

В. В. ШАРОНОВ]

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВИДИМОСТИ

(Представлено академиком В. Г. Фесенковым 19 I 1939)

Под термином «измеритель видимости» здесь будет пониматься такой прибор, в котором посредством искусственной мутности, расположенной на линии зрения наблюдателя, видимость некоторого контраста ухудшается до полного исчезновения. Примером таких приборов могут служить аппараты, предложенные Даннмейером (1), Вигандом (2), Беннетом (3), Джонсоном (4) и Шароновым (5). В литературе можно встретить мнение, что приборы этого рода дают лишь субъективные характеристики видимости и не могут служить для количественного измерения мутности атмосферы. В подтверждение такого взгляда обычно приводятся неудачи, сопровождавшие попытки применения на практике измерителей видимости Виганда. В статье, опубликованной мною в 1933 г. (6), было показано, что причиной этих неудач является неправильная теория, которую сам Виганд предложил для своих приборов, и что истинная теория измерителя видимости должна исходить из фотометрической теории контрастов и закона Вебера-Фехнера. Опыты построения такой теории для отдельных типов измерителей видимости и для частных случаев наблюдения делались различными авторами (7). Здесь будут даны основы общей теории измерителя видимости в приложении к определению коэффициента экстинкции воздуха в горизонтальном направлении и дальности видимости произвольного объекта.

Оптическое действие мутной среды измерителя видимости заключается в том, что яркость B наблюдаемого через прибор объекта снижается до некоторого значения TB ($T < 1$), и вместе с тем на нее накладывается яркость b рассеянного средой света, так что видимая через прибор яркость B' будет:

$$B' = TB + b. \quad (1)$$

Контраст, составляемый двумя яркостями B_1 и B_2 при наблюдении через мутную среду прибора, будет уменьшен. В измерителе видимости отсчет x по шкале прибора соответствует границе видимости контраста и определяется условием, чтобы значение контраста, образованного яркостями B'_1 и B'_2 , было равно порогу контрастной чувствительности глаза ε :

$$\frac{B'_1 - B'_2}{B'_1} = \frac{B_1 - B_2}{B_1 + \frac{b}{T}} = \varepsilon. \quad (2)$$

Отношение $\frac{b}{T}$ мы в дальнейшем будем называть «мутностью» и обозначать буквой M ; предполагается, что M есть однозначная функция отсчета по шкале прибора x и что вид этой функции наблюдателю известен:

$$M = \frac{b}{T} = f(x). \quad (3)$$

необходимо заметить, что в некоторых измерителях видимости с увеличением x происходит также некоторое размывание контуров наблюдаемого объекта, следствием чего должно быть изменение величины ε . Излагаемая здесь теория на эти случаи не распространяется, и в дальнейшем будет предполагаться, что устройство прибора и условия наблюдения таковы, что порог контрастной чувствительности для данной группы измерений можно считать постоянным.

В практике наблюдения дневной видимости приходится иметь дело с контрастами нижеследующих типов:

I. Составляющие контраст поверхности принадлежат двум земным предметам, находящимся от наблюдателя на одинаковом расстоянии l . Яркости B_1 и B_2 этих поверхностей различны вследствие неодинакового коэффициента отражения или вследствие неодинакового освещения.

II. Составляющие контраст поверхности принадлежат двум земным предметам, находящимся от наблюдателя на разных расстояниях l_1 и $l_2 = l_1 + \Delta$. Истинные яркости этих поверхностей могут быть как одинаковы, так и различны.

III. Контраст составлен земным предметом (яркость B) с фоном неба у горизонта (яркость B_H).

Оптическое состояние слоя воздуха, находящегося между наблюдателем и объектом, может быть охарактеризовано следующими величинами:

$$\begin{aligned} \tau &= 10^{-al}, \\ \beta &= B_H (1 - 10^{-al}), \\ \mu &= \frac{\beta}{\tau} = B_H (10^{-al} - 1), \end{aligned} \quad (4)$$

где τ — коэффициент прозрачности слоя, a — коэффициент экстинкции, l — расстояние до объекта, β — яркость света, рассеянного слоем в некотором направлении, B_H — яркость неба в том же направлении, а величину μ мы будем называть «мутностью» данной толщи воздуха.

Пусть контраст 1-го рода наблюдался посредством измерителя видимости 2 раза. В первый раз расстояние его от наблюдателя было столь малым, что можно принять $\tau = 1$ и $\beta = \mu = 0$. Тогда мутность M_0 , соответствующая его исчезновению в измерителе видимости, находится непосредственно из равенства (2):

$$M_0 = \frac{1}{\varepsilon} [B_1 (1 - \varepsilon) - B_2]. \quad (5)$$

Второе наблюдение пусть было сделано с достаточно большого расстояния l . Яркости B_1'' и B_2'' составляющих контраст объектов в этом случае будут определяться влиянием мутностей атмосферы и прибора совместно:

$$B_1'' = (B_1 \tau + \beta) T + b; \quad B_2'' = (B_2 \tau + \beta) T + b, \quad (6)$$

и условие исчезновения в измерителе видимости определяется равенством:

$$\frac{B_1'' - B_2''}{B_1''} = \frac{(B_1 - B_2) \tau}{B_1 \tau + \beta + M} = \varepsilon, \quad (7)$$

откуда имеем:

$$M = \frac{\tau}{\varepsilon} [B_1(1 - \varepsilon) - B_2] - \beta. \quad (8)$$

Пользуясь равенством (5), можем написать общее уравнение теории измерителя видимости в форме:

$$M = M_0 \tau - \beta. \quad (9)$$

Нетрудно убедиться, что уравнение справедливо и для контрастов других типов. Действительно, если в контрасте 2-го рода обозначим через B_2 яркость более далекого объекта, то его яркость B_2' при наблюдении с расстояния $l_2 = l_1 + \Delta$ будет:

$$B_2' = B_2 10^{-al_2} + B_H(1 - 10^{-al_2}) = B_2'' 10^{-al_1} + B_H(1 - 10^{-al_1}),$$

где через B_2'' обозначена яркость этого объекта, как она видна от более близкого объекта:

$$B_2'' = B_2 10^{-a\Delta} + B_H(1 - 10^{-a\Delta}).$$

Отсюда следует, что к случаю контраста 2-го рода можно применить равенства (6), (7) и (8), заменив в них B_2 через B_2'' и считая расстояния от близкого объекта. Эти же формулы применимы к контрасту 3-го рода, если в нем положить $B_1 = B_H$ и $B_2 = B$, что можно сделать в силу тождества:

$$B_H' = B_H \tau + \beta = B_H \frac{1}{2}$$

Основное уравнение (9) может быть использовано для определения фотометрических характеристик атмосферы в данном направлении B_H и a . Для этого очевидно нужно произвести 3 наблюдения некоторого контраста: с близкого расстояния и с двух далеких l_1 и l_2 , результатом чего будут мутности M_0 , M_1 и M_2 . Составляем выражения:

$$1 - \frac{M_1}{M_0} = \left(1 + \frac{B_H}{M_0}\right) (1 - 10^{-al_1}); \quad 1 - \frac{M_2}{M_0} = \left(1 + \frac{B_H}{M_0}\right) (1 - 10^{-al_2}),$$

откуда имеем:

$$\frac{1 - \frac{M_2}{M_0}}{1 - \frac{M_1}{M_0}} = \frac{1 - 10^{-al_2}}{1 - 10^{-al_1}} = \gamma. \quad (10)$$

Введем обозначения:

$$\frac{l_2}{l_1} = n; \quad 10^{-al_1} = \tau; \quad 10^{-al_2} = \tau^n.$$

Тогда для нахождения τ получаем уравнение:

$$\tau^n - \gamma\tau + \gamma - 1 = 0, \quad (11)$$

которое, будучи решено при помощи таблиц или номограммы, позволяет найти коэффициент экстинкции a . Зная последний, легко находим и вторую характеристику мутности в форме:

$$\frac{B_H}{M_0} = \frac{\tau_1 - \frac{M_1}{M_0}}{1 - \tau_1}. \quad (12)$$

Если задачей измерений является только определение величины a , то могут быть применены упрощенные приемы наблюдения. Так, если наблюдать черный объект ($B=0$) на фоне неба сначала вблизи, а потом с далекого расстояния l , то, если пренебречь величиной ε в сравнении с τ , получаем следующие весьма простые формулы:

$$\tau = \frac{M}{M_0}; \quad a = \frac{1}{l} \log \frac{M_0}{M}. \quad (13)$$

Дальность видимости L некоторого объекта очевидно представляет собой то расстояние, на котором контраст B_1, B_2 достигает порога контрастной чувствительности при наблюдении без измерителя видимости. Отсюда следует:

$$\frac{B_1 - B_2}{B_1 + \mu} = \varepsilon. \quad (14)$$

Сравнивая это равенство с (2), получаем:

$$\mu = B_H (10^{aL} - 1) = M_0, \quad (15)$$

откуда и находим L :

$$L = \frac{1}{a} \log \left(\frac{M_0}{B_H} + 1 \right), \quad (16)$$

причем эта формула справедлива для контрастов всех 3 типов. Входящую в него величину $\frac{M_0}{B_H}$ помимо равенства (12) можно найти еще следующим образом. В азимуте объекта устанавливается черный щит ($B=0$) и наблюдается на фоне неба с близкого расстояния. Полученная при таком наблюдении мутность M_4 очевидно будет равна:

$$M_4 = B_H \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (17)$$

Обозначая через M_0 мутность, полученную при наблюдении с близкого расстояния контраста, дальность видимости которого требуется определить, находим:

$$\frac{M_0}{B_H} = \frac{M_4}{B_H} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (18)$$

Заметим, что для вычисления дальности видимости по известному a полезно иметь таблицы величины

$$\frac{M_0}{B_H} = \frac{B_1(1 - \varepsilon) - B_2}{\varepsilon B_H}$$

для различных объектов при различных условиях погоды и освещения.

Астрономическая обсерватория
Ленинградского университета.

Поступило
2 I 1939.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ F. Danneberger, Ann. d. Hydr., 52, 108—143 (1924). ² A. Wigand, Phys. ZS., 20, 151—160 (1919); 22, 484—487 (1921); Met. ZS., 36, 342 (1919); 38, 349 (1921); 41, 216—219 (1924); Ann. d. Hydr., 47, 134—140 (1919); ZS. f. Instr., 45, 411—416 (1925); Gerl. Beitr., 17, 348—355 (1927). ³ M. Bennett, J. Sc. Instr., 8, 122—126 (1931). ⁴ L. Jones, Phil. Mag., 39, 39—134 (1920). ⁵ В. Шаронов, Метеор. вестник, 44, 301—311 (1934); ДАН, III, 500—505 (1934). ⁶ В. Шаронов, Зап. по гидрогр., № 6, (1933). ⁷ О. Ноеpler, Met. ZS., 50, 475—476 (1933); F. Löhle, Phys. ZS., 37, 22—27 (1936); В. Шаронов, ДАН, XIII, 131—134 (1936); В. Березкин, Руководство по актинометрии, вып. 2, 80—108 (1938).