

дождливую погоду освещенность уменьшается в 10 раз и более. В больших городах за счет искусственных источников света, рассеянного облачным покровом, освещенность земной поверхности может достигать 1 лк.

Вклад основных составляющих свечения ночного неба в освещение земной поверхности в среднем за ночь приблизительно следующий: ночное свечение атмосферы 45 %, свет звезд 30 %, зодиакальный и галактический свет около 25 %.

3 Видимость в атмосфере

3.1. Общие сведения о видимости в атмосфере. Учение о видимости представляет собой комплексное исследование закономерностей зрительного восприятия различных объектов на местности и сигнальных огней.

Задача определения дальности видимости разнообразных предметов и огней имеет большое прикладное значение. В решении этой задачи заинтересованы работники всех видов транспорта и в первую очередь авиации. Для наземного транспорта важно знать видимость на шоссейных дорогах, на улицах больших городов, оптимальные условия освещения для обеспечения видимости дорожных знаков и сигнальных огней. Для морского и речного транспорта необходимы сведения о видимости различных объектов на берегу, а также сигнальных огней. Наибольшие требования к надежному определению дальности видимости предъявляет авиация, поскольку взлет самолетов и особенно их посадка осуществляются в основном с помощью визуального наблюдения взлетно-посадочной полосы или сигнальных огней на ней.

Большое значение приобретает задача определения наклонной дальности видимости наземных объектов с космических кораблей и спутников.

Дальность видимости даже очень больших и высоких предметов на земной поверхности всегда ограничена. В самых идеальных условиях наблюдения при увеличении расстояния предметы перестают быть видимыми, поскольку скрываются за горизонтом в силу шарообразности Земли.

Дальность видимости, обусловленная только геометрическими параметрами (радиусом кривизны Земли, высотой предмета и наблюдателя) называется *геометрической (геодезической) дальностью видимости*.

На рис. 22.7 наблюдатель находится в точке A на высоте z_n и определяет геометрическую дальность видимости предмета, находящегося: 1) в точке B на земной поверхности и 2) в точке C на некоторой высоте z_{np} над земной поверхностью. Геометрическая дальность видимости (D_0) данного предмета в первом случае

равна AB и во втором $AB + BC$. Из треугольника AOC для общего второго случая находим

$$D_0 = \sqrt{2Rz_n} + \sqrt{2Rz_{пр}} = 3,57 (\sqrt{z_n} + \sqrt{z_{пр}}). \quad (3.1.1)$$

Формула (3.1.1) получена в предположении прямолинейного распространения света в атмосфере. В действительности световой луч из точки A под влиянием рефракции (см. п. 5) пойдет по дуге AB' и последняя точка, которую увидит наблюдатель на земной поверхности, будет не B , а B' . Рефракция увеличивает геометриче-

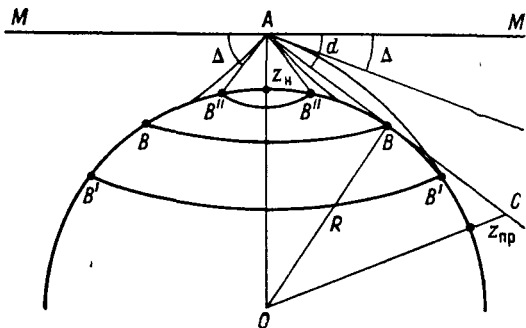


Рис. 22.7. К определению геометрической (геодезической) дальности видимости и влияния рефракции на положение горизонта.

МAM — горизонтальная плоскость, BB' — геометрический горизонт, $B'B'$ и $B''B''$ — видимые горизонты при рефракции, d — геодезическая депрессия горизонта, Δ — депрессия горизонта при рефракции.

скую дальность видимости при нормальных условиях у земной поверхности в среднем на 6—7%. Поэтому формула (3.1.1) для геометрической дальности видимости D записывается в виде

$$D = 3,82 (\sqrt{z_n} + \sqrt{z_{пр}}) \quad (3.1.2)$$

(z_n и $z_{пр}$ — в метрах, D — в километрах).

Нередко геометрическая дальность видимости объекта велика, но объект не виден, поскольку закрывается (экранируется) впереди стоящим более высоким предметом. Поэтому помимо геометрической дальности видимости введены также понятия дальности открытия предмета и дальности открытия горизонта, учитывающие не только геометрические параметры, но и топографию местности.

Часто дальность открытия горизонта велика, однако предметы, находящиеся в поле зрения (выше горизонта), все же не видны. Известно много причин, приводящих к ограничению или потере видимости предметов. Перечислим факторы, влияющие на дальность видимости любых объектов, объединив их в пять основных групп.

1. Свойства наблюдаемых предметов: их размеры, форма, яркость, цвет, состояние поверхности (сухая, мокрая, шероховатая и т. п.).

2. Свойства фона, на который проектируются предметы: яркость, цвет.

3. Прозрачность воздуха: она может быть уменьшена дымкой, туманом, мглой, выпадающими осадками.

4. Условия наблюдения объектов: время суток (освещенность), облачность (однородная, «пятнистая»).

5. Свойства аппарата (приемника), с помощью которого ведется наблюдение: глаза человека, фотоэлемента, фотопленки и пр. При визуальном наблюдении — это пороговые характеристики глаза человека: пороги чувствительности глаза к яркостному и цветовому контрастам, острота зрения.

Различают *горизонтальную дальность видимости*, когда ведется наблюдение за объектом, находящимся на земной поверхности, и *наклонную дальность видимости*, когда дальность видимости наземных объектов определяется с самолета или другого летательного аппарата или, наоборот, с земной поверхности определяется дальность видимости объектов, находящихся в воздухе. *Вертикальная дальность видимости* является частным случаем наклонной.

3.2. Теория горизонтальной дальности видимости. В основе теории дальности видимости предметов лежит понятие об яркостном контрасте. Зрение человека устроено таким образом, что при наблюдении как близких, так и далеких предметов мы видим их только в том случае, когда они отличаются по яркости или по цвету (а обычно по тому и другому) от окружающих предметов. Иными словами, мы видим предметы благодаря наличию яркостного или цветового контраста этих предметов с фоном, на который они проектируются.

Яркостным контрастом K_0 называется отношение абсолютной величины разности яркостей фона V_Φ и объекта V_0 к большей из них:

$$K_0 = |\Delta V|/V.$$

Если объект темнее фона ($V_\Phi > V_0$), то $K_0 = (V_\Phi - V_0)/V_\Phi$; если объект светлее фона ($V_0 > V_\Phi$), то $K_0 = (V_0 - V_\Phi)/V_0$. Значение K_0 равно 1, если наблюдаем черный объект ($V_0 = 0$) на светлом фоне, и K_0 равно 0, если яркость объекта и фона одинаковы. Чем больше K_0 , тем отчетливее видим объект. По мере уменьшения контраста объект становится видимым все хуже и хуже. Как показывает опыт, объект перестает быть видимым не в тот момент, когда V_0 и V_Φ станут равными, а несколько раньше, когда K_0 еще не достиг нуля. Наименьший яркостный контраст, при котором мы еще отличаем объект от фона, называется *порогом контрастной чувствительности глаза* и обозначается ϵ . Последний представляет собой одну из важнейших пороговых характеристик нашего зрения, определяющих дальность видимости объектов. Порог ϵ — величина переменная, зависящая от характера зрительной задачи, которую решает глаз, от угловых размеров объекта и от условий, в которых находится глаз (освещенность, состояние наблюдателя,

наличие побочных раздражителей и др.). Наиболее типичными являются три зрительные задачи.

1. Ведется наблюдение за объектом, все время находящимся в поле зрения наблюдателя при уменьшении контраста объекта с фоном. Контраст может уменьшаться либо под влиянием увеличения расстояния до объекта, либо вследствие увеличения замутненности атмосферы. При этом объект сначала виден отчетливо, затем менее отчетливо, затем только в виде темного пятна на фоне и, наконец, на некотором расстоянии объект сливается с фоном. То расстояние, на котором наблюдатель перестает отличать объект от фона даже в виде размытого пятна, называется *дальностью исчезновения объекта* $S_{исч}$.

2. Ведется наблюдение за объектом, контраст которого с фоном увеличивается. Сначала контраст меньше порогового значения — объект не виден. Затем по мере увеличения контраста мы обнаруживаем объект хотя бы в виде слабого, едва заметного пятна. Расстояние до объекта в этот момент называется *дальностью обнаружения объекта* $S_{обн}$.

3. Объект приближается к наблюдателю. Сначала он видит его как размытое пятно на окружающем фоне, затем более отчетливо и, наконец, на некотором расстоянии уже может установить, что это за объект. Расстояние до объекта в момент его узнавания называется *дальностью узнавания объекта* $S_{узн}$.

Между тремя названными величинами имеет место следующее соотношение: $S_{исч} > S_{обн} > S_{узн}$.

Объясним причины различия этих дальностей видимости. Во всех трех случаях наблюдался один и тот же объект, на том же фоне, при одинаковых условиях прозрачности и освещения. Различие заключается в зрительной задаче, поставленной перед глазом. Каждая из этих трех дальностей видимости определялась своим порогом контрастной чувствительности глаза. Соотношение между порогом, соответствующими $S_{исч}$, $S_{обн}$ и $S_{узн}$, будет, очевидно, таким: $\epsilon_{исч} < \epsilon_{обн} < \epsilon_{узн}$.

При достаточно хорошем освещении (дневном) и угловых размерах объекта не менее $20'$ принимаются следующие значения порогов: $\epsilon_{исч} = 0,02$ (2%), $\epsilon_{обн} = 0,05$ (5%), $\epsilon_{узн} = 0,07$ (7%). При уменьшении освещения (наступлении сумерек или ночи) или при малых угловых размерах объектов ($< 20'$) все пороги увеличиваются, а значения $S_{исч}$, $S_{обн}$ и $S_{узн}$ соответственно уменьшаются. Приведенные значения порогов контрастной чувствительности глаза являются их наиболее вероятными минимальными значениями. В случаях решения конкретных прикладных задач принимают несколько большие значения ϵ (с запасом).

При рассмотрении дальности видимости далеких объектов можно не принимать во внимание цветовой контраст. Это объясняется тем, что порог чувствительности глаза к цветовому контрасту больше порога контрастной чувствительности глаза. Между

Этими двумя порогами ($\epsilon_{\text{дв}}$ и ϵ) расположен так называемый ахроматический интервал, в котором дальность видимости определяется только порогом контрастной чувствительности глаза. Иными словами, цветовые различия перестают восприниматься прежде, чем предмет становится невидимым.

Рассмотрим основные соотношения теории видимости. Яркость наблюдаемого объекта B_0 и яркость фона $B_{\text{ф}}$, измеренные в непосредственной близости от них, называются *истинными* или *собственными яркостями*. Если наблюдатель находится на расстоянии l от объекта, то за счет рассеяния света, идущего от объекта и фона, яркости B_0 и $B_{\text{ф}}$ будут ослаблены (в согласии с законом Бугера) и, когда они дойдут до наблюдателя, будут равны $B_0 \exp(-kl)$ и $B_{\text{ф}} \exp(-kl)$, где k — объемный показатель ослабления света. Кроме того, на яркость объекта и фона накладывается яркость воздушной дымки¹ $B_{\text{доп}}$. Поэтому вводится понятие *видимой яркости объекта* B_0^* и *видимой яркости фона* $B_{\text{ф}}^*$, которые можно записать следующим образом:

$$B_0^* = B_0 \exp(-kl) + B_{\text{доп}}, \quad (3.2.2)$$

$$B_{\text{ф}}^* = B_{\text{ф}} \exp(-kl) + B_{\text{доп}}. \quad (3.2.3)$$

Обычно дополнительную яркость представляют в виде

$$B_{\text{доп}} = B_{\text{макс}} [1 - \exp(-kl)]. \quad (3.2.4)$$

Здесь $B_{\text{макс}}$ — так называемая *насыщающая* или максимальная яркость, которую создает воздушная дымка в достаточно большом (теоретически бесконечно большом) по горизонтальной протяженности слое воздуха. Вычитаемое $B_{\text{макс}} \exp(-kl)$ в (3.2.4) характеризует ослабление яркости при прохождении рассеянным светом расстояния l . Расстояние, на котором достигается $B_{\text{макс}}$, существенно зависит от состояния атмосферы. При сильном помутнении (в облаках, туманах, сильной дымке), когда велик показатель k , уже при сравнительно небольших значениях l яркость дымки близка к $B_{\text{макс}}$. Соотношение (3.2.4) нередко называют световоздушным уравнением.

Подчеркнем, что рассеяние света в атмосфере играет двойную роль в изменении видимой яркости объекта и фона. С одной стороны, рассеяние света ослабляет световые потоки, исходящие от предмета и фона (экспоненциальные множители в первых слагаемых (3.2.2) и (3.2.3)). С другой стороны, рассеяние увеличивает

¹ Воздушная дымка наблюдается в атмосфере всегда, даже в идеально чистой атмосфере, за счет молекулярного рассеяния. Частным случаем воздушной дымки служит дымка как

явление, при котором МДВ заключена между 1 и 10 км; основной вклад в рассеяние света в дымке-явлении вносят аэрозоли, как правило, сильно обводненные.

видимые яркости объекта и фона, накладывая на них дополнительные яркости $B_{\text{доп}}$.

Из соотношений (3.2.2) — (3.2.4) следует, что при удалении от любого объекта или фона на достаточно большое расстояние их видимые яркости стремятся к одному и тому же пределу — к насыщающей яркости $B_{\text{макс}}$. Это происходит потому, что собственные яркости объекта и фона стремятся к нулю и остаются только наложенные яркости, пределом которых является $B_{\text{макс}}$. По этой причине все темные объекты, у которых $B_0 < B_{\text{макс}}$ (например, леса, горы, темные строения) при удалении от них светлеют, и, наоборот, светлые объекты, у которых $B_0 > B_{\text{макс}}$ (освещенные Солнцем снежные и фирновые поля в горах) при удалении от них темнеют.

Запишем выражение для видимого контраста (K) объекта с фоном:

$$K = \frac{B_{\phi}^* - B_0^*}{B_{\phi}^*}. \quad (3.2.5)$$

После подстановки в (3.2.5) выражений для B_0^* и B_{ϕ}^* из (3.2.2) и (3.2.3), с учетом соотношения (3.2.4), получим

$$K = \frac{K_0}{1 + (B_{\text{макс}}/B_{\phi}) [\exp(kl) - 1]}. \quad (3.2.6)$$

Согласно формуле (3.2.6) видимый контраст K всегда меньше истинного контраста K_0 . Уменьшение K тем сильнее, чем больше расстояние l . При неизменном l уменьшение K происходит при увеличении показателя ослабления k . Таким образом, под влиянием обоих процессов, обусловленных рассеянием света, — уменьшения собственных яркостей объекта и фона и наложения дополнительной яркости на объект и фон — видимый контраст объекта с фоном уменьшается и объект становится видимым все хуже.

Приведем примеры, показывающие, как под влиянием большой наложенной яркости объекты становятся плохо различимыми или совсем невидимыми. На ночном небе хорошо видны звезды, днем же звезды не видны совершенно. Днем на свет звезд накладывается большая яркость дневного неба. Если убрать этот яркий фон, например, опустившись в шахту или глубокий колодец, то яркие звезды на открытом участке неба становятся видимыми.

Из темной комнаты хорошо видны дома и другие предметы на улице; стоит включить в комнате свет, как условия видимости предметов на улице существенно ухудшаются. Еще один пример, который имеет большое практическое значение. Встречаются два автомобиля ночью. При включении фар на одной из машин водитель второй перестает видеть дорогу и встречную машину (ослепляется). Вследствие этого, правила дорожного движения предусматривают при встрече автомашин выключение фар дальнего и

даже ближнего света (остаются включенными только подфарники).

Близкое по физическому содержанию явление называют эффектом белизны или белой тьмой. Наблюдается оно чаще всего в полярных широтах при наличии снежного покрова и однородной сплошной облачности типа As и Cs. При этих условиях создается настолько большая освещенность рассеянным светом (человек буквально ослепляется), что контрасты наземных предметов с фоном сильно уменьшаются или пропадают совсем. В таких условиях пилоты часто не могут посадить самолет и даже теряют ориентировку на местности.

Вернемся к уравнению (3.2.6). Если удаляться от объекта (l растет) или если замутнение атмосферы будет усиливаться (k увеличивается), то K будет уменьшаться. В тот момент, когда видимый контраст уменьшится настолько, что станет равным порогу контрастной чувствительности глаза ϵ , объект становится невидимым, т. е. наблюдатель перестает отличать его от фона. Расстояние до объекта l в тот момент, когда K становится равным ϵ , и есть реальная дальность видимости (РДВ) этого объекта, обозначаемая S_p . Полагая в (3.2.6) $K = \epsilon$ и $l = S_p$ и решая уравнение относительно S_p , получаем общую формулу для определения РДВ объектов в любых условиях наблюдения:

$$S_p = \frac{1}{k} \ln \frac{K_0/\epsilon + B_{\max}/B_\phi - 1}{B_{\max}/B_\phi}. \quad (3.2.7)$$

Достоинством формулы (3.2.7) является то, что зависимость РДВ от большого числа параметров, перечисленных в начале п. 3.1, представлена так, что РДВ оказывается функцией только трех переменных: k , K_0/ϵ и B_ϕ/B_{\max} . Наибольшее влияние на РДВ оказывает k , что обусловлено широким диапазоном его изменения (от идеально чистой атмосферы до плотного тумана или облака); на втором месте стоит отношение B_ϕ/B_{\max} , называемое иногда светлотой фона и меняющееся примерно от 0,01 для очень темных до 10 для очень светлых фонов. Наименьшее влияние оказывает K_0/ϵ , диапазон изменения которого практически невелик.

3.3. Метеорологическая дальность видимости. Метеорологической дальностью видимости (МДВ) называется то наибольшее расстояние, с которого в светлое время суток перестает быть видимым абсолютно черный объект размером более $20'$, проектирующийся на фон неба у горизонта. Полагая в (3.2.7) $K_0 = 1$ и $B_\phi = B_{\max}$, получаем

$$S_m = \frac{1}{k} \ln (1/\epsilon). \quad (3.3.1)$$

Полагая в (3.3.1) порог контрастной чувствительности глаза равным 0,02, получаем для МДВ следующее простое соотношение

$$S_m = 3,9/k. \quad (3.3.2)$$

Из формулы (3.3.2) следует, что МДВ однозначно связана с характеристиками прозрачности атмосферы в горизонтальном направлении. Поэтому и сама МДВ является также только характеристикой горизонтальной прозрачности воздуха.

Однако следует подчеркнуть, что в общем случае МДВ, как это следует из (3.3.1), зависит не только от характеристик прозрачности атмосферы, но и от порога ϵ . Полагая в (3.3.1) ϵ равным порогу обнаружения объекта ($\epsilon = 0,05$), для множителя в формуле (3.3.2) получаем значение 3,0, что приводит к отличию МДВ при одном и том же k примерно на 30 % (В. А. Гаврилов на основании сравнения измеренных значений S_m с расчетными пришел к заключению, что наиболее вероятное значение ϵ близко к 0,03, при этом $S_m = 3,5/k$).

Следует иметь в виду, что в основе изложенной теории дальности видимости лежит допущение об однородности помутнения атмосферы в любом горизонтальном направлении. Реальная атмосфера часто не обладает такой однородностью, особенно при наличии дымки, мглы, тумана, несплошной облачности и пятнистым выпадении осадков. При значительном помутнении атмосферы, обусловленным этими явлениями, возрастает роль многократного рассеяния и поглощения света, также не учтенных изложенной выше теорией.

МДВ характеризуется необычайно широким диапазоном изменения. В плотных туманах, облаках МДВ может уменьшаться до нескольких десятков метров. В достаточно чистом и сухом воздухе, когда ослабление обуславливается в основном молекулярным рассеянием света, МДВ достигает 100—200 км и более.

В течение года максимальные значения МДВ у земной поверхности наблюдаются летом и минимальные зимой. В зимний период года значительно возрастает повторяемость туманов, дымок, а также инверсий температуры, ограничивающих распространение аэрозоля в более высокие слои атмосферы. Суточный ход МДВ более сложный. В теплую половину года максимальные значения МДВ наблюдаются утром, а минимальные — вскоре после полудня. В холодный период минимальные значения МДВ нередко наблюдаются в конце ночи (когда возникают туманы или усиливаются дымки), а максимальные — в послеполуденные часы.

3.4. Видимость ночью. При рассмотрении видимости в ночное время следует различать два вида задач: 1) определение дальности видимости несамосветящихся объектов, т. е. таких, которые светятся отраженным светом; 2) определение дальности видимости самосветящихся объектов, т. е. огней.

К несамосветящимся объектам относятся все естественные объекты и искусственные сооружения на местности. Для них дальность видимости в сумерки и ночью, так же как и днем, определяется их контрастом с фоном. Объект перестает быть видимым, когда контраст его с фоном достигает порога контрастной чувствительности

глаза. Но если для дневных условий можно было указать значение ϵ в зависимости от поставленной задачи, то для сумерек и ночных условий этого сделать нельзя, так как при уменьшении освещенности порог контрастной чувствительности глаза быстро увеличивается, а острота зрения снижается. В лунную ночь ϵ увеличивается до 0,20—0,50 в зависимости от фазы Луны. В темную безлунную ночь ϵ может принимать значения больше 0,60.

Дальность видимости несамосветящихся объектов в сумерки и ночью в основном зависит от их освещенности, а также от освещенности ландшафта. Прозрачность же атмосферы (выраженная, например, через МДВ) ночью играет второстепенную роль. Темные объекты на местности, выбранные в качестве ориентиров видимости для определения МДВ днем, нельзя использовать для определения дальности видимости в сумерки и ночью, поскольку отсутствует однозначная связь ее с прозрачностью атмосферы. Поэтому для определения МДВ ночью используются огни.

Дальность видимости огней. Освещенность E , создаваемая огнем силой света I , находящимся на расстоянии l , с учетом ослабления света в атмосфере на пути l равна:

$$E = \frac{I}{l^2} \exp(-kl), \quad (3.4.1)$$

где k — показатель ослабления света.

Если наблюдение за огнем проводится визуально, то E — освещенность, создаваемая этим огнем на зрачке глаза наблюдателя. При увеличении расстояния до огня создаваемая им освещенность уменьшается. На некотором расстоянии l освещенность на зрачке глаза достигает такой минимальной величины, при которой глаз перестает видеть огонь. Эта минимальная освещенность называется *порогом световой чувствительности глаза* $E_{св}$ к точечному источнику света или, более коротко, *пороговой освещенностью на зрачке*. Расстояние до огня в момент исчезновения видимости его и есть *дальность видимости огня* $S_{ог}$:

$$E_{св} = \frac{I}{S_{ог}^2} \exp(-kS_{ог}). \quad (3.4.2)$$

Заменяя в этой формуле k на S_m по (3.3.2) и логарифмируя, получаем:

$$2 \ln S_{ог} + \frac{3,9}{S_m} S_{ог} = \ln I - \ln E_{св}. \quad (3.4.3)$$

Для решения трансцендентного уравнения (3.4.3) относительно $S_{ог}$ построены номограммы, соответствующие различным значениям $E_{св}$. Значения $E_{св}$, как уже говорилось, сильно зависят от условий наблюдения и характера зрительной задачи, решаемой глазом,

различаются для фиксированного и нефиксированного наблюдений. Для точечного источника понятие порога узнавания не применимо, имеет смысл лишь узнавание цвета огня. Значения $E_{св}$ различны для разных цветных огней. При уровне освещенности, приближающейся к $E_{св}$, все цветные огни, кроме красных, воспринимаются как белые или почти как белые. Ахроматический интервал особенно велик у огней зеленого цвета. Только у красных огней он отсутствует, и потому красные огни при исчезновении или обнаружении воспринимаются как красные.

В дальнейшем под $E_{св}$ будем подразумевать *порог обнаружения белого огня*. Значение $E_{св}$ резко возрастает даже при небольшом увеличении общей яркости фона, на который проектируется наблюдаемый огонь. После пребывания человека в течение нескольких часов в темноте глаз его приобретает удивительно высокую чувствительность к свету.

В естественных условиях минимальное значение $E_{св}$ в темную ночь имеет порядок 10^{-8} лк. При увеличении освещенности от ночной до дневной $E_{св}$ возрастает до 10^{-3} лк, т. е. увеличивается на пять порядков.

При определении в полевых условиях дальности видимости сигнальных огней приняты следующие значения $E_{св}$: в темное время суток для одиночного огня $2,7 \cdot 10^{-7}$ лк, для групповых огней 10^{-6} лк; в светлое время суток для групповых огней 10^{-3} лк.

3.5. Дальность видимости при полете, взлете и посадке. *Полетная дальность видимости* $S_{пол}$ — это наклонная дальность видимости наземных объектов с самолета. Величина $S_{пол}$ включает в себя понятия геометрической дальности видимости, дальности открытия горизонта и дальности видимости реальных объектов. Каждая из этих величин, как показано выше, а вместе с этим и $S_{пол}$ зависит от многих факторов, включающих оптические свойства атмосферы и объекта наблюдения. Предельным значением $S_{пол}$ служит геометрическая дальность видимости D , зависящая от высоты полета. Если в формуле (3.1.2) положить $z_{пр} = 0$ и высоту полета z_n равной 1, 3, 5 и 10 км, то для D получаем соответственно следующие значения: 122, 211, 272 и 385 км.

Однако горизонт обычно затянут дымкой и $S_{пол}$, как правило, составляет не более 20—50 км. Полетная дальность видимости может существенно отличаться от МДВ. В антициклонах или в теплой устойчивой воздушной массе при слабо развитом турбулентном обмене аэрозоль в основном сосредоточен вблизи земной поверхности и МДВ невелика. В то же время на средних и больших высотах полетная видимость при этих условиях может быть хорошей. Наоборот, в холодной неустойчивой воздушной массе МДВ у земной поверхности значительна, а в более высоких слоях под влиянием аэрозоля, перенесенного конвективными потоками вверх, полетная видимость может быть плохой. Поскольку определение $S_{пол}$ расчетным способом сильно затруднено, то фактические зна-

чения $S_{\text{пол}}$ чаще всего устанавливаются путем проведения самолетной разведки погоды.

Дальность видимости при взлете и посадке. С помощью современных технических средств, применяемых в посадочных системах, существенно повысилась безопасность полетов и сократились условия, исключаящие взлет и посадку воздушных судов. Однако и при современных радиотехнических, аэронавигационных и светосигнальных средствах точность выведения воздушного судна на траекторию снижения и выдерживание его на глиссаде (траектории) пока еще не настолько высоки, чтобы можно было осуществить посадку вслепую — с помощью одних лишь автоматических устройств. Поэтому наиболее ответственный этап посадки — приземление — в подавляющем большинстве случаев осуществляется летчиком визуально, при ручном управлении самолетом. В этой заключительной стадии полета глаз человека пока не могут заменить самые современные приборы.

Снижение воздушного судна по глиссаде начинается за десятки километров от взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэродрома. При хорошей прозрачности атмосферы, отсутствии низких облаков, а также таких явлений, как гроза, интенсивная болтанка, обледенение, шквалы, смерчи, сильный сдвиг ветра и др., никаких затруднений при взлете, полете и посадке воздушных судов не возникает. Однако если видимость ухудшена или наблюдается низкая облачность (равно как и одно из названных явлений), то взлет и особенно посадка воздушных судов становится затруднительной. Визуальная посадка и взлет разрешаются лишь при таких условиях, когда дальность видимости на ВПП и высота нижней границы облаков превышают некоторые минимальные значения, называемые *метеоминимумами*.

Метеоминимумы представляют собой сочетание минимальной высоты нижней границы облаков (высоты принятия решения) и дальности видимости на ВПП, при которых возможен безопасный взлет (полет, посадка) воздушного судна.

Дальность видимости на ВПП ($S_{\text{ВПП}}$) — расстояние, на котором пилот воздушного судна, находящегося на осевой линии ВПП, может обнаружить маркировку покрытия ВПП или огни, которые обозначают контуры ВПП и ее осевую линию.

Высота принятия решения ($z_{\text{пр}}$) — расстояние по вертикали от уровня начала участка ВПП, который можно использовать для посадки, до воздушного судна.

Конкретные значения $S_{\text{ВПП}}$ и $z_{\text{пр}}$, определяющие метеоминимум, зависят от оснащенности аэродрома радиотехническими средствами, типа самолета, класса летчика и др. В системе гражданской авиации установлены метеоминимумы командира воздушного судна для взлета, посадки и полета, а также метеоминимумы аэродрома и воздушного судна.

Для посадки в наиболее сложных условиях установлены метеоминимумы трех категорий: I — $z_{\text{пр}} = 60$ м, $S_{\text{ВПП}} = 800$ м; II — $30 \text{ м} \leq z_{\text{пр}} \leq 60 \text{ м}$, $400 \text{ м} \leq S_{\text{ВПП}} < 800 \text{ м}$; III — $z_{\text{пр}} < 30 \text{ м}$, $S_{\text{ВПП}} < 400 \text{ м}$.

В целом проблема метеорологического обеспечения полетов и особенно посадки самолетов и других летательных аппаратов (в том числе ракет, космических кораблей), равно как морского и речного флота и наземных видов транспорта остается одной из наиболее актуальных проблем, которые стоят перед метеорологической наукой и повседневно решаются метеорологической службой. В комплексе метеовеличин и явлений, оказывающих влияние на работу всех видов транспорта, видимости отводится одно из первых мест.

4 Оптические явления в облаках и осадках

В облаках, туманах и осадках при определенных условиях возникают разнообразные оптические явления: венцы, глории, радуги и гало. К настоящему времени установлено, что объяснение всех этих оптических явлений содержится в общей теории рассеяния. При рассмотрении рассеяния радиации в атмосфере указывалось (см. п. 2 главы 6), что характер явлений, возникающих при рассеянии, определяется отношением радиуса (r) рассеивающих частиц к длине волны (λ) падающего света, т. е. значением параметра $\mu = 2\pi r/\lambda$. При аэрозольном рассеянии угловое распределение рассеянного света (форма индикатрисы рассеяния) и, в частности, положение максимумов рассеянного света зависит от μ . Известную роль при этом играет и показатель преломления рассеивающих частиц. Когда μ достигает значений, соответствующих мелким каплям или кристаллам облаков и туманов, на индикатрисах рассеяния появляются дифракционные максимумы, угловые размеры которых определяют размеры венцов. При укрупнении капель облаков и осадков (радиус капель, как правило, больше 10 мкм) на индикатрисах рассеяния возникают дифракционные максимумы («лепестки») с угловыми размерами, соответствующими положению радуг различных порядков.

Рассеяние света на кристаллах льда размером более 10—20 мкм порождает дифракционные максимумы (пики), известные под названием гало. Возникновение и яркость оптических явлений, помимо μ , зависит от оптической толщины облака, тумана или завесы дождя. Яркие венцы, глории, радуги и гало могут наблюдаться только в тонких облаках, оптическая толщина которых не превышает единицу. При таких оптических толщинах многократное рассеяние света не играет заметной роли и не размывает