

Структура излучающего слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне и модели подповерхностного микропузырькового слоя по натурным измерениям собственных излучений атмосферы и морской поверхности в инфракрасном диапазоне

И.Т. Бубукин, В.И. Бубукин

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-исследовательский радиофизический институт"

603950, г. Нижний Новгород. Большая Печерская ул, д. 25/12а, E-mail: bubn@nirfi.sci-nnov.ru

В результате экспериментальных и теоретических исследований морской поверхности в инфракрасном (ИК) диапазоне показано, что имеющиеся данные натурального эксперимента согласуются с моделью тонкого (по сравнению со скин-слоем ИК-диапазона) микропузырькового слоя с величиной доли воздуха в микропузырьковом слое $0.5 \div 0.6$ и толщиной слоя ~ 2 мкм.

As a result of experimental and theoretical studies of the sea surface in the infrared (IR) region shows that the available data field experiment are consistent with a model of a thin (compared with the skin layer IR) microbubbles layer with the value of the ratio of air in the microbubble layer $0.5 \div 0.6$ and a thickness layer ~ 2 microns.

Введение

Пленочный слой морской поверхности непосредственно граничит с атмосферой, через него идут интенсивные процессы газообмена между атмосферой и морем, и в нем максимальная концентрация растворенных атмосферных газов. Разработанные в НИРФИ методы и приборы для исследования физических процессов в пленочном слое взволнованной морской поверхности в ИК-диапазоне позволили исследовать его структуру и обнаружить существенное отличие диэлектрических свойств верхней части пленочного слоя, граничащего с атмосферой, от данных лабораторных измерений [1]. Обнаруженный эффект объясняется наличием под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности слоя (толщиной в десятки микрон), заполненного смесью воды и воздуха - микропузырькового слоя. Основная его характеристика ρ - объемная доля воздуха в микропузырьковом слое по данным натурных измерений существенно изменчива и зависит от внешних условий [2]. Данные натурных измерений ранее интерпретировались в однослойной модели оптически толстого однородного слоя с толщиной, по крайней мере, 1.5-2 толщин скин-слоя, состоящего из статистической смеси воды и микропузырьков воздуха, формирующегося под пленкой поверхностного натяжения. Полученные в эксперименте значения отражательной способности позволяли, в рамках однородного слоя, определить концентрацию воздуха в микропузырьковом слое, а обнаруженная в эксперименте существенная изменчивость отражательной способности морской поверхности в ИК-диапазоне, связывалась с изменением концентрации воздуха в микропузырьковом слое. Однако всплывающие пузырьки воздуха должны концентрироваться под пленкой поверхностного натяжения, что учитывается двухслойной моделью: оптически тонкий микропузырьковый слой с максимальной концентрацией воздуха — вода.

Двухслойная радиофизическая модель излучения сильно поглощающей среды, покрытой полупрозрачным поглощающим слоем с существенно отличающейся диэлектрической проницаемостью.

Отражение и преломление плоской монохроматической электромагнитной волны на плоской границе раздела двух сред.

Самая простая задача о распространении волн в неоднородной среде – это задача о падении плоской монохроматической волны на плоскую границу двух сред с различными свойствами. При этом возникают преломленная (прошедшая) и отраженная волны. Пусть граница раздела между двумя полубесконечными однородными средами совпадает с плоскостью $Z=0$. Среда расположенная сверху ($Z > 0$) и снизу ($Z < 0$) от границы, характеризуются соответственно параметрами ε_1, μ_1 и ε_2, μ_2 . Здесь $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon'_{1,2} - i\varepsilon''_{1,2}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды, индексы 1 и 2 относятся к верхней и нижней средам. Так как морская вода является немагнитной средой магнитные проницаемости будем считать $\mu_1 = \mu_2 = 1$. На эту границу из первой среды падает плоская волна под углом θ_1 к оси Z . При этом образуются отраженная волна под углом θ_0 и волна прошедшая внутрь второй среды под углом θ_2 . В этом случае коэффициенты отражения $r^{\varepsilon, \varepsilon'}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \theta_1, \theta_2)$ по полю описываются формулами Френеля [3]:

$$r^{\varepsilon} = \frac{E_0}{E_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_2} \quad (1)$$

$$r^{\varepsilon'} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_2}$$

здесь индексы $\varepsilon, \varepsilon'$ означают вид поляризации: вертикальную (ε) – когда вектор электрического поля лежит в плоскости падения, и горизонтальную (ε') – когда вектор электрического поля перпендикулярен ей, индексы 1 и 2 относятся к средам, $\theta_{0,1,2}$ – углы от вертикальной оси Z . Углы падения θ_1 , отражения θ_0 и преломления θ_2 связаны соотношениями (закон отражения и закон Снеллиуса):

$$\theta_0 = \theta_1$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (2)$$

Если поглощение сред равно нулю и $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ действительные, то углы $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ – действительные углы между нормалью к фронту преломленной волны и вертикальной осью Z . Но соотношения (1) и (2) справедливы и в случае сред с поглощением (комплексная диэлектрическая проницаемость сред) [3].

Отражение плоской монохроматической электромагнитной волны на плоской границе раздела двухслойной среды.

В случае падения плоской монохроматической волны на двухслойную среду, состоящую из полубесконечной поглощающей среды, покрытой полупрозрачным слоем с отличающейся диэлектрической проницаемостью (рис. 1), задача существенно усложняется из-за переотражения волн на границах раздела.

На рис. 1 пунктирные наклонные прямые показывают результаты многократного переотражения волны от верхней и нижней границ слоя. Решение данной задачи для сред без потерь приведено в [4]. По аналогичной методике, с учетом того, что соотношения (1) и (2) справедливы и для комплексных параметров было получено соотношение для коэффициента отражения двухслойной среды $r_{123}^{\varepsilon, \varepsilon'}$ с поглощением:

$$r_{123}^{e,e} = \frac{r_{12}^{e,e} + r_{23}^{e,e} \cdot \exp\left(-i2 \frac{\omega}{c} l \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}\right)}{1 + r_{12}^{e,e} \cdot r_{23}^{e,e} \cdot \exp\left(-i2 \frac{\omega}{c} l \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}\right)} \quad (3)$$

здесь $r_{12}^{e,e}$ и $r_{23}^{e,e}$ - коэффициенты отражения на границах сред 1-2 и 2-3, ω - круговая частота, c - скорость света, l - толщина слоя, i - мнимая единица.

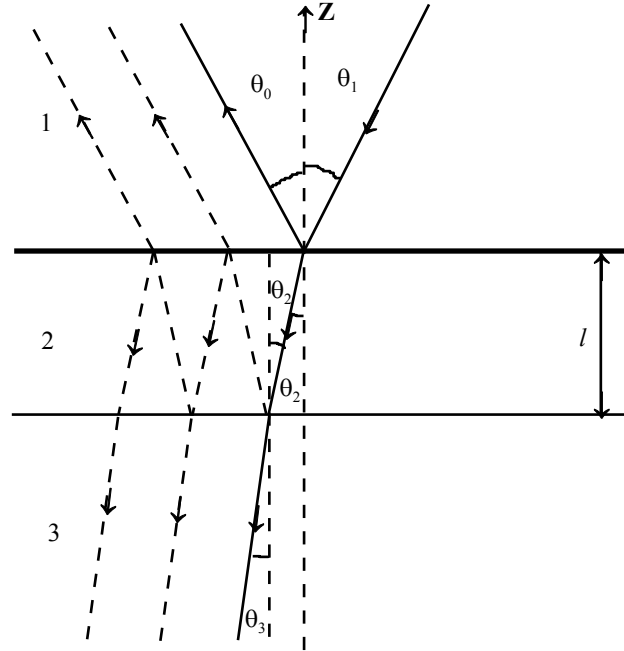


Рис. 1. Формирование потока излучения на границе двухслойной среды.

Соотношения для $r_{12}^{e,e}$ и $r_{23}^{e,e}$ были получены из (1) и (2), для случая $\varepsilon_1 = 1$ (первая среда - воздух). При выводе комплексные углы θ_2, θ_3 выражались через угол падения θ_1 .

$$\begin{aligned} r_{12}^e &= \frac{\varepsilon_2 \cdot \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}}{\varepsilon_2 \cdot \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}} \\ r_{12}^e &= \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}} \\ r_{23}^e &= \frac{\varepsilon_3 \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} - \varepsilon_2 \cdot \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}}{\varepsilon_3 \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} + \varepsilon_2 \cdot \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}} \\ r_{23}^e &= \frac{\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} - \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}}{\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} + \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}} \end{aligned} \quad (4)$$

Излучательная (отражательная) способность двухслойной среды.

В соответствии с методом Левина-Рытова [5] спектральная интенсивность в данном направлении пропорциональна той мощности, которую поглощает среда при падении на нее плоской электромагнитной волны, идущей с этого направления. Таким образом, задача по определению теплового излучения двухслойной среды сводится к более

простой задаче об отражении плоской волны. В результате получим коэффициент излучения двухслойной среды $J_{123}^{6,\varepsilon}$ через плотность потока энергии, рассеянный в верхнее полупространство, то есть через коэффициент отражения по мощности $R_{123}^{6,\varepsilon}$:

$$\begin{aligned} R^{6,\varepsilon} &= |r^{6,\varepsilon}|^2 \\ J^{6,\varepsilon} &= 1 - R^{6,\varepsilon}(\varepsilon_2, \theta_1) \\ R_{123}^{6,\varepsilon} &= |r_{123}^{6,\varepsilon}|^2 \\ J_{123}^{6,\varepsilon} &= 1 - R_{123}^{6,\varepsilon}(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \theta_1) \end{aligned} \quad (5)$$

Аналитические соотношения (3), (4) и (5) являются радиофизической моделью излучения двухслойной поглощающей среды, то есть решением поставленной задачи.

Натурные измерения собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне. Получение данных о максимальной концентрации воздуха в подповерхностном слое, состоящем из смеси воды и микропузырьков воздуха и определение параметров двухслойной модели собственного излучения поверхности акваторий.

Исследования излучений морской поверхности проводились в Отузском заливе Черного моря. Аппаратура была установлена на конце пирса Карадагского природного заповедника, имеющего свайное основание. Измерения проводились летом (июль, август), в ночное время. Расстояние от берега ~100 м, глубина в месте измерений ~2 м. Измерения проводились с помощью измерительного стенда, состоящего из двух приемников ИК-диапазона, позволяющих проводить одновременные абсолютные измерения угломестных распределений интенсивностей ИК-излучения морской поверхности и атмосферы в натуральных условиях. Диапазон длин волн принимаемого инфракрасного (ИК) – излучения: 8-14 мкм. Диапазон температур (интенсивностей) принимаемого ИК-излучения от -40° до $+40^\circ\text{C}$. Угловое разрешение составляло 1.2° (ширина области видимости) по уровню энергии 90% для каждого из приемников. Полный цикл измерений занимал около часа и заключался в последовательной синхронной регистрации ИК-излучений атмосферы и морской поверхности на углах от 0° до $\pm 60^\circ$. Абсолютные температурные шкалы ИК-приемников определялись по излучению абсолютно черного тела находившегося при температуре окружающего воздуха. Одновременно с ИК-измерениями измерялись температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра на высоте 5 м над морской поверхностью и температура воды на глубине 1 м.

На графике рис. 2 приведено распределение измеренных величин объемной концентрации микропузырьков воздуха в скин-слое ИК-излучения (однослойная модель) в диапазоне 8-14 мкм в зависимости от разности температур воды в поверхностной температурной пленке и на глубине 1 м, изменявшейся в пределах $-1.2 < (T_w - T_{\text{вода}}) \leq 0$. Прямая линия на графике представляет регрессионную зависимость:

$$\rho = -0.306 \cdot (T_w - T_{\text{вода}}) + 0.224 \quad (6)$$

с коэффициентом корреляции $K = -0.84$. Объемная концентрация максимальна $\rho_{\text{макс}} = 0.57$ при наибольшей по абсолютной величине разности температур и падает при ее уменьшении. График характеризует продуцирование воздушных микропузырьков в процессе конвективного переноса. Насыщенная атмосферными газами вода на поверхности охлажденная и более соленая благодаря испарению становится тяжелой и тонет в нижележащих слоях, имеющих более высокую

температуру воды. Максимальный перепад температур воды равен разности ($T_W - T_{вода}$). В соответствии с тепловым эффектом концентрация насыщенного раствора в затонувшей воде должна уменьшиться, а избыток растворенных газов выделяется в виде воздушных микропузырьков, всплывающих к поверхности и удерживаемых поверхностным давлением под пленкой поверхностного натяжения.

В случае двухслойной модели наблюдаемая изменчивость связана не с изменениями объемной концентрации воздуха, которая постоянна и равна максимально возможной, а с изменениями толщины слоя. Для определения объемной концентрации воздуха в двухслойной модели, в серии натуральных измерений необходимо выделить случаи предельных концентраций воздуха, что соответствует оптически толстому однородному микропузырьковому слою. Как видно из рис. 2 объемная концентрация воздуха максимальна при минимальной разности температур и равна $\rho_{\max} = 0.57$. Принимаем ее за максимальную концентрацию, необходимую для построения двухслойной модели, где изменчивость связана с толщиной полупрозрачного микропузырькового слоя.

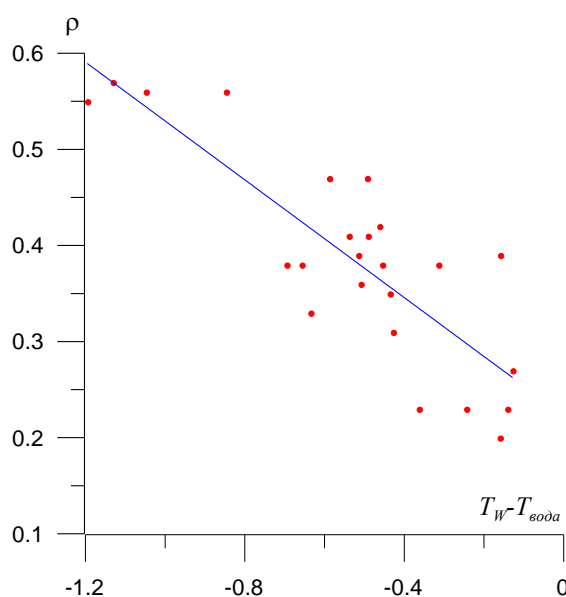


Рис.2. Зависимость объемной концентрации воздушных микропузырьков ρ в скин-слое ИК-излучения в зависимости от от разности температур воды в поверхностной температурной пленке T_W и на глубине 1 м.

В рамках двухслойной модели с помощью алгоритма решения обратной задачи по определению характеристик микропузырькового слоя на основе соотношений (3), (4) и (5), была проведена обработка части данных наблюдений показанных на рис. 2. при максимальной концентрации воздуха $\rho_{\max} = 0.57$. На рис. 3 показана зависимость толщины микропузырькового слоя l в рамках двухслойной модели от угла визирования h (от горизонта) для одного из сеансов измерений.

Так как толщина не должна зависеть от угла визирования то среднее значение дает толщину слоя, а разброс точек характеризует ошибку измерений. Таким образом, по данным натурального эксперимента толщина слоя в двухслойной модели в данном сеансе равна $l = 1.8 \pm 0.2 \text{ мкм}$.

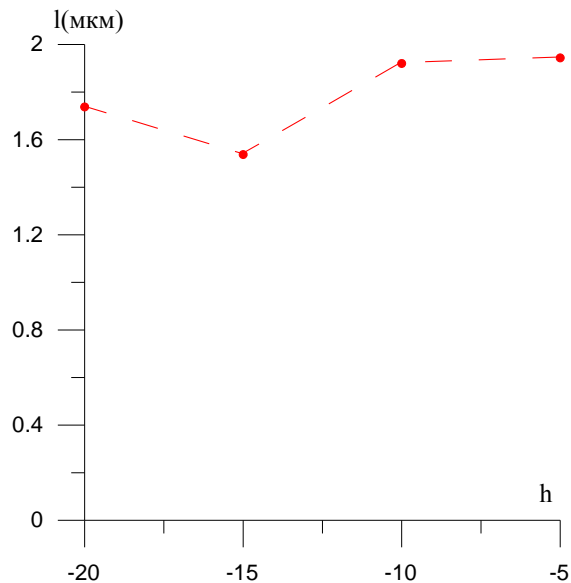


Рис.3. Зависимость толщины микропузырькового слоя l в рамках двухслойной модели от угла визирования для одного из сеансов измерений.

В результате проведенных натурных измерений собственных излучений атмосферы и морской поверхности в ИК-диапазоне и теоретических исследований показано:

1. Радиофизическая модель собственного излучения двухслойной поглощающей среды, состоящей из среды с сильным поглощением, покрытой полупрозрачным поглощающим слоем с отличающейся диэлектрической проницаемостью применима для собственного ИК-излучения слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности, состоящего из смеси воды и микропузырьков воздуха и находящейся под ним водной среды.

2. Получены данные о максимальной концентрации воздуха в подповерхностном слое $\rho_{\text{макс}} = 0.57$, состоящем из смеси воды и микропузырьков воздуха (однослойная модель) и определены параметры двухслойной модели: концентрация воздуха $\rho = 0.5 \div 0.6$ и толщина $l \approx 2 \text{ мкм}$.

Литература

1. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Дистанционная диагностика пленочного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне // Радиотехника и электроника.- 2012.- Т.57.- №10. -С.1089-1098.
2. Бубукин, И.Т. Газообмен между морем и атмосферой и механизм образования микропузырькового слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности по натурным измерениям собственных излучений этих сред в ИК диапазоне и метеоданных/ И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич // Труды IV Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (III Всероссийские Армандовские чтения), 25-27 июня 2013 г.- г.Муром.- 2013.- С.39-43.
3. Виноградова, М.Б. Теория волн/ М.Б. Виноградова, О.В.Руденко, А.П.Сухоруков.- М.:Наука, 1979.-383с.
4. Башаринов, А.Е. Измерение радиотепловых и плазменных излучений/ А.Е. Башаринов, Л.Т.Тучков, В.М.Поляков, Н.И.Ананов.- М.:Советское радио, 1968.-390с.
5. Левин, М.Л. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике/ М.Л.Левин, С.М.Рытов.- М.: Наука, 1967.-308с.