



Дистанционное определение оптической толщины атмосферы в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

***В.В.Егоров¹, А.П.Калинин², И.Д.Родионов³,
А.И. Родионов³, И.П. Родионова³***

¹Институт космических исследований РАН, Москва

²Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва

³АО, Научно-технический центр «Реагент», Москва

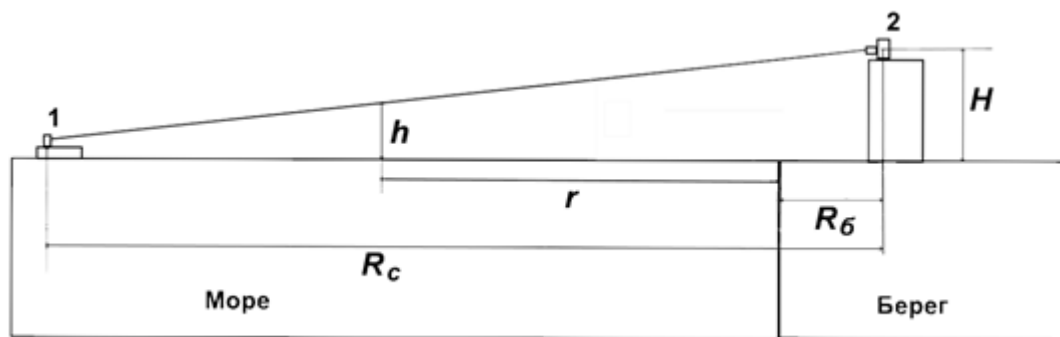
Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Цель доклада: Изложение методики и результатов эксперимента по изучению поглощения УФ-С излучения над морской поверхностью

Распространение УФ-С излучения в атмосфере представляет большой практический и научный интерес. Это связано с тем, что благодаря озоновому слою солнечная УФ-С радиация почти полностью блокируется и это создает очень низкий уровень фоновых помех. В связи с этим появилось много предложений по использованию УФ-С излучения для дистанционного мониторинга высоковольтного оборудования, навигации воздушных судов, передачи информации и т. п., модели. Поэтому для оценки эффективности применения УФ-С диапазона на море необходимы прямые измерения на морских приводных трассах и определения типовых коэффициентов затухания (экстинкции).

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

- Место и условия проведения эксперимента
- Измерения проводились на Черном море в районе г. Туапсе. Приемный ультрафиолетовый сенсор (далее сенсор) располагался на высоте $H = 40$ м над уровнем моря. Расстояние до берега R_6 составляло около 300 м. Регистрировалась интенсивность сигнала источника УФ-С излучения с катера, находящегося на поверхности моря на расстоянии R_c (рис. 1). Время проведения эксперимента с 11.00 до 15.00 местного времени. Атмосферное давления равнялось 1013 гП. Погодные условия: с 11.00 до 13.00 пасмурно; с 13.00 до 15.00 солнечная погода. Волнение на море 2-3 балла.



- **Рис. 1.** Схема связи геометрических параметров в эксперименте. 1- УФ-С источник, 2 – УФ-С приемник. Здесь h – высота трассы прохождения излучения, для дальности r , отсчитываемой от кромки берега.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

- **Методика измерений**
- Методика проведения измерений включала в себя следующую последовательность процедур:
- 1. Последовательное удаление от берега катера с расположенным на нем источником УФ-С излучения. Источник излучения находился на высоте 1 м над уровнем моря. Измерения выполнялись на станциях. Начальная станция располагалась в 750 м от берега, конечная – в 6000 м. Всего было сделано 12 станций, во время которых УФ-С излучение эксимерной лампы (см. рис. 2), регистрировалось приемником (см. рис. 3). Пространственное положение станций определялось с помощью GPS - приемника.
- 2. Приближение катера к берегу также выполнялось с 12-ю станциями. Конечная станция находилась в 430 м от берега.
- 3. Информация о пространственном положении станций и числе зарегистрированных фотонов по каждой из них с выхода приемника УФ-С излучения регистрировалась на персональном компьютере.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

- **Измерительная аппаратура** лампа ХеВг (рис. 2). Мощность излучения лампы на длине волны 282 нм составляла 10 мВт.
- В качестве приемника УФ-С излучения использовался монофотонный сенсор «Скорпион» (рис. 3), в котором применяется время-координатно-чувствительный детеклсятор (ВКЧД). Использование ВКЧД обеспечивает высокую пороговую чувствительность сенсора.

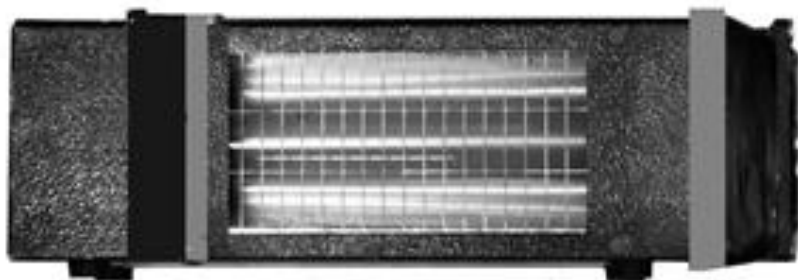


Рис. 2. Фотография эксимерной монофотонного



Рис. 3. Фотография лампы

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Обработка данных измерений и обсуждение результатов

Определение эффективного коэффициента экстинкции атмосферы над морем

На рис. 4 черными квадратами показаны результаты измерений при движении катера к берегу, а кружками – от берега.

Целью обработки данных было вычисление коэффициента экстинкции атмосферы на трассе от источника до приемника излучения. Следует отметить, что исследуемая трасса распространения излучения не являлась однородной, поскольку проходила как над морем, так и над сушей и, кроме того, ее высота над поверхностями суши и моря значительно изменялась (см. рис. 1) с изменением дальности.

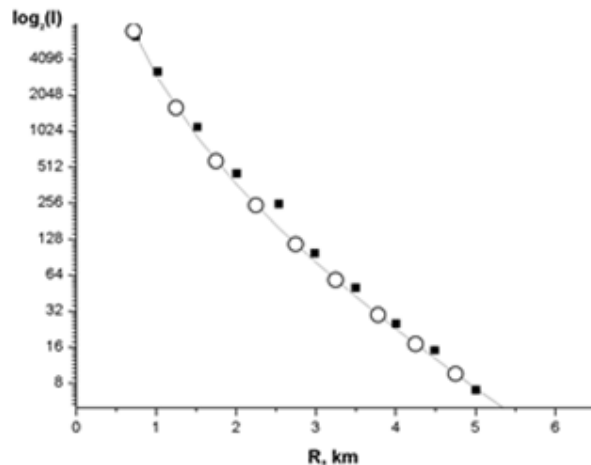


Рис. 4. График зависимости числа принимаемых фотонов с нанесенными на него экспериментальными значениями.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Поэтому на всей трассе имело место некоторое эффективное затухание УФ-С излучения, характеризуемое экстинкцией $\alpha_{эфф}$.

Формула для расчета скорости счета фотонов может быть представлено в следующем виде модифицированной формулы Бугера, в которой учтен точечный источник излучения.

$$I=I_0 \exp(-\alpha_{эфф} R)/R^2, \quad (1)$$

где I_0 – константа, R – расстояние от источника излучения до приемника. Путем процедуры подгонки экспериментальных данных и модельной кривой (1) были получены параметры I_0 , и $\alpha_{эфф}$, которые обеспечили наилучшее согласие экспериментальных данных и модельной кривой. Они оказались равными: $I_0=6000$, $\alpha_{эфф}=0,75$.

На рис. 5 сплошной линией показана зависимость скорости счета принимаемых фотонов от дальности R (сплошная линия), построенный по формуле (1) с указанными выше параметрами онных отражателей (до коррекции): а - прямое солнечное освещение; б - эталоны находятся в тени.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Из рис. 4 видно достаточно хорошее согласие эксперимента и модельных представлений. Представляет большой практический интерес оценка возможной максимальной дальности работы монофотонных сенсоров по регистрации принимаемых УФ-С сигналов. Из проведённого эксперимента следует, что для источника УФ-С малой мощности около 10 мВт в УФ-С диапазоне граница предельной чувствительности сенсоров «Скорпион» составила около 6 км.

На рис. 5 представлены модельные графики спектральной зависимости коэффициента аэрозольной экстинкции волн Уф-С диапазона со значениями высоты над уровнем моря в качестве параметра, приведенные в [1].

На основе этих графиков нами была определена зависимость коэффициента экстинкции от высоты h над морем для длины волны $\lambda = 280$ нм (см. рис. 6, квадратики). .

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

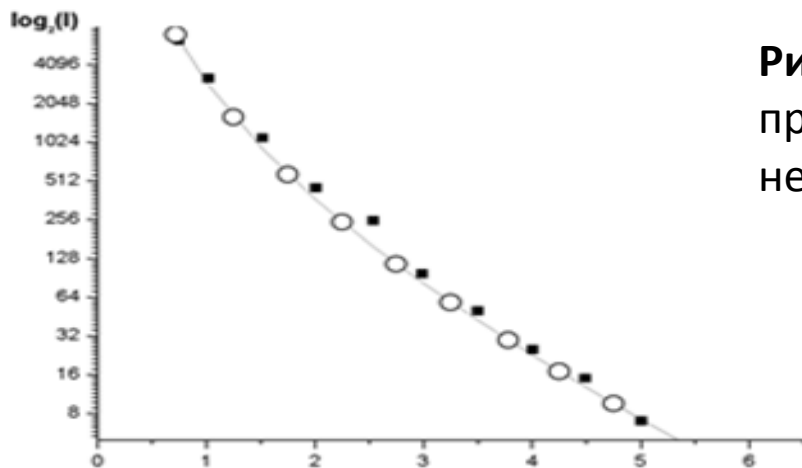


Рис. 5. График зависимости числа принимаемых фотонов с нанесенными на него экспериментальными значениями.

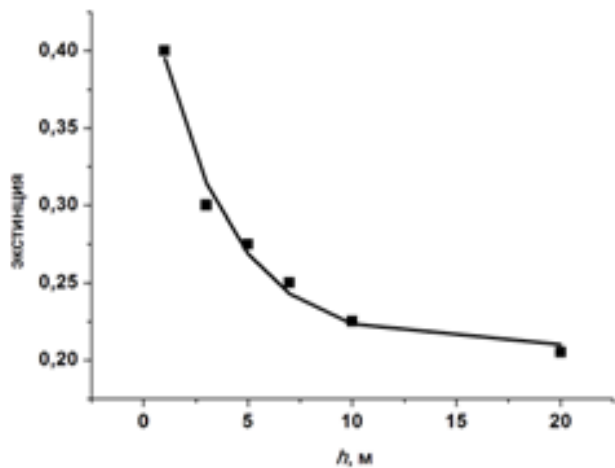


Рис. 6. Коэффициенты аэрозольной экстинкции по данным работы [14] (квадратики). Сплошная линия – аппроксимация (формула (2)).

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Кривая на графике рис. 6 имеет при этом вид следующей аналитической функции:

$$\alpha_a \approx 0,20935 + 0,24729 \cdot \exp(-0,28528 \cdot h). \quad (2)$$

Здесь α_a коэффициент аэрозольной экстинкции.

Поскольку высота прохождения трассы h связана с высотой положения измерителя H над уровнем моря, с расстоянием положения источника излучения (станции) до приемника R_c и текущей дальностью r , отсчитываемой от положения станции в направлении к берегу, как , то формула (1) может быть записана в виде:

$$\alpha_a \approx 0,20935 + 0,24729 \cdot \exp(-0,28528 \cdot r \frac{H}{R_c}). \quad (3)$$

Тогда оптическая толщина аэрозольной составляющей атмосферы τ_m на морской трассе, является интегралом от (3) по r в пределах от 0 до $R_c - R_b$ и будет равна

$$\tau_m \approx 0,20935 \cdot (R_c - R_b) + 0,8665 \cdot \frac{R_c}{H} \cdot \left[1 - e^{-0,28538 \cdot \frac{H}{R_c} (R_c - R_b)} \right]. \quad (4)$$

Здесь R_b – расстояние от приемника излучения до кромки берега.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Соответственно, число регистрируемых приемником фотонов УФ-С излучения I_c будет равно

$$I_c = \frac{I_0}{R_c^2} \cdot e^{-\tau}. \quad (5)$$

Здесь I_0 – константа, зависящая от условий эксперимента, а τ - оптическая толщина, обусловленная аэрозольным и молекулярным ослаблением излучения.

Для вычисления оптической толщины атмосферы по данным измерений числа принимаемых приемником излучения фотонов воспользуемся формулой (5). Из этой формулы следует, что

$$\tau = \ln I_0 - 2 \ln R_c - \ln I_c.$$

В проводимом эксперименте величина константы I_0 равнялась 6000.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

На рис. 7 приведены результаты обработки экспериментальных данных с использованием формулы (6) (квадратики) и график оптической толщины атмосферы, рассчитанные на основе данных эксперимента, и оптической толщины, вычисленный по формуле (4) (кривая 1). С помощью метода наименьших квадратов получено описание зависимости экспериментальных данных оптической толщины от расстояния, которая представляет собой прямую линию 2. Здесь по оси абсцисс отложена переменная $x = R_c - R_0$.

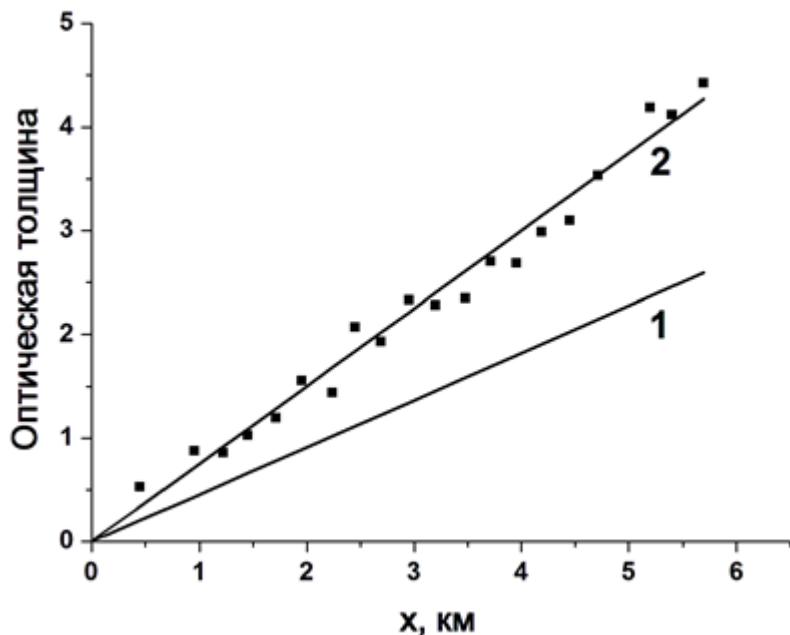


Рис. 8. Экспериментальные данные оптической толщины атмосферы над морем (квадратики) и зависимость оптической толщины атмосферы 2, полученная методом наименьших квадратов из экспериментальных данных, и график 1, рассчитанный по формуле (4).

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Из анализа графиков, представленных на рис. 8, следует:

1. График зависимости оптической толщины 2, полученный по результатам экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов, позволяет по тангенсу его наклона определить величину коэффициента экстинкции, равной 0,75.
2. Из зависимости оптической толщины, рассчитанной по формуле (4) для морской аэрозоли, которая представляет собой прямую линию 1, следует, что $\alpha_m = 0,46$.
3. По графикам 1 и 2 можно определить молекулярную составляющую коэффициента экстинкции атмосферы, которая равна разности $\alpha_{эфф} - \alpha_m$ и составляет 0,29.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Заключение

Результаты эксперимента по изучению прохождения УФ-С излучения по наклонной трассе над акваторией Черного моря позволили установить, что значение коэффициента экстинкции атмосферы для исследованной трассы равняется $\alpha_{\text{мп}} = 0,75$. Изменение высоты трассы над морем приводит к тому, что она становится неоднородной по своим электрофизическим свойствам, обладающей изменениями ослабления излучения при его распространении. Учет влияния высоты трассы над морем, посредством введения в модель распространения УФ-С излучения зависимости коэффициента экстинкции и оптической толщины атмосферы от высоты, позволил получить достаточно простые модельные формулы для определения значений указанных параметров. Проведенное исследование позволило определить величину затухания УФ-С излучения, обусловленную молекулярным рассеянием и поглощением. Таким образом, нами разработана методика расчета оптической толщины атмосферы над морем при распространении УФ-С по наклонной трассе, подтвержденная данными натурального эксперимента.

Распространения излучения в УФ-С диапазоне для наклонной трассы зондирования над морем

Следует отметить, что использованные в статье значения коэффициента аэрозольной экстинкции, взятые из работы [1], строго говоря, справедливы лишь для акватории Черного моря и условий (соленость воды, волнение морской поверхности, влажность воздуха и др.), принятых в этой работе. В общем случае для конкретной акватории и условий съемки можно воспользоваться программным пакетом Maex Pro 5,0 для расчета спектрального коэффициента экстинкции атмосферы над морем для различных высот [1].

Литература

1. *Калошин Г.А.* // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 11. С. 881.
DOI: 10.15372/AOO20181104

- **Спасибо**
- **За внимание**