

УДК 623.4.021

**Е.Н. Семашкин, Т.В. Артюшкина, А.В. Болотников, Т.В. Гарбузова****ОБНАРУЖИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ВСЕПОГОДНОСТЬ СИСТЕМ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ  
И ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР**

*Целью данной статьи является определение всепогодности телевизионных и тепловизионных приборов для основных типов климата: холодного (Диксон), умеренного (Москва), тепло влажного (Батуми) жаркого сухого (Ашхабад). Для этого на основе эмпирических законов распределения температуры и относительной влажности воздуха разработан метод моделирования закона распределения дальности метеовидимости в различных климатических зонах, где верхняя и нижняя границы значений дальности метеовидимости являются функциями дефицита влажности. Достоверность моделирования была подтверждена экспериментальными исследованиями видимости объектов из высотной лаборатории в Туле, расположенной на территории АО «КБП». Основной алгоритм дополнен моделями дымок, туманов, осадков. Ослабление оптических и инфракрасных сигналов дымами оценивалось по модели В.Л. Филиппова, согласно которой дымки подразделяются на несколько видов в зависимости от температуры воздуха и времени года. Модель туманов базируется на законе распределения дальностей метеовидимости в туманах в течение года, модель осадков – на законе распределения годовой длительности осадков различной интенсивности. Оценка ослабления инфракрасных сигналов атмосферными газами (кислородом и водяным паром) осуществлялась при помощи таблиц Пассмана–Лармора, представляющих собой зависимость спектрального коэффициента пропускания инфракрасного излучения от длины волны и толщины слоя осаждающей воды. Дальность действия наблюдательных приборов определялась с помощью теории линейной фильтрации, когда ослабленные атмосферой контрасты от наблюдаемого объекта сравниваются с контрастом, разрешаемым оптическим прибором. Расчеты по дальности действия производились для таких объектов наблюдения, как человек, легковой автомобиль и танк. Оценка всепогодности проводилась для телевизионной камеры и тепловизоров с диапазоном длин волн 3–5 мкм и 8–12 мкм. Моделирование показало, что на дальностях 5 км тепловизор превосходит телевизионную камеру в холодном климате в 2 раза, в умеренном и теплом показатели близки, в Ашхабаде показатели практически равны. При увеличении дальности до 10 км показатели всепогодности тепловизоров превосходят показатели телевизионной камеры в холодном климате на порядок, а в умеренном – в 2 раза.*

*Системы технического зрения; тепловизор; телекамера; дальность действия; всепогодность.*

**E.N. Semashkin, T.V. Artyushkina, A.V. Bolotnikov T.V. Garbuzova****ROBOT SYSTEMS VISION BASED ON THERMAL AND TV CAMERAS  
DETECTABILITY AND ALL-WEATHER CAPABILITY**

*The objective of this article is determination of the TV and thermal imaging devices day-and-night capability under main climatic types: cool (Dickson), moderate (Moscow), warm humid (Batumi), and hot arid climate (Ashkhabad). For this purpose on the basis of the empirical laws of temperature and relative air humidity distribution there was developed a method of simulation of the weather visibility distance distribution in diverse climatic zones, where upper and bottom margins of the weather visibility distance distribution values are the functions of humidity deficit. The simulation validity was approved through experimental researches of the objects visibility from a high-rise laboratory located in the territory of JSC KBP, Tula. The major algorithm is supplemented with models of haze, fog, precipitations. Optical and infrared signals attenuation due to haze was estimated on the basis of the Filippov model, which stipulates that hazes are distributed to several types depending on a temperature of air and season. Fogs model is based on the law of the weather visibility distance distribution in fogs in the course of year; the model of precipitations*

is based on the law of the various- intensity precipitations duration distribution in the course of year. Estimation of the infrared signals attenuation due to atmospheric gases (oxygen and water vapor) was performed with the use of the Passaman–Larmora tables that present the infrared radiation spectral transmittance factor dependence on the wave length and width of precipitated water sheet. The observing equipment operation range was estimated on the theory of linear filtration, where the under-observation object contrasts attenuated in the atmosphere are compared against contrast resolved by an optical device. Estimations of the operation range were performed for such objects as a man, car, and tank. Estimation of the day-and-night capability was performed for the TV camera and thermal imagers of 3–5  $\mu\text{m}$  and 8–12  $\mu\text{m}$  wavelength. The simulation has shown that at distances of 5 km the thermal imager is twice as good as the TV camera in cool climate. As for moderate and warm climate their factors are similar. In Ashkhabad the factors are actually equal. When the distance is extended to 10 km the factors of the day-and-night capability of the TV camera in a cool climate surpass the factors of the day-and-night capability the thermal imagers by ten times; as for a moderate climate – they are twice as good.

*Machine vision systems; thermal imager; TV-camera; operation range; all-weather capability.*

**Введение.** Системы технического зрения (СТЗ) (автоматического зрения) являются важнейшим компонентом робототехнических комплексов любого назначения: военного, охранного и народно-хозяйственного. Главное предназначение СТЗ – участие в ориентации роботов в пространстве, поиск и обнаружение целей и объектов.

Эффективность СТЗ определяется двумя главными характеристиками: дальностью действия и всепогодностью (частотью обеспечения той или иной дальности действия в совокупности условий среды). Как правило, большинство СТЗ построено на матричных приборах «смотрящего типа», работающих в видимой или инфракрасной области спектра (телевизоры и тепловизоры).

Данные приборы обладают большим разнообразием: от миниатюрных неохлаждаемых систем, предназначенных для малых беспилотников (БЛА), до охлаждаемых систем с большой дальностью действия (рис. 1), размещаемых на машинах, летательных аппаратах и кораблях.



Рис. 1. Сравнительные размеры охлаждаемого тепловизора ТППП1-Е (аналога тепловизора (MATIS-LR) (1) и неохлаждаемых тепловизоров (2)

Дальности действия одного из таких микротепловизоров, полученные нами с помощью теории линейной фильтрации, представлены в табл. 1, а дальности визуализации охлаждаемыми тепловизорами фирмы SAGEM (Франция) – в табл. 2.

Таблица 1

**Дальности визуализации объектов (км) неохлаждаемым микротепловизором**

| Задача      | Объект наблюдения |                     |      |
|-------------|-------------------|---------------------|------|
|             | Человек           | Легковой автомобиль | Танк |
| Обнаружение | 1,8               | 3,8                 | 5,9  |
| Опознавание | 0,4               | 0,9                 | 1,4  |

Таблица 2

**Дальности визуализации (км) объектов охлаждаемыми тепловизорами фирмы SAGEM (Франция) (по данным фирмы SAGEM (Франция))**

| Задача      | MATIS-STD |                     |                            | MATIS-LR |                     |                            |
|-------------|-----------|---------------------|----------------------------|----------|---------------------|----------------------------|
|             | Танк      | Самолет-истребитель | Корабль (боковая проекция) | Танк     | Самолет-истребитель | Корабль (боковая проекция) |
| Обнаружение | 11        | 15                  | 30                         | 23       | 25                  | 40                         |
| Опознавание | 5,3       | 7                   | 25                         | 11       | 12                  | 35                         |

**Постановка задачи.** Современные СТЗ базируются на телевизионных и тепловизионных приборах еще и по той причине, что обеспечивают высокую точность пеленгации целей и объектов в пространстве. Если у матричного приемника тепловизора размер пикселя составляет 25 мкм, а фокусное расстояние 400 мм, то в пространстве предметов на расстоянии 10 км это дает разрешение около 0,6 метра. Это намного выше, чем у локаторов любых типов и, тем более, с сантиметровой длиной волны. По этой причине тепловизоры стали доминирующими оптическими приборами. Однако всегда возникает вопрос: какова всепогодность подобных наблюдательных приборов и как она соотносится со всепогодностью приборов, работающих в видимой части спектра.

Под всепогодностью наблюдательных приборов будем понимать частоту видимости (обнаружения) объекта на заданную дальность  $L^*$  в совокупности условий окружающей среды при  $N$  розыгрышах:

$$P_n = \left( \sum_{i=1}^m n(L \geq L^*) \right) / N, \quad (1)$$

где  $n(L \geq L^*)$  – число случаев, когда дальность обнаружения была не меньше  $L^*$ ;  $N = 8760$  – число розыгрышей, равное числу часов в году.

Оценки по зависимости (1) предполагают наличие двух вычислительных алгоритмов:

- оценки дальности действия телевизионных и тепловизионных приборов;
- алгоритма имитации погодных состояний (водяной пар, дымки, туманы, осадки [11], облака [6, 12]), определяющих прозрачность трассы.

Для оценки дальности действия приборов наблюдения использована теория линейной фильтрации. В ней контрасты от объекта наблюдения, прошедшие через рассеивающую и случайно-неоднородную атмосферу, имеющую некоторую модуляционно-передаточную функцию  $МПФ_{атм}$ , сравниваются с контрастом, разрешаемым оптическим прибором с некоторой  $МПФ_{пр}$ . Дальность, на которой контрасты становятся одинаковыми, и дает дальность обнаружения.

Алгоритм моделирования погодных состояний изображен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм вычисления оптических показателей погодных явлений

Главным ядром алгоритма является розыгрыш зависимых величин «температура ( $t$ ) – относительная влажность воздуха ( $w$ )», экспериментальные распределения которых известны для целого ряда метеопунктов. Пример подобного распределения приведен в табл. 3.

В ней дано распределение « $t - w$ » для холодного арктического климата (Диксон), в котором температура редко поднимается выше  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1].

Розыгрыш распределения сочетаний « $t - w$ » состоит в поэлементном разыгрывании тех клеток таблицы, где эти сочетания существуют, причём сочетания берутся столько раз, сколько указано в клетке. Если  $t$  и  $w$  брать серединами интервалов, например,  $t = -2,5^{\circ}$  и  $w = 78\%$ , то эти сочетания необходимо разыгрывать 100 раз (табл. 3) и т.д.

Таблица 3

**Продолжительность (часы) сочетаний температуры и относительной влажности воздуха для холодного арктического климата (Диксон, Россия)**

| Температура        |    | Относительная влажность, % |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|--------------------|----|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                    |    | 36-40                      | 41-45 | 46-50 | 51-55 | 56-60 | 61-65 | 66-70 | 71-75 | 76-80 | 81-85 | 86-90 | 91-95 | 96-100 |
| $^{\circ}\text{C}$ | №  | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13     |
| -49,9:-45          | 1  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      |
| -44,9:-40          | 2  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 3     | 8     | 15    | 4     | 6     | 0     | 0      |
| -39,9:-35          | 3  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 0     | 6     | 13    | 40    | 73    | 51    | 17    | 3     | 2      |
| -34,9:-30          | 4  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 1     | 6     | 19    | 84    | 154   | 178   | 116   | 45    | 14     |
| -29,9:-25          | 5  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 1     | 3     | 24    | 68    | 189   | 194   | 200   | 85    | 31     |
| -24,9:-20          | 6  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 2     | 5     | 17    | 55    | 128   | 221   | 215   | 168   | 80     |
| -19,9:-15          | 7  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 1     | 5     | 13    | 40    | 97    | 186   | 232   | 217   | 135    |
| -14,9:-10          | 8  | 0                          | 0     | 0     | 1     | 1     | 6     | 13    | 43    | 84    | 137   | 223   | 240   | 150    |
| -9,9:-5            | 9  | 0                          | 0     | 0     | 0     | 1     | 6     | 14    | 33    | 72    | 134   | 193   | 220   | 158    |
| -4,9:0             | 10 | 0                          | 0     | 0     | 1     | 7     | 12    | 29    | 61    | 100   | 159   | 245   | 332   | 343    |
| 0,1:5              | 11 | 0                          | 0     | 0     | 0     | 3     | 8     | 13    | 43    | 86    | 171   | 308   | 437   | 303    |
| 5,1:10             | 12 | 0                          | 0     | 0     | 1     | 3     | 8     | 20    | 39    | 79    | 107   | 120   | 122   | 183    |
| 10,1:15            | 13 | 1                          | 1     | 2     | 3     | 6     | 9     | 13    | 23    | 23    | 25    | 24    | 24    | 19     |
| 15,1:20            | 14 | 1                          | 1     | 1     | 2     | 3     | 8     | 7     | 8     | 5     | 5     | 3     | 0     | 0      |
| 20,1:25            | 15 | 0                          | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      |

Сочетания « $t - w$ », которые могут быть названы векторами погоды, позволяют не только определять толщину слоя осаждаемой воды, но и моделировать аэрозольную составляющую прозрачности атмосферы (дымки).

Пропусканию оптических сигналов в атмосферных аэрозолях, гранулометрии облаков и размерам зон дождей посвящено большое количество публикаций [4–20].

Экспериментальное изучение прозрачности атмосферных дымок [2] позволило представить показатель ослабления сигнала в виде

$$\alpha_\lambda = \frac{3,912}{S_m} (h_0 + h_1 \cdot \lambda^{-h_2}), \quad (2)$$

где  $h_0, h_1, h_2$  – параметры для различных типов дымок;  $\lambda$  – длина волны излучения.

С помощью специального алгоритма типы дымок увязываются с векторами погоды  $t, w$ . Период (сезон) можно конкретизировать с помощью температуры, а дальнейшая сортировка дымок осуществлялась с помощью температуры и дальности метеовидимости (подробно об этом в [1]).

Рассмотрим теперь, как дальность метеовидимости  $S_m$  связана с векторами погоды «температура – относительная влажность воздуха». Исследования, проведенные в СССР ГГО им. А.И. Воейкова по изучению прозрачности приземного слоя атмосферы [3], показали, что дальность метеовидимости  $S_m$  зависит от дефицита влажности  $d$  следующим образом (рис. 3).

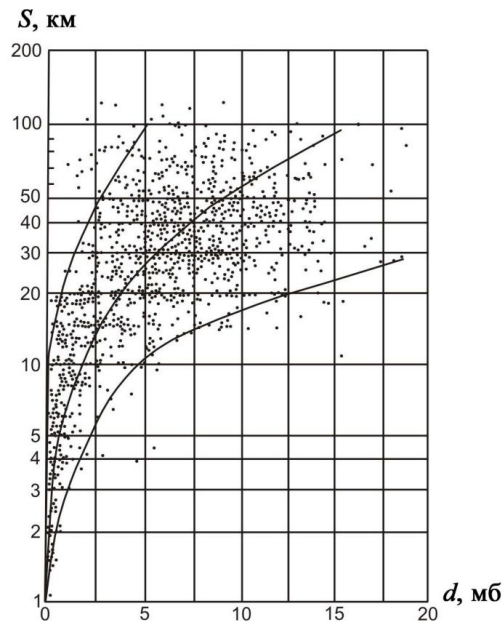


Рис. 3. Зависимость дальности метеовидимости от дефицита влажности (по данным [3])

Нами были подобраны верхняя и нижняя границы распределения точек  $S_m^B$  и  $S_m^H$  и функция, описывающая математическое ожидание  $m_{S_m}$ , относительно которого точки распределены нормально:

$$\begin{cases} S_M^B = \exp(2,71 \cdot \exp(0,1 \cdot d)), & \text{при } d \leq 5 \text{ мб}; \\ S_M^H = \exp(d^{0,52}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_M^B = 100, \\ S_M^H = \exp(2,24 \cdot d^{0,1}) \end{cases} \quad \text{при } d \geq 5 \text{ мб};$$

$$m_{S_M} = \exp(1,98 \cdot d^{0,31}); \quad (4)$$

$$\sigma_{S_M} = \frac{m_{S_M} - S_M^H}{3}. \quad (5)$$

Дальность метеовидимости равна

$$S_M = m_{S_M} + \sigma_{S_M} \cdot \eta, \quad (6)$$

где  $\eta$  – нормально распределенное число.

Дефицит влажности  $d$  определяется как

$$d = E(1 - w), \quad (7)$$

где  $E$  – упругость насыщенного водяного пара (мб), которая в диапазоне температур  $\pm 50$  °C рассчитывается по предложенной нами формуле

$$E = \exp(-0,000311 \cdot t^2 + 0,0758 \cdot t + 1,81). \quad (8)$$

Таким образом, распределение « $t - w$ » (табл. 3) совместно с законом распределения дальности метеовидимости (зависимости (3)–(8)) позволяют строить законы распределения дальности метеовидимости для различных метеопунктов, обладающих распределением « $t - w$ ».

Законы распределения  $S_M$  для холодной (Диксон), умеренной (Москва), жаркой сухой (Ашхабад) и субтропической влажной (Батуми) климатических зон, приведены на рис. 4,а.

Для проверки достоверности моделирования был проведен годичный цикл исследований видимости объектов из специальной высотной лаборатории в Туле (АО «КБП») (рис. 4,б).

Сопоставляя графики на рис. 4,б, можно констатировать хорошее совпадение. Некоторое превышение экспериментального графика для Тулы можно объяснить более теплым (на 2 °C) климатом города, который южнее Москвы на 190 км.

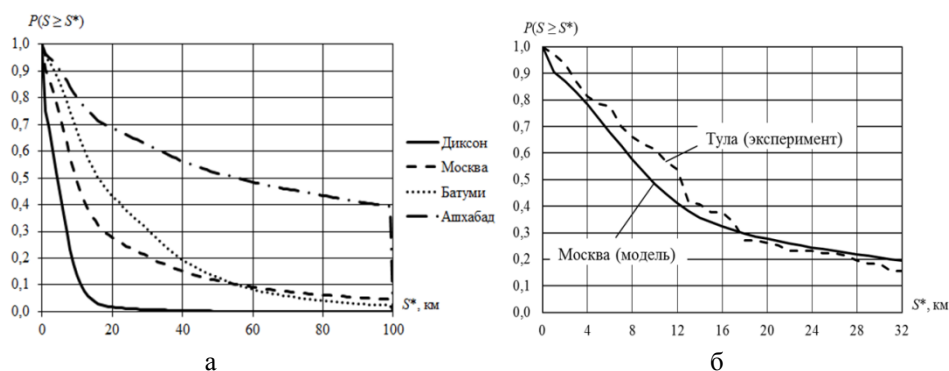


Рис. 4. Распределение дальностей метеовидимости для различных типов климата (а) и распределение метеовидимостей для Москвы (модель) и Тулы (эксперимент) (б)

Всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов рассматривалась на горизонтальных приземных трассах. Характеристики приборов приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Характеристики приборов наблюдения**

| Характеристика прибора      | Телекамера  | Тепловизор MATIS-STD | Тепловизор 8–12 мкм | Тепловизор MATIS-LR |
|-----------------------------|-------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Спектральный диапазон, мкм  | 0,5–0,7     | 3–5                  | 8–12                | 3–5                 |
| Диаметр входного зрачка, мм | 50          | 53                   | 160                 | 100                 |
| Фокусное расстояние, мм     | 400         | 212                  | 280                 | 400                 |
| Размерность матрицы         | 1000 x 1000 | 320 x 240            | 320 x 240           | 320 x 240           |
| Угловое поле, град          | 0,8 x 0,8   | 2,5 x 1,7            | 2,0 x 1,5           | 1,3 x 0,9           |

Всепогодность исследуемых тепловизоров представлена на рис. 5–8. Наблюдаемый объект имеет высоту  $h = 2,7$  м, при этом тепловой контраст между объектом и фоном составляет  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а визуальный контраст (для телекамер) – 20 %.

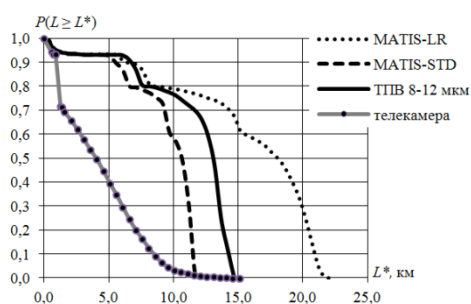


Рис. 5. Всепогодность наблюдательных приборов для метеопункта Диксон (Россия). Холодный арктический климат

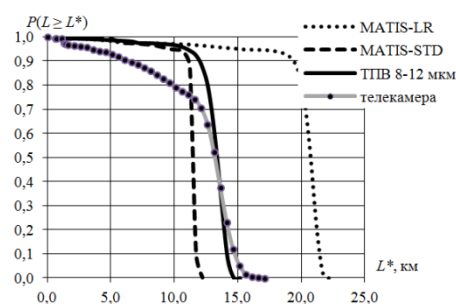


Рис. 6. Всепогодность наблюдательных приборов для метеопункта Ашхабад (Туркмения). Жаркий сухой климат

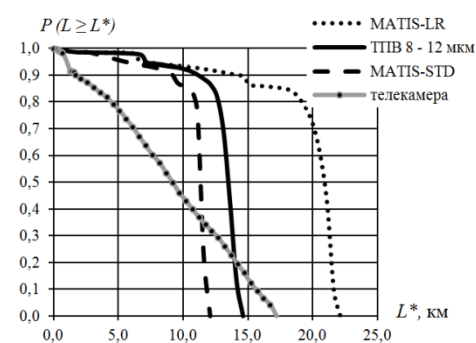


Рис. 7. Всепогодность наблюдательных приборов для метеопункта Москва (Россия). Умеренный климат

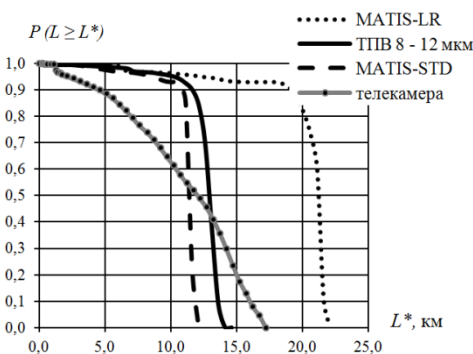


Рис. 8. Всепогодность наблюдательных приборов для метеопункта Батуми (Грузия). Влажный тропический климат

Исследование всепогодности приборов потребовало систематизации законов распределения «температура – относительная влажность» для 19 метеопунктов различных климатических зон. Установлено, что они могут быть сведены к четырем типам климатических зон, характерных для Земного шара в целом и представляющих холодный, умеренный, жаркий сухой и жаркий влажный климат. В качестве типичных представителей этих зон выбраны: поселок Диксон – побережье Северного Ледовитого океана, Москва – классический представитель умеренного климата, Батуми – влажные субтропики и Ашхабад – представитель жаркого сухого климата среднеазиатских пустынь. Эти представители охватывают весь практически интересный диапазон температур: от  $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Диксон) до  $+47\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Ашхабад).

**Выводы.** Высокая всепогодность тепловизоров объясняется высоким пропусканием в атмосферных дымках, которые и «обрезают» дальность действия приборов видимого диапазона. Мы неоднократно наблюдали, что тепловизор в плотных дымках с метеовидимостью  $S_m = 1\text{--}4\text{ км}$  обнаруживает цель на дальностях в 5–10 раз больших, чем  $S_m$ . В антропогенных дымках от лесных пожаров ( $S_m = 1\text{ км}$ ) эта разница достигает 40 единиц, что наблюдалось нами в Туле в 2004 году.

Сравнивая всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения, отметим, что на небольших дальностях (5 км) тепловизор превосходит ТВ-камеру в 2 раза только в холодном климате, в умеренном и теплом показатели близки, в Ашхабаде показатели практически равны.

При увеличении дальности до 10 км показатели всепогодности ТПВ и ТВ-камер в холодном климате уже отличаются на порядок, а в умеренном – в 2 раза.

Сравнивая тепловизор с диапазоном длин волн 8–12 мкм и MATIS-STD ( $\Delta\lambda = 3\text{--}5\text{ мкм}$ ) с близкими угловыми полями зрения, можно сказать, что на дальности 5 км их всепогодности высоки и равны. Однако на дальности 10 км видно преимущество тепловизора с диапазоном длин волн 8–12 мкм. В Диксоне это преимущество составляет 15–17 %, в Москве  $\sim 7\text{--}9\%$ , в других, более теплых зонах всепогодность одинаково высока и достигает 0,85–0,97. Лишь в особо влажных и жарких регионах (Персидский залив, Индия) небольшое преимущество у тепловизора с диапазоном длин волн 3–5 мкм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Дальность действия, всесуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. – М.: Машиностроение, 2011. – 218 с.
2. Филиппов В.Л., Мирумянц С.О. Аэрозольное ослабление ИК-радиации в «окнах прозрачности» атмосферы // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1971. – Т. 8. № 7. – С. 818-819.
3. Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Е.А. Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Труды ГГО. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – Вып. 220. – 244 с.
4. Asano S. Light scattering properties of spheroidal particles. – 1979.
5. Cai Q., Liou K.-N. Theory of time-dependent multiple back-scattering from clouds // J. Atm. Sci. – 1981. – Vol. 38, No. 7. – P. 1452-1466.
6. Cameson A.L.H., Quaije R.D. The yearly distribution of rainfall intensities // Meteorol. Mag. – 1965. – Vol. 94, No. 115. – С. 4.
7. Davis J.M., Cox S.K., McKee T.B. Vertical and horizontal distributions of solar absorption in finite clouds // J. Atm. Sci. – 1979. – Vol. 36, No. 10. – P. 1976-1984.
8. Grassl H. Bestimmung der Grossenverteilung von Wolkelementen aus spektralen Transmissionsmessungen // Beitr. Phys. Atm. – 1970. – Vol. 43, No. 4. – P. 255-284.
9. Hensen J. E., Cheyney H. Theoretical spectra scattering of ice clouds in the near infrared // J. Geoph. Research. – 1969. – Vol. 74, No. T-13. – P. 3337-3346.



10. Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation. – New-York, London Acad, Press, 1969. – 645 p.
11. Mie G. A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions // *Annal. Phys.* – 1908. – Vol. 25, No.4. – P. 377-445.
12. Pawlina A. Some features of ground rain pattern measured by radar in North Italy // *Radio Sci.* – 1984. – Vol. 19, No. 3. – P. 855-861.
13. Piass G.N., Kattawar G.N. Radiative transfer in water and and ise clouds in the visible and infrared region // *J. Appl. Optics.* – 1971. – Vol. 10, No. 4. – P. 738-748.
14. Rusk A.N., Williams D., Querry M.R. Optical constants of water in the infrared // *J. Opt. soc. Amer.* – 1971. – Vol. 61, No. 7. – P. 895-903.
15. Sassen K. Infrared (10,6  $\mu$ ) scattering and extinction in laboratory water and ise clouds // *Appl. Opt.* – 1987. – Vol. 20, No. 2. – P. 185-193.
16. Sassen K., Liou K.-N. scattering of polarized laser light by water droplet, mixed-phase and ice crystal clouds. Part 1: Angular scattering patterns // *J. Atm. Sci.* – Vol. 36, No. 5. – P. 838-851.
17. Schaaf J.W., Williams D. Optical constants of ice in the infrared // *J. Opt. Soc. Amer.* – 1973. – Vol. 63, No. 6. – P. 720-732.
18. Siedentopf H., Reger E. *Met. Zeit.* – 1944. – No. 61. – P. 114.
19. Warren S.G. Optical constants of ice from ultraviolet to the microwave // *Appl. Opt.* – 1984. – Vol. 18, No. 8. – P. 1206-1225.
20. Wickramasinghe N.C. Light scattering functions for small particles with applications in astronomy. – London. Adam Hilger, 1973. – 506 p.

## REFERENCES

1. Shipunov A.G., Semashkin E.N. Dal'nost' deystviya, vsesutochnost' i vsepogodnost' televizionnykh i teplovizionnykh priborov nablyudeniya [Operation range, day-and-night and all-weather capability of the TV and thermal imaging observation devices]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 218 p.
2. Filippov V.L., Mirumyants S.O. Aerazol'noe oslablenie IK-radiatsii v «oknakh prozrachnosti» atmosfery [Aerosol attenuation of the infrared radiation in atmospheric windows], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya of Aof Scs USSR. Atmosphere and ocean physics], 1971, Vol. 8, No. 7, pp. 818-819.
3. Barteneva O.D., Dovgyallo E.N., Polyakova E.A. Eksperimental'nye issledovaniya opticheskikh svoystv prizemnogo sloya atmosfery [Experimental researches of optical features of near-surface atmosphere], *Trudy GGO* [Works GGO]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967, Issue 220, 244 p.
4. Asano S. Light scattering properties of spheroidal particles, 1979.
5. Cai Q., Liou K.-N. Theory of time-dependent multiple back-scattering from clouds, *J. Atm. Sci.*, 1981, Vol. 38, No. 7, pp. 1452-1466.
6. Cameson A.L.H., Quaije R.D. The yearly distribution of rainfall intensities, *Meteorol. Mag.*, 1965, Vol. 94, No. 115. pp. 4.
7. Davis J.M., Cox S.K., McKee T.B. Vertical and horizontal distributions of solar absorption in finite clouds, *J. Atm. Sci.*, 1979, Vol. 36, No. 10, pp. 1976-1984.
8. Grassl H. Bestimmung der Grossenverteilung von Wolkenelementen aus spektralen Transmissionsmessungen, *Beitr. Phys. Atm.*, 1970, Vol. 43, No. 4, pp. 255-284.
9. Hensen J. E., Cheyney H. Theoretical spectra scattering of ice clouds in the near infrared, *J. Geoph. Research*, 1969, Vol. 74, No. T-13, pp. 3337-3346.
10. Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation. New-York, London Acad, Press, 1969, 645 p.
11. Mie G. A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions, *Annal. Phys.*, 1908, Vol. 25, No.4, pp. 377-445.
12. Pawlina A. Some features of ground rain pattern measured by radar in North Italy, *Radio Sci.*, 1984, Vol. 19, No. 3, pp. 855-861.
13. Piass G.N., Kattawar G.N. Radiative transfer in water and and ise clouds in the visible and infrared region, *J. Appl. Optics.*, 1971, Vol. 10, No. 4, pp. 738-748.
14. Rusk A.N., Williams D., Querry M.R. Optical constants of water in the infrared, *J. Opt. soc. Amer.*, 1971, Vol. 61, No. 7, pp. 895-903.

15. *Sassen K.* Infrared (10,6  $\mu$ ) scattering and extinction in laboratory water and ice clouds, *Appl. Opt.*, 1987, Vol. 20, No. 2, pp. 185-193.
16. *Sassen K., Liou K.-N.* scattering of polarized laser light by water droplet, mixed-phase and ice crystal clouds. Part 1: Angular scattering patterns, *J. Atm. Sci.*, Vol. 36, No. 5, pp. 838-851.
17. *Schaaf J.W., Williams D.* Optical constants of ice in the infrared, *J. Opt. Soc. Amer.*, 1973, Vol. 63, No. 6, pp. 720-732.
18. *Siedentopf H., Reger E.* *Met. Zeit.* 1944. No. 61, pp. 114.
19. *Warren S.G.* Optical constants of ice from ultraviolet to the microwave, *Appl. Opt.*, 1984, Vol. 18, No. 8, pp. 1206-1225.
20. *Wickramasinghe N.C.* Light scattering functions for small particles with applications in astronomy. London. Adam Hilger, 1973, 506 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.В. Ветров.

**Семашкин Евгений Николаевич** – АО «Конструкторское бюро приборостроения имени академика А.Г. Шипунова»; e-mail: kbkedr@tula.net; semashkin.e.n@gmail.com; 300001, г. Тула, ул. Щегловская засека, 59; тел.: 84872469864; факс: 84872426139, 469861; д.т.н.; профессор; начальник отдела.

**Артюшкина Татьяна Владимировна** – начальник сектора.

**Гарбузова Татьяна Вячеславовна** – начальник сектора.

**Болотников Алексей Васильевич** – ведущий инженер-исследователь.

**Semashkin Evgeniy Nikolaevich** – JSC “KBP named after Academician A. Shipunov”; e-mail: kbkedr@tula.net; semashkin.e.n@gmail.com; 59, Shcheglovskaya Zaseks street, Tula, 300001, Russia; phone: +74872469864; fax: +74872426139; 469861; dr. of eng. sc.; professor; chief of division.

**Artyushkina Tatyana Vladimirovna** – chief of sector.

**Garbuzova Tatyana Vyacheslavovna** – chief of sector.

**Bolotnikov Alexey Vasil’evich** – principal research engineer.