

УДК 551.501
EDN: XKEUEQ

PACS: 42.68.Bz, 42.68.Ge, 42.68.Jg

Границы диапазона измерения метеорологической оптической дальности трансмиссометрами

П. Н. Назаренко

Представлены результаты анализа и оценки пределов и точности измерения метеорологической оптической дальности (МОД) с помощью оптических трансмиссометров. Получены уравнения для расчета абсолютной и относительной методических погрешностей измерения МОД. Использование этих уравнений позволяет решить как прямую задачу расчета границ измерения МОД при заданных требованиях к предельно допустимым погрешностям измерения МОД, так и обратную задачу: расчет зависимостей методических погрешностей измерения МОД от предела абсолютной погрешности измерения коэффициента направленного пропускания трансмиссометром, длины измерительной базы и МОД. Особенностью полученных зависимостей погрешностей измерения МОД от МОД является их нелинейность, наличие минимума и, как следствие, наличие как нижней, так и верхней границ диапазона измерения МОД. Границы диапазонов измерения МОД с заданной точностью отличаются от диапазона МОД, соответствующего метеорологическому диапазону измерения коэффициента пропускания атмосферы 0,1–99 %. Приводится обсуждение полученных результатов.

Ключевые слова: трансмиссометр; метеорологическая оптическая дальность; коэффициент пропускания атмосферы; измерительная база; спектральный коэффициент направленного пропускания (СКНП).

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-6-567-575

Введение

В современных средствах измерения видимости атмосферы производится непосредственное измерение коэффициента пропускания в слое атмосферы, соответствующем измерительной базе или показателю ослабления с последующим преобразованием измеренного коэффициента пропускания в метеорологическую оптическую дальность (МОД)

[1, 2]. МОД официально принята в качестве меры видимости в атмосфере и основной метеорологической величины при определении дальности видимости на ВПП (взлетно-посадочной полосе) [2–4]. Концепция МОД достаточно объективно отражает оптическое состояние атмосферы и до настоящего времени считается наиболее приемлемой при использовании инструментальных методов измерения видимости в атмосфере, как в дневное, так и в ночное время [2–4].

Наименьшей погрешностью измерения МОД обладают трансмиссометры [1, 2]. Метод измерения метеорологической оптической дальности (МОД) оптическими трансмиссометрами заключается в непосредственном измерении коэффициента пропускания атмосферы, соответствующим измерительной базе с последующим преобразованием измеренного

Назаренко Павел Николаевич, в.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: nprn05@mail.ru
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».
Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-1.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024

После доработки 18.11.2024

Принята к публикации 12.12.2024

Шифр научной специальности: 1.3.19

© Назаренко П. Н., 2024

коэффициента пропускания в МОД [2, 5]. Трансмиссометры как средство измерений относятся к спектрофотометрам.

В соответствии с ГОСТ 8.557–2007 [6] пределы допускаемых абсолютных погрешностей рабочих спектрофотометров в диапазоне измерений от 0,01 до 0,99 составляют: – от 0,0015 до 0,0030 при передаче размера единицы от вторичных эталонов; – от 0,003 до 0,020 при передаче размера единицы от рабочих эталонов.

Некоторые производители в своих технических характеристиках на приборы приводят пределы диапазонов показаний и точности измерения коэффициентов пропускания атмосферы (КПА), которые соответствуют инструментальным возможностям приборов. При этом не учитываются ограничения диапазонов и погрешности измерений, связанные с самим фотометрическим методом измерений, т. е. методические погрешности. Так, например, сообщается о диапазонах измерения коэффициентов пропускания атмосферы от 0,01 до 100 % при соответствующей точности измерений не хуже 0,01 % [7]. Для сравнения, расширенная неопределенность воспроизведения единицы спектрального коэффициента направленного пропускания (СКНП) Государственного первичного эталона (ГПЭ) РФ (ГЭТ 156–2015) составляет 0,08 %, диапазон измерений 1–99 % [8]. Как следствие, в области законодательной метрологии поверка приборов в диапазонах коэффициентов пропускания атмосферы от 0,01 % до 1,0 (0,1) % и от 99 % до 100 % и точности измерений 0,01 % невозможна.

Преобразование измеренного трансмиссометром КПА в МОД сопряжено с некоторыми особенностями, связанными с логарифмической зависимостью между указанными параметрами, что не обеспечивает преобразование коэффициента пропускания в МОД с одинаковой точностью во всем диапазоне измерения. В результате границы диапазона и точность измерения МОД зависят, как от длины измерительной базы, так и от точности измерения коэффициента пропускания атмосферы.

В зависимости от пределов допускаемых абсолютной и относительной погрешностей измерения МОД границы диапазонов измерения МОД могут существенно отличаться как от данных, приводимых разными производителями, так и от требований ИКАО [2, 9–12].

Целью настоящей работы являлось математическое исследование влияния на границы диапазонов измерения МОД методических погрешностей измерений, связанных с преобразованием измеряемого трансмиссометрами коэффициента пропускания атмосферы в МОД.

Оценка границ измерения МОД для различных измерительных баз

За метеорологическую оптическую дальность (МОД) принимается длина пути светового луча в атмосфере, на котором световой поток ослабляется до 0,05 его первоначального значения. Отношение между МОД (метеорологической дальностью видимости) и показателем ослабления с использованием закона Кошмидера выражается в виде [2]:

$$MOR = a \frac{\ln 0,05}{\ln \tau} = -\frac{2,996 a}{\ln \tau}, \quad (1)$$

где MOR – метеорологическая оптическая дальность, τ – коэффициент пропускания атмосферы, a – длина измерительной базы.

Данное уравнение является основным уравнением для определения МОД. Из данного уравнения видно, что границы измеряемой МОД определяются нижними и верхними границами измеряемого диапазона пропускания атмосферы τ_{\min} и τ_{\max} и длиной измерительной базы a .

Уравнение (1) позволяет провести оценку границ диапазона МОД в пределах метрологического диапазона спектрального коэффициента направленного пропускания (СКНП) от 0,1 до 99 %. Соответствующие диапазоны МОД зависят от длины измерительной базы (a) и составляют $0,44a$ – $300a$.

В таблице 1 приведены расчетные значения границ диапазонов МОД для нескольких длин измерительных баз. С учетом максимальной границы измерений МОД (для реальных приборов 10 000 м) оптимальной длиной измерительной базы является 35 м. На данной измерительной базе в пределах диапазона коэффициента пропускания атмосферы 0,1–99 % соответствующий диапазон значений МОД составляет 15–10 500 м. Для сравнения в таблице 1 представлены данные для ряда транс-

миссометров разных производителей [10–12]. Характеристики приборов практически совпадают с расчетными значениями.

Увеличение длины измерительной базы приводит к расширению диапазона измерения МОД за счет увеличения его верхнего предела. Но при этом увеличивается нижний предел измерений МОД. Так, на нижней границе коэффициента пропускания $\tau_{\min} = 0,1\%$ соответствующее значение МОД уже превышает 10 м и увеличивается с увеличением длины измерительной базы, достигая значений более 40 м

на длине измерительной базы 100 м. При этом максимальное значение МОД, соответствующее верхней границе диапазона коэффициента пропускания $\tau_{\max} = 99\%$, на длине измерительной базы 25 м составляет только 7 500 м.

Таким образом, проведенные оценки показывают, что метрологическому диапазону измерений СКНП 0,1–99 % соответствует диапазон измерения МОД 0,44а–300а. Для измерения МОД не ниже 10000 м требуются измерительные базы со стандартной длиной 35 м и более.

Таблица 1

Границы диапазонов измерения МОД в диапазоне коэффициентов пропускания атмосферы 0,1–99 %

Длина измерительной базы, м	Диапазон МОД, м			
	Расчет	Пеленг СФ-01	Vaisala LT 31	ЛОМО ФИ-6
25	11–7 500			
30	13–9 000	15–10 000	10–10 000	
35	15–10 500			20–10 000
50	22–15 000	25–10 000	25–10 000	
75	33–22 500	40–10 000	37,5–10 000	
100	44–30 000	50–10 000		

Зависимость границ диапазона измерения МОД от требований к точности измерений

Преобразование измеренного трансмиссометром коэффициента пропускания в МОД сопряжено с некоторыми особенностями, связанными с логарифмической зависимостью между указанными параметрами, что не обеспечивает преобразование коэффициента пропускания в МОД с одинаковой точностью во всем диапазоне измерения МОД от 0,44а до 300а. Поэтому другим фактором, определяющим границы измеряемого диапазона МОД, являются требования к точности измерений МОД.

Дифференцирование уравнения (1) позволяет получить связь между относительной погрешностью измерения МОД и погрешностью измерения коэффициента пропускания атмосферы:

$$\frac{\Delta MOR}{MOR} = -\frac{\Delta \tau}{\tau \ln \tau}, \quad (2)$$

где ΔMOR – абсолютная погрешность измерения МОД; MOR – метеорологическая оптическая дальность; τ – коэффициент пропускания

атмосферы; $\Delta \tau$ – предел абсолютных погрешностей СКНП трансмиссометра.

Из уравнения (2) видно, что относительная погрешность зависит только от коэффициента пропускания атмосферы τ и погрешности его измерения $\Delta \tau$. Абсолютная погрешность ΔMOR зависит и от длины измерительной базы:

$$\Delta MOR = 2,996 a \frac{\Delta \tau}{\tau \ln^2 \tau}. \quad (3)$$

Как абсолютная, так и относительная погрешности измерения МОД нелинейно зависят от КПА. Поэтому для оценки границ диапазонов измерений МОД удобно применение графоаналитического метода решения уравнений (2) и (3). Метод заключается в построении графиков зависимостей погрешностей измерения МОД от КПА для ряда предельно допустимых абсолютных погрешностей измерения КПА с последующим определением границ диапазона КПА на выбранном уровне $\Delta MOR/MOR$ или ΔMOR .

Для анализа зависимостей абсолютных и относительных погрешностей измерения МОД от коэффициента пропускания атмосферы были выбраны следующие значения $\Delta \tau$ [7]:

– нижний предел диапазона абсолютных погрешностей рабочих спектрофотометров при передаче размера единицы от вторичных эталонов: 0,0015;

– нижний предел диапазона абсолютных погрешностей рабочих спектрофотометров при передаче размера единицы от рабочих эталонов: 0,003;

– верхний предел диапазона абсолютных погрешностей рабочих спектрофотометров при передаче размера единицы от рабочих эталонов: 0,020.

На рисунке 1 приведены графики расчетных зависимостей методических относительных погрешностей МОД от коэффициента пропускания атмосферы τ для трех значений $\Delta\tau$: 0,0015 (0,15 %), 0,003 (0,3 %) и 0,02 (2 %). В качестве верхней границы диапазона относительной погрешности МОД не выше 20 % приняты рекомендации ИКАО к точности измерения видимости $\pm 20\%$ при значениях МОД свыше 1500 м [2]. Из полученных зависимостей видно, что на границах диапазона коэффициентов пропускания атмосферы относительная погрешность $\Delta MOR/MOR$ резко возрастает даже при незначительном изменении измеряемого коэффициента пропускания. При этом снижение требований к точности измерения КПА приводит к сужению диапазона измерения КПА.

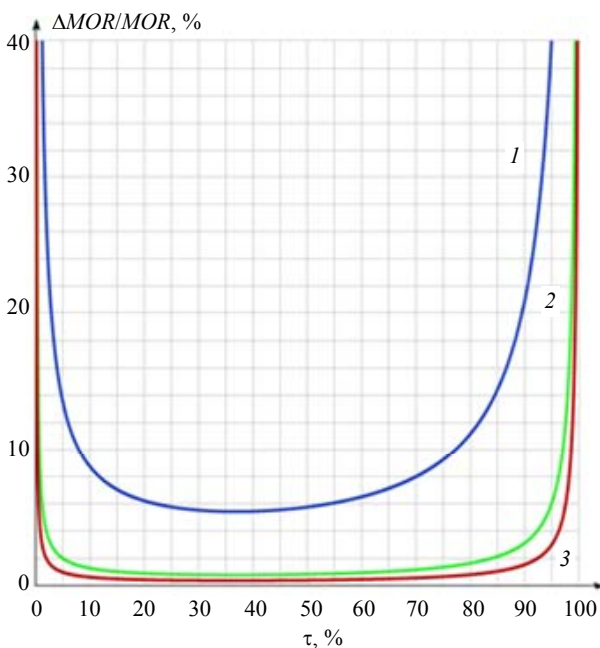


Рис. 1. Расчетные зависимости относительной погрешности МОД от коэффициента пропускания атмосферы для $\Delta\tau$: 2,0 % (1); 0,3 % (2) и 0,15 % (3)

Так, для приборов с верхним пределом $\Delta\tau = 0,02$ (2 %) диапазон МОД, соответствующий относительной погрешности МОД $\pm 20\%$, составляет 1,1–95 %. Для приборов с $\Delta\tau = 0,003$ диапазон измерения КПА составляет 0,1–99 %.

Таким образом, для приборов, калибровка которых осуществляется при использовании рабочих эталонов, верхняя и нижняя границы диапазонов измерения пропускания атмосферы находятся в пределах метрологического диапазона измерения СКНП 0,1–99 %.

Уравнения (2) и (3) позволяют определить методические относительную и абсолютные погрешности измерения МОД в зависимости от коэффициента пропускания атмосферы. Однако, в большинстве случаев требования к точности измерений МОД определяются диапазоном измерения МОД. Преобразование уравнений (2) и (3) позволяет получить следующие уравнения для относительной и абсолютной погрешностей:

$$\Delta MOR / MOR = MOR \frac{\exp\left(\frac{2,996 a}{MOR}\right)}{2,996 a} \Delta\tau, \quad (4)$$

$$\Delta MOR = MOR^2 \frac{\exp\left(\frac{2,996 a}{MOR}\right)}{2,996 a} \Delta\tau. \quad (5)$$

Полученные уравнения (4) и (5) позволяют при известных значениях $\Delta\tau$:

– оценить границы диапазонов измерения МОД, в пределах которых обеспечивается требуемая точность измерений;

– определить погрешности измерения МОД на границах рабочего диапазона измерения МОД.

Из полученных уравнений (4) и (5) видно, что для математического анализа закономерностей взаимосвязей параметров, входящих в данные уравнения, удобно ввести понятие нормируемой МОД: $F = MOR/a$. Данное отношение F позволяет исключить из анализа конкретные значения МОД и длины измерительной базы. Тогда уравнения (4) и (5) принимают вид:

$$\frac{\Delta MOR}{MOR} = \frac{F}{2,996} \exp\left(\frac{2,996}{F}\right) \Delta\tau, \quad (6)$$

$$\Delta MOR = \frac{aF^2}{2,996} \exp\left(\frac{2,996}{F}\right) \Delta\tau. \quad (7)$$

Нормирование МОД на длину измерительной базы позволяет при проведении анализа достаточно просто определить как пределы измерений МОД на выбранной базе, так и выбрать длину измерительной базы в зависимости от требований к точности измерения МОД на границах измерительного диапазона. Так, например, в диапазоне измерения МОД от $0,44a$ до $300a$, соответствующему метрологическому диапазону СКНП от 0,1 до 99 % относительная погрешность измерений МОД составляет порядка $135\Delta\tau$ и $100\Delta\tau$ для нижнего и верхнего пределов измерения МОД, соответственно.

Как абсолютная, так и относительная погрешности измерения МОД нелинейно зависят от F . Поэтому для оценки границ диапазонов измерений МОД, как и в предыдущем случае, удобно применение графоаналитического метода решения уравнений (6) и (7). Метод заключается в построении графиков зависимостей погрешностей измерения МОД от F для ряда предельно допустимых абсолютных погрешностей измерения КПА с последующим определением границ диапазона измерения МОД на выбранном уровне $\Delta MOR/MOR$ или ΔMOR .

На рисунках 2 и 3 приведены графики зависимостей относительной погрешности МОД от МОД, нормированной на длину измерительной базы, MOR/a . Данные зависимости получены с использованием уравнения (6) для трех значений пределов допускаемых абсолютных погрешностей рабочих спектрофотометров 0,0015 (0,15 %), 0,003 (0,3 %) и 0,02 (2 %).

Особенностью полученных зависимостей является наличие как нижнего, так и верхнего пределов диапазона измерения МОД, определяемых требованиями к $\Delta MOR/MOR$. Вблизи нижнего предела измерений данные зависимости имеют явно выраженный экспоненциальный характер (рис. 3). При приближении МОД к нижней границе относительная погрешность измерений резко возрастает с долей – единиц процентов до 40 % и выше. При увеличении МОД относительная погрешность

$\Delta MOR/MOR$ достигает минимума и начинает снова возрастать практически линейно (рис. 2).

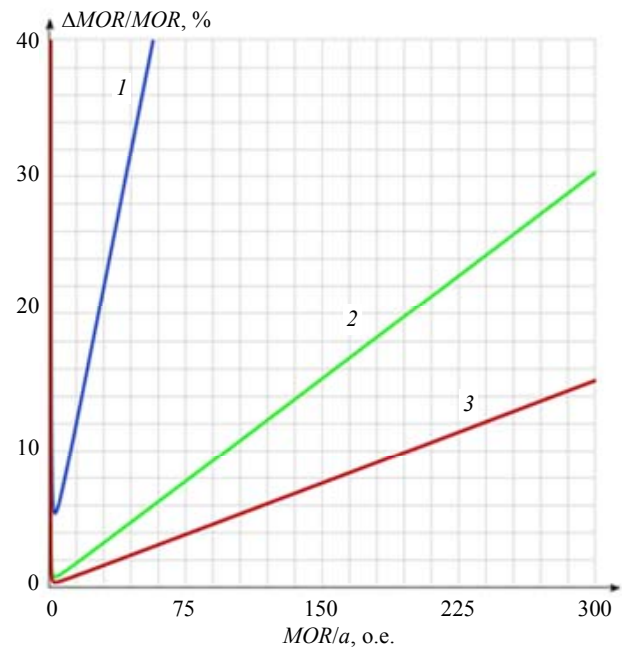


Рис. 2. Расчетные зависимости относительной погрешности $\Delta MOR/MOR$ от MOR/a для $\Delta\tau$: 2,0 % (1); 0,3 % (2) и 0,15 % (3)

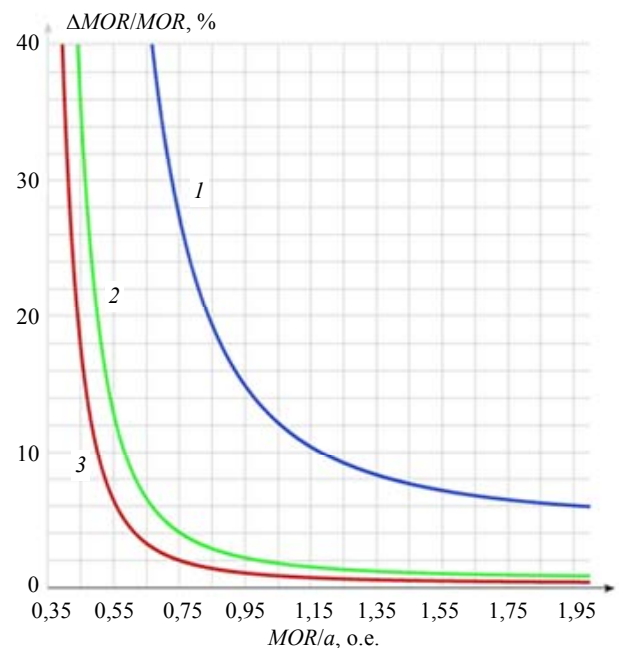


Рис. 3. Расчетные зависимости относительной погрешности $\Delta MOR/MOR$ от MOR/a для $\Delta\tau$: 2,0 % (1); 0,3 % (2) и 0,15 % (3)

Приведенные на рисунках 2 и 3 графики позволяют определить как минимальные значения $\Delta MOR/MOR$, так и определить границы нормируемой МОД для различных уровней относительной погрешности измерения.

Из сравнения графиков полученных зависимостей также видно, что снижение требований к точности измерения, т. е. увеличение верхнего предела диапазона абсолютных погрешностей $\Delta\tau$ приводит к существенному сужению диапазона измерений МОД.

В таблице 2 приведены диапазоны измерений МОД для ряда значений $\Delta\tau$, рассчитанные при разных требованиях к относительной погрешности $\Delta MOR/MOR$. Для сравнения в данной таблице представлены диапазоны измерений МОД, рекомендованные ИКАО [2, 4].

Таблица 2

Границы диапазонов МОД в зависимости от требований к верхнему пределу относительной погрешности измерения МОД

$\frac{\Delta MOR}{MOR}$, %	Диапазоны МОД для различных $\Delta\tau$, м			Диапазоны МОД в соответствии с рекомендациями ИКАО [2], м
	$\Delta\tau = 0,15\%$	$\Delta\tau = 0,3\%$	$\Delta\tau = 2\%$	
± 5	(0,6–100) <i>a</i>	(0,7–50) <i>a</i>	–	–
± 10	(0,5–200) <i>a</i>	(0,6–100) <i>a</i>	(1,15–15) <i>a</i>	600–1500
± 20	(0,45–400) <i>a</i>	(0,5–200) <i>a</i>	(0,85–30) <i>a</i>	более 1500

Приведенные в таблице 2 данные позволяют определить диапазоны длин измерительных баз, в пределах которых выполняются рекомендации ИКАО к диапазонам и точности измерений МОД. Так, принимая в качестве верхней границы МОД значение 10 000 м (табл. 1) и $\Delta MOR/MOR = 0,2$, получаем при $\Delta\tau = 2\%$ значение *a* порядка 300 м.

Максимальная стандартная длина измерительной базы составляет 100 м. Для данной длины измерительной базы соответствующий предел допустимой абсолютной погрешности $\Delta\tau$ не должен превышать 0,6 %. При данном значении $\Delta\tau$ полный диапазон измерения МОД с точностью измерения не хуже $\pm 20\%$ находится в пределах от 55 м до 10 000 м. Измерению МОД с относительной погрешностью не выше $\pm 10\%$ соответствует диапазон от 65 м до 5 000 м.

Таким образом, диапазоны измерений МОД, приведенные в таблице 2, лежат в пределах метрологического диапазона измерений МОД (0,44–300) *a*, соответствующего метрологическому диапазону измерения спектрального коэффициента направленного пропускания 0,1–99 %. При верхнем пределе измерений МОД 10 000 м, $\Delta MOR/MOR = 0,2$ и максимальной длине измерительной базы 100 м $\Delta\tau$ не должен превышать 0,6 %. При выполнении перечисленных условий диапазон и верхний предел относительной погрешности измерений МОД соответствуют рекомендациям ИКАО (табл. 2).

В рекомендациях ИКАО для диапазона МОД до 600 м точность измерений должна определяться верхним пределом абсолютной погрешности измерения МОД. Уравнение (7) позволяет определить верхние пределы допускаемых абсолютных погрешностей и соответствующие границы измерения МОД.

На рисунках 4 и 5 приведены графики зависимостей абсолютной погрешности измерения МОД от нормируемой МОД. Данные зависимости получены с использованием уравнения (7) также для четырех значений пределов допускаемых абсолютных погрешностей рабочих спектрофотометров 0,0015 (0,15 %), 0,003 (0,3 %) и 0,006 (0,6 %) на измерительной базе длиной 100 м.

Особенностью полученных зависимостей также является наличие как нижнего, так и верхнего пределов диапазона измерения МОД, определяемых требованиями к ΔMOR . Вблизи нижнего предела измерений данные зависимости имеют явно выраженный экспоненциальный характер (рис. 5). При приближении МОД к нижней границе абсолютная погрешность измерений резко возрастает с единиц метров до 50 м и выше. Уровню абсолютной погрешности 50 м при длине измерительной базы 100 м соответствуют нижние пределы измерений МОД порядка 30–55 м. При увеличении МОД абсолютная погрешность достигает минимума и начинает снова возрастать (рис. 4). Верхние пределы измерения МОД определяются уровнем допускаемой абсолютной погрешности и также зависят от $\Delta\tau$. Так,

например, при снижении $\Delta\tau$ с 2 % до 0,3 % (диапазон калибровки прибора при использовании рабочих эталонов) верхний предел измерения МОД с абсолютной погрешностью 50 м увеличивается с 700 м до 2100 м.

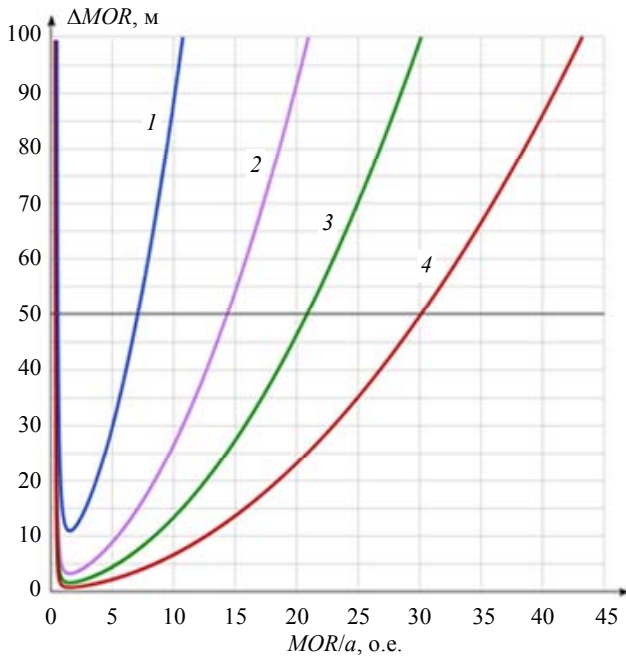


Рис. 4. Расчетные зависимости абсолютной погрешности ΔMOR от МОД для $\Delta\tau$: 2,0 % (1); 0,6 % (2); 0,3 % (3) и 0,15 % (4)

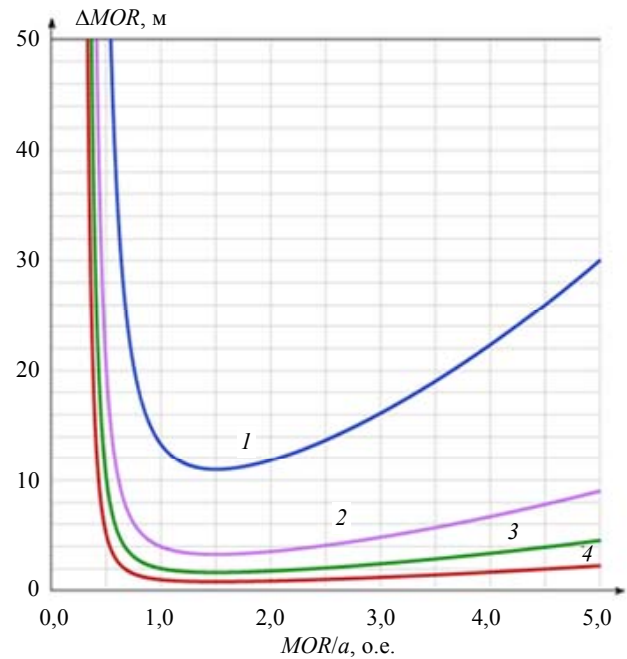


Рис. 5. Расчетные зависимости абсолютной погрешности ΔMOR от МОД для $\Delta\tau$: 2,0 % (1); 0,6 % (2); 0,3 % (3) и 0,15 % (4)

В таблице 4 представлены диапазон МОД, рекомендованный ИКАО [2], и диапазоны МОД для ряда значений $\Delta\tau$, рассчитанные для измерительной базы длиной 100 м при разных требованиях к абсолютной погрешности ΔMOR .

Таблица 4

Границы диапазонов МОД в зависимости от требований к верхнему пределу абсолютной погрешности измерения МОД

$\Delta MOR, м$	Диапазоны МОД для различных $\Delta\tau$, м				Диапазоны МОД (ИКАО [2]), м
	0,15 %	0,3 %	0,6 %	2 %	
± 25	40–2100	41–1400	47–9600	68–4500	–
± 50	30–3000	35–2100	41–1450	55–7100	до 600 м

Сравнение данных, представленных в таблицах 3 и 4, позволяет определить нижние пределы измерений МОД на уровне 30–50 м в диапазоне $\Delta\tau$ от 0,3 % до 0,6 %, соответствующем калибровке приборов при использовании рабочих эталонов. Соответственно, требование ИКАО к абсолютной погрешности МОД выполняется только при значениях МОД более 30–50 м.

Таким образом, полученные уравнения (6) и (7) позволяют решить как прямую задачу расчета границ измерения МОД при заданных требованиях к предельно допустимым погрешностям измерения МОД, так и обратную

задачу: расчет методических погрешностей измерения МОД в зависимости от $\Delta\tau$, a и MOR .

Заключение

Полученные уравнения (6) и (7) позволяют решить как прямую задачу расчета границ измерения МОД при заданных требованиях к предельно допустимым погрешностям измерения МОД, так и обратную задачу: расчет методических погрешностей измерения МОД в зависимости от $\Delta\tau$, a и MOR .

Для оценки границ диапазонов измерений МОД используется графоаналитический метод решения данных уравнений. Метод заключается в построении графиков зависимостей погрешностей измерения МОД от F для ряда предельно допустимых абсолютных погрешностей измерения КПА с последующим определением границ диапазона МОД на выбранном уровне $\Delta MOR/MOR$ или ΔMOR .

Особенностью полученных зависимостей погрешностей измерения МОД от МОД является их нелинейность, наличие минимума и, как следствие, наличие как нижнего, так и верхнего пределов диапазона измерения МОД.

В отличие от диапазона измерения МОД (0,44–300) a , соответствующего метрологическому диапазону измерения КПА 0,1–99 %, пределы диапазонов измерений МОД с заданной точностью зависят от предельной абсолютной погрешности измерения СКНП приборов. Так, например, при увеличении Δt от 0,3 % до 2 % диапазон измерений МОД с относительной погрешностью ± 20 % уменьшается от (0,5–200) a до (0,85–30) a .

Для верхнего предела измерения МОД 10 000 м и максимальной стандартной длине измерительной базы 100 м соответствующий предел допустимой абсолютной погрешности Δt не превышает 0,6 %. При данном значении Δt полный диапазон измерения МОД с точ-

ностью измерения не хуже ± 20 % находится в пределах от 55 м до 10 000 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев В. А. Видимость в атмосфере и её определение. – Л.: Гидрометеиздат, 1988.
2. Appendix 3. Meteorological support for international air navigation. Part I. Basic SARPs. Part II. Appendices and Attachments. Twentieth edition. – ICAO, 2018.
3. International Civil Aviation Organization (ICAO), Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices, Doc 9328, AN/908 3rd Edition. – ICAO, 2005.
4. РД 52.21.680-2006. Руководство по определению дальности видимости на ВПП (RVR). – М.: Издательский центр АНО Метеоагентство Росгидромета, 2006.
5. Horvath H. / Atmospheric Environment. 1971. Vol. 5. № 3. P. 177.
6. ГОСТ 8.557-2007. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральных, интегральных и редуцированных коэффициентов направленного пропускания и оптической плотности в диапазоне длин волн от 0,2 до 50,0 мкм, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн от 0,2 до 20,0 мкм. – М.: ФГУП Стандартиформ, 2008.
7. 53272-13: Описание типа СИ. Трансмиссометры ЛТ31. Государственный реестр СИ РФ. – М.: ФГУП ВНИИОФИ, 2018.
8. <https://www.vniiofi.ru/depart/m4/get156-2015.html>
9. Волков О. А., Денисенко С. А., Константинов К. В., Кругло Р. А. / Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 71.
10. <https://peleng.by/products/meteorology>
11. <https://datchiki.com/wp-content/uploads/2023/08/transmissometr-lomo-fi-6.pdf>
12. <https://docs.vaisala.com/v/u/B210416EN-E/en-US>

PACS: 42.68.Bz, 42.68.Ge, 42.68.Jg

Limits of the range of measurement of meteorological optical range by transmissometers

P. N. Nazarenko

SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”
68-1 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220072, Belarus
E-mail: npn05@mail.ru

Received 28.10.2024; revised 18.11.2024; accepted 12.12.2024

The paper presents the results of the analysis and assessment of the limits and accuracy of measuring the meteorological optical range (MOR) using optical transmissometers. As part of the analysis, equations were obtained for calculating the absolute and relative methodological errors of measuring the MOR. The use of these equations allows us to solve both the

direct problem of calculating the limits of MOR measurement with given requirements for the maximum permissible errors of MOR measurement, and the inverse problem: calculating the dependencies of the methodological errors of MOR measurement on the limit of the absolute error of measuring the coefficient of directional transmission by the transmissometer, the length of the measuring base and MOR. The peculiarity of the obtained dependencies of the MOR measurement errors on the MOR is their nonlinearity, the presence of a minimum and, as a consequence, the presence of both the lower and upper limits of the MOR measurement range. The limits of the MOR measurement ranges with a given accuracy differ from the MOR range corresponding to the metrological range of measuring the atmospheric transmittance of 0.1...99%. A discussion of the obtained results is provided.

Keywords: transmissometer; meteorological optical range; atmospheric transparency coefficient; measuring base.

REFERENCES

1. Kovalev V. A., Visibility in the atmosphere and its definition, Gidrometeoizdat, 1988 [in Russian].
2. Appendix 3. Meteorological support for international air navigation. Part I. Basic SARPs. Part II. Appendices and Attachments. Twentieth edition, ICAO, 2018.
3. International Civil Aviation Organization (ICAO), Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices, Doc 9328, AN/908 3rd Edition, ICAO, 2005.
4. RD 52.21.680-2006. Guidelines for Determining Runway Visual Range (RVR), Publishing Center of ANO Meteoragentstvo Roshydromet, 2006 [in Russian].
5. Horvath H., Atmospheric Environment **5** (3), 177 (1971).
6. GOST 8.557-2007. State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification scheme for measuring instruments of spectral, integral and reduced coefficients of directional transmittance and optical density in the wavelength range from 0.2 to 50.0 μm , diffuse and specular reflections in the wavelength range from 0.2 to 20.0 μm , FSUE Standartinform, 2008 [in Russian].
7. 53272-13: Description of the measuring instrument type. LT31 transmissometers. State Register of Measuring Instruments of the Russian Federation, FSUE VNIIOFI, 2018 [in Russian].
8. <https://www.vniiofi.ru/depart/m4/get156-2015.html>
9. Volkov O. A., Denisenko S. A., Konstantinov K. V. and Kruglo R. A., Optical Journal **76** (10), 71 (2009) [in Russian].
10. <https://peleng.by/products/meteorology>
11. <https://datchiki.com/wp-content/uploads/2023/08/transmissometr-lomo-fi-6.pdf>
12. <https://docs.vaisala.com/v/u/B210416EN-E/en-US>