

## **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

*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](mailto:bubn@nirfi.sci-nnov.ru), [stnk@nirfi.sci-nnov.ru](mailto:stnk@nirfi.sci-nnov.ru)*

*По натурным измерениям собственных излучений атмосферы и морской поверхности в ИК-диапазоне и теоретических исследований было установлено, что обнаруженный ранее микропузырьковый воздушный слой под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности является универсальным образованием в структуре морской поверхности холодного пограничного слоя, возникающим в следствие фундаментальных процессов тепло и газообмена на границе атмосфера – морская поверхность.*

*According to in-situ measurements of the atmosphere and its own radiation of the sea surface in the infrared range and theoretical studies have shown that the observed earlier microbubble air layer below the surface film of the sea surface is a universal form in the structure of cold sea surface boundary layer arising in consequence of the fundamental processes of heat and gas exchange on the edge of the atmosphere - the sea surface.*

### **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  $\rho$  - объемная доля воздуха в микропузырьковом слое по данным натурных измерений существенно изменчива и зависит от внешних условий [2]. Расширение объема экспериментальных данных о параметрах поверхностной пленки морской поверхности по натурным измерениям в ИК-диапазоне, с синхронно измеренными рядами метеоданных (скорость ветра, температура и влажность воздуха) позволяют выявить зависимость параметров микропузырькового слоя от состояния водной поверхности и приповерхностной атмосферы и исследовать механизм образования микропузырькового слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности.

### **Растворение атмосферных газов в морской воде. Образование микропузырькового слоя под пленкой поверхностного натяжения.**

Между атмосферой и морем через морскую поверхность интенсивно идут процессы энерго и массо переноса. Они влияют на структуру (стратификацию) приповерхностного слоя морской воды. Для интерпретации результатов измерения собственного излучения морской поверхности в ИК диапазоне рассмотрим один из процессов массопереноса – растворение атмосферных газов, кислорода и азота, в воде через морскую поверхность [3].

Процессы растворения всегда сопровождаются выделением или поглощением тепла. Тепловой эффект – количество тепла, поглощающегося или выделяющегося при растворении вещества при постоянном давлении равен [4].

$$Q_p = kT^2 n \frac{\partial \ln C_0}{\partial T}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,

$T$  – абсолютная температура,

$n$  – число растворяющихся молекул вещества,

$C_0$  – растворимость – молекулярная концентрация насыщенного раствора.

Из (1) следует, что тепловой эффект однозначно определяется зависимостью растворимости от температуры. Тепловой эффект при растворении в воде газов, в том числе атмосферных, всегда положительный, т.е.  $Q_p < 0$  и, следовательно, производная должна быть отрицательной  $\frac{\partial C_0}{\partial T} < 0$ . Поэтому при возрастании температуры

растворимость должна падать. При этом часть растворенных газов должна выделиться из раствора. Эти выводы соответствуют принципу Ле-Шателье: для сохранения равновесия система противодействует внешнему воздействию, выводящему ее из равновесия [4]. Поэтому в насыщенном растворе при повышении температуры уменьшается тепловой эффект в следствие уменьшения растворимости. При охлаждении насыщенного раствора растворимость должна повыситься так, чтобы произошло дополнительное растворение, и за счет теплового эффекта в растворе выделилось тепло.

Так как растворимость воздуха в морской воде определяет температура воды в поверхностной температурной пленке, то в случае холодного пограничного слоя образуется насыщенный раствор атмосферных газов, имеющий температуру меньшую, чем температура воды ниже пленочного пограничного слоя. Вода с поверхности, опускаясь вследствие свободной конвекции, попадает в слои с более высокой температурой и, следовательно, должен уменьшаться тепловой эффект, а с ним уменьшается молекулярная концентрация растворенных атмосферных газов. Их избыток выделяется из раствора в виде воздушных микропузырьков, которые всплывают и удерживаются поверхностным давлением под пленкой поверхностного натяжения, образуя тонкий, толщиной несколько микрон, микропузырьковый воздушный слой. Объемная концентрация воздушных микропузырьков при постоянной температуре может варьироваться в зависимости от атмосферного давления, поскольку основные атмосферные газы создают слабый раствор, в котором растворимость по закону Генри [4] пропорциональна их парциальному давлению.

Толщина холодного пограничного слоя при свободной конвекции и слабых ветрах во всех случаях не превышает 5-7 мм, он обычно не имеет четкой нижней границы и по толщине практически совпадает с вязким подслоем [5]. Вертикальный профиль температуры имеет вблизи поверхности квазилинейный участок толщиной около 2 мм, в котором температурный градиент наибольший. Под ним располагается переходный слой, занимающий всю нижнюю часть термического пограничного слоя, его толщина максимальна в условиях свободной конвекции. За пределами пограничного слоя заметные температурные градиенты не наблюдались. Общий перепад температур воды на поверхности и ниже холодного пограничного слоя не превосходит  $-1^\circ\text{C}$ . В холодном пограничном слое, на глубине наибольших температурных градиентов происходит уменьшение концентрации растворенных атмосферных газов и выделение их избытка в виде газовых микропузырьков.

Образование тонкого микропузырькового воздушного слоя является частью единого процесса газообмена между атмосферой и морской поверхностью и является

следствием температурной зависимости растворимости воздуха в воде, которая возрастает при охлаждении и падает при нагреве.

### **Натурные измерения собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне, с синхронными измерениями рядов метеоданных.**

Образование микропузырькового воздушного слоя в пленочном слое изменяет отражательную и излучательную способности морской поверхности в ИК диапазоне, и эти изменения были обнаружены в натурных условиях с помощью созданных в НИРФИ методов [1]. Натурные измерения собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне с синхронно измеренными метеоданными (направление и скорость ветра, температура и влажность воздуха) позволяют выявить зависимость параметров пленочного слоя (доли воздуха в микропузырьковом слое -  $\rho$ ) от состояния водной поверхности и метеорологических параметров приземной атмосферы.

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 оперативные одновременные абсолютные измерения угломестных распределений интенсивностей ИК-излучения морской поверхности и атмосферы в натурных условиях с повышенной точностью, благодаря исключению влияния нестационарности излучений сред. Диапазон длин волн принимаемого инфракрасного (ИК) – излучения: 8-14 мкм. Диапазон температур (интенсивностей) принимаемого ИК-излучения от  $-40^{\circ}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ . Угловое разрешение составляло  $1.2^{\circ}$  (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  $0^{\circ}$  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.

Получаемые ряды данных являются случайными функциями времени и выявление связи производилось методами регрессионного анализа. Параметры линейной регрессии определялись из минимума среднеквадратичного отклонения регрессионной прямой от экспериментальных точек (метод наименьших квадратов).

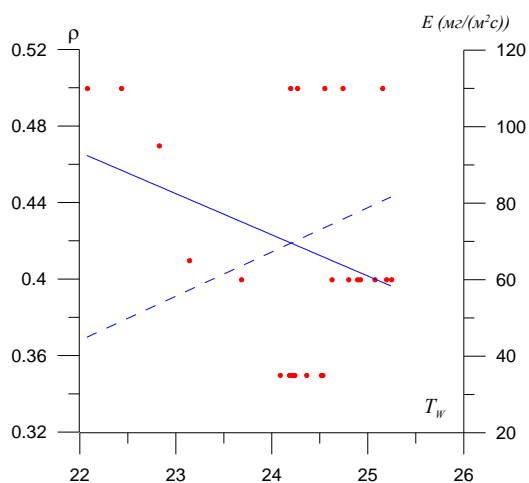
На графике рис. 1 представлены данные измерений объемной концентрации воздушных микропузырьков  $\rho$  в скин-слое ИК-излучения в зависимости от температуры воды  $T_w$  в поверхностной температурной пленке морской поверхности, которая аппроксимирована регрессионным уравнением, на графике - прямая линия. В интервале температур воды  $T_w$  от 22 до 26  $^{\circ}\text{C}$  регрессионное уравнение имеет вид:

$$\rho = -0.022 \cdot (T_w - 23) + 0.44 \quad (2)$$

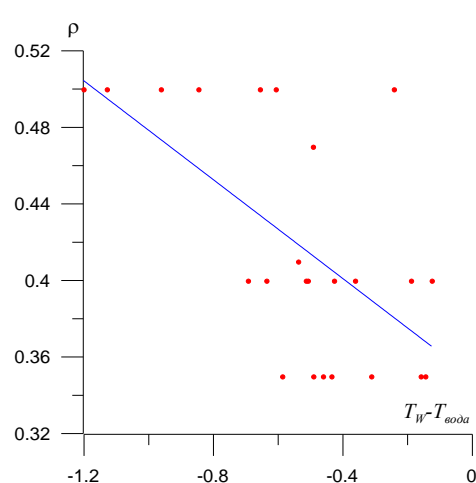
Поскольку воздушные микропузырьки могут выделяться только из насыщенного раствора, то их присутствие означает, что растворение атмосферных газов идет с образованием насыщенного раствора этих газов в поверхностном слое морской воды. Из графика видно, что объемная концентрация микропузырьков воздуха зависит от температуры и уменьшается с ее ростом, что означает уменьшение концентрации насыщенного раствора, из которого она образуется и является следствием

температурной зависимости растворимости атмосферных газов, падающей с ростом температуры воды. На графике рис. 1 также нанесена регрессионная зависимость потока влажности от температуры воды морской поверхности (пунктирная линия, правая ось) для иллюстрации массопереноса между атмосферой и морем: два разнонаправленных процесса идут одновременно – испарение воды и растворение атмосферных газов, кислорода и азота, в морской воде холодного поверхностного слоя.

Были проведены также исследования воздействия ветра со скоростями в интервале от 1.2 до 3.2 м/с на величину объемной концентрации микропузырьков воздуха под пленкой поверхностного натяжения, но заметная зависимость не была обнаружена.



**Рис.1.**



**Рис.2.**

**Зависимость объемной концентрации воздушных микропузырьков  $\rho$  в скин-слое ИК-излучения в зависимости от температуры воды  $T_w$  (точки) и ее регрессионная прямая (сплошная, левая ось) и регрессионная зависимость потока влажности  $E$  ( $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ ) (пунктир, правая ось) от температуры воды  $T_w$  (Рис.1) и величин объемной концентрации  $\rho$  в зависимости от разности температур воды в поверхностной температурной пленке  $T_w$  и на глубине 1 м (Рис.2).**

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

$$\rho = -0.129 \cdot (T_w - T_{\text{сод}a}) + 0.35 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции  $K = -0.61$ . Объемная концентрация максимальна  $\rho_{\text{max}} = 0.5$  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  $(T_w - T_{\text{сод}a})$ . 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.

Таким образом, в результате проведенных натуральных измерений собственных излучений атмосферы и морской поверхности в ИК-диапазоне и теоретических исследований было установлено, что обнаруженный микропузырьковый воздушный слой является универсальным образованием в структуре морской поверхности холодного пограничного слоя, возникающим в следствие фундаментальных процессов тепло и газообмена на границе атмосфера – морская поверхность.

### **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., Станкевич К.С. "Структура поверхностной пленки морской поверхности по натурным измерениям в ИК-диапазоне" // Труды XXIII Всероссийской научной конференции по "Распространению радиоволн", Труды конференции, 23-26 мая 2011 г., г.Йошкар-Ола, стр.161-164.
3. Химия океана. Т.1. Под редакцией Бордовского О.К. и Иваненкова В.Н. Из-во «Наука». М. 1979.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Теоретическая физика. Т.V. Из-во «Наука». М. 1964.
5. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Ленинград. Гидрометеиздат. 1988.