

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. Царев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «НЕКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ  
В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2022

УДК [551.463:531.79](075.8)  
ББК 26.221.31я73  
Ц18

**Царев, Валерий Анатольевич**  
Ц18      Лабораторный практикум по дисциплине «Неконтактные методы в гидрометеорологии»: [текст электронный] / В.А. Царев. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2022. – 24 с.

В лабораторный практикум учебной дисциплины «Неконтактные методы» включены работы, при выполнении которых выполняются расчеты основных электромагнитных характеристик морской воды, а также составляющие электромагнитного излучения моря, фиксируемые при использовании пассивных и активных методов неконтактных методов. Выполнение данных работ позволит достичь лучшего понимания физических основ, на которых строятся используемые неконтактные методы.

УДК [551.463:531.79](075.8)  
ББК 26.221.31я73

© В.А. Царев, 2022  
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2022

# Работа № 1. Расчет спектрального распределения интенсивностей отраженного солнечного излучения и собственного излучения моря

*Цель работы:* ознакомление учащихся с методикой расчета интенсивности излучения морской поверхности, с особенностями спектрального распределения интенсивности отраженного солнечного излучения и собственного излучения поверхности моря, с соотношением между ними.

## *Задачи работы*

1. Рассчитать спектральное распределение интенсивностей отраженного солнечного излучения и собственного излучения моря.
2. Проанализировать особенности рассчитанных спектральных распределений.
3. Составить представление о соотношении между интенсивностями отраженного солнечного излучения и собственного излучения моря

## *Порядок выполнения работы*

1. С помощью уравнения Планка для температуры поверхности моря рассчитать интенсивность собственного излучения морской поверхности. Формула Планка имеет вид:

$$m_{\lambda_m} = \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \left( \exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda k T_m}\right) - 1 \right)^{-1},$$

где  $m_{\lambda_m}$  – интенсивность собственного излучения моря;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $c$  – скорость света;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\hbar$  – постоянная Планка,  $T_m$  – температура морской поверхности.

2. По формуле Планка рассчитать спектральное распределение интенсивности отраженного от морской поверхности солнечного излучения. Для этого следует воспользоваться указанным ниже уравнением:

$$m_{\lambda_c} = A \left( \frac{r}{R} \right)^2 \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \left( \exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda k T_c}\right) - 1 \right)^{-1},$$

где  $m_{\lambda_c}$  – интенсивность отраженного солнечного излучения;  $A$  – альbedo морской поверхности;  $r$  – радиус Солнца;  $R$  – расстояние от Земли до Солнца,  $T_c$  – температура поверхности стены.

При расчетах температуру поверхности Солнца принять равной 6000 °К.

3. Расчеты провести для длин волн 0,1, 0,3, 0,9, 2,7, 8,1, 24,3 мкм. По результатам расчетов построить графики спектрального распределения интенсивностей собственного излучения моря и отраженного от морской поверхности солнечного излучения. При построении графиков выделенные длины волн расположить равномерно на горизонтальной оси.

#### *Исходные данные*

Исходными данными служат температура поверхности моря ( $T_m = 300$  °К) и температура поверхности Солнца, равная 6000 °К. Входящие в исходные уравнения константы имеют следующие значения:

$$k = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ дж град}^{-1};$$

$$\hbar = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ дж с};$$

$$r = 0,7 \cdot 10^9 \text{ м};$$

$$R = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м}.$$

#### *Анализ результатов и составление отчета*

1. Провести анализ особенностей полученных распределений, сопоставить их между собой.
2. В отчете следует представить: анализ графиков спектрального распределения интенсивностей излучения морской поверхности и отраженного солнечного излучения.

## **Работа № 2. Расчет**

### **электромагнитных характеристик морской воды**

*Цель работы:* ознакомление учащихся с методикой расчета электромагнитных характеристик морской воды, с характером их зависимости от длины волны излучения, от температуры и солёности воды.

#### *Задачи работы*

1. Рассчитать электромагнитные характеристики морской воды.
2. Построить и проанализировать графики распределения рассчитанных характеристик в зависимости от длины волны.
3. Проанализировать характер изменения составляющих комплексной диэлектрической проницаемости воды от температуры и солёности.

*Порядок выполнения работы*

1. С помощью представленных ниже формул рассчитать электромагнитные характеристики морской воды:

- действительной и мнимой составляющих комплексной диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  соответственно);
- коэффициентов преломления и поглощения ( $n$  и  $\chi$ );
- коэффициентов отражения ( $R$ ) и излучения ( $\varepsilon$ );
- тангенса угла потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ );
- толщины слоя поглощения излучения ( $d$ ).

Для расчета действительной и мнимой составляющих комплексной диэлектрической проницаемости используются формулы Дебая, которые имеют вид:

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2},$$

$$\varepsilon'' = \frac{\lambda_s}{\lambda} \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2} + a_0 \sigma_0 \lambda.$$

Входящие в указанные уравнения величины рассчитываются с помощью следующих эмпирических соотношений:

$$\varepsilon_s(t, N) = \varepsilon_s(t, 0) a(N),$$

$$\varepsilon_s(t, 0) = 87,7 - 0,4t,$$

$$a(N) = 1,0 - 0,3N,$$

$$\varepsilon_0(t) = 5,0 + 0,02t,$$

$$\lambda_s(t, N) = \lambda_s(t, 0) b(N),$$

$$\lambda_s(t, 0) = 3 \left[ 1,1 - 3,8 \cdot 10^{-2} t \right],$$

$$b(N) = 0,15 \cdot 10^{-2} N \cdot t,$$

$$N = 1,7 \cdot 10^{-2} s,$$

$$\sigma_0(t, N) = \sigma_0(25, N) \left( 1,0 - 1,96 \cdot 10^{-2} \Delta \right) 10^{-3},$$

$$\sigma_0(25, N) = 10,4 \cdot N,$$

$$\Delta = 25,0 - t.$$

Ниже представлены уравнения для расчета остальных электромагнитных характеристик морской воды:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{2\sigma_0 \lambda}{c\varepsilon'},$$

$$n = \left[ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left( \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1 \right) \right]^{1/2},$$

$$\chi = \left[ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left( \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right) \right]^{1/2},$$

$$R = \frac{n-1}{n+1},$$

$$\varepsilon = 1 - R^2,$$

$$d = \frac{\lambda}{2\pi\chi},$$

где  $N$  – нормальность раствора NaCl в г-экв/л.

2. По результатам расчетов построить графики спектрального распределения рассчитанных характеристик.

#### *Исходные данные*

Исходными данными служат температура и соленость морской воды. Рекомендуется провести расчеты для солености 0 ‰, 20 ‰ и 40 ‰. Для каждой выбранной солености повторить расчеты при температурах 0°, 20° и 40°. Входящие в исходные уравнения константы имеют следующие значения:  $\mu = 1,0$ ,  $a_0 = 1,0$ .

#### *Анализ результатов и составление отчета*

1. Провести анализ особенностей полученных распределений, сопоставить их между собой.

## Работа № 3. Расчет составляющих оптического излучения моря

*Цель работы:* ознакомление учащихся с методикой расчета интенсивности составляющих оптического излучения морской среды, с особенностями их спектрального распределения, с соотношением между ними.

### *Задачи работы*

1. Рассчитать спектральное распределение интенсивностей основных составляющих оптического излучения моря, включая отраженное солнечное излучение; излучение, рассеянное подповерхностным слоем, и излучение, отраженное от морского дна.

2. Проанализировать особенности рассчитанных спектральных распределений.

3. Составить представление о соотношении между ними.

### *Порядок выполнения работы*

1. С помощью уравнения Планка для оптического диапазона длин волн рассчитать интенсивность приходящего к морской поверхности солнечного излучения. Формула Планка имеет вид:

$$m_{\lambda c} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda kT}\right) - 1\right)^{-1},$$

где  $m_{\lambda c}$  – интенсивность солнечного излучения;  $r$  – радиус Солнца;  $T$  – температура поверхности Солнца,  $R$  – расстояние от Земли до Солнца;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $c$  – скорость света;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\hbar$  – постоянная Планка.

При расчетах температуру поверхности Солнца принять равной 6000 °К.

2. По приведенной ниже формуле рассчитать спектральное распределение интенсивности отраженного от морской поверхности солнечного излучения. Для этого следует воспользоваться указанным ниже уравнением:

$$m_{\lambda 1} = A_{\lambda} m_{\lambda c},$$

где  $m_{\lambda 1}$  – интенсивность отраженного солнечного излучения;  $A_{\lambda}$  – альbedo морской поверхности.

3. По представленной ниже формуле рассчитать спектральное распределение интенсивности составляющей оптического излучения моря ( $m_{\lambda 2}$ ), обусловленной рассеянием назад падающего солнечного излучения.

$$m_{\lambda 2} = (1 - A_{\lambda}) \frac{\beta_{\lambda}}{2\alpha_{\lambda}} m_{\lambda c} (1 - \exp(-2\alpha_{\lambda} H)),$$

где  $\beta_{\lambda}$  – коэффициент рассеяния назад распространяющегося в море оптического излучения;  $\alpha_{\lambda}$  – коэффициент вертикального ослабления интенсивности оптического излучения;  $H$  – глубина моря;  $A_{\lambda}$  – альbedo морской поверхности.

4. Рассчитать спектральное распределение интенсивности составляющей оптического излучения моря ( $m_{\lambda 3}$ ), обусловленной отражением солнечного излучения от морского дна. Для этого можно воспользоваться следующим уравнением:

$$m_{\lambda 3} = (1 - A_{\lambda}) r_{\lambda} m_{\lambda c} \exp(-2\alpha_{\lambda} H),$$

где  $r_{\lambda}$  – коэффициент отражения оптического излучения от дна.

5. По результатам расчетов построить и проанализировать графики спектрального распределения интенсивностей рассчитанных составляющих излучения моря.

#### *Исходные данные*

Исходными данными служат температура поверхности Солнца, равная 6000 °К. Входящие в исходные уравнения константы имеют значения, как в работе 1.

#### *Анализ результатов и составление отчета*

1. Провести анализ особенностей полученных распределений, сопоставить их между собой.

2. В отчете следует представить графики спектрального распределения интенсивностей излучения морской поверхности и отраженного солнечного излучения.

## **Работа № 4. Расчет оптического эхосигнала**

*Цель работы:* ознакомление учащихся с методикой расчета интенсивности оптического эхосигнала, сформированного в результате отражения оптического зондирующего сигнала морской поверхностью, его рассеянием в подповерхностном слое, отражением от морского дна.

#### *Задачи работы*

1. Рассчитать для заданных длин волн оптического зондирующего сигнала распределение интенсивностей эхосигнала, сформированного отражением оптического зондирующего сигнала морской

поверхностью, а также его рассеянием в подповерхностном слое на различной глубине от поверхности моря, отражением от дна.

2. Проанализировать особенности формы эхосигнала в зависимости от длины волны зондирующего оптического сигнала.

*Порядок выполнения работы*

1. С помощью представленного ниже уравнения для длин волн, соответствующих красному, желтому, зеленому и синему цветам, рассчитать интенсивность участка эхосигнала, сформированного, отражением от морской поверхности.

$$m_{\lambda 1} = R \cdot m_0,$$

где  $m_{\lambda c}$  – интенсивность отраженного солнечного излучения;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $R$  – коэффициент отражения морской поверхности;  $m_0$  – интенсивность зондирующего оптического сигнала.

2. По представленному ниже уравнению рассчитать распределение интенсивности участков эхосигнала моря, обусловленной рассеянием назад на различных глубинах зондирующего оптического излучения.

$$m_{\lambda 2} = \frac{\beta_{\lambda}}{2\alpha_{\lambda}} m_0 \exp(-2\alpha_{\lambda} z),$$

где  $\beta_{\lambda}$  – коэффициент рассеяния назад распространяющегося в море оптического излучения;  $\alpha_{\lambda}$  – коэффициент вертикального ослабления интенсивности оптического излучения;  $\alpha(\lambda) = \sigma(\lambda) + \chi(\lambda)$ ;  $\sigma(\lambda)$ ,  $\chi(\lambda)$  – коэффициенты рассеяния и поглощения воды,  $z$  – глубина моря.

3. Рассчитать интенсивность участка оптического эхосигнала ( $m_{\lambda 3}$ ), сформировавшегося за счет отражения излучения от морского дна. Для этого можно воспользоваться следующим уравнением:

$$m_{\lambda 3} = r_{\lambda} m_{\lambda 0} \exp(-2\alpha_{\lambda} H),$$

где  $r_{\lambda}$  – коэффициент отражения оптического излучения от дна.

4. По результатам расчетов построить графики распределения интенсивности оптического эхосигнала моря при различных глубинах моря.

Исходными данными служат интенсивность приходящего солнечного излучения  $m_0$ , равная  $1,4 \text{ кВт} \cdot \text{м}^2$ . Коэффициент обратного рассеяния связан с коэффициентом рассеяния соотношением  $\beta(\lambda) = \gamma \sigma(\lambda)$ , где  $\gamma = 0,05$ . Коэффициент отражения от дна  $r_{\lambda}$

принимается равным 0,2. Величины коэффициентов рассеяния и поглощения в зависимости от длины волны излучения выбираются из таблицы:

$\lambda$ , мкм	0,4	0,5	0,6	0,7
$\chi$ , $\text{м}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$20 \cdot 10^{-2}$
$\sigma$ , $\text{м}^{-1}$	$14 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$

Расчеты провести для интервала глубин моря в пределах от 1 до 30 м.

*Анализ результатов и составление отчета*

1. Провести анализ особенностей полученных распределений, сопоставить их между собой.

2. В отчете следует представить графики спектрального распределения интенсивностей излучения морской поверхности и отраженного солнечного излучения.

## Работа № 5. Расчет коэффициентов пропускания атмосферой оптического излучения моря

Атмосфера ослабляет принимаемое оптическое излучение моря за счет его частичного рассеяния. Кроме этого, она формирует дополнительную составляющую, возникающую в результате рассеивания солнечного излучения на неоднородностях атмосферы. С учетом этого яркость принимаемого излучения может быть представлена с помощью следующего уравнения:

$$b(\lambda, H) = b_0 \tau(\lambda) + b_d, \quad (1)$$

где  $b_d$  – яркость атмосферной дымки;  $b_0$  – яркость оптического излучения моря;  $\tau(\lambda)$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Рассеяние в атмосфере составляет 4–22 % от прямой солнечной радиации. В видимой части спектра ослабление излучения происходит в основном за счет рассеяния. Ослабление за счет поглощения не превышает 5–10 %, и им обычно пренебрегают. Рассеяние разделяют на релеевское (молекулярное) и аэрозольное. При этом коэффициент пропускания атмосферы разделяют на релеевский ( $\tau_p(\lambda)$ ) и аэрозольный ( $\tau_a(\lambda)$ ), которые связаны с общим коэффициентом пропускания соотношением:

$$\tau(\lambda) = \tau_p(\lambda) + \tau_a(\lambda). \quad (2)$$

Коэффициенты пропускания связаны с коэффициентами рассеяния следующими соотношениями:

$$\tau_p(H, \lambda) = \exp\left(-\int_0^H \sigma_p(z, \lambda) dz\right), \quad (3)$$

$$\tau_a(H, \lambda) = \exp\left(-\int_0^H \sigma_a(z, \lambda) dz\right), \quad (4)$$

где  $\sigma_p, \sigma_a$  – коэффициенты релеевского и аэрозольного рассеяния.

Коэффициенты релеевского и аэрозольного рассеяния зависят от высоты регистрации излучения и от длины волны. Коэффициент релеевского рассеяния в приземном слое атмосферы в точке спектра  $\lambda = 0,550$  мкм равен  $\sigma_{p0} = 0,000012 \text{ м}^{-1}$ . Зависимость  $\sigma_p$  от длины волны имеет вид:

$$\sigma_p(0, \lambda) = \sigma_{p0} \left(\frac{0,550}{\lambda}\right)^4, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения в мкм.

С высотой показатель релеевского рассеяния уменьшается по экспоненциальному закону:

$$\sigma_p(z, \lambda) = \sigma_p(0, \lambda) \exp\left(\frac{-z}{H_p}\right), \quad (6)$$

где  $H_p = 8$  км – эффективная толщина релеевской атмосферы,  $z$  – высота.

После подстановки (6) в (3) получим соотношение для релеевского коэффициента пропускания:

$$\tau_p(H, \lambda) = \exp\left(-\sigma_{p0} \left(\frac{0,55}{\lambda}\right)^4 H_p \left(1 - \exp\left(\frac{H}{H_p}\right)\right)\right). \quad (7)$$

Аэрозольное рассеяние, в отличие от релеевского, сильно изменчиво. Оно зависит от размера, формы, состава и концентрации частиц, содержащихся в реальной атмосфере, и определяет в сущности «мутность» атмосферы. При этом аэрозоль над морем отличается по своим оптическим свойствам от приземного аэрозоля. Величина  $\sigma_a(0,550)$  связана соотношением измеряемой метеорологической дальностью видимости (МДВ)  $S_m$ :

$$\sigma_a(0,550) = \frac{3,9}{S_m} - \sigma_p(0,550) \cong \frac{3,9}{S_m}, \quad (8)$$

где  $S_m$  – балл метеорологической дальности видимости.

Величина  $\sigma_a$  сложным образом зависит от длины волны. Для нее обычно используют зависимость вида:

$$\sigma_a(0,\lambda) = \sigma_a(0,550) \left( \frac{0,550}{\lambda} \right)^{Ma}, \quad (9)$$

где  $Ma$  – показатель Ангстрема.

Показатель Ангстрема для морского аэрозоля меняется от 0 до 1,1. Для открытого океана его среднее значение составляет  $Ma = 0,55$ , а для прибрежных районов –  $Ma = 0,7$ . Эти значения можно использовать для приближенных расчетов. Зависимость аэрозольного рассеяния от высоты достаточно сложная. Приближенно ее можно считать экспоненциальной.

$$\sigma_a(z,\lambda) = \sigma_a(0,\lambda) \exp\left(\frac{-z}{H_a}\right), \quad (10)$$

где  $H_a$  – эффективная высота аэрозольной атмосферы.

В среднем значение  $H_a = 1$  км. Подставляя (9) в (4), получим соотношение для аэрозольного коэффициента пропускания.

$$\tau_o(H,\lambda) = \exp\left(-\sigma_{o0} \left(\frac{0,55}{\lambda}\right)^{Ma} H_o \left(1 - \exp\left(\frac{H}{H_o}\right)\right)\right). \quad (11)$$

*Цель работы:* ознакомление учащихся с методикой расчета коэффициентов пропускания атмосферы для оптического излучения моря, а также дать представление о механизмах и степени влияния атмосферы на оптическое излучение моря.

#### *Задачи работы*

1. Рассчитать коэффициенты пропускания атмосферы для оптического излучения с учетом релеевского и аэрозольного рассеяния.

2. Построить графики распределения коэффициентов пропускания оптического излучения в зависимости от длины волны и расстояния от морской поверхности.

3. Проанализировать характер изменения с высотой рассчитанных величин в зависимости от длины волны излучения.

### *Порядок выполнения работы*

С помощью уравнений (7) и (11) рассчитываются аэрозольный и релеевский коэффициенты пропускания атмосферы. Расчеты провести для длин волн 0,4, 0,5, 0,7 мкм, а также для высоты  $H = 100, 500, 1000, 5000, 10\ 000$  м.

### *Исходные данные*

При выполнении расчетов использовать следующие значения входящих в уравнения величин:

$$\sigma_{p0} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1},$$

$$\sigma_{a0} = 20 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1},$$

$$H_p = 8000 \text{ м},$$

$$H_a = 1000 \text{ м},$$

$$Ma = 0,7.$$

### *Анализ результатов и составление отчета*

Провести анализ особенностей полученных распределений, сопоставить их между собой.

## **Работа № 6. Расчет коэффициентов пропускания атмосферой инфракрасного излучения моря**

*Цель работы:* ознакомление учащихся с методикой расчета спектра коэффициента пропускания атмосферой инфракрасного (ИК) излучения моря, а также дать представление о механизме и степени влияния атмосферы на инфракрасное излучение моря.

### *Задачи работы*

1. Рассчитать коэффициенты пропускания атмосферой инфракрасного излучения над морем, трансформированного за счет частичного поглощения в атмосфере водяным паром и углекислым газом.

2. Построить графики спектрального распределения рассчитанных коэффициентов.

4. Проанализировать характер изменения с высотой рассчитанных величин в зависимости от длины волны излучения.

### *Порядок выполнения работы*

1. С помощью представленных ниже формул рассчитать коэффициенты пропускания инфракрасного излучения, обусловленные влиянием водяного пара и углекислого газа атмосферы:

$$\tau_i(\lambda) = \exp(-\alpha_i(\lambda)) m_i(z), \quad (1)$$

где  $\tau_i(\lambda)$  – коэффициент пропускания атмосферы, обусловленный поглощением излучения  $i$ -м газом;  $\alpha_i(\lambda)$  коэффициент поглощения излучения  $i$ -м газом;  $m_i(\lambda)$  – масса  $i$ -го газа в столбе атмосфера единичной площади и высотой  $z$ ;  $z$  – высота измерения излучения;  $\lambda$  – длина волны ИК излучения.

Массы газов зависят от вертикального распределения плотности газов и высоты регистрации излучения, что описывается уравнением:

$$m_i(\lambda) = \int_0^z \rho_i(z') dz'. \quad (2)$$

где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го газа.

Вертикальное распределение плотности газов по высоте определяется вертикальным распределением плотности воздуха и относительным содержанием газа в воздухе. Вертикальное распределение плотности воздуха по высоте описывается уравнением:

$$\rho_a = \rho_a^0 \exp\left(-\frac{z}{H_a}\right), \quad (3)$$

где  $\rho_a^0$  – плотность воздуха у морской поверхности;  $H_a$  – эквивалентная толщина атмосферы.

Углекислый газ сохраняет постоянное относительное содержание в воздухе во всей толще атмосферы.

$$\rho_{\text{CO}_2}(z) = s_{\text{CO}_2} \rho_a(z), \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{CO}_2}$  – плотность углекислого газа;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $s_{\text{CO}_2}$  – содержание углекислого газа в воздухе.

Средняя величина содержания углекислого газа в воздухе составляет 0,00003.

Содержание водяного пара в воздухе меняется по высоте в соответствии с уравнением:

$$s_{\text{H}_2\text{O}} = s_{\text{H}_2\text{O}}^0 \exp\left(-\frac{z}{H_{\text{H}_2\text{O}}}\right), \quad (5)$$

где  $H_{\text{H}_2\text{O}}$  – эквивалентная толщина атмосферы водяного пара, равная 2 км;  $s_{\text{H}_2\text{O}}^0$  – относительное содержание водяного пара в воздухе у морской поверхности.

Влияние озона на поглощение ИК излучения не учитывается, так как его влияние проявляется в относительно узкой области спектра. Объединяя представленные выше формулы, получим выражения для массы углекислого газа и водяного пара в единичном столбе атмосферы высотой  $z$ :

$$m_{\text{CO}_2} = \rho_a^0 s_{\text{CO}_2} H_a \left( 1 - \exp\left(-\frac{z}{H_a}\right) \right), \quad (6)$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_a^0 s_{\text{H}_2\text{O}}^0 \hat{H}_{\text{H}_2\text{O}} \left( 1 - \exp\left(-\frac{z}{\hat{H}_{\text{H}_2\text{O}}}\right) \right), \quad (7)$$

где  $\hat{H}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{H_{\text{H}_2\text{O}} \cdot H_a}{H_{\text{H}_2\text{O}} + H_a}$ .

В работе с помощью уравнений (1) и (6)–(7) рассчитываются коэффициенты пропускания для углекислого газа и водяного пара в диапазоне длин волн от 1 до 15 мкм. Далее рассчитывается суммарный коэффициент пропускания как произведение первых двух.

#### *Исходные данные*

Расчеты проводятся при следующих значениях входящих в уравнения параметров:

$$\rho_a^0 = 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$s_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 2 \cdot 10^{-3};$$

$$s_{\text{CO}_2} = 0,0003;$$

$$H_a = 10000 \text{ м};$$

$$H_{\text{H}_2\text{O}} = 2000 \text{ м}.$$

*Таблица*

**Коэффициенты поглощения водяного пара и углекислого газа (м<sup>2</sup> кг)**

$\lambda$ , мкм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$	40	0,02	0,03	20	40	50	40	0,02	0,01	0,01	0,03	0,07	0,15	0,8	2
$\alpha_{\text{CO}_2}$	0,03	0,04	50	0,05	40	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

*Задание к составлению отчета*

1. Выполнить расчеты коэффициентов пропускания для водяного пара, углекислого газа и суммарного при различных высотах регистрации излучения ( $z$ ).
2. Выделить области с высоким и низким значением коэффициентов пропускания.
3. Отметить характер изменения коэффициентов пропускания с высотой.

## **Работа № 7. Расчет составляющих инфракрасного излучения моря**

*Цель работы:* ознакомить учащихся с составляющими инфракрасного излучения моря и методикой их расчета, а также дать представление о механизме и степени влияния атмосферы на инфракрасное излучение моря.

*Задачи работы*

1. Рассчитать яркость восходящего инфракрасного излучения моря с учетом собственного излучения моря, трансформированного за счет частичного поглощения в атмосфере.
2. Рассчитать яркостную температуру восходящего излучения атмосферы за счет излучения водяным паром и углекислым газом.
3. Построить графики спектрального распределения яркостной температуры рассчитанных составляющих ИК излучения.
4. Сопоставить рассчитанные графики и проанализировать их характер изменения с высотой.

*Порядок выполнения работы*

1. С помощью представленных ниже формул рассчитать яркость восходящего инфракрасного излучения моря, а также определить яркостную температуру излучения. Для расчета яркости излучения моря следует использовать уравнение:

$$b_s(H) = b_{s0} \exp\left(-\sum_{i=1}^2 \int_0^H \alpha_i \rho_i dz\right), \quad (1)$$

где  $b_s(H)$  – яркость излучения моря на высоте  $H$ ;  $b_{s0}$  – яркость излучения у поверхности моря;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты поглощения водяного пара и углекислого газа соответственно;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность водяного пара и углекислого газа соответственно;  $z$  – высота горизонта над уровнем моря.

Составляющие ИК излучения атмосферы за счет водяного пара и углекислого газа рассчитываются из уравнения:

$$b_{ai}(H) = \int_0^H \alpha_i \rho_i(z) b_{ai}(z) \exp\left(-\sum_{i=1}^2 \int_0^z \alpha_i \rho_i dz'\right), \quad (2)$$

где  $b_{ai}(H)$  – яркость излучения  $i$ -го газа атмосферы на высоте  $H$  над уровнем моря;  $b_{ai}(z)$  – яркость излучения  $i$ -го газа атмосферы на высоте  $z$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты поглощения водяного пара и углекислого газа соответственно,  $\rho_1, \rho_2$  – плотность водяного пара и углекислого газа соответственно;  $z$  – высота горизонта над уровнем моря.

Входящие в уравнения яркость инфракрасного излучения моря и яркость инфракрасного излучения газов атмосферы находятся с помощью следующих уравнений:

$$b_{s0} = \frac{2\hbar c^2}{\lambda^5} \left( \exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda \kappa T_0}\right) - 1 \right)^{-1}, \quad (3)$$

$$b_{ai}(z) = \frac{2\hbar c^2}{\lambda^5} \left( \exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda \kappa T_a(z)}\right) - 1 \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $T_0$  – температура морской поверхности;  $T_a$  – температура атмосферных газов на горизонте  $z$ ;  $\hbar$  – постоянная Планка;  $\kappa$  – постоянная Больцмана;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $c$  – скорость света;  $z$  – высота над уровнем моря.

Вертикальное распределение плотности водяного пара находится из соотношения:

$$\rho_1(z) = \rho_a(z) \cdot a_1 \exp(-b_1 \cdot z), \quad (5)$$

$$\rho_2(z) = \rho_a(z) \cdot a_2, \quad (6)$$

где  $a_1, a_2, b_1$  – эмпирические коэффициенты.

Рассчитанную яркость излучения следует представить в виде яркостной температуры, воспользовавшись для этого уравнением Планка, преобразованным относительно температуры излучающей поверхности:

$$T_o = \frac{k\lambda}{\hbar c} \left[ \ln\left(\frac{2\hbar c^2}{\lambda^5 b_\lambda}\right) + 1 \right]^{-1}. \quad (6)$$

Вертикальное распределение температуры атмосферы  $T_a$  описывается уравнением:

$$T_a = \begin{cases} T_0 - \gamma \cdot z, & \text{если } z < 10 \text{ км} \\ T_0 - \gamma \cdot (10 \text{ км}), & \text{если } z \geq 10 \text{ км} \end{cases} \quad (7)$$

где  $T_0$  – температура морской поверхности;  $\gamma$  – эмпирический коэффициент.

Провести расчеты для длин волн от 1 до 15 мкм. По результатам расчетов построить графики спектрального распределения рассчитанных характеристик.

#### *Исходные данные*

Температуру морской поверхности принять равной 300 °К. Входящие в исходные уравнения константы имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,02, \\ b_1 &= 0,5 \text{ км}^{-1}, \\ a_2 &= 3 \cdot 10^{-4}, \\ \hbar &= 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \\ \kappa &= 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж град}^{-1}, \\ c &= 3 \cdot 10^8 \text{ м с}^{-1}. \end{aligned}$$

Значения коэффициентов поглощения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  выбираются из таблицы в соответствии с заданной величиной длины волны излучения (см. работу № 6).

#### *Анализ результатов и составление отчета*

Провести анализ особенностей полученных распределений, сопоставить их между собой.

## **Работа № 8. Расчет спектра коэффициентов пропускания атмосферой микроволнового излучения моря**

*Цель работы:* ознакомление учащихся с методикой расчета коэффициентов пропускания атмосферой микроволнового излучения моря, а также с особенностями их спектрального распределения.

#### *Задачи работы*

1. Рассчитать спектральное распределение коэффициентов пропускания микроволнового излучения моря.

2. Проанализировать особенности рассчитанных спектральных распределений.

3. Провести сопоставление рассчитанных характеристик.

*Порядок выполнения работы*

Всходящее микроволновое излучение моря при распространении в атмосфере трансформируется за счет его частичного поглощения водяным паром и кислородом. Яркостная температура собственного микроволнового излучения моря на высоте  $H$  с учетом его поглощения в атмосфере описывается уравнением:

$$T_1(\lambda) = T_0 \tau_w(\lambda) \tau_o(\lambda), \quad (1)$$

где  $T_0$  – яркостная температура поверхности моря;  $\tau_w(\lambda)$ ,  $\tau_o(\lambda)$  – коэффициенты пропускания атмосферы за счет влияния водяного пара и кислорода атмосферы соответственно.

Коэффициенты пропускания микроволнового излучения, обусловленные влиянием водяного пара и углекислого газа атмосферы рассчитываются из уравнения:

$$\tau_i(\lambda) = \exp(-\alpha_i(\lambda)) m_i(z), \quad (2)$$

где  $\tau_i(\lambda)$  – коэффициент пропускания атмосферы, обусловленный поглощением излучения  $i$ -м газом;  $\alpha_i(\lambda)$  коэффициент поглощения излучения  $i$ -м газом;  $m_i(\lambda)$  – масса  $i$ -го газа в столбе атмосферы единичной площади и высотой  $z$ ;  $z$  – высота измерения излучения;  $\lambda$  – длина волны микроволнового излучения.

Массы газов зависят от вертикального распределения плотности газов и высоты регистрации излучения, что описывается уравнением:

$$m_i(\lambda) = \int_0^z \rho_i(z') dz'. \quad (3)$$

Вертикальное распределение плотности газов по высоте определяется вертикальным распределением плотности воздуха и относительным содержанием газа в воздухе. Вертикальное распределение плотности воздуха по высоте описывается уравнением:

$$\rho_a = \rho_a^0 \exp\left(-\frac{z}{H_a}\right), \quad (4)$$

где  $\rho_a^0$  – плотность воздуха у морской поверхности;  $H_a$  – эквивалентная толщина атмосферы.

Из перечисленных выше газов кислород сохраняет постоянное относительное содержание в воздухе во всей толще атмосферы.

$$\rho_{\text{O}}(z) = s_{\text{O}_2} \rho_a(z), \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{O}}$  – плотность кислорода;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $s_{\text{O}_2}$  – относительное содержание кислорода в воздухе.

Средняя величина относительного содержания кислорода в воздухе составляет 0,2. Содержание водяного пара в воздухе меняется по высоте в соответствии с уравнением:

$$s_w = s_w^0 \exp\left(-\frac{z}{H_w}\right), \quad (6)$$

где  $H_w$  – эквивалентная толщина атмосферы водяного пара, равная 2 км;  $s_w^0$  – относительное содержание водяного пара в воздухе у морской поверхности.

Объединяя представленные выше формулы, получим выражения для массы углекислого газа и водяного пара в единичном столбе атмосферы высотой  $z$ :

$$m_{\text{O}_2} = \rho_a^0 s_{\text{O}_2} H_a \left(1 - \exp\left(-\frac{z}{H_a}\right)\right), \quad (7)$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_a^0 s_{\text{H}_2\text{O}}^0 \hat{H}_{\text{H}_2\text{O}} \left(1 - \exp\left(-\frac{z}{\hat{H}_{\text{H}_2\text{O}}}\right)\right), \quad (8)$$

где  $\hat{H}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{H_{\text{H}_2\text{O}} \cdot H_a}{H_{\text{H}_2\text{O}} + H_a}$ .

С помощью уравнений (2)–(6), а также (7)–(8) рассчитываются коэффициенты пропускания для кислорода и водяного пара в диапазоне длин волн от 1 до 15 см. Далее рассчитывается суммарный коэффициент пропускания как произведение первых двух. Находится регистрируемая яркостная температура моря путем умножения яркостной температуры моря на рассчитанные коэффициенты пропускания водяным паром и кислородом. Находятся яркостные температуры собственного излучения водяного пара и кислорода в том же диапазоне длин волн. Расчеты проводятся при следующих значениях входящих в уравнения параметров:

$$\rho_a^0 = 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$s_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 2 \cdot 10^{-3};$$

$$s_{\text{O}_2} = 0,2;$$

$$H_a = 10000 \text{ м};$$

$$H_{\text{H}_2\text{O}} = 2000 \text{ м};$$

$$\gamma = 6 \cdot 10^{-3} \text{ град} \cdot \text{м}^{-1}.$$

### *Анализ результатов и составление отчета*

Провести анализ особенностей полученных спектральных распределений коэффициентов пропускания, сопоставить их между собой. Приложить графики спектрального распределения коэффициентов пропускания.

*Таблица*

**Коэффициенты поглощения ( $\alpha$ ) ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ), микроволнового излучения водяным паром и кислородом в зависимости от длины волны ( $\lambda$ )**

$\lambda$ , мкм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\alpha_{\text{H}_2\text{O}} 10^4$	40	10	10	2	1	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,1
$\alpha_{\text{O}_2} 10^6$	$8 \cdot 10^3$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

## **Работа № 9. Расчет составляющих микроволнового излучения моря**

*Цель работы:* дать представление о механизме и степени влияния атмосферы на микроволновое излучение моря, а также ознакомление учащихся с методикой расчета составляющих микроволнового излучения моря.

### *Задачи работы*

1. Рассчитать яркость восходящего микроволнового излучения моря, трансформированного за счет частичного поглощения в атмосфере.
2. Рассчитать яркость составляющих собственного излучения атмосферы.

3. Построить графики распределения яркостной температуры излучения моря и составляющих собственного излучения атмосферы.

4. Выделить особенности построенных графиков и сопоставить их между собой.

*Порядок выполнения работы*

1. С помощью представленных ниже формул рассчитать яркость восходящего инфракрасного излучения над морем, а также определить яркостную температуру излучения. Для расчета яркости излучения моря и составляющих излучения атмосферы следует использовать уравнения:

$$T_s(H) = T_{s0} \exp\left(-\sum_{i=1}^2 \int_0^H \alpha_i \rho_i dz\right), \quad (1)$$

$$T_i(H) = \int_0^H \alpha_i \rho_i(z) T_a(z) \exp\left(-\sum_{i=1}^2 \int_0^z \alpha_i \rho_i dz'\right), \quad (2)$$

где  $T_s(H)$  – яркостная температура излучения моря на высоте  $H$ ;  $T_i(H)$  – яркостная температура составляющих излучения  $i$ -го газа атмосферы на высоте  $H$ ;  $T_{s0}$  – яркостная температура излучения моря у поверхности;  $T_a(z)$  – яркостная температура излучения атмосферы на высоте  $z$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты поглощения водяного пара и кислорода соответственно;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность водяного пара и кислорода соответственно;  $z$  – высота горизонта над уровнем моря.

Входящее в уравнения (1)–(2) вертикальное распределение плотности водяного пара и кислорода находится из соотношений:

$$\rho_1(z) = \rho_a(z) \cdot a_1 \exp(-b_1 \cdot z), \quad (4)$$

$$\rho_2(z) = \rho_a(z) \cdot a_2, \quad (5)$$

где  $a_1, a_2, b_1$  – эмпирические коэффициенты.

Вертикальное распределение температуры атмосферы  $T_a$  описывается уравнением:

$$T_a = \begin{cases} T_0 - \gamma \cdot z, & \text{если } z < 10 \text{ км} \\ T_0 - \gamma \cdot (10 \text{ км}), & \text{если } z \geq 10 \text{ км} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $T_0$  – температура морской поверхности;  $\gamma$  – эмпирический коэффициент.

По результатам расчетов построить графики спектрального распределения рассчитанных характеристик.

### *Исходные данные*

Входящую в уравнение (1) температуру морской поверхности принять равной 300 °К. Для входящих в уравнения (1)–(2) констант принять следующие значения:

$$\begin{aligned}a_1 &= 0,02, \\ b_1 &= 0,5 \text{ км}^{-1}, \\ a_2 &= 3 \cdot 10^{-4}, \\ \gamma &= 6 \cdot 10^{-3} \text{ град} \cdot \text{м}^{-1}.\end{aligned}$$

Значения коэффициентов поглощения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  выбираются из таблицы в соответствии с заданной величиной длины волны излучения.

### *Анализ результатов и составление отчета*

Приложить графики спектрального распределения рассчитанных характеристик. Провести анализ особенностей полученных распределений, сопоставить их между собой.

## **Литература**

1. Царев В.А., Коровин В.П. Неконтактные методы измерений в океанологии. – СПб.: РГГМУ, 2005. – 184 с.
2. Рис У. Основы дистанционного зондирования. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
3. Митник Л.М. Физические основы дистанционного зондирования окружающей среды. – Л.: ЛПИ, 1977. – 56 с.
4. Вагапов Р.Х. и др. Дистанционные методы исследования морских льдов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1993. – 324 с.
5. Кондратьев К.Я. и др. Космическая дистанционная индикация акваторий и водосборов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1992. – 248 с.
6. Быченкова И.А. и др. Дистанционное определение температуры моря. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 223 с.

## Содержание

Работа № 1. Расчет спектрального распределения интенсивностей отраженного солнечного излучения и собственного излучения моря . . . . .	3
Работа № 2. Расчет электромагнитных характеристик морской воды . . . . .	4
Работа № 3. Расчет составляющих оптического излучения моря . . . . .	7
Работа № 4. Расчет оптического эхосигнала . . . . .	8
Работа № 5. Расчет коэффициентов пропускания атмосферой оптического излучения моря . . . . .	10
Работа № 6. Расчет коэффициентов пропускания атмосферой инфракрасного излучения моря. . . . .	13
Работа № 7. Расчет составляющих инфракрасного излучения моря . . . . .	16
Работа № 8. Расчет спектра коэффициентов пропускания атмосферой микроволнового излучения моря. . . . .	18
Работа № 9. Расчет составляющих микроволнового излучения моря . . . . .	21
Литература . . . . .	23

*Учебное издание*

Валерий Анатольевич Царев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«НЕКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

*Начальник РИО А.В. Ляхтейнен  
Редактор Л.Ю. Кладова  
Верстка М.В. Ивановой*

---

Подписано к публикации 13.07.2022. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,5. Заказ № 1251

РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79.

---