

УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ТРАССЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С-ДИАПАЗОНА НАД МОРЕМ

© 2023 г. А. И. Родионов^{1, 2}, И. Д. Родионов^{1, 2}, И. П. Родионова^{1, 2}, Д. В. Шестаков^{1, 2},
В. В. Егоров³, В. Л. Шаповалов¹, А. П. Калинин^{4*}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
Москва, Россия

²Акционерное общество “Научно-технический центр “Реагент”, Москва, Россия

³Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kalinin@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 11.04.2023;

после доработки 12.05.2023;

принята в печать 22.05.2023

Ультрафиолетовый (УФ) С-диапазон обеспечивает высокую помехоустойчивость и возможность работы аппаратуры в тропосфере в дневное время, так как озоновый слой атмосферы практически полностью поглощает УФ-С-излучение Солнца. Одним из главных преимуществ этого диапазона в сравнении с видимым, инфракрасным и даже радиодиапазоном является слабое рассеяние ультрафиолета на аэрозольных частицах пыли, снега, града, водяных каплях тумана и дождя. В настоящей работе предложен метод определения оптической толщины атмосферы при распространении УФ-С-излучения по наклонной трассе над морем. Учет неоднородности трассы распространения УФ-С-излучения обеспечивается посредством введения в модель зависимости коэффициента экстинкции и оптической толщины атмосферы от высоты. Справедливость предложенной модели подтверждена данными натурного эксперимента, проведенного над акваторией Черного моря. На основании экспериментальных данных определены коэффициент экстинкции атмосферы над морской поверхностью и его аэрозольная и молекулярная составляющие.

Ключевые слова: УФ-С-излучение, оптическая толщина, экстинкция, высота над уровнем моря, УФ-С-приемник.

DOI: 10.31857/S0207401X23100138, **EDN:** TCNBUQ

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы применение устройств, работающих в ультрафиолетовом (УФ) С-диапазоне, в решении различных прикладных задач получило достаточно широкое распространение [1–8], что связано с отсутствием влияния на работу этих устройств излучения Солнца, а также с их высокой чувствительностью за счет функционирования в монофотонном режиме [9–13]. При определении предельной дальности действия УФ-С-сенсоров важное место занимает вопрос о затухании волн указанного диапазона на трассе их распространения от источника излучения до приемника. Особого внимания заслуживает проблема затухания излучения на морских трассах, где большую роль играет аэрозольная составляющая экстинкции атмосферы. Она характеризуется влиянием повышенного влагосодержания насыщенного солями атмосферного воздуха, волнением морской поверхности, а так-

же изменением погонного затухания излучения (ослабление излучения на единицу длины) при его распространении по наклонным трассам. Информация о степени затухания УФ-С-излучения над морем при наклонных трассах крайне важна для обнаружения и определения местоположения различных объектов, высокоточного измерения дальности или высоты над земной поверхностью, параметров движения объектов и дистанционного определения параметров атмосферы.

Цели настоящей работы — изложение новой методики определения оптической толщины атмосферы при распространении УФ-С-излучения над морем и сравнение модельных расчетов с данными эксперимента, по которым были определены аэрозольная и молекулярная составляющие коэффициента экстинкции атмосферы над морской поверхностью.

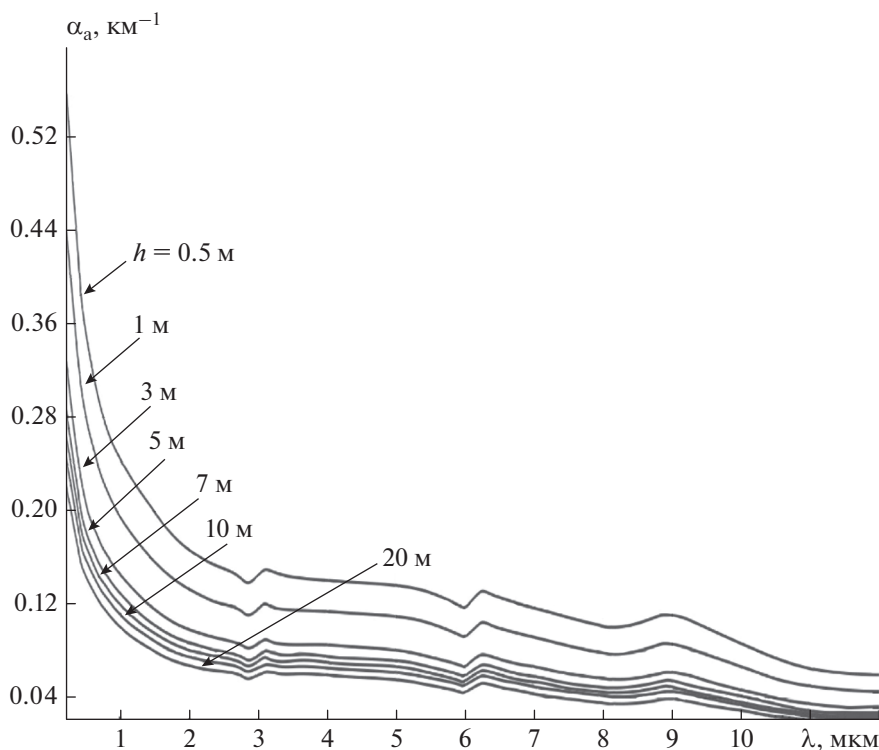


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициентов аэрозольной экстинкции $\alpha_a(\lambda)$ от высоты h над уровнем моря.

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ

При определении оптической толщины атмосферы необходимо учитывать степень однородности ее электрофизических характеристик. В частности, при расчетах ее величины над морской поверхностью при наклонных трассах распространения УФ-С-излучения следует принимать во внимание зависимость коэффициента аэрозольной экстинкции, α_a , от текущей высоты трассы h над уровнем моря. В работе [14] приведены данные модельных расчетов величины α_a в зависимости от h . Авторами использовались параметры, присущие акватории Черного моря. Спектральные зависимости $\alpha_a(h)$ приведены на рис. 1.

На основе этих данных была определена зависимость $\alpha_a(h)$ для длины волны $\lambda = 280$ нм (см. рис. 2), которая была рабочей для измерительной аппаратуры, использованной в натурном эксперименте в районе Черного моря. Кроме того, методом наименьших квадратов была найдена аппроксимация данных работы [14]. Кривая на рис. 2 имеет при этом вид следующей аналитической функции:

$$\alpha_a(h) \approx 0.20935 + 0.24729 \exp(-0.28528h). \quad (1)$$

На рис. 3 представлена схема эксперимента, поясняющая связь локальной высоты h над уров-

нем моря с геометрическими параметрами трассы. Поскольку величина h связана с высотой H положения измерителя над уровнем моря, с расстоянием положения источника излучения (стан-

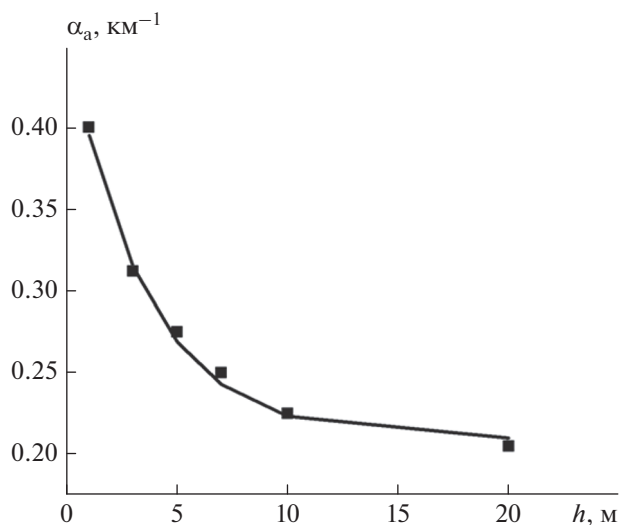


Рис. 2. Зависимость коэффициента аэрозольной экстинкции α_a от текущей высоты трассы h над уровнем моря: квадраты — данные работы [14]; сплошная линия — аппроксимация экспериментальных данных, полученная методом наименьших квадратов.

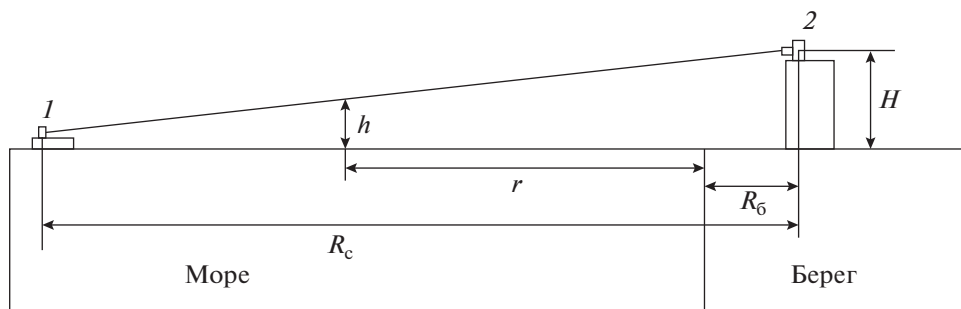


Рис. 3. Схема проведения эксперимента: 1 – УФ-С-источник, 2 – УФ-С-приемник.

ции) до приемника R_c и текущей дальностью r , отсчитываемой от положения станции в направлении к берегу, как

$$h = r \frac{H}{R_c}, \quad (2)$$

то формула (1) может быть записана в виде

$$\alpha_a(r) \approx 0.20935 + 0.24729 \exp\left(-0.28528r \frac{H}{R_c}\right). \quad (3)$$

Поскольку оптическая толщина аэрозольной составляющей атмосферы, τ_a , на морской трассе определяется выражением

$$\tau_a = \int_0^{R_c - R_6} \alpha_a(r) dr, \quad (4)$$

то с учетом (3) имеем

$$\begin{aligned} \tau_a \approx & 0.20935(R_c - R_6) + 0.8665 \frac{R_c}{H} \times \\ & \times \left[1 - \exp\left\{-0.28528 \frac{H(R_c - R_6)}{R_c}\right\} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь R_6 – расстояние от приемника излучения до кромки берега. Соответственно, число регистрируемых приемником фотонов УФ-С-излучения, I_c , согласно закону Бугера–Ламберта–Бера с учетом точечного характера источника излучения, будет равно

$$I_c = \frac{I_0}{R_c^2} e^{-\tau}, \quad (6)$$

где I_0 – константа, зависящая от условий эксперимента, а τ – оптическая толщина, обусловленная как аэрозольным, так и молекулярным ослаблением излучения. Для проверки достоверности формулы (5) был выполнен натурный эксперимент в Черном море.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Место и условия проведения эксперимента

Измерения проводились в Черном море в районе г. Туапсе. Приемный ультрафиолетовый сенсор (далее УФ-С-сенсор) располагался на высоте 40 м от уровня моря в 300 м от берега. Регистрировалась интенсивность сигнала источника УФ-С-излучения с катера, находящегося на поверхности моря (см. рис. 3). Время проведения эксперимента – с 11.00 до 15.00 местного времени. Атмосферное давление равнялось 1013 гПа. Погодные условия: с 11.00 до 13.00 – пасмурно; с 13.00 до 15.00 – солнечная погода. Волнение на море составляло 1–2 балла.

3.2. Методика измерений

Методика проведения измерений включала в себя несколько этапов.

1. Последовательное удаление от берега катера с расположенным на нем источником УФ-С-излучения (эксимерная лампа). Источник излучения находился на высоте 1 м над уровнем моря. Измерения выполнялись на 12-ти станциях. Начальная станция располагалась на расстоянии 0.75 км от берега, конечная – на расстоянии 5.6 км. Всего было 12 станций, на которых УФ-С-излучение эксимерной лампы 1 регистрировалось приемником 2 (см. рис. 3). Пространственное положение станций определялось с помощью GPS-приемника. Геомагнитная обстановка во время измерений была спокойной.

2. Приближение катера к берегу, которое выполнялось также на 12-ти станциях. Конечная станция находилась на расстоянии 0.4 км от берега.

3. Информация о пространственном положении станций и числе принимаемых фотонов по каждой из них регистрировалась с выхода приемника УФ-С-излучения на персональном компьютере.



Рис. 4. Фотография монофотонного УФ-С-сенсора “Скорпион”.

3.3. Измерительная аппаратура и ее характеристики

Источником УФ-С-излучения служила эксимерная лампа, мощность излучения которой составляла 10 мВт. В качестве приемника УФ-С-излучения использовался монофотонный сенсор “Скорпион” [12] (см. рис. 4) со средней длиной волны $\lambda = 280$ нм и полушириной 30 нм.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для вычисления оптической толщины атмосферы τ по данным измерений числа принимаемых приемником фотонов I_c воспользуемся формулой (6). Из (6) следует, что

$$\tau = \ln I_0 - 2 \ln R_c - \ln I_c. \quad (7)$$

В проводимом эксперименте величина константы I_0 равнялась 6000.

На рис. 5 приведены результаты расчета оптической толщины, вычисленной по формуле (5) — линейная зависимость 1, и обработки экспериментальных данных с использованием формулы (7). С помощью метода наименьших квадратов получено описание зависимости экспериментальных данных оптической толщины от расстояния $x = R_c - R_0$ (линия 2 на рис. 5). Из анализа графиков, представленных на рис. 5, следует:

1) график зависимости оптической толщины (линия 2), полученный по результатам экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов, позволяет по тангенсу его наклона определить величину коэффициента экстинкции $\alpha_{\text{эксп}} = 0.75$;

2) из зависимости оптической толщины аэрозольной составляющей атмосферы, τ_a , от расстояния на морской трассе (рассчитанной по формуле (5) для морского аэрозоля), которая представ-

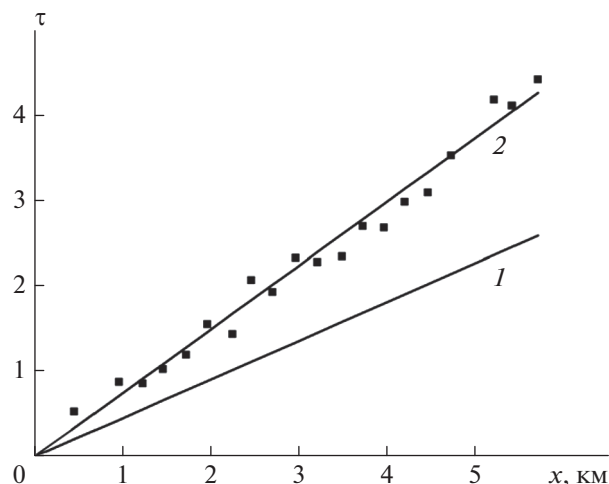


Рис. 5. Зависимость оптической толщины τ атмосферы над морем от величины $x = R_c - R_0$: квадраты — данные эксперимента; кривая 1 — расчет по формуле (5); кривая 2 — линейная аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

ляет собой прямую линию 1, следует, что $\alpha_a = 0.46$;

3) по тангенсам углов наклона графиков 1 и 2 можно определить молекулярную составляющую коэффициента экстинкции атмосферы, которая равна $\alpha_m = \alpha_{\text{эксп}} - \alpha_a = 0.29$.

Следует отметить, что использованные значения коэффициента аэрозольной экстинкции α_a [14], строго говоря, справедливы лишь для акватории Черного моря и условий (соленость воды, волнение морской поверхности, влажность воздуха и др.), принятых в настоящей работе. В общем случае для конкретной акватории и условий съемки можно воспользоваться программным пакетом Maex Pro 5.0 [14] для расчета спектрального коэффициента экстинкции атмосферы над морем для различных высот.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена методика определения оптической толщины атмосферы при распространении УФ-С-излучения по наклонной трассе над морем. Изменение высоты трассы над морем приводит к тому, что она (трасса) становится неоднородной по своим электрофизическим свойствам. Учет неоднородности трассы распространения УФ-С-излучения обеспечивается посредством введения в модель зависимости коэффициента экстинкции и оптической толщины атмосферы от высоты. Справедливость предложенной модели подтверждена данными натурного эксперимента, проведенного над акваторией Черного моря.

Выполненное исследование позволило определить величину затухания УФ-С-излучения, обусловленного молекулярным рассеянием и поглощением. В результате эксперимента было установлено, что значение коэффициента экстинкции атмосферы для исследованной трассы равняется $\alpha_{\text{эксп}} = 0.75$. Величины аэрозольной и молекулярной составляющих составили 0.46 и 0.29 соответственно.

Полученные результаты могут быть полезны для построения моделей, используемых в задачах проектирования УФ-С-сенсоров, и крайне важны для систем связи, локации и навигации воздушных судов при заходе последних на посадку на прибрежные аэродромы.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы № 122040500060–4 и № 123021700057–0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Непобедимый С.П., Белов А.А., Калинин А.П. и др. // Докл. АН. 2010. Т. 432. № 6. С. 764.*
2. *Белов А.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В. и др. // Датчики и системы. 2014. № 1. С. 37.*
3. *Егоров В.В., Калинин А.П., Коровин Н.А. и др. // Датчики и системы. 2016. № 3. С. 40.*
4. *Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов А.И. и др. // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 51; <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-51-57>*
5. *Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. // Датчики и системы. 2015. № 12. С. 29.*
6. *Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 26; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21080069>*
7. *Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 9. С. 26; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22090047>*
8. *Ларин И.К. // Хим. физика. 2023. Т. 41. № 1. С. 84; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23010077>*
9. *Родионов А.И., Родионов И.Д., Родионова И.П. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 61; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21100113>*
10. *Родионов И.Д., Родионов А.И., Родионова И.П. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 30; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19070136>*
11. *Городничев В.А., Пашенина О.Е., Белов М.Л. и др. // Науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 11. С. 482; <https://doi.org/10.7463/1114.0731582>*
12. *Белов А.А., Калинин А.П., Крысюк И.В. и др. // Датчики и системы. 2010. № 1. С. 47.*
13. *Белов М.Л., Городничев В.А., Пашенина О.Е. // Науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 255; <https://doi.org/10.7463/0813.0587120>*
14. *Калошин Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 11. С. 881; <https://doi.org/10.15372/AOO20181104>*