

ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ

9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

9.1.1 Определения

Видимость традиционно определялась 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. 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. Световой поток оценивается по функции фотометрической яркости Международной комиссии по освещению (МКО), которая описывает среднюю спектральную чувствительность зрительного восприятия яркости человеком (см. 9.4.1).

Видимость, метеорологическая видимость в дневное время и метеорологическая видимость в ночное время¹. 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, 1992a).

Дальность прямой видимости (метеорологическая). Расстояние, на котором видимый контраст наблюдаемого тела на фоне равен порогу чувствительности глаза наблюдателя (ВМО, 1992a).

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.

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.

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

- a) *Световой поток* (обозначение: F (или Φ), единица: люмен): параметр, рассчитываемый по потоку излучения при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО;
- 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 единице 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). Это дает степень, в которой световой поток коллимированного пучка лучей, излучаемого источником накаливания при цветовой температуре 2 700 K, уменьшается при прохождении единицы расстояния в атмосфере. Этот коэффициент является мерой ослабления, возникающего в результате как поглощения, так 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 источником накаливания при цветовой температуре 2 700 K, 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 последнем случае T часто умножается на 100 и выражается в %.

Аэродром. 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 (ИКАО, 2016).

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 применении к измерению дальности видимости на взлетно-посадочной полосе, определяющей условия для взлета и посадки при низкой видимости. Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе (ВПП) требуется от 50 м или ниже

до 2 000 м и рассчитывается на основе МОД с использованием, среди прочих переменных, интенсивности освещения ВПП и фоновой яркости (см. том III, глава 2 настоящего Руководства). 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. том III, глава 2 настоящего Руководства).

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 (ВМО, 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 МОД, дальности видимости на взлетно-посадочной полосе и фоновой освещенности приведены в настоящем томе, 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 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 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

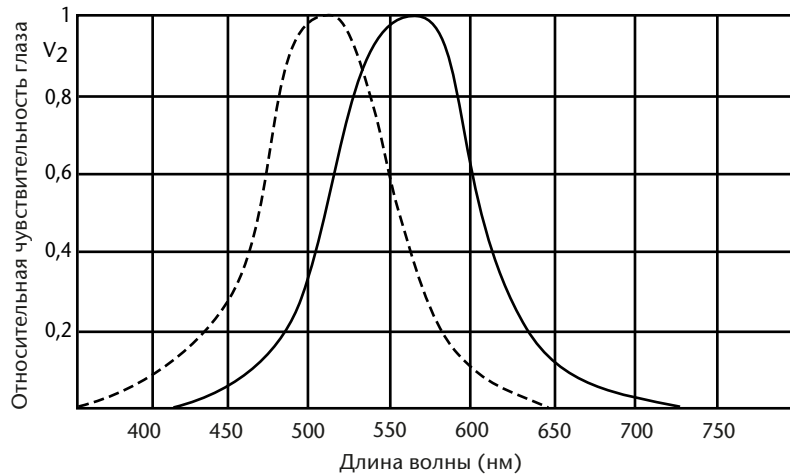


Рисунок 9.1. Относительная чувствительность глаза человека к монохроматическому излучению. Сплошная линия — дневное видение, штриховая линия — ночное видение.

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 $x = 0$ и σ — коэффициент ослабления на единицу длины. 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 определения значения МОД при $T = 0,05$, и, установив $x = P$, где P обозначает МОД,, то может быть записано 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:

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

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 9.2.3, а использование этого уравнения для визуальных наблюдений описывается в 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, выдвижные устройства, 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. Наблюдатель также должен уделять особое внимание существенным изменениям МОД по направлениям во время оценки видимости.

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 меняется в разных направлениях, записанное или сообщенное значение может зависеть от методов кодирования сводки. 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 $0,5^\circ$. 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 противолечал 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:

- а) для каждого значения МОД задается такая сила света, при которой отмечается прямое соответствие между расстоянием, на котором огонь едва виден, и значением МОД;
- б) 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

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 Р		
Р (м)	В сумерках ($E_t = 10^{-6,0}$)	При лунном свете ($E_t = 10^{-6,7}$)	В полной темноте ($E_t = 10^{-7,5}$)
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		
<i>P</i> (м)	<i>В сумерках</i> ($E_t = 10^{-6,0}$)	<i>При лунном свете</i> ($E_t = 10^{-6,7}$)	<i>В полной темноте</i> ($E_t = 10^{-7,5}$)
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

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.

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 вблизи прибора, и между наблюдателем и объектами.

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 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 (WMO, 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).

9.2.6 **Использование передающих камер**

Системы передающих камер иногда используются в качестве вспомогательного средства для наблюдателя при оценке видимости области, которая закрыта от обзора зданиями, или для наблюдения за видимостью в удаленном месте. В настоящее время разрабатываются системы автоматизированного определения наличия тумана и оценки видимости по изображениям с передающих камер. Это неудивительно, учитывая, что доступность и качество (веб-)камер возросли, стоимость этих систем снизилась, а изображения можно легко разместить в Интернете. Кроме того, методы обработки изображений развиваются и в настоящее время легко доступны. Были реализованы различные методы, такие как определение того, видны ли объекты на известных расстояниях путем оценки границ территории или уменьшения контрастности. Другие методы используют статистические параметры изображения, такие как градиенты или анализ Фурье, и связывают их с видимостью, или используют результаты методов улучшения изображения, таких как устранение дымки. Эти методы могут быть применены либо к отдельным изображениям, либо к двум изображениям одного и того же участка, полученным двумя камерами на разных расстояниях, либо к одному изображению относительно (набора) эталонных изображений в определенных атмосферных условиях. Часто методы ограничены дневным временем, и реализация должна быть настроена на изображения/участки для конкретного сайта (см. к примеру, WMO, 2016).

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 интенсивности света, рассеянного в определенных направлениях в небольшом объеме воздуха, из которого выводится коэффициент рассеяния: в условиях естественного тумана поглощением часто можно пренебречь, а коэффициент рассеяния может рассматриваться равным коэффициенту ослабления.

Обе вышеуказанные категории включают приборы, использующие источник света и фотоприемник для обнаружения рассеянного и ослабленного светового луча.

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, 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 удаленного 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 света отражается зеркалом или обратным отражателем, находящимся на известном расстоянии, которое составляет половину базовой линии (поскольку световой луч проходит расстояние до отражателя и обратно), как показано на рисунке 9.3.

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.

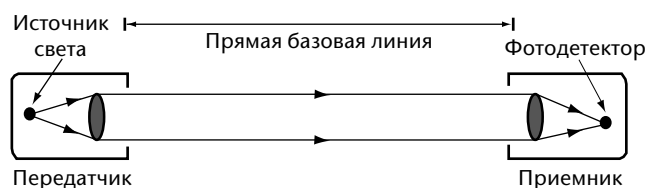


Рисунок 9.2. Двухлучевой трансмиссометр

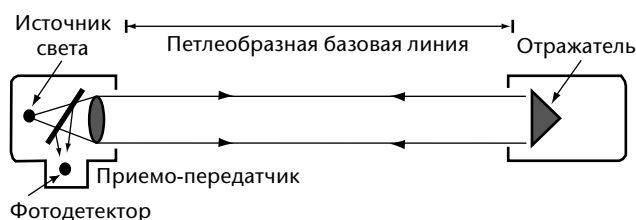


Рисунок 9.3. Однолучевой трансмиссометр

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. 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 настоящем томе, 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 уравнению:

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

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 Инструменты для оценки 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 инструмент для определения 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 в направлениях, где рассеяние обеспечивает наилучшую оценку коэффициента рассеяния во всех условиях. 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 во всех условиях.

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.
- б) *Прямое рассеяние.* Количество света, рассеянного частицами малого размера (аэрозоли, мелкие капли), имеет угловую зависимость. Кроме того, угловая зависимость определяется химическим составом (например, концентрацией соли), типом ядра (песок, пыль), а также размером и формой частиц. Следовательно, угол рассеяния должен быть выбран таким образом, чтобы угловая зависимость была минимальной и репрезентативной для коэффициента рассеяния. Несколько авторов показали, 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 используемые конфигурации приборов. Приборы, определяющие МОД на основе принципа прямого рассеяния, обычно называются приборами прямого рассеяния или измерителями прямого рассеяния.

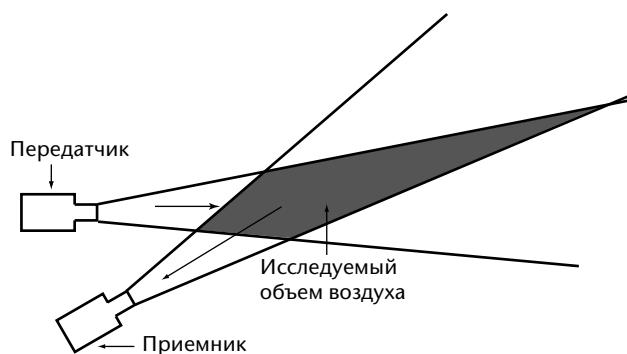


Рисунок 9.4. Измеритель видимости, основанный на измерении обратного рассеяния

- 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.

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

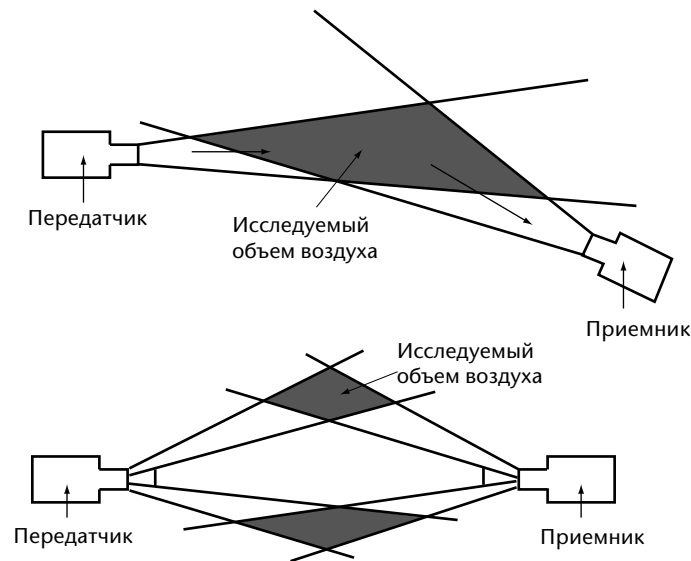


Рисунок 9.5. Измеритель видимости, основанный на измерении прямого рассеяния, в двух конфигурациях



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

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 эти приборы все чаще используются в автоматических метеорологических системах наблюдений из-за их способности измерять МОД в широком диапазоне и их относительно низкой восприимчивости к загрязнению оптических поверхностей по сравнению с трансмиссометрами.

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 измерители прямого рассеяния должны быть установлены таким образом, чтобы солнце не находилось в оптическом поле зрения приемника в любое время суток. Обычно это достигается либо установкой оптической оси в направлении север-юг (до $\pm 45^\circ$), когда приемник расположен горизонтально и направлен в сторону от экватора на широтах до 50° , либо с помощью систем экранов или отражателей. Измерители прямого рассеяния также должны быть выровнены таким образом, чтобы избежать отражения объектов в оптическом поле зрения приемника.

Для авиационных целей измерения должны быть репрезентативными для условий на аэродроме или вдоль взлетно-посадочной полосы. Эти условия, которые более конкретно относятся к эксплуатации аэродромов, описываются в томе III, глава 2 настоящего Руководства.

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 быть механически прочными (и в то же время быть упругими — при установке на аэродромах), чтобы избежать любого смещения из-за движения грунта во время замерзания и особенно во время оттаивания. Кроме того, крепления не должны деформироваться под воздействием термических напряжений, которым они подвергаются. Некоторые современные трансмиссометры могут автоматически производить регулировку их соосности, чтобы компенсировать это.

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.

9.3.5.1 **Техническое обслуживание**

Большинство трансмиссометров требуют регулярной чистки оптических поверхностей; соответственно необходимо планировать выполнение частого технического обслуживания, 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. Системы подогрева часто размещаются перед оптическими системами и в кожухе, чтобы улучшить работу прибора в таких условиях. Системы продувки воздухом иногда используются для уменьшения вышеуказанных проблем и необходимости частой очистки. Однако следует указать на то, что эти системы обдува и подогрева могут генерировать 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. Современные трансмиссометры и измерители прямого рассеяния контролируют загрязнение оптической линзы или окошка и выдают предупреждения и ошибки, когда загрязнение достигает порогового значения. Некоторые приборы вносят поправку на загрязнение окошка.

На измерение МОД измерителем прямого рассеяния влияет паутина или даже отдельные нити паутины в измеряемом объеме. Летающие насекомые, которые обычно роятся в сумерках в спокойных погодных условиях, могут способствовать рассеянному сигналу. И то, и другое приводит к тому, что измеритель прямого рассеяния сообщает ложно заниженные параметры МОД. Уменьшение значений МОД измерителем прямого рассеяния из-за паутины и летающих насекомых может быть весьма значительным, между тем как они практически не влияют на МОД, определяемую трансмиссометром. Некоторые измерители прямого рассеяния фильтруют необработанный сигнал на наличие всплесков, вызванных летающими насекомыми (WMO, 2012). Однако необходимо следить за тем, чтобы пиковые отклонения, возникающие в результате воздействия атмосферных частиц или капель, не отфильтровывались, так как такая фильтрация приводит к более высоким значениям МОД, что может повлечь за собой проблемы для безопасности.

Основные источники ошибок и рекомендуемые действия обобщены в таблице 9.3 для трансмиссометров и в таблице 9.4 для измерителей прямого рассеяния.

9.3.5.2 **Калибровка**

Калибровку следует регулярно производить (обычно это выполняется в условиях очень хорошей видимости, то есть на расстоянии от 10 до 15 км), а прибор следует откалибровать и при необходимости отрегулировать. 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.

Трансмиссометр может быть откалиброван путем прямого сравнения с расстоянием, на котором наблюдатель может видеть определенные объекты и светосигналы известной интенсивности. Наблюдение должно быть как можно ближе к МОД, так как это значение МОД, которое используется для преобразования, чтобы определить коэффициент пропускания. Калибровка также может быть выполнена непосредственно с помощью отслеживаемых оптических фильтров нейтральной плотности.

Таблица 9.3. Трансмиссометры: источники погрешностей и действия по их устранению

<i>Источник погрешности</i>	<i>Действие</i>
Атмосферные загрязнители, оседающие на оптических поверхностях	1. Функции самодиагностики прибора: алгоритмы измерения загрязнения и корректировки загрязнения в программном обеспечении прибора 2. Профилактическое обслуживание: регулярная чистка в соответствии с инструкциями производителя 3. Текущее техническое обслуживание: очистка при необходимости
Нестабильность электронного оборудования системы	Регулярная проверка калибровки с использованием градуированного набора фильтров ослабления в стабильных условиях высокой видимости. При необходимости регулировка настройки прибора в соответствии с инструкциями производителя
Скопление снега или льда на поверхностях вблизи оптического измерительного тракта	Профилактические меры: установить обогреватели измерительной головки и обогреватели крышки прибора
Старение источника света передатчика или неправильная центровка ламп	1. Функции самодиагностики прибора: измерение интенсивности лампы и предупреждающие сообщения о старении 2. Профилактическое/текущее техническое обслуживание: замена источника света передатчика, если требуется 3. Использование встроенной программы автоматического выравнивания, при наличии
Недостаточная жесткость и стабильность креплений передатчика/приемника, а также последствия замерзания или оттаивания грунта и термического напряжения	Регулярная проверка калибровки с использованием градуированного набора фильтров ослабления в устойчивых условиях высокой видимости. При необходимости регулировка настройки прибора в соответствии с инструкциями производителя
Дистанционная передача коэффициента ослабления в виде сигнала слабого тока может быть подвержена помехам от электромагнитных полей (особая проблема на аэродромах)	Сигналы в цифровой форме менее подвержены помехам, чем аналоговые сигналы
Ошибка калибровки из-за калибровки/регулировки, выполняемой при низкой видимости или нестабильных атмосферных условиях, влияющих на коэффициент затухания	Калибровка и регулировка должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя
Неправильная настройка передатчиков и приемников	Использование встроенной программы автоматического выравнивания, при наличии
Помехи, когда солнце находится вблизи горизонта, или из-за отражений от прилегающих поверхностей	Установка и ориентация должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя

Таблица 9.4. Измерители прямого рассеяния: источники погрешностей и действия по их устранению

<i>Источник погрешности</i>	<i>Действие</i>
Атмосферные загрязнители, оседающие на оптических поверхностях, и/или неправильная корректировка этого загрязнения	1. Функции самодиагностики прибора: алгоритмы измерения загрязнения и корректировки загрязнения в программном обеспечении прибора 2. Конструктивные особенности: геометрия обзора вниз и колпаки над приборными головками обеспечивают лучшую защиту оптики и увеличивают интервалы между техническим обслуживанием 3. Профилактическое обслуживание: регулярная чистка в соответствии с инструкциями производителя 4. Текущее техническое обслуживание: очистка при необходимости
Нестабильность электронного оборудования системы	Регулярная проверка калибровки с использованием рассеивающих пластин (также известных как калибровочные блоки измерителя рассеяния – SCU), которые имитируют определенные условия тумана. При необходимости регулировка настройки прибора в соответствии с инструкциями производителя
Скопление снега или льда на поверхностях вблизи оптического измерительного тракта	Профилактические меры: установить обогреватели измерительной головки и обогреватели крышки прибора
Старение источника света передатчика	1. Функции самодиагностики прибора: измерение интенсивности лампы и предупреждающие сообщения о старении 2. Профилактическое/текущее техническое обслуживание: замена источника света передатчика, если требуется
Источник света не на видимых длинах волн	Конструктивная особенность, учитываемая при проверке калибровки по трансмиссометру
Атмосферные условия (например, дождь, снег, кристаллы льда, песок, местные атмосферные загрязнители), дающие коэффициент рассеяния, который отличается от коэффициента затухания	1. Конструктивная особенность: оптимизированный угол рассеяния 2. Разбор атмосферных условий и их корректировка
Дополнительное поглощение песком, пылью и дымом, которое влияет на видимость и ее измерение	Различение и коррекция поглощения или применение калибровочного коэффициента, полученного для этих условий
Ошибка калибровки из-за калибровки/регулировки, выполняемой при низкой видимости или нестабильных атмосферных условиях, влияющих на коэффициент затухания	Калибровка и регулировка должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя
Неправильные процедуры калибровки/регулировки или использование неправильных или поврежденных рассеивающих пластин	Калибровка и регулировка должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя
Помехи, когда солнце находится вблизи горизонта, или из-за отражений от прилегающих поверхностей	Установка и ориентация должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя

<i>Источник погрешности</i>	<i>Действие</i>
Помехи от паутины или даже отдельных паутинок и летающих насекомых в измеряемом объеме	1. Профилактическое обслуживание: регулярная чистка в соответствии с инструкциями производителя 2. Текущее техническое обслуживание: чистка при необходимости 3. Распознавание и коррекция всплесков рассеянного сигнала из-за летающих насекомых

Калибровка приборов, основанная на измерении коэффициента рассеяния, также известных как измерители рассеяния, не может быть выполнена напрямую. Калибровка измерителя прямого рассеяния должна быть отслеживаемой и проверяемой в соответствии со стандартом трансмиссометра, точность которого была проверена в предполагаемом рабочем диапазоне (ICAO, 2016). Калибровка измерителя рассеяния включает в себя вставку оптических пластин (часто называемых калибровочными блоками с дозированием рассеяния (SCU)) в измеряемый объем в фиксированном положении, которое имитирует определенное значение МОД. Эти SCU являются специфическими и предоставляются производителем прибора. Как правило, только SCU, соответствующие минимальному значению МОД в сочетании с блокировкой приемника (высокое значение МОД), могут использоваться для выполнения двухточечной калибровки.

SCU подвержены изменениям в течение периода использования из-за загрязнения и старения, и их следует в самом начале, а затем регулярно проверять и калибровать. Это должно быть сделано путем возврата пластин в подходящее испытательное оборудование, оснащенное соответствующими эталонами для видимости и отслеживаемой цепочкой калибровки. Для некоторых приборов производитель может предложить эквивалентную услугу калибровки для SCU, поставляемых самостоятельно.

В соответствии с ICAO (2005), раздел 9.4.3 относительно эталонов для видимости: «идеальный» эталон представляет собой набор приборов, состоящий по меньшей мере из двух трансмиссометров (оптимально с использованием двух разных базовых линий) и двух измерителей прямого рассеяния, показывающих медианные значения со смещением менее 5 % по сравнению с трансмиссометрами.

На объекте калибровки видимости SCU следует проверить на известном эталонном измерителе прямого рассеяния и при необходимости еще раз откалибровать с новым коэффициентом.

Там известные эталонные измерители прямого рассеяния сами регулярно калибруются с помощью эталонного блока SCU и систематически сверяются с эталонными трансмиссометрами в условиях случаев низкой видимости. В случае отклонения от определенного порогового значения (5 % для ИКАО) эталонный блок SCU повторно калибруется с новым коэффициентом. Эталонные трансмиссометры также должны регулярно калиброваться. Это может быть произведено в сопоставлении с визуальными наблюдениями или с помощью набора оптических фильтров нейтральной плотности. Следует установить прослеживаемость количества измерений МОД до известного стандарта. Эталонная и калибровочная цепочка определения видимости описана, например, в публикации WMO (2006). Результирующая цепочка производства калибровки описана на рисунке 9.7.

Сравнение измерителей прямого рассеяния и трансмиссометров должно быть тщательно проведено с использованием проверенных данных. Сравнение измерителей рассеяния и трансмиссометров следует проводить в периоды условий низкой видимости, так как SCU обычно имитирует эти условия. Кроме того, точность эталонных трансмиссометров очень высока при низкой видимости, а значения низкой видимости имеют существенно важное значение для целей авиации.

Следует сохранять данные только по случаям появления тумана, а эпизоды, включающие осадки (дождь, снег), должны быть исключены. Причина была отмечена в 9.1.4: взаимосвязь между коэффициентом пропускания и МОД действительна для капель

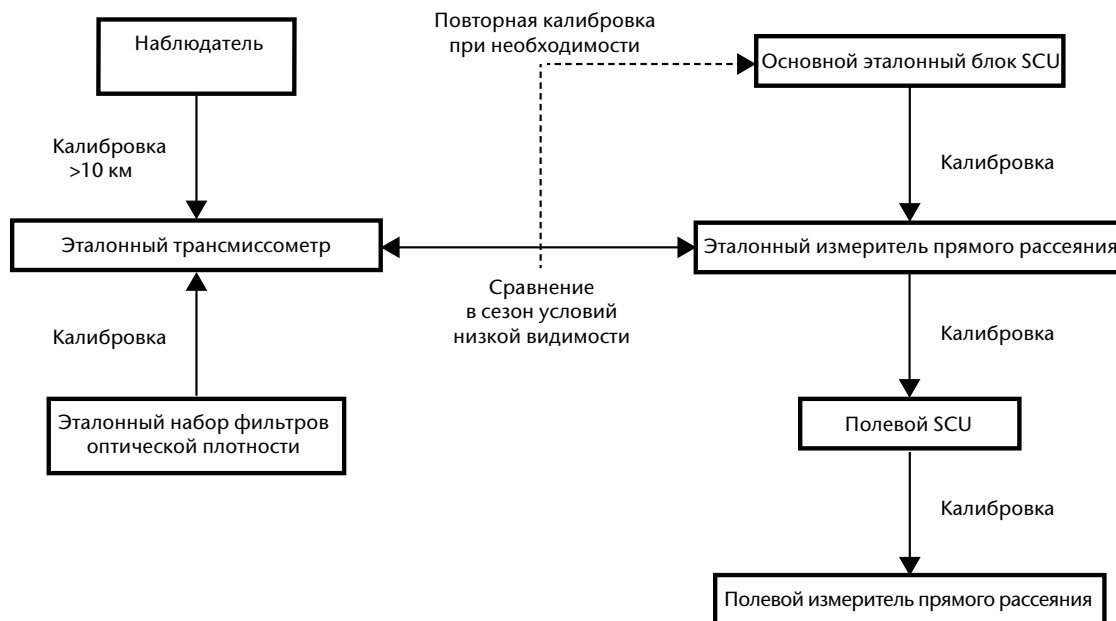


Рисунок 9.7. Цепочка калибровки видимости для измерителей рассеяния

тумана, однако когда видимость снижается другими гидрометеорами (такими как дождь или снег) или литометеорами (такими как песчаная буря), к значениям МОД следует относиться с большей осторожностью.

Наконец, как поясняется в публикации ICAO (2005), при сравнении приборов необходимо проверять однородность тумана. Неоднородные туманы могут сильно повлиять на коэффициент распределения МОД у прибора. Поэтому такие периоды должны быть определены и исключены из анализа данных.

Следует обратить внимание, что более высокие значения видимости также могут учитываться при сравнении измерителей прямого рассеяния и трансмиссометров, когда трансмиссометр может служить в качестве эталона. Это расширение диапазона МОД, кроме того, служит для проверки линейности и двухточечной калибровки измерителей прямого рассеяния в большем диапазоне видимости.

9.3.6 **Оценки точности измерения метеорологического оптического диапазона**

9.3.6.1 **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 (WMO, 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.

9.3.6.2 Точность трансмиссометров

Основные источники погрешностей при измерениях с помощью трансмиссометра перечислены в таблице 9.3 в 9.3.5.1.

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 только в ограниченном диапазоне. Кривая относительной погрешности для МОД может быть построена по данным, полученным путем дифференцирования основной формулы трансмиссометра (см. уравнение 9.7). На рисунке 9.8 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

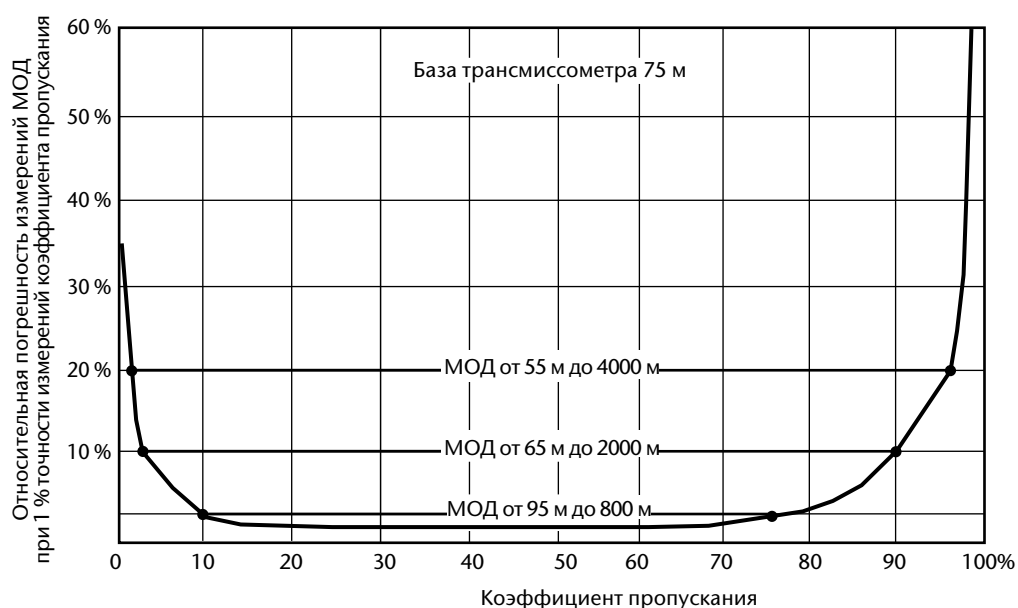


Рисунок 9.8. Зависимость погрешности измерений метеорологической оптической дальности от погрешности коэффициента пропускания 1 %.

самым обуславливая ограничение верхних и нижних пределов диапазона измерений МОД. Пример, показанный кривой, 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 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 взаимных 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.

9.3.6.3 **Точность измерителей рассеяния**

Основные источники погрешностей при измерениях МОД с помощью измерителей рассеяния перечислены в Таблице 9.4 в 9.3.5.1.

Результаты первых взаимных 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 выдавали 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, 1992b).

9.3.6.4 **Точность телефотометров и визуальных фотометров**

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

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, 2016: *Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации*. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации — 19-е издание. Монреаль, ИКАО.
- Международная электротехническая комиссия, 1987: *Международный электротехнический словарь*, глава 845: Освещение, МЭК 60050-845. Женева.
- Всемирная метеорологическая организация, 1992a: *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182). Женева.
- , 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.
- International Civil Aviation Organization, 2005: *Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices*. Doc 9328, AN/908. Third edition. Montreal, ICAO.
- 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*. Toronto, University of Toronto Press.
- 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*. New York, Wiley & Sons (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) (WMO/TD-No. 462). Paper 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. Geneva.
- , 2006: *KNMI Visibility Standard for Calibration of Scatterometers* (H. Bloemink) (WMO/TD-No. 1354). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2006) (Geneva, Switzerland, 4–6 December 2006). Instruments and Observing Methods Report No. 94. Geneva.
- , 2012: Filtering of insect reduced MOR measurements by a forward scatter sensor (W. Wauben). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2012) (Brussels 16–18 October 2012). Instruments and Observing Methods Report No. 109. Geneva.
- , 2016: Exploration of fog detection and visibility estimation from camera images (W. Wauben and M. Roth). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2016) (Madrid, 27-30 September 2016). Instruments and Observing Methods Report No. 125. Geneva.
-