

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ	334
9.1 Общие сведения	334
9.1.1 Определения	334
9.1.2 Единицы измерения и шкалы	335
9.1.3 Метеорологические требования	336
9.1.4 Методы измерения	336
9.2 Визуальная оценка метеорологической оптической дальности	340
9.2.1 Общие сведения	340
9.2.2 Оценка метеорологической оптической дальности в дневное время	340
9.2.3 Оценка метеорологической оптической дальности в ночное время	341
9.2.4 Оценка метеорологической оптической дальности при отсутствии удаленных объектов	343
9.2.5 Точность визуальных наблюдений	343
9.3 Инструментальные измерения метеорологической оптической дальности	344
9.3.1 Общие сведения	344
9.3.2 Приборы для измерения коэффициента ослабления	345
9.3.3 Приборы для измерения коэффициента рассеяния	347
9.3.4 Выбор места и установка приборов	350
9.3.5 Калибровка и техническое обслуживание приборов	350
9.3.6 Источники погрешностей при измерениях метеорологической оптической дальности и оценки точности измерений	351
СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА	355

ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ

9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

9.1.1 Определения

Видимость была впервые определена для метеорологических целей как параметр, который должен оцениваться наблюдателем, причем такого рода наблюдения широко используются. Однако оценка видимости зависит от многих субъективных и физических факторов. Необходимый метеорологический параметр, которым является прозрачность атмосферы, может быть измерен объективно и представлен как метеорологическая оптическая дальность (МОД).

Метеорологическая оптическая дальность — это длина пути светового потока в атмосфере, необходимая для уменьшения этого потока в параллельном пучке лучей от лампы накаливания при цветовой температуре 2 700 К до 5 % его первоначального значения; при этом световой поток оценивается по функции фотометрической яркости, которая определена Международной комиссией по освещению (МКО).

*Видимость, метеорологическая видимость в дневное время и метеорологическая видимость в ночное время*¹ определяются как наибольшее расстояние, на котором черный объект, имеющий подходящие размеры и находящийся у поверхности земли, можно увидеть и распознать в дневное время или можно увидеть и распознать в ночное время, повысив общую освещенность до уровня нормальной дневной освещенности (ВМО, 1992а; 2010а).

Дальность прямой видимости (метеорологическая) — это расстояние, на котором видимый контраст наблюдаемого тела на фоне равен порогу чувствительности глаза наблюдателя (ВМО, 1992а).

Воздушная дымка создается светом от солнца и неба, рассеянным в глаза наблюдателя атмосферными аэрозолями (и в небольшой степени молекулами воздуха), находящимися в конусе зрения наблюдателя. Рассеянный свет достигает глаза таким же образом, как и рассеянная радиация достигает поверхности Земли. Воздушная дымка является основным фактором, ограничивающим горизонтальную видимость черных объектов в дневное время за счет ее интегрированного воздействия вдоль конуса зрения от глаза до объекта, выражающегося в повышении видимой яркости достаточно отдаленного черного объекта до уровня, который не позволяет отличить его от фоновой яркости неба. В отличие от случая субъективного восприятия, большая часть рассеянного света попадает в глаз наблюдателя из той части конуса его зрения, которая находится от него на довольно близком расстоянии.

В различных стандартах, таких как стандарт Международной электротехнической комиссии, подробно описаны следующие четыре фотометрических качества (МЭК, 1987):

- а) *Световой поток* (обозначение: F (или Φ), единица: люмен) — параметр, рассчитываемый по потоку излучения при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя Международной комиссии по освещению;

¹ Во избежание путаницы, видимость в ночное время не следует определять просто как «наибольшее расстояние, на котором можно увидеть и распознать источники света определенной умеренной силы» (см. *Сокращенный окончательный отчет одиннадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 807)). Если видимость следует определять, исходя из оценки источников света, рекомендуется оценивать дальность видимости по точно определенной интенсивности света и ее практическому применению, подобно дальности видимости на ВПП. Тем не менее, на своей одиннадцатой сессии КПМН признала необходимость дальнейших исследований для разрешения практических трудностей, возникающих в связи с употреблением этого определения.

- b) *сила света* (обозначение: I , единица: кандела или $\text{лм} \cdot \text{ср}^{-1}$) — отношение светового потока к единице телесного угла;
- c) *яркость* (обозначение: L , единица: $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$) — отношение силы света к площади;
- d) *освещенность* (обозначение: E , единица: люкс или $\text{лм} \cdot \text{м}^{-2}$) — отношение светового потока к площади освещаемой им поверхности.

Коэффициент ослабления (обозначение σ) — доля светового потока, теряемая коллимированным пучком лучей, испускаемых раскаленным источником при цветовой температуре 2 700 К при прохождении единицы расстояния в атмосфере. Этот коэффициент является мерой ослабления, возникающего в результате поглощения и рассеивания.

Яркостный контраст (обозначение C) — отношение разности между яркостью объекта и яркостью его фона к яркости фона.

Пороговый контраст (обозначение ϵ) — минимальное значение контраста яркости, который может различить глаз человека, т. е. значение, которое позволяет отличить объект от его фонового освещения. Пороговый контраст у разных людей различный.

Пороговая освещенность (обозначение E_t) — наименьшая освещенность на зрачке глаза наблюдателя, которая позволяет обнаруживать точечные источники света на фоне с данной яркостью. В связи с этим значение E_t изменяется в зависимости от условий освещения.

Показатель пропускания (обозначение T) определяется для коллимированного пучка лучей, испускаемых раскаленным источником при цветовой температуре 2 700 К, как часть светового потока, сохраняющаяся в потоке после прохождения им в атмосфере оптического пути заданной длины. Показатель пропускания называется также коэффициентом пропускания. Термины «коэффициент пропускания» или «пропускная способность атмосферы» используются при определении пути, т. е. конкретной длины (например, в случае с трансмиссометром). В этом случае T часто умножается на 100 и выражается в %.

Аэродром определяется как определенный участок земной или водной поверхности (включая любые здания, сооружения и оборудование), предназначенный полностью или частично для прибытия, отправления и движения по этой поверхности воздушных судов (Международная организация гражданской авиации, 2013).

9.1.2 Единицы измерения и шкалы

Метеорологическая видимость, или МОД, выражается в метрах или в километрах. Диапазон измерений зависит от дальнейшего использования данных. В то время как для потребностей синоптической метеорологии диапазон измерений МОД составляет 100 м – 70 км и более, для других применений он может быть более узким. Так, в гражданской авиации верхней границей может быть и 10 км. Этот диапазон может быть еще более сужен при использовании измерений для оценки дальности видимости на взлетно-посадочной полосе, определяющей условия для взлета и посадки при низкой видимости. Необходимые значения дальности видимости на взлетно-посадочной полосе (ВПП) составляют лишь от 50 до 1 500 м (см. часть II, глава 2). Для других применений, таких как обеспечение дорожного движения или морской навигации, диапазон измерений зависит от потребностей и от места проведения измерений.

Ошибки в данных измерений видимости увеличиваются пропорционально видимости, что учитывается в шкалах измерений. Указанный факт отражен в коде, применяемом для синоптических сводок, путем использования трех линейных интервалов с уменьшающимся разрешением, а именно: при видимости 100–5 000 м она передается в значениях, кратных 100 м; при видимости 6–30 км — в значениях, кратных 1 км, и при

видимости 35–70 км — в значениях, кратных 5 км. Эти шкалы позволяют передавать данные о видимости с разрешением, превышающим точность измерения, за исключением тех случаев, когда видимость составляет менее 1 000 м.

9.1.3 Метеорологические требования

Понятие «видимость» широко применяется в метеорологии в двух совершенно определенных значениях. Во-первых, это один из параметров, позволяющих оценить характеристики воздушной массы специально для нужд синоптической метеорологии и климатологии. В этом случае видимость является показателем оптического состояния атмосферы. Во-вторых, это оперативный параметр, соответствующий определенным критериям или специальным применениям. В этом случае видимость выражается в виде расстояния, на котором можно видеть конкретные маркеры или огни.

Одно из наиболее важных специальных применений — метеорологическое обслуживание авиации (см. часть II, глава 2).

Мера видимости, используемая в метеорологии, должна быть свободна от влияния условий, не являющихся метеорологическими, но она должна быть просто связана с субъективными представлениями о видимости и расстоянием, на котором обычные объекты могут наблюдаться в нормальных условиях. Концепция МОД была разработана для удовлетворения этих потребностей, поскольку она удобна для использования инструментальных методов в дневное и ночное время, а также хорошо связана с другими мерами видимости. МОД была официально принята ВМО в качестве меры видимости как для использования в авиации, так и для широкого применения (WMO, 2014). Это понятие также признано Международной электротехнической комиссией (МЭК, 1987) для использования в атмосферной оптике и визуальной сигнализации.

МОД связана с субъективными представлениями о видимости через пороговый контраст. В 1924 г. Кошмидер, а за ним Геймгольц, предложили для ε значение 0,02. Другими авторами были предложены иные значения. Они колеблются от 0,007 7 до 0,06 или даже до 0,2. Меньшие значения дают большую дальность видимости для данных атмосферных условий. Для требований авиации принято, что ε превышает 0,02 и принимается за 0,05, поскольку для пилота контрастность объекта (маркировочные огни на ВПП) на фоне окружающей местности гораздо меньше контрастности объекта на фоне горизонта. Предполагается, что когда наблюдатель может едва видеть и распознавать черный объект на фоне горизонта, то видимая контрастность объекта составляет 0,05, в связи с чем, как будет показано ниже, именно значение 0,05 было выбрано в качестве коэффициента пропускания, принятого в определении для МОД.

Требования к точности рассмотрены в части I, глава 1.

9.1.4 Методы измерения

Видимость представляет собой сложное психофизическое явление, обусловленное, главным образом, коэффициентом ослабления, связанным с твердыми и жидкими частицами, находящимися в атмосфере во взвешенном виде; ослабление обусловлено, главным образом, рассеиванием, а не поглощением света. Оценка видимости зависит от индивидуальной способности восприятия и интерпретации, а также от характеристик источника света и коэффициента пропускания. Таким образом, любая визуальная оценка видимости является субъективной.

Когда видимость оценивается человеком (наблюдателем), она зависит не только от фотометрических и размерных характеристик объекта, которые воспринимаются или должны восприниматься, но и от порогового контраста наблюдателя. В темное время суток она зависит от яркости источников света, фоновой освещенности и — при оценке ее наблюдателем — от адаптации к темноте глаз наблюдателя, а также от пороговой освещенности. Оценка видимости в темное время суток является особенно сложной.

Первое определение видимости в ночное время в разделе 9.1.1 дается как эквивалент видимости в дневное время, для того чтобы обеспечить отсутствие искусственных изменений при оценке видимости на рассвете и в сумерках. Второе определение имеет практические применения, особенно для требований авиации, однако оно отличается от первого, и обычно при его использовании получают другие результаты. Однако очевидно, что оба они не являются точными.

С помощью инструментальных методов измеряют коэффициент ослабления, по которому можно рассчитать МОД. Затем на основе данных о пороговых контрастах и освещенности или путем задания для них согласованных значений можно рассчитать видимость. Шепард (1983) указал на то, что:

«строгое соблюдение определения (МОД) потребует установки прожектора и приемника с соответствующими спектральными характеристиками на двух платформах, которые можно разнести (например, вдоль железной дороги) так, чтобы коэффициент пропускания составлял 5 %. Любые другие методы дают только оценку МОД».

Однако применяемые на практике приборы используются, исходя из предположения о том, что коэффициент ослабления не зависит от расстояния. С помощью одних приборов непосредственно измеряют ослабление, а с помощью других измеряют рассеяние света для того, чтобы рассчитать коэффициент ослабления. Они описываются в разделе 9.3. Краткий анализ физики видимости, сделанный в настоящей главе, может быть полезен для понимания взаимосвязи между различными методами измерений коэффициента ослабления, а также для рассмотрения приборов, используемых для его измерения.

Визуальное восприятие — видимость днем и ночью

Условия визуального восприятия основаны на измерении эффективности восприятия глазом человека в дневное время монохроматического излучения в видимом спектре. Термины «дневное видение» и «ночное видение» относятся к условиям дневного и ночного времени соответственно.

Прилагательное «дневное» относится к состоянию аккомодации глаза к внешней освещенности в условиях дневного времени. Более точно дневное видение определяется как зрительная реакция наблюдателя с нормальным зрением на раздражитель, которым является свет, падающий на ямку сетчатки (наиболее чувствительную центральную часть сетчатки), с помощью которой различаются мельчайшие детали и цвета при названных условиях аккомодации к свету.

При дневном видении (зрении посредством центральной части сетчатки) относительная чувствительность глаза к свету изменяется в зависимости от длины волны падающего света. При дневном видении чувствительность глаза максимальна при длине волны 555 нм. Кривая относительной чувствительности глаза к различным длинам волн видимого спектра может быть построена путем определения чувствительности к волне длиной 555 нм в качестве эталонной величины. На рисунке 9.1 представлена кривая, принятая МКО для среднего нормального наблюдателя.

Зрение в темное время суток называется ночным видением (это зрение, при котором возникает возбуждение палочек, а не колбочек сетчатки). Палочки, находящиеся на периферии сетчатки, не обладают чувствительностью к цвету или тонким деталям, но особенно чувствительны к свету низкой интенсивности. При ночном видении максимальная чувствительность глаза соответствует длине волны 507 нм.

Ночное видение требует длительного периода аккомодации (до 30 мин), тогда как период аккомодации при дневном видении составляет всего лишь 2 мин.

Основные уравнения

Основное уравнение для измерения видимости — это закон Бугера–Ламберта:

$$F = F_0 e^{-\sigma x} \quad (9.1)$$

где F — световой поток, принимаемый после прохождения пути длиной x в атмосфере, а F_0 — поток при $x = 0$. Путем дифференцирования мы получаем:

$$\sigma = \frac{-dF}{F} \cdot \frac{1}{dx} \quad (9.2)$$

Следует принять во внимание, что этот закон действителен только для монохроматического света, однако может применяться с хорошей аппроксимацией и для спектрального потока. Коэффициент пропускания описывается выражением:

$$T = F/F_0 \quad (9.3)$$

Математические зависимости между МОД и различными параметрами, характеризующими оптическое состояние атмосферы, могут выводиться из закона Бугера–Ламберта. Соотношение между коэффициентом пропускания и МОД справедливо для капель тумана, но в тех случаях, когда видимость ухудшена за счет других гидрометеоров (таких как дождь или снег) или литометеоров (таких как низовая песчаная метель), значения МОД следует интерпретировать с большей осторожностью.

Из уравнений 9.1 и 9.3 следует, что

$$T = F / F_0 = e^{-\sigma x} \quad (9.4)$$

Если применить этот закон для получения значений МОД, то принимая, что $T = 0,05$, и обозначив $x = P$, можем записать следующее:

$$T = 0,05 = e^{-\sigma P} \quad (9.5)$$

Отсюда математическое соотношение между МОД и коэффициентом ослабления можно представить, как:

$$P = (1/\sigma) \cdot \ln(1/0,05) \approx 3/\sigma \quad (9.6)$$

где $\ln$ — логарифм по основанию e , или натуральный логарифм. Объединяя уравнение 9.4, выведенное из закона Бугера–Ламберта, с уравнением 9.6, получаем:

$$P = x \cdot \ln(0,05)/\ln(T) \quad (9.7)$$

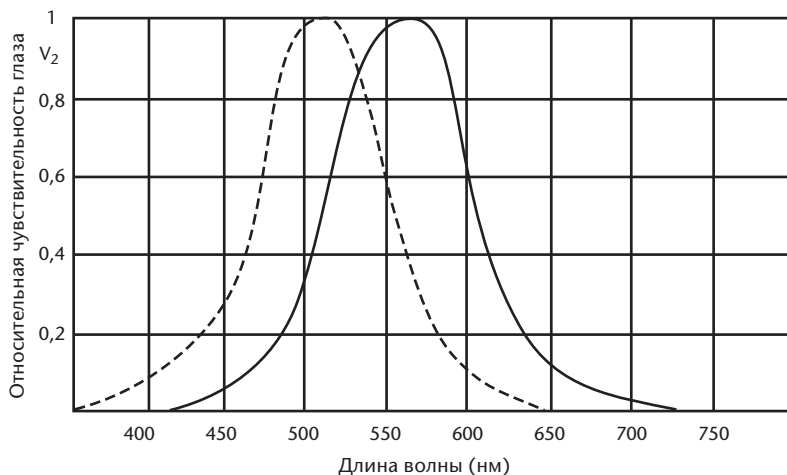


Рисунок 9.1. Относительная чувствительность глаза человека к монохроматическому излучению. Сплошная линия — дневное видение, штриховая линия — ночное видение.

Эта формула взята за основу для измерения МОД с помощью трансмиссометров, причем x в данном случае равно базовой линии трансмиссометра a в уравнении 9.14.

Метеорологическая видимость в дневное время

Яркостный контраст определяется как:

$$C = \frac{L_b - L_h}{L_h} \quad (9.8)$$

где L_h — яркость горизонта, а L_b — яркость объекта.

Яркость неба на горизонте обусловлена светом, рассеянным вдоль линии зрения наблюдателя.

Следует отметить, что если объект темнее, чем горизонт, то значение C является отрицательным, а если объект черный ($L_b = 0$), то $C = -1$.

В 1924 г. Кошмидер установил взаимосвязь, которая стала известна как закон Кошмидера, между кажущимся контрастом (C_x) объекта, который видит на фоне горизонта наблюдатель, находящийся на определенном расстоянии, и действительным контрастом (C_0), т. е. контрастом объекта, который был бы виден на фоне горизонта с очень близкого расстояния. Уравнение Кошмидера может быть записано в следующем виде:

$$C_x = C_0 e^{-\sigma x} \quad (9.9)$$

Это уравнение справедливо при условии, что коэффициент рассеяния не зависит от угла азимута, а освещение является однородным вдоль всей линии между наблюдателем, объектом и горизонтом.

Если черный объект наблюдается на фоне горизонта ($C_0 = -1$) и видимый контраст составляет $-0,05$, то уравнение 9.9 сокращается до следующего вида:

$$0,05 = e^{-\sigma x} \quad (9.10)$$

Сравнение этого результата с уравнением 9.5 показывает, что если видимый контраст черного объекта, наблюдаемого на фоне горизонта, составляет $0,05$, то этот объект находится на расстоянии МОД (P).

Метеорологическая видимость в темное время суток

Расстояние, на котором свет (маркера для определения видимости в ночное время) может быть виден ночью, не просто связано с МОД. Оно зависит не только от МОД и силы света, но и от освещения от других источников света, которое видит наблюдатель.

В 1876 г. Аллард предложил закон ослабления света от точечного источника известной силы (I) как функцию расстояния (x) и коэффициента ослабления (σ). Освещенность (E) точечным источником света определяется как:

$$E = I \cdot x^{-2} \cdot e^{-\sigma x} \quad (9.11)$$

Когда свет едва видим, $E = E_t$ можно записать следующее уравнение:

$$\sigma = (1/x) \cdot \ln \left\{ I / (E_t \cdot x^2) \right\} \quad (9.12)$$

Принимая во внимание, что $P = (1/\sigma) \cdot \ln (1/0,05)$ (уравнение 9.6), мы можем написать:

$$P = x \cdot \ln (1/0,05) / \ln \left(I / (E_t \cdot x^2) \right) \quad (9.13)$$

Соотношение между МОД и расстоянием, на котором могут быть видны огни, рассматриваются в разделе 9.2.3, а использование этого уравнения для визуальных наблюдений описывается в разделе 9.2.

9.2 **ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ**

9.2.1 **Общие сведения**

Визуальная оценка метеорологической оптической дальности может проводиться метеорологом-наблюдателем, использующим естественные или искусственные объекты (группы деревьев, скалы, вышки, колокольни, церкви, огни и т. д.).

Для каждой станции следует подготовить план объектов, используемых для наблюдений, с указанием расстояний до них и пеленгов от наблюдателей. Этот план должен включать объекты, пригодные для наблюдений в дневное время, и объекты, пригодные для наблюдений в темное время суток. Наблюдателю следует также уделять особое внимание существенным изменениям МОД по направлениям.

Наблюдения должен проводить наблюдатель с нормальным зрением, соответствующим образом подготовленный. Как правило, наблюдения должны проводиться без использования каких-либо дополнительных оптических устройств (бинокля, телескопа, теодолита и т. д.), и желательно не проводить наблюдения через окно, особенно когда объекты или огни наблюдаются в ночное время. Глаза наблюдателя должны быть на нормальной высоте над поверхностью земли (около 1,5 м); таким образом, наблюдения не должны проводиться с верхних этажей командно-диспетчерских пунктов или других высоких зданий. Это особенно важно в условиях низкой видимости.

Когда видимость изменяется с направлением, зарегистрированные или сообщаемые значения могут зависеть от того, для чего предназначается сводка. В синоптических сообщениях следует передавать нижние значения видимости, но в сводках для авиации следует руководствоваться указаниями ВМО (WMO, 2014).

9.2.2 **Оценка метеорологической оптической дальности в дневное время**

При наблюдениях в дневное время визуальная оценка видимости дает хорошую аппроксимацию истинного значения МОД.

При условии соблюдения следующих требований для наблюдений в дневное время следует выбирать как можно больше объектов, расположенных на разных расстояниях. Выбирать нужно только черные или почти черные по цвету объекты, выделяющиеся на фоне неба на горизонте. Следует по мере возможности избегать выбора объектов светлых тонов, расположенных близко к поверхности земли. Это особенно важно в условиях, когда объект освещается солнцем. В случае, если альbedo объекта не превышает 25 %, погрешность при облачном небе не превысит 3 %, в то время как при солнечном освещении она может быть гораздо больше. Так, например, дом белого цвета будет непригоден для выбора в качестве объекта, а вот группа темных деревьев подходит для этой цели, за исключением тех случаев, когда они ярко освещены солнцем. Если приходится использовать объект на фоне наземных предметов, то он должен быть расположен гораздо ближе своего фона, т. е. по меньшей мере посередине между точкой наблюдения и фоном. Например, дерево, стоящее на опушке леса, будет неподходящим объектом для наблюдений видимости.

Для того чтобы наблюдения были репрезентативными, используемые объекты должны противолечь глазу наблюдателя под углом не менее 0,5°. Объект, противолечащий под углом менее этой величины, становится невидимым на меньшем расстоянии, чем более крупный объект при тех же условиях. Следует отметить, что отверстие диаметром

7,5 мм, пробитое в карточке, которую наблюдатель держит на расстоянии вытянутой руки, дает примерно такой угол; поэтому рассматриваемый через отверстие объект должен полностью его заполнять. Вместе с тем, нельзя допускать, чтобы такой объект противолежал под углом зрения более 5° .

9.2.3 Оценка метеорологической оптической дальности в ночное время

Методы оценки МОД в ночное время с помощью визуальных наблюдений путем определения расстояний, на которых воспринимаются источники света, описываются ниже.

В качестве объекта для определения видимости можно использовать любой источник света при условии, что его сила в направлении наблюдателя хорошо определена и известна. Желательно, однако, использовать огни, которые могут рассматриваться в качестве точечных источников и сила которых в каком-либо одном направлении не выше, чем в другом, и не ограничена телесным углом, который слишком мал. Следует позаботиться о том, чтобы была обеспечена механическая и оптическая стабильность источника света.

Необходимо проводить различие между источниками, известными как точечные, по соседству с которыми нет других источников или освещенных зон, и группами огней, если даже они отделены друг от друга. В последнем случае такое расположение может оказать влияние на видимость каждого источника, рассматриваемого по отдельности. Для измерения видимости в ночное время рекомендуется использовать только точечные источники, распределенные должным образом.

Следует отметить, что на ночные наблюдения видимости с использованием освещаемых объектов может оказать заметное влияние освещение окружающей местности и физиологические эффекты ослепляющих и других огней, даже если они находятся вне поля зрения. Это влияние еще больше усиливается, если наблюдения проводятся через окно. Таким образом, точное и надежное наблюдение можно провести лишь из темного и должным образом выбранного места.

Более того, нельзя недооценивать значение физиологических факторов, поскольку это серьезный источник разброса получаемых значений наблюдений. Важно, чтобы такие измерения проводили только квалифицированные наблюдатели с нормальным зрением. Необходимо также предусматривать период адаптации (обычно от 5 до 15 минут), в течение которого глаза привыкают к темноте.

Для практических целей связь между расстоянием, на котором воспринимается источник света в ночное время, и значением МОД может быть выражена двумя различными способами:

- a) для каждого значения МОД задается такая сила света, при которой отмечается прямое соответствие между расстоянием, на котором огонь едва виден, и значением МОД;
- b) для огня заданной силы света устанавливается соотношение между расстоянием, на котором воспринимается огонь, и значением МОД.

Второй способ является более простым и, кроме того, более практичным, поскольку весьма сложно установить источники света различной силы на разных расстояниях. Указанный метод включает использование источников света, которые или уже имеются, или устанавливаются вокруг станции, и замену I_x и E_t в уравнении 9.13 соответствующими значениями для имеющихся источников света. Таким образом, метеорологические службы могут подготовить таблицы, где значения МОД даются как функции фоновой яркости и источников света известной силы. Значения, которые должны задаваться пороговой освещенности E_t существенно различаются в зависимости от яркости фона. Следует использовать следующие значения, которые может использовать средний наблюдатель:

- а) $10^{-6,0}$ лк для наблюдений в сумерках и на рассвете или когда едва видимый свет исходит от искусственных источников;
- б) $10^{-6,7}$ лк для наблюдений при лунном свете или когда еще не совсем темно;
- в) $10^{-7,5}$ лк для наблюдений в полной темноте или только при свете звезд.

В таблицах 9.1 и 9.2 приводятся соотношения между МОД и расстоянием, на котором воспринимаются источники света, для каждого из вышеупомянутых методов при различных условиях наблюдений. Они были составлены как руководство для метеорологических служб с целью помощи в выборе или установке огней при наблюдениях видимости в ночное время и для подготовки инструкций для их наблюдателей в целях расчета значений МОД.

Таблица 9.1. Соотношение между МОД и силой едва видимого точечного источника света для трех значений E_t

МОД	Сила света (кандела) ламп, едва видимых на расстояниях, указанных в графе для P		
	В сумерках ($E_t = 10^{-6,0}$)	При лунном свете ($E_t = 10^{-6,7}$)	В полной темноте ($E_t = 10^{-7,5}$)
P (м)			
100	0,2	0,04	0,006
200	0,8	0,16	0,025
500	5	1	0,16
1 000	20	4	0,63
2 000	80	16	2,5
5 000	500	100	16
10 000	2 000	400	63
20 000	8 000	1 600	253
50 000	50 000	10 000	1 580

Таблица 9.2. Соотношение между МОД и расстоянием, на котором точечный источник света в 100 кд едва виден, для трех значений E_t

МОД	Дальность восприятия (м) лампы в 100 кд как функция значения МОД		
	В сумерках ($E_t = 10^{-6,0}$)	При лунном свете ($E_t = 10^{-6,7}$)	В полной темноте ($E_t = 10^{-7,5}$)
P (м)			
100	250	290	345
200	420	500	605
500	830	1 030	1 270
1 000	1 340	1 720	2 170
2 000	2 090	2 780	3 650
5 000	3 500	5 000	6 970
10 000	4 850	7 400	10 900
20 000	6 260	10 300	16 400
50 000	7 900	14 500	25 900

Обычная лампочка накаливания мощностью 100 Вт обеспечивает источник света приблизительно в 100 кд.

Ввиду наличия существенных различий, обусловленных относительно небольшими изменениями пороговой освещенности и разными условиями общей освещенности, очевидно, что таблица 9.2 предназначена не для того, чтобы дать абсолютный критерий видимости, а для того, чтобы показать необходимость калибровки огней, используемых для оценки МОД в темное время суток; это гарантирует, насколько возможно, сравнимость наблюдений в темное время суток в различных местах и проводимых различными службами.

9.2.4 **Оценка метеорологической оптической дальности при отсутствии удаленных объектов**

В определенных местах (открытая равнина, судно и т. д.), а также из-за ограниченного горизонта (долина или ледниковый кар) или отсутствия подходящих удаленных объектов невозможно проводить прямые оценки, за исключением наблюдений при относительно низкой видимости. При отсутствии инструментальных методов значения МОД, превышающие значения, для которых имеются объекты видимости, должны быть получены по общей прозрачности атмосферы. Это можно сделать, если принять во внимание, насколько отчетливо вырисовываются удаленные объекты. Четкие очертания и характерные признаки при небольшом ослаблении цвета или без всякого ослабления цвета указывают на то, что МОД больше расстояния между объектом и наблюдателем. С другой стороны, нечеткие объекты указывают на наличие дымки или других явлений, уменьшающих МОД.

9.2.5 **Точность визуальных наблюдений**

Общие сведения

Наблюдения объектов обычно должны выполняться наблюдателями, прошедшими специальную подготовку и обладающими зрением, которое принято называть нормальным. Этот человеческий фактор имеет существенное значение при оценке видимости в данных атмосферных условиях, поскольку восприятие и визуальная способность интерпретации у разных людей различны.

Точность визуальных оценок метеорологической оптической дальности в дневное время

Наблюдения показывают, что значения МОД, основанные на инструментальных измерениях, хорошо согласуются с визуальными оценками видимости в дневное время. Видимость и МОД должны быть равны в том случае, если пороговый контраст у наблюдателя составляет 0,05 (при использовании критерия распознавания), а коэффициент ослабления характеризуется одинаковыми значениями как вблизи прибора, так и вблизи наблюдателя.

Middleton (1952) на основании 1 000 измерений обнаружил, что средний пороговый контраст для группы из 10 молодых служащих BBC, подготовленных в качестве метеорологических наблюдателей, составлял 0,033 при разбросе для отдельных наблюдений от 0,01 и менее до 0,2 и более. Sheppard (1983) указал на то, что, когда данные Мидлтона наносятся на логарифмическую шкалу, то они показывают хорошее согласие с распределением Гаусса. Если данные Мидлтона репрезентативны для нормальных условий наблюдений, то мы должны ожидать, что значения оценок видимости в дневное время в среднем будут на 14 % выше, чем МОД, при среднем квадратическом отклонении от МОД 20 %. Эти расчеты прекрасно согласуются с результатами, полученными в ходе Первых сравнений ВМО по измерению видимости (WMO, 1990), которые показали, что значения видимости, полученные наблюдателями в дневное время, оказались на 15 %

выше, чем данные инструментальных измерений МОД. Диапазон интерквантильных различий между значениями, полученными наблюдателями и с помощью приборов, составлял около 30 % измеренной МОД. Это соответствует среднему квадратическому отклонению приблизительно 22 % в случае распределения Гаусса.

Точность визуальных оценок метеорологической оптической дальности в темное время суток

Из таблицы 9.2 в разделе 9.2.3 ясно видно, насколько значения МОД могут вводить в заблуждение в том случае, если они основаны только на расстоянии, на котором можно видеть огонь, без должного учета силы света и условий наблюдений. Это подчеркивает необходимость предоставления наблюдателям четких, точных инструкций и обучения их проведению наблюдений видимости.

Следует принять во внимание, что на практике использование методов и таблиц, описанных выше, для подготовки схем размещения излучающих свет объектов не всегда является легкой задачей. Источники света, используемые в качестве объектов, не обязательно удачно расположены или стабильны, не всегда известна сила их света и не всегда они являются точечными. Что касается последнего, то огни могут быть в виде широкого или узкого луча, они могут быть сгруппированы или даже быть разных цветов, к которым глаз имеет различную чувствительность. При использовании таких огней следует соблюдать большую осторожность.

Визуальная оценка дальности видимости огней может давать надежные результаты для видимости в темное время суток только в тех случаях, когда огни и их фон тщательно подобраны, условия наблюдений, в которых находится лицо, их проводящее, тщательно контролируются, а наблюдению может быть посвящено значительное время, для того чтобы обеспечить полную аккомодацию глаз наблюдателя к условиям наблюдений. Результаты первых сравнений ВМО по измерению видимости (ВМО, 1990) показывают, что в темное время суток оценки наблюдателями видимости оказались на 30 % выше данных инструментальных измерений МОД. Интерквартильный диапазон различий между значениями, полученными наблюдателями и полученными с помощью приборов, оказался лишь незначительно больше, чем при наблюдениях в дневное время (приблизительно 35–40 % измеренной МОД).

9.3 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ

9.3.1 Общие сведения

Принятие определенных допущений позволяет преобразовать данные инструментальных измерений в МОД. При измерениях в дневное время, если имеется ряд подходящих ориентиров для проведения прямых наблюдений, использование приборов не всегда является предпочтительным. Однако прибор для измерения видимости часто используется в темное время суток, или при отсутствии ориентиров, или же для автоматических систем наблюдений. Приборы для измерения МОД могут быть отнесены к одной из двух категорий:

- a) приборы для измерения коэффициента ослабления или коэффициента пропускания в горизонтальном цилиндре воздуха. Ослабление света происходит как за счет рассеяния, так и за счет поглощения частицами, находящимися в воздухе на пути светового луча;
- b) приборы для измерения коэффициента рассеяния света в небольшом объеме воздуха. В условиях естественного тумана поглощением часто можно пренебречь, а коэффициент рассеяния может рассматриваться равным коэффициенту ослабления.

Обе вышеуказанные категории включают приборы, применяемые для визуальных измерений наблюдателем, а также приборы, которые используют источник света и электронное устройство, включающее фотоэлектрический элемент или фотодиод для обнаружения светового луча. Основным недостатком приборов для визуальных измерений — возможные значительные ошибки, если наблюдатель не тратит достаточно времени для адаптации глаз к условиям наблюдений (особенно в темное время суток).

Основные характеристики этих двух категорий приборов для измерения МОД описаны ниже.

9.3.2 Приборы для измерения коэффициента ослабления

Телефотометрические приборы

Ряд телефотометров был разработан для измерения коэффициента ослабления в светлое время суток путем сравнения видимой яркости удаленного объекта с яркостью небесного фона (например, телефотометр Лохля). Однако они, как правило, не используются для повседневных измерений, поскольку, как было указано выше, предпочтительно использовать прямые визуальные наблюдения. Эти приборы могут, однако, оказаться полезными для экстраполяции значений МОД за пределы самого отдаленного объекта.

Визуальный фотометр

Очень простой прибор, использующийся в темное время суток при наличии удаленного источника света и представляющий собой градуированный нейтральный светофильтр, который обеспечивает гашение в известной степени света; при этом положение фильтра можно регулировать до тех пор, пока свет не становится едва видимым. Показания прибора позволяют судить о степени прозрачности атмосферы между источником света и наблюдателем, на основании чего можно вычислить коэффициент ослабления. Общая точность, главным образом, зависит от изменений чувствительности глаза и флуктуации силы излучения источника света. Ошибка увеличивается пропорционально увеличению МОД.

Преимуществом этого прибора является то, что он позволяет получать достаточно точные значения МОД в диапазоне 100 м – 5 км с использованием только трех хорошо размещенных источников света, тогда как без помощи этого прибора для достижения той же степени точности необходимо использовать более сложную систему источников света. Однако способ применения такого прибора (позволяющего определить расстояние, на котором свет появляется или исчезает) в значительной степени влияет на точность и однородность измерений.

Трансмиссометры

Измерения с помощью трансмиссометра — наиболее широко используемый метод для измерения среднего значения коэффициента ослабления в горизонтальном цилиндре воздуха между передатчиком, который является источником модулированного светового потока постоянной средней мощности, и приемником, включающим в себя фотодетектор (обычно это фотодиод, помещенный в фокальной точке параболического зеркала или линз). Первоначально наиболее часто используемым источником света являлась галогенная лампа или ксеноновая импульсная газоразрядная лампа. В современных трансмиссометрах используются светодиоды. Модулирование источника света позволяет устранить влияние солнечного света на точность измерений. Коэффициент пропускания определяется по выходному сигналу фотодетектора, что позволяет рассчитать коэффициент ослабления и МОД.

Поскольку оценки МОД с помощью трансмиссометра основаны на ослаблении светового потока параллельного пучка лучей в зависимости от рассеяния и поглощения, то эти

оценки тесно связаны с определением МОД. Хороший и правильно обслуживаемый трансмиссометр, работающий в диапазоне, в котором он дает самую высокую точность, обеспечивает прекрасную аппроксимацию истинного значения МОД.

Существует два типа трансмиссометров:

- а) трансмиссометры, которые состоят из передатчика и приемника, находящихся в различных блоках на известном расстоянии друг от друга (рисунок 9.2);
- б) трансмиссометры, у которых передатчик и приемник совмещены в одном блоке, а излучаемый луч отражается находящимся на некотором расстоянии зеркалом или обратным отражателем (световой луч проходит расстояние до отражателя и обратно) (рисунок 9.3).



Рисунок 9.2. Однолучевой трансмиссометр.



Рисунок 9.3. Двухлучевой трансмиссометр.

Расстояние, которое проходит луч между передатчиком и приемником, обычно называется базовой линией, и это расстояние может изменяться от нескольких метров до 150 м (или даже достигать 300 м) в зависимости от диапазона значений МОД, которые должны измеряться прибором, а также от того, для каких целей должны использоваться данные измерений.

Как было видно из выражения для МОД в уравнении 9.7, отношение

$$P = a \cdot \ln(0,05) / \ln(T) \quad (9.14)$$

где a — базовая линия трансмиссометра, представляет собой основную формулу для измерений с помощью трансмиссометров. Справедливость ее зависит от допущений, предусматривающих, что применение законов Кошмидера, Бугера-Ламберта является приемлемым и что коэффициент ослабления вдоль базовой линии трансмиссометра является таким же, как и на линии между наблюдателем и объектом при данном значении МОД.

Если необходимо, чтобы данные измерений оставались приемлемыми в течение длительного периода времени, световой поток должен оставаться постоянным в течение всего этого периода. При использовании галогенового источника света проблема старения нити лампы носит менее критический характер и световой поток остается более постоянным. Однако в некоторых трансмиссометрах используется система обратной связи (за счет восприятия и измерения небольшой части излучаемого потока), обеспечивающая большую однородность светового потока с течением времени или коррекцию в случае любых изменений.

Как мы увидим в разделе, посвященном точности измерений МОД, значение, принятое для базовой линии трансмиссометра, определяет диапазон измерений МОД. В целом принято, что этот диапазон лежит между величиной, равной базовой линии, и величиной, превышающей ее в 25 раз. Тем не менее, современные оптоэлектронные приборы могут обеспечивать более точные результаты с расширенным диапазоном (см. раздел 9.3.6 и WMO, 1992b).

Дальнейшее совершенствование принципа измерения с помощью трансмиссометров — использование двух приемников или обратных отражателей, находящихся на разных расстояниях, с тем, чтобы расширить как нижний предел (короткая базовая линия), так и верхний предел (длинная базовая линия) диапазона измерений МОД. Эти приборы известны как приборы с «двойной базовой линией».

Во многих современных трансмиссометрах в качестве источника света используются светодиоды. Однако для получения репрезентативного коэффициента ослабления обычно рекомендуется использовать полихроматический свет видимого спектра.

Определение видимости с помощью лидара

Технологии доплеровских метеорологических лазерных локаторов ЛИДАР, как они описаны для лазерного облакомера в части I, глава 15, могут быть использованы для определения видимости в случае, если луч строго горизонтален. Продольный профиль сигнала обратного рассеяния S зависит от выходящего сигнала S_0 , расстояния x , коэффициента обратного рассеяния β , фактора передачи T согласно выражению:

$$S(x) \sim S_0 \cdot 1/x^2 \cdot \beta(x) \cdot T^2 \quad \text{где} \quad T = \int -\sigma(x) dx \quad (9.15)$$

Если атмосфера горизонтально однородна, то β и σ — константы, а коэффициент ослабления σ определяется только по двум точкам профиля:

$$\ln(S(x) \cdot x^2 / S_0) \sim \ln \beta - 2 \sigma x \quad (9.16)$$

В условиях неоднородной атмосферы зависящие от дальности параметры $\beta(x)$ и $\sigma(x)$ могут быть определены с помощью алгоритма Клетта (Klett, 1985).

При МОД, приближающейся к 2 000 м, точность метода с использованием технологии ЛИДАР становится неудовлетворительной.

Более подробную информацию о требованиях к осуществлению измерений видимого диапазона с помощью лидара для определения метеорологической оптической дальности, зависящей от направления, можно найти в стандарте Международной организации по стандартизации ИСО 28902-1:2012 (ISO, 2012).

9.3.3 Приборы для измерения коэффициента рассеяния

Ослабление света в атмосфере происходит как за счет рассеяния, так и за счет поглощения. Наличие загрязняющих веществ вблизи от промышленных зон, ледяные кристаллы (переохлажденный туман) или пыль могут привести к тому, что величина поглощения станет значительной. Однако, как правило, фактором поглощения можно пренебречь, а явление рассеяния, обусловленное отражением, рефракцией и дифракцией на каплях воды, становится основным фактором, определяющим ухудшение видимости. Тогда коэффициент ослабления может приниматься равным коэффициенту рассеяния, а прибор для измерения последнего может использоваться для оценки МОД.

Измерения удобнее всего выполнять, направляя луч света на небольшой объем воздуха и определяя фотометрическими методами долю света, рассеянного при достаточно большом телесном угле и в направлениях, которые не являются критическими. При условии полного экранирования от других источников света или при условии, что свет

источника модулирован, прибор такого типа можно использовать как в светлое, так и в темное время суток. Коэффициент рассеяния b является функцией, которую можно записать в следующем виде:

$$b = \frac{2\pi}{\Phi_v} \int_0^\pi I(\phi) \sin(\phi) d\phi \quad (9.17)$$

где Φ_v — поток воздуха, поступающий в объем воздуха V , а $I(\phi)$ — сила света, рассеиваемого в направлении ϕ по отношению к падающему лучу.

Следует принять во внимание, что точное определение b требует измерения и интегрирования значений света, рассеянного от луча под всеми углами. Используемые на практике приборы измеряют рассеянный свет по ограниченному углу и основаны на высокой степени корреляции между ограниченным интегральным значением и полным интегральным значением.

В этих приборах используются три метода измерений: измерения обратного рассеяния, прямого рассеяния и рассеяния, интегрированного по широкому углу.

- а) *Обратное рассеяние.* В приборах для измерения обратного рассеяния (рисунок 9.4) луч света направляется на небольшой объем воздуха перед передатчиком, а приемник помещается в том же блоке и ниже источника света, куда поступает в обратном направлении свет, рассеянный исследуемым объемом воздуха. Некоторые исследователи пытались определить соотношение между видимостью и коэффициентом обратного рассеяния, но в целом принято считать, что такая корреляция не является удовлетворительной.

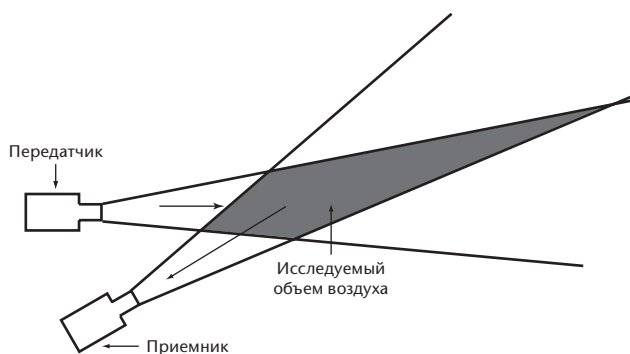


Рисунок 9.4. Измеритель видимости, основанный на измерении обратного рассеяния.

- б) *Прямое рассеяние.* Профиль света, рассеянного частицами малого размера (аэрозоли, небольшие капли), имеет угловую зависимость. Кроме того, угловая зависимость (т. е. профиль рассеянного света) зависит от химического состава (например, концентрации соли), типа ядра (песок, пыль) и размеров частиц. Следовательно, необходимо выбрать угол рассеяния таким образом, чтобы свести угловую зависимость к минимуму. Ряд авторов продемонстрировал, что оптимальным является угол между 20° и 50° (Kneizys et al., 1983; Jia and Lü, 2014; Barteneva, 1960; Van de Hulst, 1957). Поэтому приборы для измерения прямого рассеяния включают в себя передатчик и приемник, причем угол между лучами составляет от 20° до 50° . При другой конструкции прибора предусматривается установка посередине между передатчиком и приемником одной диафрагмы либо двух диафрагм, каждая из которых расположена на небольшом расстоянии от передатчика или приемника. На рисунке 9.5 показаны две конфигурации приборов, о которых шла речь.

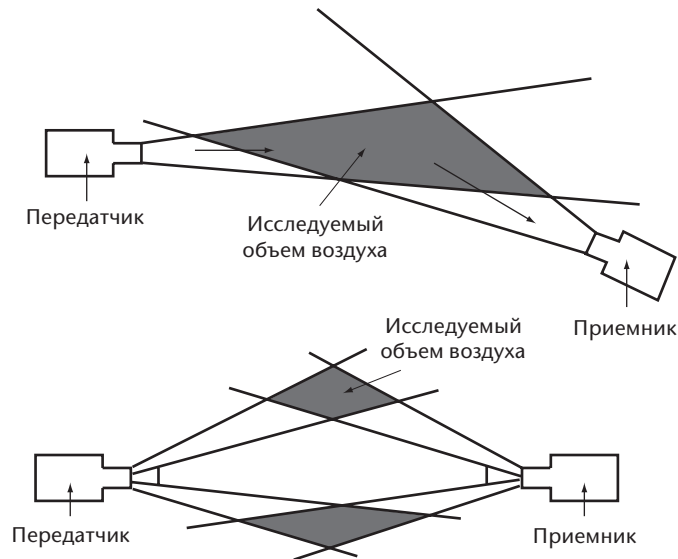


Рисунок 9.5. Измеритель видимости, основанный на измерении рассеяния вперед, в двух конфигурациях.

- с) *Рассеяние в пределах широкого угла.* Такой прибор, представленный на рисунке 9.6, известен как интегрирующий нефелометр и основан на принципе измерения рассеяния в максимально широком угле: идеально от 0° до 180° , однако на практике примерно от 0° до 120° . Приемник устанавливается перпендикулярно оси источника света, который обеспечивает освещение с широким углом. Хотя в теории такой прибор должен давать более точные значения коэффициента рассеяния, чем прибор, измеряющий небольшой диапазон углов рассеяния, на практике при его использовании сложнее избежать изменения коэффициента ослабления в исследуемом объеме воздуха из-за нахождения в нем самого прибора. На практике интегрирующие нефелометры редко применяются для измерения МОД, но широко используются для измерения количества загрязняющих веществ.



Рисунок 9.6. Измеритель видимости, основанный на измерении рассеянного света в широком угле.

Во всех перечисленных выше приборах, как и в большинстве трансмиссометров, приемники включают в себя фотодетекторы или фотодиоды. Используемый свет излучается в виде импульсов (например, применяется ксеноновая газоразрядная лампа большой мощности).

Для использования приборов этого типа достаточно ограниченного пространства (как правило, 1–2 м). В связи с этим они полезны при отсутствии ориентиров видимости или источников света (на судах, обочинах дорог и т. д.). Поскольку в данном случае измерения относятся лишь к небольшому объему воздуха, их репрезентативность для состояния атмосферы в том или ином месте может быть поставлена под сомнение. Однако

репрезентативность можно улучшить путем осреднения большого числа проб или измерений. Кроме того, иногда сглаживание результатов достигается путем исключения экстремальных значений.

Использование приборов этого типа нередко ограничивалось специализированными применениями (например, для измерения видимости на автострадах или определения наличия или отсутствия тумана). Кроме того, они применяются в тех случаях, когда достаточно менее точных измерений МОД. В настоящее время они все чаще используются в автоматических метеорологических системах наблюдений, поскольку могут измерять МОД в широком диапазоне и по сравнению с трансмиссометрами относительно слабее реагируют на загрязнение.

9.3.4 Выбор места и установка приборов

Измерительные приборы должны устанавливаться в таких местах, где имеется гарантия того, что измерения будут достаточно репрезентативными. Таким образом, для синоптических целей приборы следует размещать в местах, свободных от локального загрязнения атмосферы, т. е. от дыма и промышленных выбросов, вдали от пыльных дорог и т. д.

Объем воздуха, в котором измеряется коэффициент ослабления или коэффициент рассеяния, как правило, должен находиться на уровне глаза наблюдателя, т. е. примерно на высоте 1,5 м над поверхностью земли.

Необходимо учитывать, что трансмиссометры и приборы для измерения коэффициента рассеяния следует устанавливать таким образом, чтобы солнце не попадало в оптическое поле в любое время дня. Добиться этого можно путем установки оптической оси в направлении север-юг (до $\pm 45^\circ$) горизонтально для широт до 50° или за счет использования систем экранов или отражателей.

Для целей авиации измерения должны быть репрезентативными для условий аэродрома. Эти условия, которые в основном относятся к функционированию аэродромов, описываются в части II, глава 2.

Приборы следует устанавливать в соответствии с теми направлениями, которые указаны изготовителями. Особое внимание необходимо уделять обеспечению соосности передатчиков и приемников и правильной юстировке светового луча. Опоры, на которых устанавливают передатчики/приемники, должны обладать механической прочностью (и в то же время быть упругими — при установке на аэродромах), для того чтобы избежать нарушения соосности из-за движения грунта во время замерзания и особенно во время таяния. Кроме того, крепления не должны изгибаться под воздействием теплового удара.

9.3.5 Калибровка и техническое обслуживание приборов

Для того чтобы получить удовлетворительные и надежные данные наблюдений, необходимо проводить техническое обслуживание приборов для измерения МОД, эксплуатировать их в соответствии с требованиями фирм-изготовителей и постоянно содержать их в хорошем рабочем состоянии. Регулярные поверки и калибровка согласно рекомендациям изготовителя должны обеспечивать их оптимальное функционирование.

Следует регулярно производить калибровку в условиях очень хорошей видимости (более 10–15 км). Необходимо избегать таких атмосферных условий, которые приведут к ошибкам в калибровке. Например, при наличии сильных восходящих потоков или после ливневых осадков отмечаются значительные изменения коэффициента ослабления в слое воздуха у поверхности земли, и если используется несколько удаленных друг от друга трансмиссометров (как это бывает на аэродромах), то результаты их измерений характеризуются значительной дисперсией. В таких условиях проводить калибровку не рекомендуется.

Следует принять во внимание, что оптические поверхности большинства трансмиссометров нуждаются в регулярной чистке, и необходимо планировать ежедневное техническое обслуживание некоторых приборов, особенно на аэродромах. Эти приборы следует регулярно чистить во время или после атмосферных возмущений, поскольку дождь или ливни, а также сильные ветры могут приводить к тому, что оптические системы покрываются большим количеством водяных капель и твердых частиц, в результате чего возникают значительные ошибки при измерении МОД. То же самое справедливо и в отношении снегопада, который может блокировать оптические системы. Часто перед оптическими системами устанавливаются системы подогрева для улучшения функционирования прибора в таких условиях. Иногда используются системы, подающие воздух, для того чтобы в какой-то степени решить все эти проблемы и избежать необходимости в частой чистке приборов. Однако следует указать на то, что системы подачи воздуха и системы подогрева могут создавать воздушные потоки, более теплые, чем окружающий воздух, и тем самым отрицательно влиять на результаты измерений коэффициента ослабления воздушной массы. В засушливых зонах песчаные бури или поднимающийся в воздух песок могут блокировать оптическую систему и даже повредить ее.

9.3.6 **Источники погрешностей при измерениях метеорологической оптической дальности и оценки точности измерений**

Общие сведения

Все оперативные приборы, используемые на практике для измерений МОД, исследуют относительно небольшой объем воздуха по сравнению с тем, что видит глаз наблюдателя. Приборы могут производить точные измерения МОД только в тех случаях, когда объем воздуха, который они исследуют, является репрезентативным для атмосферы, окружающей место наблюдения, до радиуса, равного МОД. Легко представить себе такую ситуацию, когда в условиях зарядов тумана, локального дождя или снежной бури показания прибора вводят в заблуждение. Однако опыт показал, что такие ситуации отмечаются довольно редко, и постоянный мониторинг МОД с помощью прибора позволяет обнаружить изменения МОД до того, как их распознал наблюдатель, работающий без приборов. Тем не менее, результаты инструментальных измерений МОД должны интерпретироваться с осторожностью.

Другой фактор, который должен приниматься во внимание при обсуждении репрезентативности измерений, — однородность самой атмосферы. Для всех значений МОД коэффициент ослабления в небольшом объеме воздуха обычно колеблется быстро и нерегулярно, и результаты отдельных измерений МОД с помощью измерителей рассеяния и трансмиссометров с короткой базовой линией, не имеющих встроенных систем сглаживания или осреднения, характеризуются значительной дисперсией. В связи с этим необходимо проводить много измерений и сглаживать или осреднять их для получения репрезентативного значения МОД. Анализ результатов первых сравнений ВМО по измерению видимости (ВМО, 1990) показывает, что для большинства приборов осреднение в течение периода более 1 минуты не дает никаких преимуществ, однако для самых «шумных» приборов предпочтительное время осреднения составляет более 2 минут.

Точность телефотометров и визуальных фотометров

Визуальные измерения, основанные на измерениях коэффициента ослабления, проводить довольно трудно, причем основным источником погрешностей является изменчивость функционирования глаза человека. Эти ошибки были описаны в разделах, касающихся методов визуальной оценки МОД.

Точность трансмиссометров

Основные источники погрешностей при измерениях с помощью трансмиссометра следующие:

- a) нарушение соосности передатчиков и приемников;
- b) недостаточная жесткость и стабильность креплений передатчика/приемника (замерзание и оттаивание грунта, тепловой удар);
- c) старение и неправильная центровка источников излучения;
- d) ошибки при калибровке (плохая видимость или проведение калибровки в нестабильных условиях, влияющих на коэффициент ослабления);
- e) нестабильность электронного оборудования системы;
- f) передача на большое расстояние коэффициента ослабления в виде сигнала слабого тока, подверженного интерференции от электромагнитных полей (особенно на аэродромах); предпочтительно преобразовывать сигналы в цифровой вид;
- g) помехи, обусловленные восходом или заходом Солнца, и плохая начальная ориентация трансмиссометров;
- h) атмосферное загрязнение, приводящее к загрязнению оптических систем;
- i) локальные атмосферные условия (ливневые осадки и сильные ветры, снег и т. д.), обуславливающие нерепрезентативные результаты измерения коэффициента ослабления или отклонения от закона Кошмидера (снег, ледяные кристаллы, дождь, песок и т. д.). Дополнительное поглощение песком и пылью влияет на видимость и ее измерение. Это учитывается в принципе измерения с помощью трансмиссометров. (Измерения с помощью скаттерометров не могут учитывать эффект дополнительного поглощения в связи с особенностями принципа измерения). Рассеяние и отражение больших частиц создает небольшое нежелательное прямое рассеяние в измерениях трансмиссометра. Это может повлиять на неопределенность измерений с помощью трансмиссометра в зависимости от отклонения передатчика и поля зрения приемника.

Хорошо откалиброванный и правильно обслуживаемый трансмиссометр должен давать репрезентативные результаты измерения МОД, если коэффициент ослабления вдоль оптической оси прибора является репрезентативным коэффициентом ослабления в пределах МОД. Однако трансмиссометр может обеспечивать производство точных измерений МОД в рамках ограниченного диапазона. Кривая относительной погрешности для МОД может быть построена по данным, полученным путем дифференцирования основной формулы трансмиссометра (см. уравнение 9.7). На рисунке 9.7 показаны изменения относительной погрешности в зависимости от пропускания при допущении того, что точность измерений коэффициента пропускания T должна составлять 1 %.

Такая погрешность (1 %) коэффициента пропускания, которая может считаться нормальной для многих старых приборов, не включает погрешности, связанные с дрейфом приборов и загрязнением их оптических элементов, или разброс в результатах измерений, обусловленный самим явлением. Если точность уменьшается примерно до 2–3 % (с учетом других факторов), то значение относительной погрешности, приведенное на вертикальной оси графика, следует умножить на тот же коэффициент 2 или 3. Следует также принять во внимание, что относительная погрешность измерений МОД возрастает экспоненциально в начале и конце кривой, тем самым обуславливая ограничение верхних и нижних пределов диапазона измерений МОД. Кривая на рисунке 9.7 указывает на то, где находится предел диапазона измерений в том случае, если погрешность 5, 10 или 20 % допускается на верхней и нижней границах диапазона измерений при базовой линии 75 м. Можно также вывести, что при измерениях МОД в пределах 1,25–10,7 длины

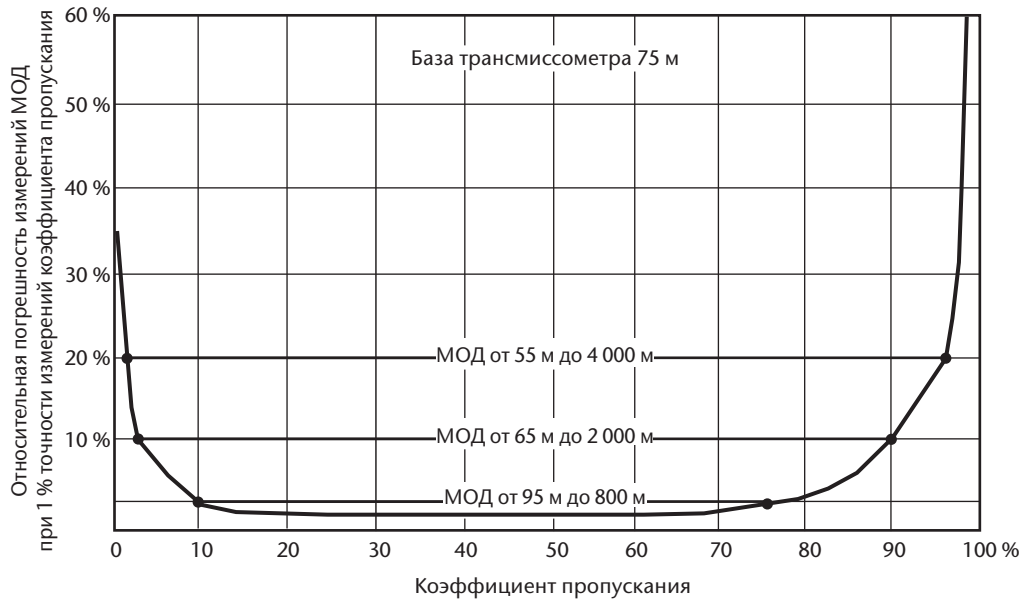


Рисунок 9.7. Зависимость погрешности измерений метеорологической оптической дальности от погрешности коэффициента пропускания 1 %.

базовой линии относительная погрешность МОД должна быть низкой (примерно 5 %), если исходить из допущения, что погрешность для T составляет 1 %. Относительная погрешность МОД превышает 10 % в тех случаях, когда МОД составляет менее 0,87 длины базовой линии или превышает ее более чем в 27 раз. При дальнейшем расширении диапазона измерений ошибка быстро увеличивается и становится неприемлемой. Тем не менее, поскольку современные трансмиссометры допускают погрешности коэффициента пропускания, которые явно ниже образцового показателя 1 %, пригодный для использования диапазон измерений может быть расширен соответствующим образом.

Уже результаты первых сравнений ВМО по измерениям видимости (WMO, 1990) показали, что лучшие трансмиссометры при правильной их калибровке и хорошем техническом обслуживании могут обеспечивать измерения МОД при среднем квадратическом отклонении примерно 10 % в тех случаях, когда МОД равна величине, до 60 раз превышающей базовую линию.

Точность измерителей рассеяния

Основные источники погрешностей при измерениях МОД с помощью измерителей рассеяния следующие:

- погрешности калибровки (слишком плохая видимость или проведение калибровки в нестабильных условиях, влияющих на коэффициент ослабления);
- отсутствие возможности повторения процедуры или отсутствие материалов при использовании для калибровки непрозрачных рассеивателей;
- нестабильность электронного оборудования системы;
- передача на большое расстояние коэффициента рассеяния в качестве сигнала слабого тока или низкого напряжения, подверженного интерференции от электромагнитных полей (особенно на аэродромах); предпочтительно преобразовывать сигналы в цифровой вид;
- возмущения, обусловленные восходом или заходом Солнца, и плохая первоначальная ориентация прибора;

- f) атмосферные загрязнения, приводящие к загрязнению оптических систем (оптические элементы этих приборов менее чувствительны к грязи по сравнению с трансмиссометрами, однако сильное загрязнение все же оказывает на них влияние);
- g) атмосферные условия (дождь, снег, ледяные кристаллы, песок, местное загрязнение и т. д.), приводящие к тому, что коэффициент рассеяния отличается от коэффициента ослабления.

Результаты первых сравнений ВМО по измерениям видимости (WMO, 1990) показывают, что при низких значениях МОД измерители рассеяния, как правило, являются менее точными, чем трансмиссометры, и их показания имеют большую изменчивость. Было также обнаружено доказательство того, что как класс измерители рассеяния более подвержены влиянию осадков, чем трансмиссометры. Однако самые лучшие измерители рассеяния продемонстрировали небольшую уязвимость к осадкам или вообще ее отсутствие и давали оценки МОД со средним квадратическим отклонением около 10 % в диапазоне МОД 100 м – 50 км. Почти все измерители рассеяния в ходе сравнений показали наличие значительной систематической ошибки в какой-либо части диапазона их измерений. Оптические системы измерителей рассеяния также продемонстрировали хорошую устойчивость к загрязнению.

Обзор различий между измерителями рассеяния и трансмиссометрами предложен ВМО (WMO, 1992*b*).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Бартенева О. Д., 1960: Индикатрисы рассеяния света в призмном слое атмосферы. *Изв. АН СССР, Сер. геофиз. [Bull. Acad. Sci. USSR, Geophysics Series]*, № 12: 1237-1244.
- Международная организация гражданской авиации, 2013: *Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации*. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации — 18-е издание. Монреаль.
- Международная электротехническая комиссия, 1987: *Международный электротехнический словарь*, глава 845: Освещение, МЭК 60050-845. Женева.
- Всемирная метеорологическая организация, 1992a: *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182). Женева.
- , 2010a: *Наставление по Глобальной системе наблюдений* (ВМО – № 544), том I. Женева.
- , 2010b: *Руководство по Глобальной системе наблюдений* (ВМО – № 488). Женева.
- , 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.
- International Organization for Standardization, 2012: *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 1: Ground-based Remote Sensing of Visual Range by Lidar*, ISO 28902-1:2012. Geneva.
- Jia S.-J. and D.-R. Lü, 2014: Optimal forward-scattering angles of atmospheric aerosols in North China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(3):236–242.
- Klett, J.D., 1985: Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Applied Optics*, 24(11):1638–1643.
- Kneizys, F.X., E.P. Shettle, W.O. Gallery, J.H. Chetwynd, L.W. Abreu, J.E.A. Selby, S.A. Clough and R.W. Fenn, 1983: *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6*, Appendix D. AFGL-TR-83-0187, Environmental Research Papers No. 846. Air Force Geophysics Laboratory, Massachusetts.
- Middleton, W.E.K., 1952: *Vision Through the Atmosphere*. University of Toronto Press, Toronto.
- Sheppard, B.E., 1983: Adaptation to MOR. *Preprints of the Fifth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation* (Toronto, 11–15 April 1983), pp. 226–269.
- Van de Hulst, H.C., 1957: *Light Scattering by Small Particles*. Wiley & Sons, New York (repr. Dover Books on Physics, 1981).
- World Meteorological Organization, 1990: *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report* (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldrige and W.R. Sparks). Instruments and Observing Methods Report No. 41 (WMO/TD-No. 401). Geneva.
- , 1992b: Visibility measuring instruments: Differences between scatterometers and transmissometers (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92)* (Vienna, Austria, 11–15 May 1992), Instruments and Observing Methods Report No. 49 (WMO/TD-No. 462). Geneva.
-