

Оценка коэффициента оптической прозрачности атмосферы на наклонных и вертикальных трассах по измерениям метеорологической дальности видимости на приземных трассах

И. Ю. Возмищев, А. А. Печковская, С. А. Бетин, А. И. Гнатюк

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vantil@mail.ru, alya.pechkovskaya.99@mail.ru, telemetryst@ya.ru, gnatiukai@gmail.com

Аннотация. В настоящей работе проведена оценка коэффициента оптической прозрачности атмосферы на наклонных и вертикальных трассах по измерениям метеорологической дальности видимости к задаче исследования астроклиматических условий функционирования наземных астрономических телескопов и поиска возможных мест для размещения перспективных. В работе использовались известные модели атмосферы и эмпирические зависимости, которые учитывают влияние различных атмосферных составляющих на прозрачность земной атмосферы.

Ключевые слова: оптическое излучение, коэффициент оптической прозрачности атмосферы, метеорологическая дальность видимости

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основной объем наблюдательных астрономических данных обеспечивается наземными оптическими средствами – астрономическими телескопами. С учетом тенденций создания новых и совершенствования существующих телескопов остается актуальной задача исследования атмосферы, как оптической среды существенно ограничивающей возможности телескопов и снижающей их эффективность.

Исследование оптической прозрачности атмосферы, как одного из основных параметров астроклимата, дает возможность определить степень её пригодности для астрономических наблюдений [1]. Для этой цели используются различные средства и методы, позволяющие количественно оценить оптическую прозрачность атмосферы, как правило, в виде коэффициента прозрачности атмосферы (КПА).

Метеорологическая дальность видимости (МДВ) представляет собой предельное расстояние, на котором из-за влияния среды становится невидимым в светлое время суток абсолютно черный объект с угловым размером не менее 30 угловых минут на фоне неба у горизонта. МДВ определяют инструментально для горизонтального слоя атмосферы с помощью измерителей метеорологической дальности видимости – трансмиссометров или измерителей высоты нижней границы облачности – аэрозольных лидаров, также известных как облакомеры (рис. 1) [2–4].



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид приборов измерения МДВ: (а) – трансмиссометр Vaisala LT31, (б) – облакомер ООО «НПП «Лазерные системы»

В данной работе проведена оценка коэффициента оптической прозрачности атмосферы на наклонных и вертикальных трассах по эмпирическим формулам при следующих параметрах: толщина слоя осаждаемой воды $\omega = 2$ мм, протяженность оптической горизонтальной трассы $l = 1$ км, для видимого и инфракрасного излучения $\lambda_1 = 0,55$ мкм, $\lambda_2 = 1,55$ мкм, метеорологическая дальность видимости МДВ = 10 км (ясная погода). Произведен перерасчет коэффициента оптической прозрачности атмосферы с горизонтальной трассы на вертикальную и наклонную.

II. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Ослабление лазерного излучения связано с рассеиванием и поглощением на мельчайших частицах, содержащихся в атмосфере. Наличие таких явлений ограничивает предельную дальность работы лазерных

систем, позволяющих регистрировать исследуемый объект на дальнем расстоянии. При рассеянии происходит только изменение направления распространения излучения – от направленного на случайное, а при поглощении происходит необратимое преобразование энергии электромагнитного излучения в тепло. Это ослабление описывается уравнением Бугера–Ламберта–Бера:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda)l}, \quad (1)$$

где $I_0(\lambda)$ и $I(\lambda)$ – интенсивность излучения соответственно до и после прохождения трассы длиной l , $\alpha(\lambda)$ – коэффициент пропорциональности, называемый показателем ослабления излучения определенной составляющей, зависящей от свойств среды распространения и длины волны λ .

По определению коэффициент пропускания атмосферы $\tau(\lambda)$ равен:

$$\tau(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda)l}. \quad (2)$$

Процессы ослабления излучения разными составляющими земной атмосферы могут рассматриваться независимо друг от друга, что позволяет при расчетах перемножать соответствующие коэффициенты.

Коэффициент оптической прозрачности $\tau(\lambda)$ атмосферы на длине волны λ на горизонтальной трассе определяется двумя фундаментальными явлениями ослабления излучения, а именно молекулярным поглощением газовыми составляющими атмосферы и рассеянием на частицах:

$$\tau = \tau_{mn} \cdot \tau_{ap}, \quad (3)$$

где $\tau_{mn}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания для составляющих молекулярного поглощения излучения, $\tau_{ap}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания для составляющих аэрозольного рассеяния излучения спектральный [5].

Таким образом, для оценки коэффициента прозрачности атмосферы необходимо оценить спектральный коэффициент пропускания для составляющих молекулярного поглощения излучения по таблице Пассмана–Лармора и спектральный коэффициент пропускания для составляющих аэрозольного рассеяния излучения по измерениям метеорологической дальности видимости.

А. Оценка коэффициента молекулярного поглощения

Молекулярное поглощение, вызванное наличием в атмосфере различных газов, играет ключевую роль в ослаблении видимого излучения. Основными газовыми составляющими атмосферы являются водяной пар, углекислый газ и озон. Наиболее сильно влияют на прозрачность атмосферы поглощение излучения водяным паром и углекислым газом:

$$\tau_{mn} = \tau_{H_2O} \cdot \tau_{CO_2}, \quad (4)$$

где $\tau_{H_2O}(\lambda)$ – коэффициент пропускания водяного пара, $\tau_{CO_2}(\lambda)$ – коэффициент пропускания углекислого газа.

Поглощение излучения водяным паром определяется числом поглощающих молекул. Оно зависит как от парциального давления водяного пара, так и от расстояния, пройденного излучением l . Этот фактор характеризуют толщиной слоя осаждаемой воды ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{216,7 \cdot w \cdot E}{t + 273,16}, \quad (5)$$

где w – относительная влажность воздуха в долях единицы, E – упругость насыщающего пара в мбар, t – температура воздуха в °С. За упругость насыщенного пара принимается давление, при котором пар находится в равновесии с жидкостью при определенной температуре.

Общее выражение для расчета слоя осаждаемой воды с учетом прохождения излучения трассы протяженностью l равно:

$$\omega = \omega_0 \cdot l, \quad (6)$$

Дальнейшую оценку коэффициента пропускания паров воды проведем с помощью таблицы 1 Пассмана–Лармора. Данные для других длин волн опубликованы в работе [6].

Если полученное значение толщины слоя осаждаемой воды находится между значениями, представленными в таблице 1, то спектральный коэффициент пропускания паров воды определяется с помощью следующей функции:

$$\tau_{H_2O} = e^{(-a \cdot \omega^b)}, \quad (7)$$

где a , b – параметры аппроксимации. Погрешности аппроксимации составляют доли процентов.

Учет влияния углекислого газа на ослабление оптических сигналов более прост, в сравнении с водяным паром. Это обусловлено тем, что концентрация углекислого газа в атмосфере зависит только от давления и на уровне моря остается относительно постоянной. Следовательно, коэффициент пропускания углекислого газа зависит только от пройденного расстояния, что отражено также в табл. 2 Пассмана–Лармора.

Данные с этой таблицы могут быть сглажены для определения спектрального коэффициента углекислого газа с помощью следующей функции:

$$\tau_{CO_2} = e^{(-c \cdot l^d)}, \quad (8)$$

где c , d – параметры аппроксимации [7, 8]. На трассе протяженностью 1 км спектральный коэффициент пропускания углекислого газа равен 1.

В. Оценка коэффициента аэрозольного рассеяния

Кроме газов в земной атмосфере присутствуют аэрозольные частицы, размер которых находится в широком диапазоне от 0,01 до 100 мкм. При аэрозольном рассеянии падающий световой пучок сталкивается с аэрозольными частицами. Это приводит к изменению направления распространения света: часть света отражается назад, часть рассеивается в различных направлениях, а остальная часть проходит через атмосферу [9]. Коэффициент пропускания, определяемый аэрозольным рассеянием, согласно выражению (2) равен:

$$\tau_a = e^{-\alpha_{ap}(\lambda)l}, \quad (9)$$

где $\alpha_{ap}(\lambda)$ – показатель аэрозольного рассеяния.

В практических расчетах ослабления излучения вследствие аэрозольного рассеяния учитывают характеристику прозрачности атмосферы – МДВ:

$$МДВ = \frac{1}{\alpha_{ap}(\lambda)} \cdot \ln\left(\frac{C}{\varepsilon}\right) = \frac{3,91}{\alpha_{ap}(\lambda)}, \quad (10)$$

где C – контраст изображения (при определении МДВ равен единице, т.е. объект не отличим от фона), ε – порог контрастной чувствительности глаза, равный 0,02. Понятие МДВ относится к излучению с длиной волны 0,55 мкм.

Внешним параметром, подлежащим количественной оценке, является показатель аэрозольного рассеяния $\alpha_{ap}(\lambda)$, который определяется на основе измерений МДВ. Из выражения (10) получим коэффициент аэрозольного рассеяния $\alpha_{ap}(\lambda)$:

$$\alpha_{ap}(\lambda) = \frac{3,91}{МДВ}, \quad (11)$$

где МДВ выражено в километрах, показатель аэрозольного рассеяния $\alpha_{ap}(\lambda)$ – в обратных километрах.

С учетом другой длины волны показатель аэрозольного рассеяния $\alpha_{ap}(\lambda)$ равен:

$$\alpha_{ap}(\lambda) = \frac{3,91}{МДВ} \cdot \left(\frac{550}{\lambda}\right)^{0,585 \cdot МДВ^{1/3}}, \quad (12)$$

где длина волны λ – в нанометрах. Выражение (12) справедливо только для видимого и инфракрасного диапазона [10, 11].

С. Итоговые выражения и результаты

Общее выражение для оценки коэффициента прозрачности атмосферы на горизонтальных трассах с учетом вышеуказанных выражений:

$$\tau = \tau_{H_2O} \cdot \tau_{CO_2} \cdot e^{-\frac{3,91 \cdot l}{МДВ}}. \quad (13)$$

Для пересчета значения коэффициента прозрачности атмосферы с горизонтальной трассы на наклонную можно использовать следующее эмпирическое выражение для длины волны 0,55 мкм:

$$\tau_{n1} = \tau_{H_2O}^{\frac{l}{(\sin \beta)^{b1}}} \cdot \tau_{CO_2}^{\frac{l}{(\sin \beta)^{d1}}} \cdot e^{-\left(\frac{3,91 \cdot l}{МДВ \sin \beta}\right)},$$

где β – угол места. Для другой длины показатель аэрозольного рассеяния $\alpha_{ap}(\lambda)$ рассчитывается с учетом выражения (12). Для оценки коэффициента прозрачности атмосферы необходимо построить зависимость данного параметра от угла места для инфракрасного и видимого диапазона длин волн (рис. 2).

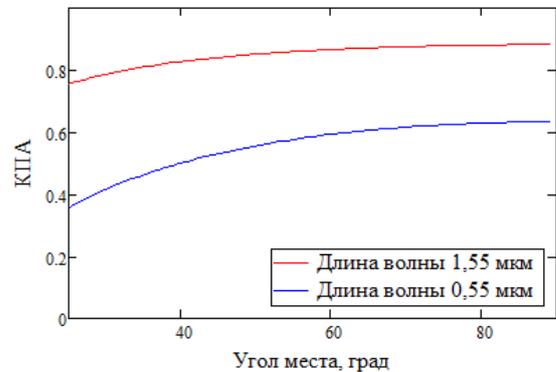


Рис. 2. Зависимость КПА от угла места для двух длин волн

ТАБЛИЦА I. СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПРОПУСКАНИЯ ПАРОВ ВОДЫ ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРАССЫ НА УРОВНЕ МОРЯ

Длина волны, мкм	Толщина слоя осажденной воды ω , мм						
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
0,55	0,986	0,980	0,968	0,956	0,937	0,900	0,863
1,55	0,997	0,994	0,991	0,988	0,982	0,972	0,960

ТАБЛИЦА II. СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПРОПУСКАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРАССЫ НА УРОВНЕ МОРЯ

Длина волны, мкм	Протяженность трассы l , км						
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
0,55	1	1	1	1	1	1	1
1,55	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,995	0,995

В табл. 3 представлены параметры аппроксимации для двух длин волн: 0,55 мкм и 1,55 мкм.

ТАБЛИЦА III. ПАРАМЕТРЫ АППРОКСИМАЦИИ

Параметр	Длина волны, мкм	
	0,55	1,55
a	0,04614	0,01211
b	0,504	0,5378
c	0,0001	0,0017
d	0,2	0,55

Коэффициент прозрачности атмосферы достигает максимального значения при направлении в зенит (угол места равен 90 градусам), поскольку лучи проходят через наименьшую толщину атмосферы. С увеличением

угла места, толщина атмосферы, через которую проходят лучи, увеличивается, что увеличивает вероятность взаимодействия лучей с атмосферными частицами и молекулами. В результате коэффициент прозрачности атмосферы начинает уменьшаться по мере приближения к горизонту.

Различия в коэффициентах прозрачности атмосферы для видимого и инфракрасного света обусловлены физическими процессами взаимодействия света с атмосферой.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описана связь коэффициента оптической прозрачности атмосферы с МДВ и проведена

оценка данного параметра на наклонных и вертикальных трассах. При оценке использовались эмпирические зависимости, учитывающие влияние различных атмосферных составляющих на прозрачность земной атмосферы. Определение этого коэффициента является важным аспектом для эффективной работы телескопов и других оптико-электронных приборов.

В ходе исследований было выяснено, что коэффициент оптической прозрачности атмосферы в видимой и инфракрасной области спектра в большей степени зависит как от молекулярного поглощения газовыми составляющими атмосферы, так и от рассеяния на аэрозолях. Оценка коэффициента пропускания молекулярного поглощения, а именно коэффициента пропускания паров воды и коэффициента пропускания углекислого газа, проведена с помощью таблиц Пассмана–Лармора для горизонтальных трасс на уровне моря. Эти таблицы являются результатом экспериментальных измерений, которые позволяют оценить влияние поглощения газов на прозрачность атмосферы в зависимости от их концентрации и длины волны излучения.

Метеорологическая дальность видимости измеряется на горизонтальных трассах с помощью различных приборов, таких как трансмиссометров или измерителей высоты нижней границы облачности – аэрозольных лидаров. Оценка коэффициента пропускания аэрозольного рассеяния проведена по измерениям МДВ = 10 км, что соответствует ясной погоде.

Были получены итоговые выражения для оценки коэффициента оптической прозрачности атмосферы для горизонтального слоя атмосферы. Произведен перерасчет коэффициента оптической прозрачности атмосферы с горизонтальной трассы на вертикальную и наклонную.

Зависимость коэффициента прозрачности атмосферы от угла места построена для видимого излучения с длиной волны 0,55 мкм и инфракрасного излучения с длиной волны 1,55 мкм. Результаты показывают, что коэффициент прозрачности атмосферы существенно изменяется в зависимости от угла места. Инфракрасное излучение имеет более высокую прозрачность на вертикальных трассах (угол места близок к 90°) по сравнению с видимым излучением. Это может быть обусловлено взаимодействием излучения с молекулами атмосферных газов. В различных спектральных областях наблюдается разная степень поглощения и рассеяния

излучения, что влияет на прозрачность атмосферы. Однако с увеличением угла места и при наклонных трассах (углы места близки к 0°) прозрачность атмосферы значительно снижается из-за увеличения пути прохождения света через атмосферу.

Для дальнейшего развития работы по оценке коэффициента прозрачности атмосферы на наклонных и вертикальных трассах с использованием измерений метеорологической дальности видимости необходимо учесть дополнительные факторы. Исследование влияния других атмосферных параметров на прозрачность атмосферы, таких как концентрация аэрозольных частиц различного размера и состава, а также учет изменений в атмосферных условиях с течением времени. Применение численных моделей и компьютерных симуляций для более глубокого понимания процессов, определяющих прозрачность атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лукин В.П., Ильясов С.П., Носов В.В. и др. Изучение астроклимата района юга Сибири и Средней Азии // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. №. 10. 973-980.
- [2] Трансмиссометр Vaisala LT31 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vaisala.com/ru/products/russian-transmissometer-LT31>. (дата обращения: 05.03.2024).
- [3] Облакомер Skydex Лазерные системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lsystems.ru/products/lidary/skydex/>. (дата обращения: 05.03.2024).
- [4] Гришин А.И., Крючков А.В. Измерения характеристик атмосферы лидарным и нефелометрическим методами // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. №. 2. 156-159 с.
- [5] Белоусов Ю.И. Оптическое поле морской пригоризонтной области для инфракрасных и телевизионных приборов». Санкт-Петербург: Лань, 2022. 456 с.
- [6] Passman S., Larmore L., Atmospheric Transmission. Rand Paper, Rand Corporation, Santa Monica, 1956. P. 897.
- [7] Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Под ред. чл.-корр. АН СССР Л.Н. Курбатова. М.: «Мир», 1988. 416 с.
- [8] Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Всепогодность радиолокационных и тепловизионных каналов наведения комплексов ПВО: монография. Москва: Машиностроение, 2013.
- [9] Борейшо А.С. Лидарные комплексы для исследования атмосферы: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 244 с.
- [10] Савиных В.П., Соломатин В.А. Оптико-электронные системы дистанционного зондирования. Москва: Машиностроение, 2023. 432 с.
- [11] Гаврилов В.А. Прозрачность атмосферы и видимость. Москва: Гидрометеорологическое изд-во, 1958. 166 с.