

Радиометрический метод измерения разности температур в термической пленке морской поверхности 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

Предложен и апробирован в натурных условиях радиометрический метод измерений разности температур в термической пленке морской поверхности в натурных условиях морского волнения. Метод реализован в измерительной системе, состоящей из двух элементов: плавающей платформы основанной на методе «черного ящика» для оперативного измерения температуры воды на нижней границе термической пленки и системы измерения флуктуаций яркостной температуры ИК-излучения морской поверхности с высоким пространственным и временным разрешением.

Proposed and tested an in situ radiometric method of measuring the temperature difference in the heat of the sea surface film in situ sea swell. The method implemented in the measuring system consisting of two elements: a floating platform is based on the method of "black box" for the rapid measurement of water temperature at the lower boundary of the thermal film and the measurement system of fluctuations of the brightness temperature of the infrared radiation of the sea surface with high spatial and temporal resolution.

Введение

Термический пограничный слой непосредственно прилегает снизу к свободной поверхности океана. Через этот слой осуществляется молекулярный обмен тепловыми потоками и веществом между атмосферой и океаном.

В этом слое преобладают молекулярные процессы теплопроводности, диффузии, вязкости и, как следствие, имеют место максимальные градиенты температуры, солёности, скорости. Термодинамическая температура поверхности океана (ТПО) может значительно отличаться от температуры нижележащего слоя. Разность температур в термическом пограничном слое, её знак и толщина термического слоя определяются условиями локального взаимодействия атмосферы и океана и в первую очередь величиной и направлением теплового потока на единицу площади.

Линейное изменение температуры внутри термического слоя, соответствующее молекулярной теплопроводности, происходит в тонкой водной толще, порядка несколько миллиметров, поэтому этот слой называют ещё температурным (термическим) плёночным слоем.

Температурный плёночный слой неустойчив и разрушается при возникновении перемешивания воды вблизи поверхности, которое создают капли дождя или сильное волнение. Обрушение волн приводит также к его разрушению, но в этом случае слой восстанавливается примерно через 12 сек.

Сканирующие многоканальные ИК-радиометры, установленные на метеорологических спутниках, являются в настоящее время основным средством получения информации о температуре поверхностей морей и океана в районах, свободных от облачности, тумана и аэрозольных выбросов. В окне прозрачности атмосферы 8-12 мкм, сформированном спектром поглощения водяного пара и углекислого газа, измеряется радиационная температура поверхности океана. При исключении поглощения в атмосфере и при учёте излучательной способности водной поверхности она равнялась бы физической температуре воды в скин-слое.

Сами спутниковые ИК-измерения хорошо определяют контрасты или горизонтальные градиенты в распределении температуры воды на поверхности. Абсолютные величины температур получаются только при привязке (калибровке) спутниковых измерений к значениям температуры воды в нескольких подспутниковых точках на водной поверхности, измеряемой контактными методами с дрейфующих буёв. Термодатчики на дрейфующем буе измеряют температуру воды на глубине от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров, которая отличается от температуры морской поверхности и температуры воды в скин-слое ИК-излучения. Только в условиях сильного перемешивания и в отсутствие солнечного прогрева эти температуры могут совпадать. Температура воды ниже температурного слоя морской поверхности принимается за "истинную" температуру морской поверхности, и её величина приписывается температуре, измеряемой по ИК-излучению на метеорологическом спутнике. В этом состоит неопределённость спутниковых данных и карт температурных полей морской поверхности и их недостаток для решения задач взаимодействия атмосферы и океана.

Их удалось бы избежать, если калибровку спутниковых данных проводить по температуре воды, измеренной по ИК-излучению морской поверхности и температуре ниже термической пленки в подспутниковых точках. Поэтому для повышения точности определения температурных полей океана необходима разработка новых методов подспутниковых калибровок, и один из них рассматривается в настоящей работе

Измерительная системы ИК-диапазона «ИК-капсула», основанная на методе «черного ящика» для оперативного измерения разности температур в термическом слое морской поверхности и их изменений на границе атмосферы с пограничным слоем

Пограничный слой непосредственно граничит с атмосферой и через него осуществляется массо и энергообмен в системе "водная поверхность-атмосфера". Разработанные ранее в НИРФИ методы и приборы для исследования физических процессов в пограничном 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. 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 - доля воздуха в микропузырьковом слое по данным натурных измерений существенно изменчива и зависит от внешних условий. В большинстве случаев в натуральных условиях поверхностная температура слоя молекулярной теплопроводности и вязкости меньше подповерхностной (холодный пограничный слой). Пограничный слой морской поверхности изменчив и конвективные процессы происходящие в нем приводят к быстрым изменениям температуры на малых пространственных масштабах. Для измерения интервалов изменения яркостных температур и температур воды во времени и пространстве при микроконвекции необходимо создание специальных методов и приборов абсолютных измерений яркостных температур теплового излучения морской поверхности с высоким пространственным и временным разрешением.

Задачей измерительной системы «ИК-капсула» являются абсолютные измерения яркостных температур теплового излучения морской поверхности с высоким пространственным и временным разрешением и получение данных об интервалах температур воды и периодов их изменений на границе атмосферы с холодным и теплым пограничным слоем морской поверхности.

Конструктивно измерительная система «ИК-капсула» состоит из двух элементов: плавающей платформы «ИК-колокол» для оперативного измерения температуры воды по ее ИК-излучению ниже термической пленки системы измерения флуктуаций яркостной температуры ИК-излучения морской поверхности с высоким пространственным и временным разрешением «ИК-удочка».

ИК- колокол

Задачей эксперимента является измерение температуры воды T_w в скин-слое ИК-излучения с помощью плавающего «ИК-колокола». Принцип действия измерительной плавающей платформы основан на методе «черного ящика». Используются условия квазиравновесного состояния, когда температуры воды и радиоизлучений атмосферы и моря почти одинаковы. Такую ситуацию можно создать искусственно, если накрыть приемник над морской поверхностью колпаком, покрытым изнутри отражающим ИК-излучение покрытием - «черным ящиком». В такой системе яркостная температура морской поверхности будет равна температуре воды в слое, где формируется излучение.

Основное уравнение дистанционного зондирования морской поверхности для ИК-диапазона имеет вид [1]:

$$I_M(\theta) = I_w(1 - R_M(\theta)) + R_M(\theta)I_H(\theta)\xi(\theta), \quad (1)$$

здесь $R_M(\theta)$ - коэффициент отражения ИК-излучения по мощности в точке пересечения взволнованной поверхности моря с лучом зрения,

I_w - интенсивность излучения воды в скин-слое,

$I_M(\theta)$ - интенсивность излучения моря,

$I_H(\theta)$ - интенсивность нисходящего излучения атмосферы по зеркальному лучу.

Множитель $\xi(\theta)$, учитывает корреляцию флуктуаций коэффициента отражения и интенсивности излучения атмосферы по зеркальному лучу. Идея «черного ящика» весьма проста и вытекает из выражения (1), если его записать в виде

$$I_w = I_M(\theta) + R_M(\theta)(I_w - I_H(\theta)\xi(\theta)) \quad (2)$$

Если яркостная температура атмосферы и температура воды близки то $I_w \approx I_H(\theta)$ и $\xi(\theta) \approx 1$ (вблизи надир), то яркостная температура морской поверхности равны температуре воды в слое, где формируется излучение

$$T_w = T_M(\theta) \quad (3)$$

независимо от величины коэффициента отражения морской поверхности.

Таким образом, для определения температуры воды нужны условия квазиравновесного состояния, когда температуры воды и радиоизлучений атмосферы и моря почти одинаковы $T_w \cong T_H(\theta) \cong T_M(\theta)$, что в естественных условиях может реализовываться в довольно редких случаях. Однако такую ситуацию можно создать искусственно, если накрыть приемник над морской поверхностью колпаком, покрытым изнутри отражающим ИК-излучение покрытием - «черным ящиком». Через некоторое время, когда система придет в равновесное состояние, температуры выровняются и условие (3) будет выполнено. Так как плавающая платформа разделяет атмосферу от морской поверхности и прекращает процессы массо и газообмена между морской поверхностью и атмосферой, то измеряемая температура будет равна температуре ниже термической пленки.

ИК-удочка

Для одновременного измерения температурных флуктуаций ИК-излучения морской поверхности в невозмущенных условиях была создана измерительная система «ИК-удочка». Система представляет собой приемник ИК-излучения закрепленный на конце длинной штанги позволяющей приближать приемник к морской поверхности на такое же расстояние как приемник плавающей платформы «ИК-колокол». Одновременно, для определения коэффициента отражения морской поверхности по методике, описанной в [1], производится регистрация излучения неба в зените. Измерительная система «ИК-удочка» позволяет измерять флуктуаций ИК-излучения морской поверхности с высоким пространственным и временным разрешением.

Натурные измерения собственных излучений морской поверхности и атмосферы в ИК-диапазоне. Измерения методом «черного ящика»

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. Диапазон длин волн принимаемого инфракрасного 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. 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.

В результате обработки получены временные зависимости температуры морской поверхности, полученные системой «ИК-удочка» в надире и системой «ИК-колокол» в режиме прекращения тепло и газообмена между морской поверхностью и атмосферой. Температура морской поверхности, измеренная системой «ИК-удочка» получена с учетом коэффициента отражения морской поверхности по методике, описанной в [1]. Разность значений температур полученных системами «ИК-удочка» и «ИК-колокол» дают разность температур в термической пленке морской поверхности. Пример временной зависимости разности температур в термической пленке морской поверхности для одного из сеансов измерений показан на рис. 1.

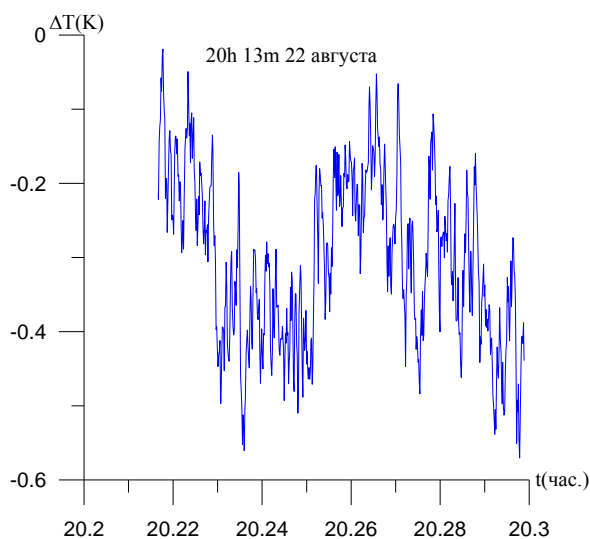


Рис.1. Зависимость разности температур в термической пленке морской поверхности для одного из сеансов измерений.

Выявление характерных масштабов изменчивости разности температур в термической пленке морской поверхности может проводиться методами Фурье анализа. Примеры спектров реализаций флуктуаций разности температур, определенной по ИК-излучению морской поверхности системой «ИК-капсула» показаны на рис. 2.

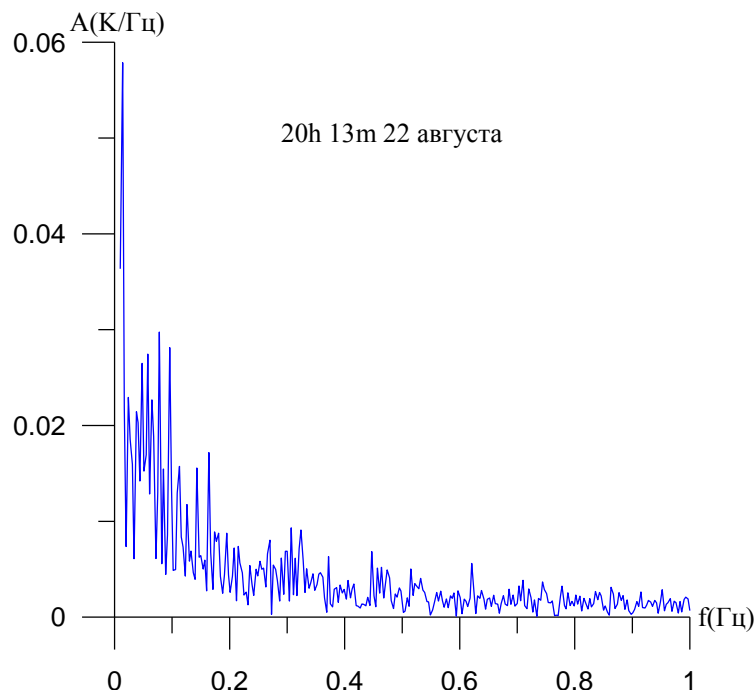


Рис.2.Пример спектра реализации флуктуаций разности температур в термической пленке морской поверхности, определенной по синхронным измерениям ИК-излучения морской поверхности системами «ИК-удочка» и «ИК-колокол».

Целью спектрального анализа может быть выявление периодов характерных для волнового и конвективного механизмов формирования микропузырькового слоя [2]. На данном спектре нет максимума характерного для волнового перемешивания на частоте 0.7 Гц. Это свидетельствует о том, что при данных условиях наблюдений (прибрежная зона, слабые ветра) основным механизмом формирования микропузырькового слоя является конвективный. Конвективному механизму соответствуют частоты порядка 0.1 Гц (период ~ 12 сек.). Такая компонента прослеживается на рис. 2.

Заключение

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

1. Измерительная система «ИК-капсула» состоящая из двух элементов: плавающей платформы «ИК-колокол» для оперативного измерения температуры воды на нижней границе термической пленки и системы измерения флуктуаций яркостной температуры ИК-излучения морской поверхности с высоким пространственным и временным разрешением «ИК-удочка» может измерять разность температур в термической пленке морской поверхности в натурных условиях морского волнения.

2. Первые данные натурных измерений показывают, что разность температур в термической пленке морской поверхности в натурных условиях является переменной величиной, характерные масштабы изменчивости которой могут нести информацию о механизмах формирования микропузырькового слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности.

Литература

1. Бубукин, И.Т. Дистанционная диагностика пленочного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне / И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич // Радиотехника и электроника.- 2012.- Т.57.- №10. -С.1089-1098.
2. Бубукин, И.Т. Радиометрический метод исследования механизмов переноса растворенных атмосферных газов через морскую поверхность и образования микропузырькового слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности по натурным измерениям собственных излучений атмосферы и морской поверхности в инфракрасном диапазоне/ И.Т. Бубукин, В.И. Бубукин // МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ «АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА» (МСАРД –2015), 23 – 26 июня 2015, Санкт-Петербург-Петродворец, Тезисы, стр. 66-68.