

## **Тепловой баланс потоков на границе атмосферы и термической пленки морской поверхности по натурным дистанционным измерениям собственных излучений этих сред в ИК и СВЧ диапазонах**

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 одновременным натурным измерениям собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК(8-14 мкм) и СВЧ(4 см) диапазонах получены температуры в пленочном слое морской поверхности, полный тепловой поток из моря в атмосферу, составляющие теплового баланса потоков на границе и параметры турбулентного теплопереноса в приповерхностном слое атмосферы. Показано, что использование данных лабораторных измерений о диэлектрических свойствах чистой воды в скин-слое ИК-диапазона приводит к ошибочным выводам о величине и направлении теплового потока на границе-море-атмосфера.*

*From simultaneous measurements of thermal radiation of sea surface and the atmosphere in the infrared (8-14 microns) and microwave (4 cm) bands were obtained in the temperature of the film layer of the sea surface, the total heat flux from the sea into the atmosphere, the heat balance of flows at the border and the parameters of the turbulent heat transfer in the surface layer of the atmosphere. It is shown that the use of a priori data on the dielectric properties of water in the skin layer of IR leads to erroneous conclusions about the magnitude and direction of heat flow in the boundary-sea-atmosphere system.*

### **Введение**

Пленочный слой морской поверхности непосредственно граничит с атмосферой, и массо и энергообмен в системе "водная поверхность-атмосфера" определяется состоянием пленочного слоя. В поверхностном слое воды толщиной до 2 мм перенос тепла осуществляется молекулярной теплопроводностью, что позволяет по измерениям собственного излучения морской поверхности на двух длинах волн с разной толщиной скин-слоя внутри поверхностной пленки определять градиент температуры и поток энергии из моря в атмосферу [1]. Отражательная способность морской воды формируется в скин-слое толщиной 0.02 мм в инфракрасном диапазоне (8-14 мкм) и 1.5-2 мм в сантиметровом диапазоне длин волн, что дает возможность измерять тепловые потоки на границе атмосферы и морской поверхности по её собственному тепловому излучению. В реальных условиях волнения измерения температуры и диэлектрических характеристик воды в поверхностной пленке возможны только дистанционными методами по данным точных абсолютных измерений яркостной температуры собственного излучения и коэффициента отражения воды в скин-слое. В НИРФИ разработаны методы одновременного измерения температуры и отражательной способности водной поверхности [2], в том числе в инфракрасном [3, 4], и сантиметровом [5] диапазонах длин волн, что позволяет при одновременных измерениях получать баланс потоков на границе море-атмосфера.

**Одновременные натурные измерения излучений морской поверхности и атмосферы в ИК и СВЧ диапазонах. Тепловые потоки в пленочном слое морской поверхности.**

Исследования излучений морской поверхности в диапазоне 8-14 мкм (ИК) и 4 см (СВЧ) 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, на угле визирования  $h = -37^\circ$  от горизонта.

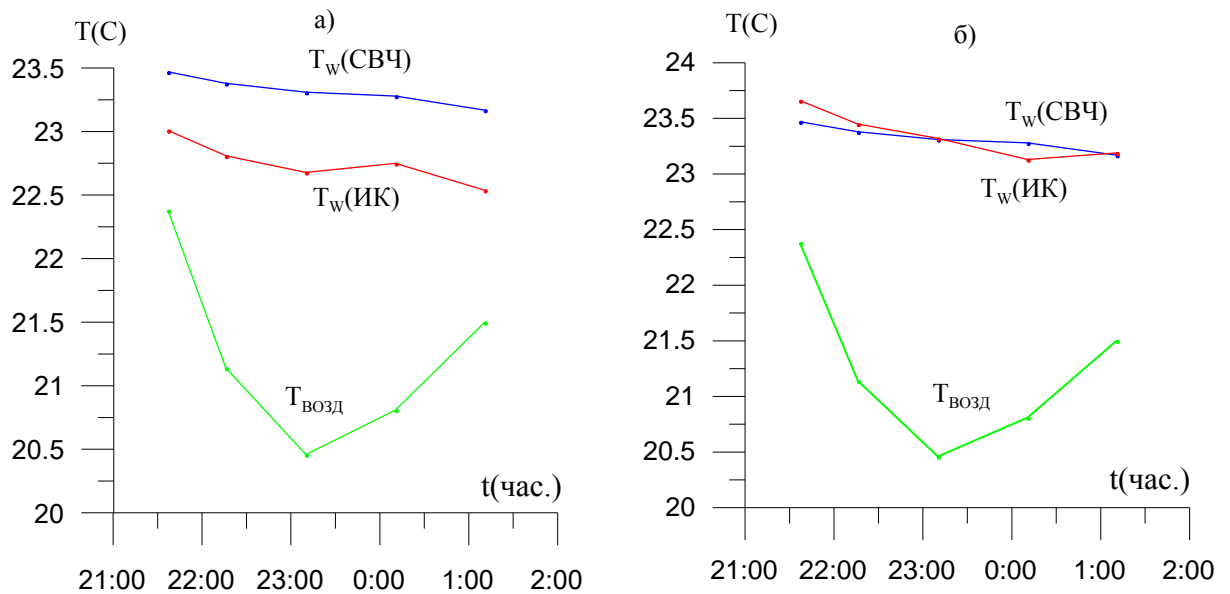
СВЧ измерения. Измерения проводились на длине волны 4 см фазово-поляризационной радиометрической системой [5]. Калибровка проводилась по излучению абсолютно черного тела при температуре окружающего воздуха. Толщина скин-слоя составляла  $l_{4\text{см}} = 1.7\text{мм}$ . Влияние крупномасштабного волнения (зыби) исключалось фазово-поляризационной радиометрической системой, для минимизации вклада зыби выбирались ночи со скоростью ветра менее 1-2 м/с. Как пример, на рис. 1а и 1б показан график зависимости температуры воды в скин-слое СВЧ-диапазона  $T_w(\text{СВЧ})$  при одновременных СВЧ и ИК измерениях. Также измерялись температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра на высоте 5 м над морской поверхностью. Температура воздуха  $T_{\text{возд}}$  также показана на рис. 1а и 1б.

ИК измерения. В [3] описан метод одновременного определения диэлектрической проницаемости, температуры и волнового состояния морской поверхности по измерениям собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне. Как пример, в одном из циклов измерений (июль, ночное время с 21<sup>00</sup> до 2<sup>00</sup>) величина коэффициента отражения составила  $R_{\text{ИК}} = 0.011 \pm 0.007$ , температура ИК излучения моря в этот период менялась в интервале 22÷23 С, температура излучения атмосферы по зеркальному лучу -9.4÷12.2 С. Полученная по этим данным временная зависимость температуры воды в скин-слое ИК-диапазона  $T_w(\text{ИК})$  показана на рис. 1а. Полученное значение коэффициента отражения  $R_{\text{ИК}}$  меньше величины коэффициента отражения вычисленного по величине диэлектрической проницаемости воды измеренной в лабораторном эксперименте  $R_{\text{ЛАБ}} = 0.037$  [6]. Согласно разработанной модели, это можно объяснить наличием статистической смеси воды и микропузырьков воздуха, формирующейся при малых скоростях ветра (<5м/с) под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности [4], и заполняющей слой, излучающий в ИК-диапазоне. Комплексная диэлектрическая проницаемость статистической смеси определяется из уравнения [7]:

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_{\text{см}}} \rho_i = 0 \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i$  - комплексные диэлектрические проницаемости воды и воздуха и объемная концентрация воды  $\rho_1 = \rho$  и воздуха  $\rho_2 = 1 - \rho$ . Доля воды в микропузырьковом слое в этом случае была  $\rho_1 = 0.5$ , максимальная толщина скин-слоя в пределах полосы приемника составляла  $l_{\text{ск}} = 47\text{мкм}$ , т.е. микропузырьковый слой имел толщину  $l \approx 3l_{\text{ск}} = 140\text{мкм}$ .

Таким образом, на границе море-атмосфера необходимо рассматривать трехслойную модель: вода - микропузырьковый слой - атмосфера. Необходимость учета этого явления иллюстрируется на рис. 1б, где показана температура в скин-слое ИК-диапазона при её определении по лабораторным измерениям диэлектрической проницаемости чистой воды.



**Рис.1. Зависимости от времени температур воды в скин-слое ИК-диапазона  $T_w(IK)$ , СВЧ-диапазона  $T_w(SVCh)$  и температуры воздуха  $T_{возд}$  при использовании экспериментально определенного коэффициента отражения (а) и коэффициента отражения вычисленного по лабораторным измерениям диэлектрической проницаемости чистой воды (б).**

В трехслойной модели на нижней границе микропузырькового слоя должны выполняться граничные условия для уравнения теплопроводности - должны быть равными температуры  $T_1 = T_2$  и при отсутствии источников тепла на границе поток тепла, выходящий из одной среды должен равняться потоку, входящему во вторую среду:

$$\kappa_{МП} \frac{\partial T_1}{\partial n_1} = \kappa_B \frac{\partial T_2}{\partial n_2} \quad (2)$$

где  $\kappa_B = 0.565 \frac{\text{дж}}{\text{м} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$  - коэффициент молекулярной теплопроводности воды,  $\kappa_{МП}$  -

коэффициент теплопроводности микропузырькового слоя, который можно получить из соотношения (1) аналогично диэлектрической проницаемости для двухфазной среды по

$\kappa_B$  и  $\kappa_{возд} = 0.024 \frac{\text{дж}}{\text{м} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$  - коэффициенту молекулярной теплопроводности

воздуха. Из граничного условия (2) получим температуру на нижней границе микропузырькового слоя  $T_{МП}$ :

$$T_{МП} = \frac{\kappa_B \cdot l \cdot T_w(SVCh) + \kappa_{МП}(l_{4см} - l)T_w(IK)}{\kappa_{МП}(l_{4см} - l) + \kappa_B \cdot l}$$

Теперь из (2) можно получить вертикальный поток тепла из моря в атмосферу  $\kappa_{МП} \nabla T$  с учетом микропузырькового слоя. На рис. 2а показана зависимость полного потока тепла  $\kappa_{МП} \nabla T$  от времени (красная кривая) полученная по данным на рис. 1а. При использовании данных с рис. 1б, т.е. без учета микропузырькового слоя, получается временная зависимость полного потока тепла  $\kappa_{МП} \nabla T$ , показанная на рис. 2б (синяя кривая). В этом случае получаем ошибочный результат: полный поток тепла оказывается знакопеременным, чего быть не могло т.к. в ночное время вода была постоянно теплее воздуха.

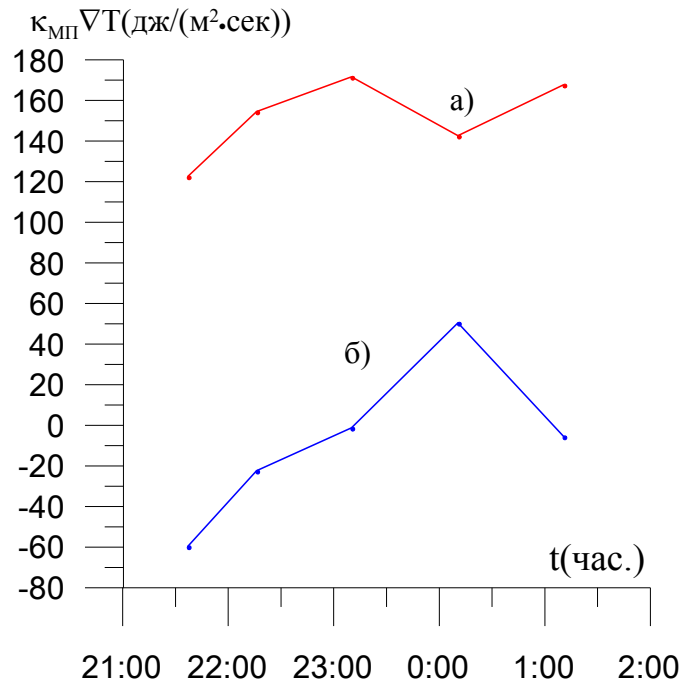


Рис. 2. Зависимости от времени полного потока тепла из океана в атмосферу  $\kappa_{МП} \nabla T$ , с учетом микропузырькового слоя (а) и без него (б).

**Составляющие теплового баланса на границе атмосферы и термической пленки морской поверхности по данным натурных измерений.**

На границе море-атмосфера граничные условия (2) принимают вид (указаны наиболее значимые источники тепла):

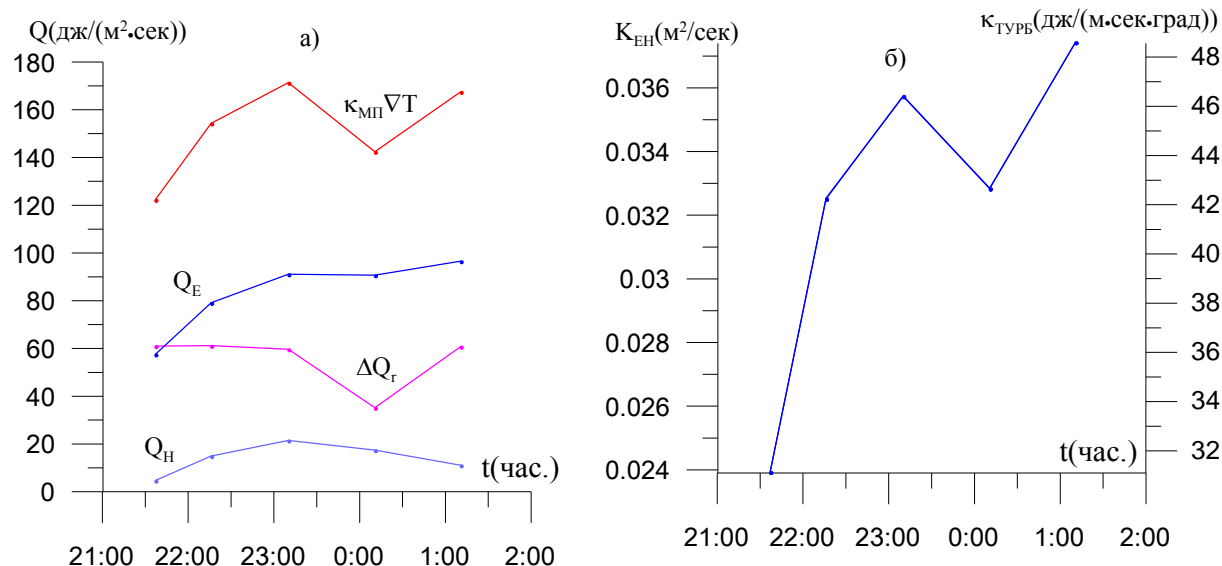
$$\kappa_{МП} \nabla T = Q_H + Q_E + \Delta Q_r \quad (3)$$

где  $Q_H$  - поток явного тепла (теплообмен между морем и атмосферой),  $Q_E$  - поток скрытого тепла (энергообмен при испарении или конденсации) и  $\Delta Q_r$  - радиационные потери тепла морской поверхностью. Величины  $Q_H$  и  $Q_E$  определяются градиентами температуры и влажности в приводном слое [8]:

$$\begin{aligned} Q_H &= -\rho_a C_p K_H \nabla T \\ Q_E &= -\rho_a L K_E \nabla q \end{aligned} \quad (4)$$

$\rho_a$  - плотность воздуха,  $C_p$  - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении,  $L$  - скрытая теплота испарения,  $q$  - удельная влажность воздуха,  $K_H$  - параметр турбулентной теплопроводности, связан с коэффициентом турбулентной теплопроводности в приводном слое соотношением  $\kappa_{Турб} = \rho_a C_p K_H$ ,  $K_E$  - параметр турбулентной диффузии водяного пара,  $q$  - удельная влажность воздуха. Считается, что  $K_H = K_E = K_{EH}$  [8].

В ночное время большую часть радиационного баланса  $\Delta Q_r$  составляет ИК-излучение моря и атмосферы в окне прозрачности 8-14 мкм, которое вычисляется по данным натурных ИК-измерений. Теперь из (3) и (4) можно получить  $K_{EH}$ ,  $\kappa_{Турб}$  и  $Q_H$ ,  $Q_E$ . Полученные составляющие теплового баланса показаны на рис. 3а, а параметры турбулентного теплопереноса в приводном слое атмосферы  $K_{EH}$ ,  $\kappa_{Турб}$  на рис. 3б.



**Рис. 3. Зависимости от времени полного потока тепла из океана в атмосферу  $\kappa_{МП}\nabla T$ , потока явного тепла в приводном слое атмосферы  $Q_H$ , потока скрытого тепла  $Q_E$  и радиационных потерь морской поверхности  $\Delta Q_r$  (а), коэффициента турбулентной теплопроводности  $\kappa_{ТУРБ}$  и  $K_{ЭН}$  (б).**

### Литература

1. McAlister E.D. Infrared-Optical Techniques Applied to Oceanography 1. Measurements of Total Heat Flow from the Sea Surface// Applied Optics.-1964.-V.3.-N5.-P.609-612.
2. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Радиометрия температурной плёнки морской поверхности // Успехи современной радиоэлектроники.- 2006.- №11.- С.39-55.
3. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. "Одновременное определение диэлектрических свойств морской поверхности, ее волнового состояния и температуры воды в скин-слое по дистанционным измерениям собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне" // Труды Всероссийских радиофизических научных чтений-конференций памяти Н.А.Арманда, Всероссийская научно-практическая конференция "Космическая радиолокация", Труды конференции, 28.06-1.07.2010 г., Муром, стр.215-219..
4. 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.
5. И.Т.Бубукин, К.С.Станкевич Суточный ход температуры в термической плёнке морской поверхности по СВЧ радиометрическим измерениям// Труды XX всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород, 2-4 июля 2002 г., с.374-375.
6. Кодратьев К.Я., Бургов М.П., Гайнулин И.Ф., Тотунова Г.Ф. Инфракрасный спектр поглощения жидкой воды // "Проблемы физики атмосферы". сб.2. Изд. Ленинград. университета. -1963.- С.87-112.
7. Оделевский В.И. Расчёт обобщённой проводимости гетерогенных систем. II Статистические смеси невытянутых частиц// Журнал технической физики.- 1951.- Т.21.- В.6.- С.678-685.
8. Перри А.Х., Уокер Дж.М. Система океан-атмосфера// Ленинград. Гидрометеоздат. 1979.