## Моделирование микроволнового излучения взволнованной морской поверхности на основе экспериментальных данных

Сазонов Дмитрий Сергеевич Институт космических исследований РАН e-mail: <u>Sazonov 33m7@mail.ru</u>



# Радиоизлучение водной поверхности в микроволновом диапазоне

Измеренное радиометром излучение взволнованной водной поверхности (в случае наземно-дистанционных наблюдений, когда восходящим излучением атмосферы между объектом и приемной антенной можно пренебречь) может быть записано на основе уравнения переноса излучения:



$$\begin{split} T_{\mathcal{A}.\mathcal{H}C\Pi} &= E \cdot T_{0.M\Pi} + R \cdot T_{\mathcal{A}.ATM} + \Delta T_{\mathcal{A}.M\Pi} \\ T_{\mathcal{A}.\Pi} &= E \cdot T_{0.M\Pi} \end{split}$$

где: *Т*<sub>я.ЭКСП</sub> – радиояркостная температура водной поверхности, измеренная экспериментально;

R – коэффициент отражения, рассчитываемый по формулам Френеля для термодинамической температуры воды  $T_{0.M\Pi}$ ;  $T_{R.ATM}$  – радиояркостная температура атмосферы;  $\Delta T_{R.M\Pi}$  – радиояркостный контраст.

Следует отметить, что все члены этого выражения обладают частотной и поляризационной зависимостью (за исключением  $T_{g.ATM}$ ), а также являются функциями углов наблюдения (вертикального  $\theta$  и азимутального  $\varphi$ ).



### Радиояркостный контраст

Радиояркостный контраст учитывает изменение интенсивности излучения, обусловленное трансформацией границы раздела "вода-воздух" при наличии волнения. На основе экспериментальных данных определяется как:

$$\Delta T_{\mathcal{A}.M\Pi} = T_{\mathcal{A}.\mathcal{H}C\Pi} - E \cdot T_{0.M\Pi} - R \cdot T_{\mathcal{A}.ATM}$$

Анализ величины радиояркостного контраста является общепринятым методом исследования параметров волнения, однако, сама величина радиояркостного контраста обладает следующими недостатками:

- Содержит в себе информацию об отражении атмосферы на не зеркальных углах наблюдения. Таким образом, при измерении в одинаковых метеоусловиях (*скорость и направление ветра, температура воды и воздуха*), но при разных состояниях атмосферы приводит к сильным различиям величины радиояркостного контраста, что влияет на интерпретацию результатов измерений;
- коэффициенты отражения *R* и излучения *E* гладкой водной поверхности рассчитываются на основе модели диэлектрической проницаемости, т.о., расчетные значения для яркостной температуры гладкой водной поверхности содержат в себе ошибку моделирования, которая трансформируется в ошибку вычисления радиояркостного контраста.



#### Радиационно-ветровая зависимость

В случае наземного эксперимента радиационно-ветровая зависимость может быть описана следующим образом:

$$\partial T_{\mathcal{A}} / \partial W = T_{\mathcal{A}. \ni KC\Pi} (W + \Delta W) - T_{\mathcal{A}. \ni KC\Pi} (W), \quad \Delta W = 1_{\mathcal{M}} / c$$

Преобразуем данное выражение, используя формулу для радиояркостного контраста:

 $\partial T_{\mathcal{A}} / \partial W = \Delta T_{\mathcal{A}.M\Pi} (W + \Delta W) + E \cdot T_{0.M\Pi} + R \cdot T_{\mathcal{A}.ATM} - \Delta T_{\mathcal{A}.M\Pi} (W) - E \cdot T_{0.M\Pi} - R \cdot T_{\mathcal{A}.ATM}$ 

Сократив подобные слагаемые, получим:

$$\partial T_{\mathcal{A}} \big/ \partial W = \Delta T_{\mathcal{A}.M\Pi} (W + \Delta W) - \Delta T_{\mathcal{A}.M\Pi} (W)$$

Из представленной формулы можно сделать следующие выводы:

• Отсутствует ошибка моделирования, т.к. излучение гладкой водной поверхности и переотраженое излучение атмосферы сокращаются при вычислениях;

• Приращение излучения, связанное с неучтенным остатком переотражения атмосферы можно считать малым и, что величина  $\partial T_{\pi}/\partial W$  связана только с изменением состояния поверхности. Т.е. зависит от поляризации, угла места, азимутального угла, частоты, температуры поверхности и солености.



### Место проведения натурных экспериментов

Экспериментальные исследования по изучению взаимодействия океана и атмосферы, начиная с 2005 года, проводились на океанографической платформе, принадлежащей федеральному государственному бюджетному учреждению науки "Черноморскому гидрофизическому полигону РАН" (ЧГП РАН), с помощью микроволновых радиометрических измерений. Платформа расположена на южной оконечности полуострова Крым близ п. Кацивели, (географические координаты: 44°23'35" с.ш., 33°59'04" в.д.). Удаленность платформы от берега составляет порядка 600 метров, а глубина моря - 30 метров.



Географическое положение платформы

Океанографическая платформа ЧГП РАН

### Поворотная установка "Траверс"





Схема сканирования водной поверхности.

#### Характеристики радиометра-поляриметра Р08П:

- поляризации В, Г, ±45°;
- ширина луча ДН 9 градусов;
- чувствительность 0,15 К.

## КИ



#### Сравнение с моделями

Диапазон изменения скорости ветра 7-8 м/с

## Сравнение с аналогичными экспериментами



### Актуальность работы

Сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами в рамках корреляционного анализа и анализа невязок показало, что:

- существует значимая корреляция между экспериментальными и модельными данными.
- есть расхождения по абсолютному уровню, которые могут достигать от 20 до 50К.

• среди выбранных для сравнения моделей нет ни одной, адекватно описывающей поведение радиационно-ветровой зависимости в полном диапазоне исследуемых углов наблюдения и скоростей ветра.

Цель работы: разработать модель радиоизлучения взволнованной водной поверхности на основе экспериментальных данных.



#### Моделирование (предварительные замечания)

- 1. Для построения модели использованы данные, полученные в экспериментах 2005 и 2007 годов.
- 2. Т.к. вклад атмосферы в величину  $\partial T_{g} / \partial W$  пренебрежимо мал, то зависимость от состояния атмосферы не рассматривается.
- 3. Измерения выполнены только с платформы в Черном море, т.е. при одинаковом значении солености, поэтому зависимость от солености воды не рассматривается.
- 4. Измерения выполнены в основном при условиях, что  $T_{0.M\Pi} < T_a$ , поэтому стратификация не учитывается.
- 5. Модель строится на данных, которые усреднены по азимутальному углу наблюдения, поэтому азимутальная зависимость не рассматривается.

Модельная функция будет зависеть от трех переменных:

- интервала скорости ветра  $\Delta W$ ,
- угла места θ
- физической температуры воды *Т*<sub>0.МП</sub>.



#### Моделирование (нормирование переменных)

С целью упрощения моделирования и введения безразмерных переменных выполняется нормирование переменных. Формулы для преобразования имеют следующий вид:

$$x^{0} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}, \qquad \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2},$$

где  $\Delta x$  – интервал варьирования по оси  $x, x^0$  – центр новой системы. Переход от гоординат  $x_1, x_2, ..., x_n$  к новой безразмерной системе координат  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, ..., \hat{x}_n$  осуществляется линейным преобразованием координат:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - x^0}{\Delta x}, \quad i = 1...n$$

Обратный переход выполняется по формуле  $x_i = \hat{x}_i \cdot \Delta x + x^0$ .

Переменная	Максимум	Минимум	Интервал варьирования по оси Х	Центр новой системы	
Угол наблюдения, градусы	80	30	25	55	
Интервал скорости ветра, м/с	2,5	12,5	5	7,5	
Температура воды, °С	12,5	25	6,25	18,75	

Таблица. Нормировочные коэффициенты для переменных модели

КИ

#### Моделирование (Регрессионные зависимости)



Аппроксимация угловой зависимости выполнена полином второго порядка для вертикальной поляризации и полином третьего порядка для горизонтальной поляризации:

$$\frac{\partial T_{V,H}(\theta_N)}{\partial W} = \sum_i \theta_N^{i} \cdot \alpha_i^{V,H}$$

Коэффициенты *a<sub>i</sub>* построены как функция от интервала скорости ветра и аппроксимированы линейной функцией:

$$\alpha_i^{V,H}(Wc_N) = \delta_0^{V,H} + Wc_N \cdot \delta_1^{V,H}$$





### Моделирование (Регрессионные зависимости)



Полученные коэффициенты  $\delta_i$  построены как функция от температуры поверхности воды и тоже аппроксимированы линейной функцией:

$$\mathcal{S}_i^{V,H}(T_N) = \gamma_0^{V,H} + \gamma_1^{V,H} \cdot T_N$$

	Коэффициент $a_0^V$			Коэффициент $a_1{}^V$			<b>Коэффициент</b> $a_2^{V}$		
	$\gamma_0$	γ	1	$\gamma_0$	$\gamma_1$		Υo	$\gamma_1$	
$\delta_0$	0,159	0,0	93	-1,344	0,121	-0,	767	0,086	
$\delta_1$	0,244	0,0	155	0,749	-0,113	0,	764	0,105	
	Коэффиі	<b>Коэффициент</b> $a_0^{\ H}$		<b>Коэффициент</b> $a_l{}^H$		Коэффициент а2 <sup>Н</sup>		Коэффициент а <sub>3</sub> <sup>Н</sup>	
	γ <sub>0</sub>	γ <sub>1</sub>	$\gamma_0$	γ <sub>1</sub>	$\gamma_0$	γ <sub>1</sub>	$\gamma_0$	$\gamma_1$	
$\delta_0$	1,318	-0,183	0,111	-0,344	-1,046	0,247	-0,857	0,506	
$\delta_1$	-0,553	0,149	-1,166	-0,327	1,589	-0,178	2,399	0,202	

Таблица. Коэффициенты температурной зависимости.



## Модель MiROSE

MiROSE - Microwave Rough Ocean Surface Emission model.

Модель описывает результаты наблюдений в диапазоне следующих условий:

- вертикальный угол наблюдения 30 80 градусов,
- температура воды 12,5 25°С,
- скорость ветра 3 13 м/с.

#### По модели можно рассчитать:

- радиационно-ветровую зависимость:  $\partial T_{\mathcal{A}}/\partial W$
- радиояркостный контраст:  $\Delta T_{\mathcal{A}.M\Pi} = \sum_{i=2.5}^{n} \partial T_{\mathcal{A}} / \partial W_i$
- радиояркостную температуру:  $T_{g.M\Pi} = E \cdot T_{0.M\Pi} + \Delta T_{g.M\Pi}$

КИ

#### Модель MiROSE





#### Восстановление скорости ветра по модели MiROSE

#### По экспериментальным данным за октябрь 2009 года





#### Заключение

Предлагаемая модель в настоящее время находится на начальном этапе разработки, но демонстрирует большой потенциал. Модель MiROSE будет протестирована и использована для определения скорости ветра в экспериментальных исследованиях. Определенная скорость ветра будет использована при решении ряда задач, связанных с исследованием процессов взаимодействия системы океанатмосфера, методами микроволновой радиометрии.

С целью улучшения модели MiROSE необходимо провести дополнительные исследования: во-первых, выполнить измерения излучения водной поверхности в широком диапазоне температур воды от 0 до 30°C и более; во-вторых, выполнить измерения в надир и около него; в-третьих, выполнить измерения при штормовых ветрах 20 м/с и более; и, в-четвертых, выполнить измерения на разных частотах в микроволновой области.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-02-00839\_а и № 15-05-08401\_а.



### Публикации

- <u>Сазонов Д.С.</u>, Кузьмин А.В., Садовский И.Н. Экспериментальные исследования зависимости интенсивности радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости приводного ветра // Исслед. Земли из космоса. 2016, №1-2, С. 25-34.
- Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sadovsky I. N. Experimental Studies of Thermal Radiation Intensity Dependenceon Near-Water Wind Speed for Rough Sea Surface, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 911–919. ISSN 0001-4338.
  DOI: 10.1134/S0001433816090218 (Sazonov, D.S., Kuzmin, A.V. & Sadovsky, I.N. Izv. Atmos. Ocean. Phys. (2016) 52: 911. doi:10.1134/S0001433816090218).
- Сазонов Д.С. Корреляционный анализ экспериментальных дистанционных измерений и моделей микроволнового излучения взволнованной водной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2017, №3, С. 1–12.
- *Сазонов Д.С.* Моделирование микроволнового излучения взволнованной морской поверхности на основе экспериментальных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. *Подана в редакцию*.

## Спасибо за внимание



Океанографическая платформа "Черноморского гидрофизического полигона РАН" (ЧГП РАН). Крым, пос. Кацивели.