль, а минимально – в декабре и январе. Ведению ночной съемки большей продолжительности будут способствовать месяцы декабрь, январь.

Использование ОЭС видимого диапазона применяется только в светлое время суток, а применение ОЭС инфракрасного диапазона возможно как в светлое, так и в темное время суток. Исходя из этого следует, что обеспечить всесуточность ведения съемки возможно при использовании ОЭС, в состав которых входит приемник как видимого диапазона, так и инфракрасного [8].

Вероятность распознавания зависит от технических характеристик применяемых камер, а также формы и контраста объекта. Оценить вероятность обнаружения и распознавания оператором объектов возможно с помощью следующего выражения [9]:

$$P_{рас} = \exp\left\{-\left(\frac{B \cdot L}{I_{никс} \cdot \sqrt{K}}\right)^2\right\}, \quad (9)$$

где $\left\{-\left(\frac{B \cdot L}{I_{никс} \cdot \sqrt{K}}\right)^2\right\}$ – показатель ослабления разрешения объекта на полученном от фотоприемника изображении, представленный следующими составляющими: B – коэффициент распознавания формы объекта; L – ЛРМ (линейное разрешение на местности) ОЭС; $I_{никс}$ – максималь-

Таблица 3. Вероятность использования ОЭС в зависимости от времени суток

Table 3. The probability of using optoelectronic devices depending on the time of day

День или ночь	Месяц											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Средняя продолжительность дня (ч: мин) (Q_d)	09:02	10:02	11:53	13:35	14:59	15:46	15:25	14:10	12:33	10:56	09:25	08:38
Вероятность использования днем ($P_{E_{дi}}$)	0,37	0,41	0,49	0,56	0,62	0,66	0,64	0,59	0,52	0,45	0,39	0,36
Средняя продолжительность ночи (ч: мин) (Q_n)	14:58	13:58	13:07	10:25	09:01	08:14	08:35	09:50	11:27	13:04	14:35	15:22
Вероятность использования ночью ($P_{E_{ни}}$)	0,63	0,59	0,51	0,44	0,38	0,34	0,36	0,41	0,48	0,55	0,61	0,64

ный линейный размер объекта в пикселях; K – видимый контраст объекта относительно фона. Подставив в показатель ослабления $L = \frac{R \cdot B}{2 \cdot R_c \cdot f_{\text{Э}}}$, получим выражение следующего вида:

$$-\left(\frac{B \cdot L}{I_{\text{пикс}} \cdot \sqrt{K}}\right)^2 = \left(\frac{B \cdot R \cdot B}{2 \cdot R_c \cdot f_{\text{Э}} \cdot I_{\text{пикс}} \cdot \sqrt{K}}\right)^2, \quad (10)$$

где R – расстояние до объекта; B – коэффициент распознавания формы объекта; R_c – разрешающая способность ОЭС; $f_{\text{Э}}$ – фокусное расстояние объектива. Значения переменных B , $I_{\text{пикс}}$, K для всех рассматриваемых ОЭС будем считать равным и представим как

$$F = \left(\frac{B^2}{2 \cdot I_{\text{пикс}} \cdot \sqrt{K}}\right)^2, \quad (11)$$

тогда выражение (10) будет иметь вид

$$-\left(\frac{B \cdot L}{I_{\text{пикс}} \cdot \sqrt{K}}\right)^2 = -F \cdot \left(\frac{R}{R_c \cdot f_{\text{Э}}}\right)^2. \quad (12)$$

Вероятность обнаружения и распознавания объектов поиска в заданном районе и время, необходимое для выполнения этого поиска, можно рассчитать по известным характеристикам ОЭС, полета БПЛА, размерам района поиска и объекта поиска. Эти зависимости позволяют решить задачу, когда по заданному значению вероятности обнаружения и распознавания объекта поиска, известным характеристикам ОЭС, размерам района поиска и объекта поиска можно рассчитать параметры полета БПЛА и количество вылетов в район поиска, обеспечивающих минимальное время поиска [10].

На основе данных табл. 1–3 и с учетом выражений (1–12) зависимости добывания данных об объекте, с учетом условий и факторов, представлены на рис. 1.

Проведенный анализ факторов, влияющих на вероятность добывания данных, подтверждает необходимость комплексного подхода к сбору и обработке данных от фотоприемников разного спектрального диапазона длин волн. Повысить вероятность распознавания объектов можно путем суммирования информационных параметров, определяющих их признаки и отличительные характеристики в каждом из примененных ОЭС беспилотных летательных аппаратов.

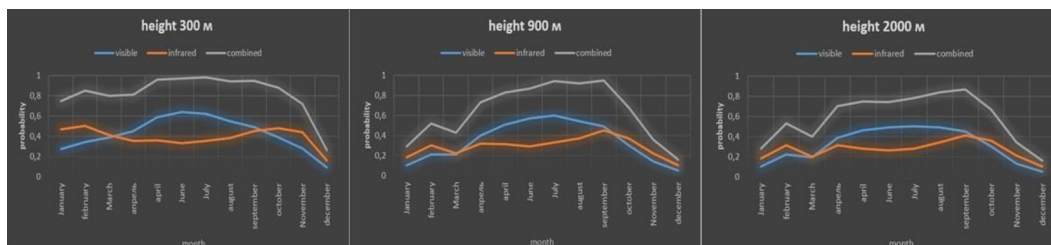


Рис. 1. Вероятность использования ОЭС БПЛА различного диапазона длин волн с учетом интервала времени

Fig. 1. The probability of using optoelectronic means of unmanned aerial vehicles of various wavelength ranges, taking into account the time interval

Список литературы / References

- [1] Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. *Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние*. Под ред. В.С. Фетисова. Уфа: ФОТОН, 2014. 217 с. [Fetisov V.S., Neugodnikova L.M., Adamovsky V.V., Krasnoperov R.A. *Unmanned aviation: terminology, classification, current state*. Edited by V.S. Fetisov. Ufa: PHOTON, 2014. 217 p. (in Russian)]
- [2] Кожанов Н.Ю., Танченко А.П., Москаленко Ю.В., Мартимов Р.Ю., Петрченко А.В. Перспективные методы обработки потоков видовых данных для повышения результативности применения БЛА. *Доклады и статьи ежегодной научно-практической конференции «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами»*. Коломна, 2016. С. 175–180. [Kozhanov N.U., Donchenko A.P., Moskalenko Y.V., Martynov R.Y. Promising methods of processing species data streams to improve the effectiveness of the use of an unmanned aerial vehicle. *Reports and articles of the annual scientific and practical conference «Prospects for the development and application of complexes with unmanned aerial vehicles»*. Kolomna, 2016. P. 175–180 (in Russian)]
- [3] Безуглый Н.Н., Чупаков М.В., Симак В.Н. *Справочник по беспилотным летательным аппаратам стран НАТО и Израиля. Кн. 2 (Полезная нагрузка, системы обеспечения и связи)*. Под ред. Н.Н. Безуглого. Севастополь, 2014 [Bezugly N.N., Chupakov M.V., Simak V.N. *Handbook of unmanned aerial vehicles of NATO countries and Israel book 2 (payload, support and communication systems)*. Ed. N.N. Bezuglyogo. Sevastopol, 2014 (in Russian)]
- [4] Ищук И.Н., Степанов Е.А., Бебенин А.А., Дмитриев Д.Д., Филимонов А.М. Способ классификации объектов оптико-электронными системами разведки на основе обработки многоспектрального кубоида изображений. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2017, 10(2), 183–190 [Ischuk I.N., Stepanov E.A., Bebenin A.A., Dmitriev D.D., Filimonov A.M. Method for Classification of Objects Optoelectronic Exploration Systems Based Multispectral Cuboid Images. *Journal Sib. Feder. un-ta. Engineering and Technology*, 2017, 10(2), 183–190 (in Russian)]
- [5] Замараев В.В., Кутузов А.С., Лютиков И.В., Мальцев Д.В. Метод построения траектории скрытного выхода летательного аппарата в заданную точку зоны обнаружения обзорного радиолокатора, основанный на анализе спектра доплеровских частот принимаемого сигнала. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2021, 14(3), 281–291 [Zamaraev V.V., Kutuzov A.S., Lyutikov I.V. and Malcev D.V. Method of Constructing a Line Secretive Exit the Aircraft at a Given Point of the Detection Area Surveillance Radar Based on the Spectrum Analysis of the Doppler Frequency of the Received Signal. *Journal Sib. Feder. un-ta. Engineering and Technology*, 2021, 14(3), 281–291 (in Russian)]
- [6] РосГидромет. Астраханский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.meteorf.ru/about/structure/cgms/3130/> – Заглавие с экрана. [RosHydromet. Astrakhan Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring [Electronic resource] – Access: <https://www.meteorf.ru/about/structure/cgms/3130/>
- [7] Пестунов И.А., Рылов С.А., Мельников П.В. Классификация гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2018, 11(1), 69–76 [Pestunov I.A., Rylov S.A. and Melnikov P.V. Classification

of Hyperspectral Images with High Spatial Resolution. *Journal Sib. Feder. un-ta. Engineering and Technology*, 2018, 11(1), 69–76 (in Russian)]

[8] Ищук И.Н., Долгов А.А., Лихачев М.А., Тельных Б.К. Модель расчета теплофизических параметров материалов по данным многоспектральной разновременной фотографической съемки земной поверхности. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 894–906 [Ischuk I.N., Dolgov A.A., Likhachev M.A., Telnykh B.K. Model for Calculating the Thermophysical Characteristics of Materials According to Multispectral Multi-Temporal Photographic Survey of the Earth's Surface. *Journal Sib. Feder. un-ta. Engineering and Technology*, 2020, 13(7), 894–904 (in Russian)]

[9] Веселов Ю.Г., Данилин А.А., Тихонычев В.В. Выбор текст-объекта для оценки разрешающей способности цифровых оптико-электронных средств мониторинга земной поверхности. *Наука и образование*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 4, 1–24. [Veselov Y.V., Danilin A.A., Tikhonychev V.V. Selection of a text object for assessing the resolution of digital optoelectronic means of monitoring the Earth's surface. *Journal Science and education*, Bauman Moscow State Technical University, 2012, 4, 1–24 (in Russian)]

[10] Тищенко А.И., Артыщенко С.В. Математическая модель вероятности обнаружения точечной цели оператором полезной нагрузки оптико-электронной системы беспилотного летательного аппарата. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2020, 13(3), 328–337 [Tishchenko A.I. and Artyschenko S.V. A Mathematical Model of the Detection Probability of the Point Target by the Operator of the Payload Electro-Optical System for Unmanned Aerial Vehicle. *Journal Sib. Feder. un-ta. Engineering and Technology*, 2020, 13(3), 328–337 (in Russian)]