

# Исследование морской поверхности с помощью метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии

*Кузьмин А.В.*

Институт космических исследований РАН

Email: [alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru](mailto:alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru)

# Содержание

- Критические явления в тепловом излучении морской поверхности
- Теория метода
- Эксперименты
- Перспективы использования метода НРРС

# Критические явления в тепловом излучении морской поверхности

Механизм критических явлений в собственном излучении воды на мелкомасштабной шероховатой поверхности, связанный с дифракционными механизмами рассеяния. Этот механизм был предсказан теоретически в работе [Кравцов и др., 1978] и обнаружен экспериментально [Эткин и др., 1978].

Критическое условие для вертикальной поляризации, когда волновой вектор синусоидальной поверхностной волны  $\mathbf{K}$  лежит в плоскости наблюдения  $(x, z)$ .

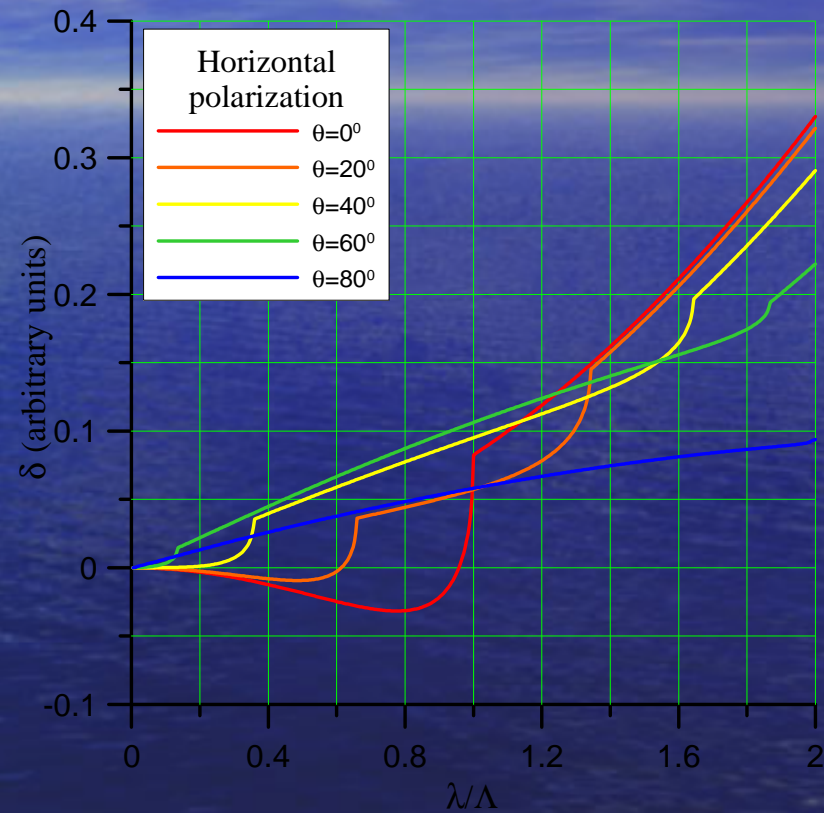
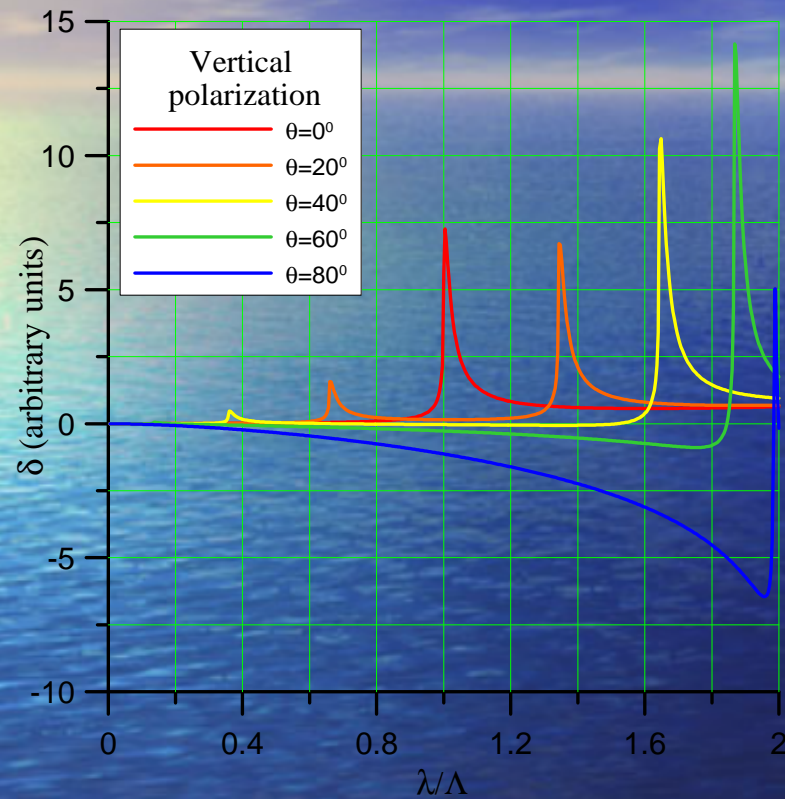
$$K = k(1 \pm \sin \theta)$$

Если поверхностная водная волна повернута под углом  $\varphi$  к плоскости наблюдения  $(x, z)$ , то появление или пропадание дифракционных максимумов  $\pm 1$  порядка происходит при условии [Ирисов, 1984]:

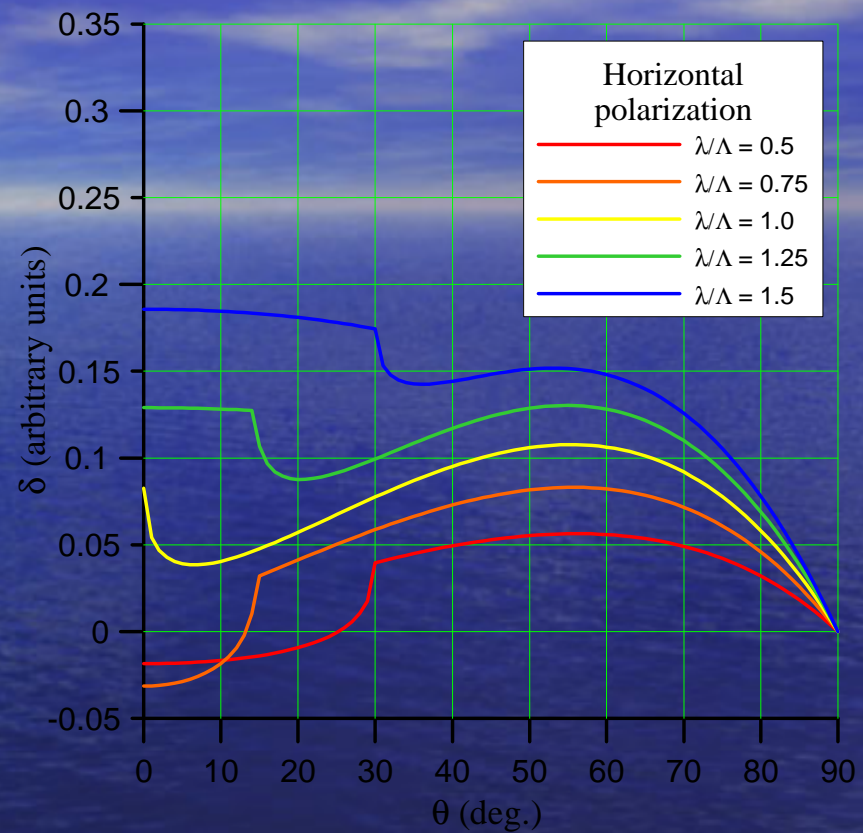
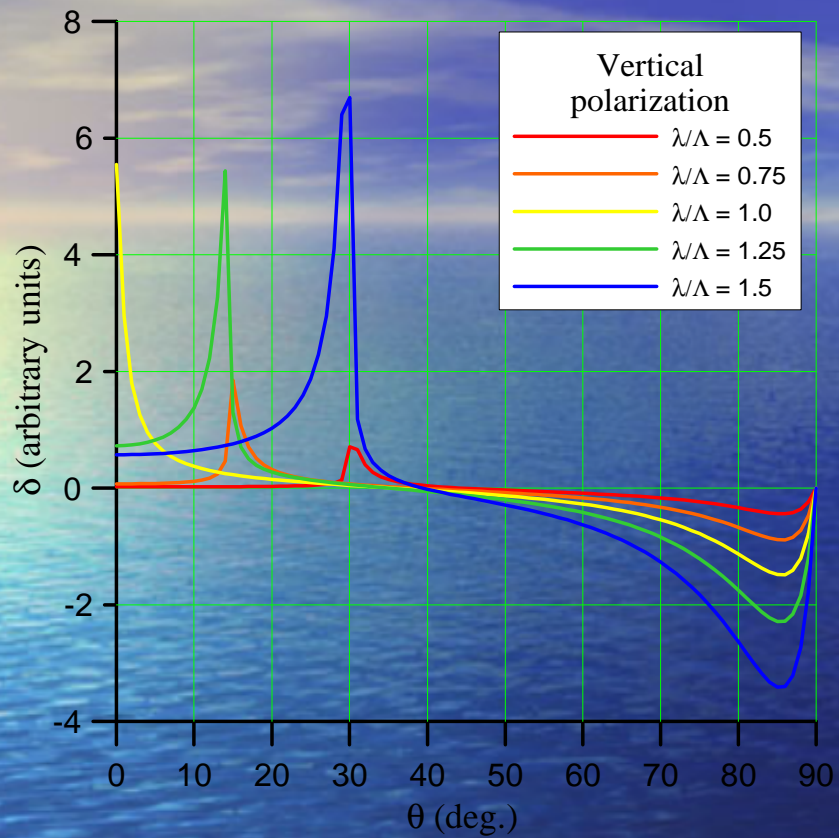
$$K^2 \pm 2Kk \cos \varphi \sin \theta = k^2 \cos^2 \theta,$$

Ирисов В. Г., Ю. Г. Трохимовский, В. С. Эткин. «Радиотепловая спектроскопия морской поверхности.» // Доклады АН СССР, т. 297, № 3, с 587-589, 1987.

$$\Delta T = T_0 (k a)^2 \delta(\dot{\epsilon}, \rho, \theta, \varphi,)$$



Излучательная способность  $\delta$  на вертикальной и горизонтальной поляризациях от величины  $\lambda/\Lambda$  от различных углов визирования  $\theta$



Излучательная способность  $\delta$  на вертикальной и горизонтальной поляризациях от угла визирования  $\theta$  для различных соотношений параметра  $\lambda/\Lambda$

# Методы измерения спектра ГКВ

- Струнные волнографы в этом диапазоне не работают
- Оптические методы - хорошо работают в бассейнах, но сталкиваются с серьезными трудностями при работе в натуральных условиях. Оптические измерения с помощью сканирующих лазеров имеют большой разброс, а сами методики не являются бесспорными
- Большие надежды возлагались на радиолокационные системы, однако, трудности абсолютной калибровки и вклад нерезонансных механизмов рассеяния затрудняют практическое использование радиолокационных измерений для определения пространственного спектра

Созданию нового метода определения (нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии) и экспериментальным исследованиям спектра ГКВ с помощью микроволновых радиометрических измерений поверхности моря была посвящена данная работа. Рассмотрим подробнее методы и подходы

# Теория

Трохимовский Ю. Г., «Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности.» // ИЗК. № 1, с. 39-49, 1997.

- **Метод расчета радиотеплового излучения**
  - Длинные поверхностные волны  $k \gg K$   
 $k = 2\pi/\lambda$  ;  $K = 2\pi/L$
  - Короткие волны  $k \sim K$
  - Влияние пены
  - Модель атмосферы
  - Диэлектрическая постоянная воды
- **Решение обратной задачи**

# Расчет длинных волн

Длинными волнами (в случае гравитационных волн) считаются гармоники поверхностного волнения с длиной волны  $\Lambda \gg \lambda$ . Хорошим приближением является усреднение яркостной температуры собственного излучения поверхности и переотраженного излучения атмосферы по функции распределения вероятности уклонов поверхности :

$$\Delta T_{\text{BL}}(\theta) = \iint P_{\theta}(\varphi_x, \varphi_y) \cdot \left( T_0 \cdot (1 - |R|^2) + |R|^2 \cdot T_S(\theta, \varphi_x, \varphi_y) \right) d\varphi_x d\varphi_y - T_{\text{B0}}(\theta) \quad (1)$$

В предположении случайного распределения фаз отдельных гармоник уклоны имеют нормальное распределение

$$P_{\theta}(\varphi_x, \varphi_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{\varphi_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\varphi_y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$



Дисперсии уклонов  $\sigma_x^2$  и  $\sigma_y^2$  можно вычислить по известному спектру возвышений морской поверхности  $F(\vec{K})$

$$\sigma_x^2 = \int_0^{K_L} \int_{-\pi}^{\pi} F(\vec{K}) K^2 \sin^2 \phi K dK d\phi$$
$$\sigma_y^2 = \int_0^{K_L} \int_{-\pi}^{\pi} F(\vec{K}) K^2 \cos^2 \phi K dK d\phi$$

Расчеты по формуле (1) показывают, что зависимость контраста крупных волн от среднеквадратичных уклонов близка к линейной. Если рассматривать контрасты, усредненные по азимутальному углу наблюдения, то можно предположить:

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$$

Используя численные расчеты, легко построить аппроксимацию вида:

$$\Delta T_{BL}(\theta) = c_1 \sigma^2 + c_2 (\sigma^2)^2$$

# Учет мелкомасштабного волнения

Мелкомасштабные компоненты волнения ( $K > K_L$ ) требуют иного рассмотрения из-за дифракционных эффектов при  $K \sim k$ . Их контраст определяется интегрированием вклада отдельных гармоник [Trokhimovski and Irisov, 1997]

$$\Delta T_{BS}(k, \varphi) = 2T_0 k^2 \int_{K_{MIN}}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} F(\mathbf{K}) \delta(K/k, \varphi - \varphi') K dK d\varphi'. \quad (2)$$

Функция  $\delta$  определяется методом малых возмущений для синусоидальной поверхности. При этом  $\delta$  вводится таким образом, что контраст синусоидальной поверхности с амплитудой  $a$  равен  $T_0 (ak)^2 \delta$

В общем виде, без ограничений на азимутальный угол  $\varphi$  и  $\varepsilon$ , задача определения радиояркостного контраста периодической поверхности с  $K \sim k$  решена в работе [Trokhimovski, Irisov and Etkin, 1987].

Затухание в атмосфере учитывается в функции  $\delta(K/k, \varphi)$  для каждого дифракционно максимума отдельно.

- **Влияние пены**

Все результаты расчетов и экспериментальные измерения проводились при скорости ветра менее 10 м/с, при этом площадь покрытия пеной морской поверхности составляет менее 0.2%. Таким образом, в окончательных результатах мы пренебрегли вкладом пены в суммарный радиояркостный контраст.

- **Модель атмосферы**

Использовалось приближение горизонтально-однородной безоблачной атмосферы. Для расчета принималось, что эффективная температура атмосферы равна температуре зондируемой поверхности. Поглощение в атмосфере вычислялось по модели работы [Liebe, *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 10, No.6, 651-660, 1989.] с учетом вклада водяного пара и линий поглощения молекулярного кислорода. Концентрация водяного пара у поверхности океана принималась равной 10 г/м<sup>3</sup>, а его высотное распределение предполагалось экспоненциальным с характерной высотой 1,7 км.

- **Диэлектрическая проницаемость воды**

Диэлектрическая проницаемость воды, используемая для расчета коэффициента Френеля в формуле (1) и функции  $\delta$  в формуле (2), определялась по модели, приведенной в [Ulaby, *et al.*, 1986].

# Решение обратной задачи

Решение задачи восстановления спектра поверхностного волнения проводилось методом Монте-Карло. Исследуемый интервал волновых чисел случайным образом разбивался на  $n$  подинтервалов примерно одинаковой длины в логарифмическом масштабе. Верхняя граница последнего подинтервала соответствовала длине волны принимаемого излучения данного радиометрического канала, а нижняя граница первого интервала была фиксирована  $K_0 = 0,031$  рад/см. Для каждой реализации считалось, что спектр

кривизны в  $B(K) = F(K)K^4$  интервале с индексом  $i$  имеет постоянную величину  $B_i$ . Затем для каждого из рассматриваемых радиометрических измерений с учетом длины волны  $\lambda_j$ , поляризации и угла наблюдения  $\theta_j$  по формуле (2) вычислялись коэффициенты  $b_{ij}$ , позволяющие определить радиояркий контраст коротких волн простым суммированием

$$\Delta T_{BS}^j = \sum_j b_{ij} \cdot B_i$$

При вычислении коэффициентов  $b_{ij}$  учитывались только волновые числа, удовлетворяющие условию  $K > K_L$ . Для интервалов с волновыми числами меньшими  $K_L$ , коэффициенты  $b_{ij}$  полагались равными нулю:  $b_{ij}=0$ .

Для каждого радиометрического канала затем определялась дисперсия уклонов крупных волн, соответствующая заданной длине волны и условию :  $K_{Lj} = 0.1k_j$

$$\sigma_j^2 = \int_0^{K_{Lj}} \int_{-\pi}^{\pi} F(\mathbf{K}) K^2 \cos^2 \phi K dK d\phi = \sigma_0^2 + \pi \sum_{i=1,m} B_i \ln \frac{K_i}{K_{i-1}} + \pi B_{m+1} \ln \frac{K_{Lj}}{K_m}$$

где  $\sigma_0^2$  дисперсия уклонов волн с волновыми числами  $K < K_0$  , а значение  $m$  равно максимальному значению индекса  $i$  , для которого еще выполняется условие  $K_i < K_L$ .

Модельный контраст радиояркостной температуры, обусловленный длинными и короткими волнами, определяется как

$$\Delta T_B^j = \Delta T_{BS}^j + \Delta T_{BL}^j = \sum_j b_{ij} \cdot B_i + c_1 \sigma_j^2 + c_2 (\sigma_j^2)^2$$

Для каждой из реализаций разбиения волновых чисел методом Монте-Карло определялись значения  $\sigma_0^2$  and  $B_i$  , доставляющие минимум функции невязки

$$\varepsilon = \sum_j \left| \Delta T_B^j - \Delta T_j^y \right| \cdot p_j$$

где  $p_j$  весовые коэффициенты. При нахождении минимума выполнялось до  $2 \cdot 10^5$  итераций .

# Эксперименты



Эксперименты выполнялись в Голубой бухте на базе Южного отделения ИО РАН близ г. Геленджика.

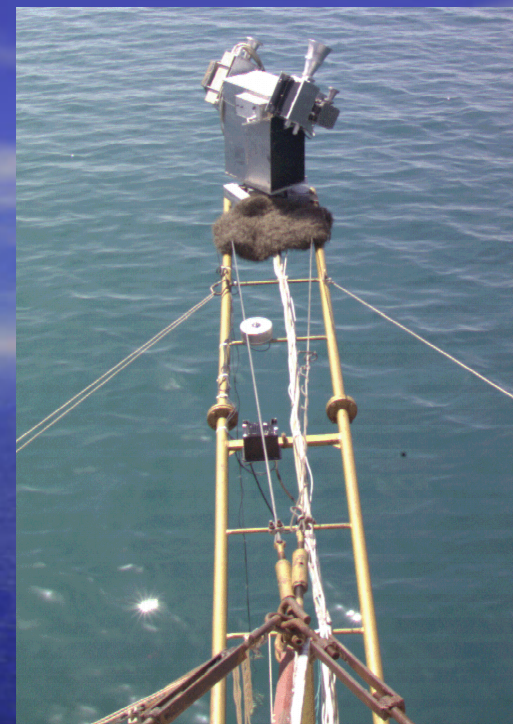
Все оборудование устанавливалось на конце 200 м пирса на высоте 3 м от поверхности воды. Глубина воды в месте установки аппаратуры была приблизительно 7 м.

Первая серия экспериментов по проверки методики восстановления спектра ГКВ методом НРРС была проведена на Черном море в течении летних месяцев 1999 – 2001 гг.

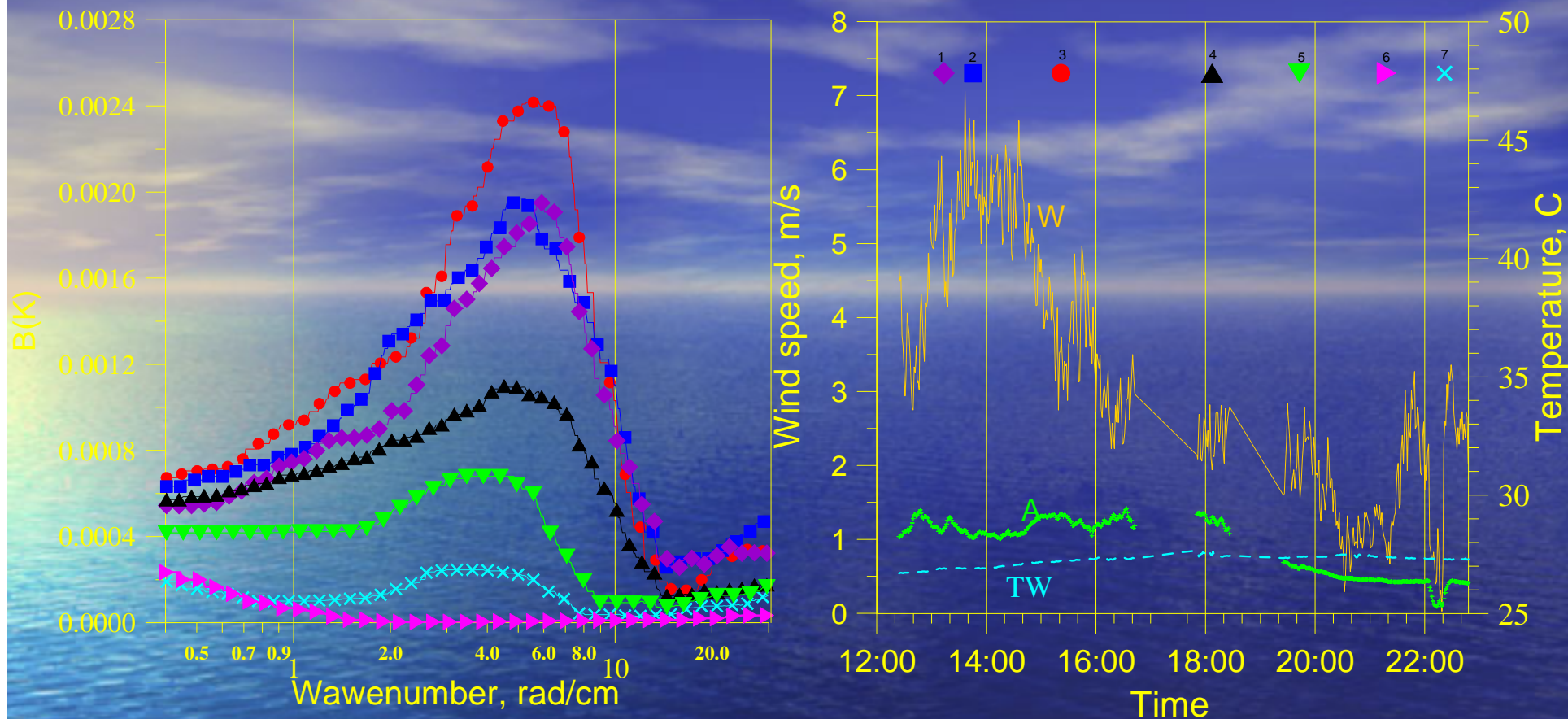


# СВЧ радиометры

Сканирующая-поворотная платформа с микроволновыми радиометрами была установлена на специальном шестиметровом выносе, который крепился на конце пирса. Радиометры имели возможность сканировать по углу места от  $10^\circ$  до  $170^\circ$  от надира и  $300^\circ$  по азимуту.



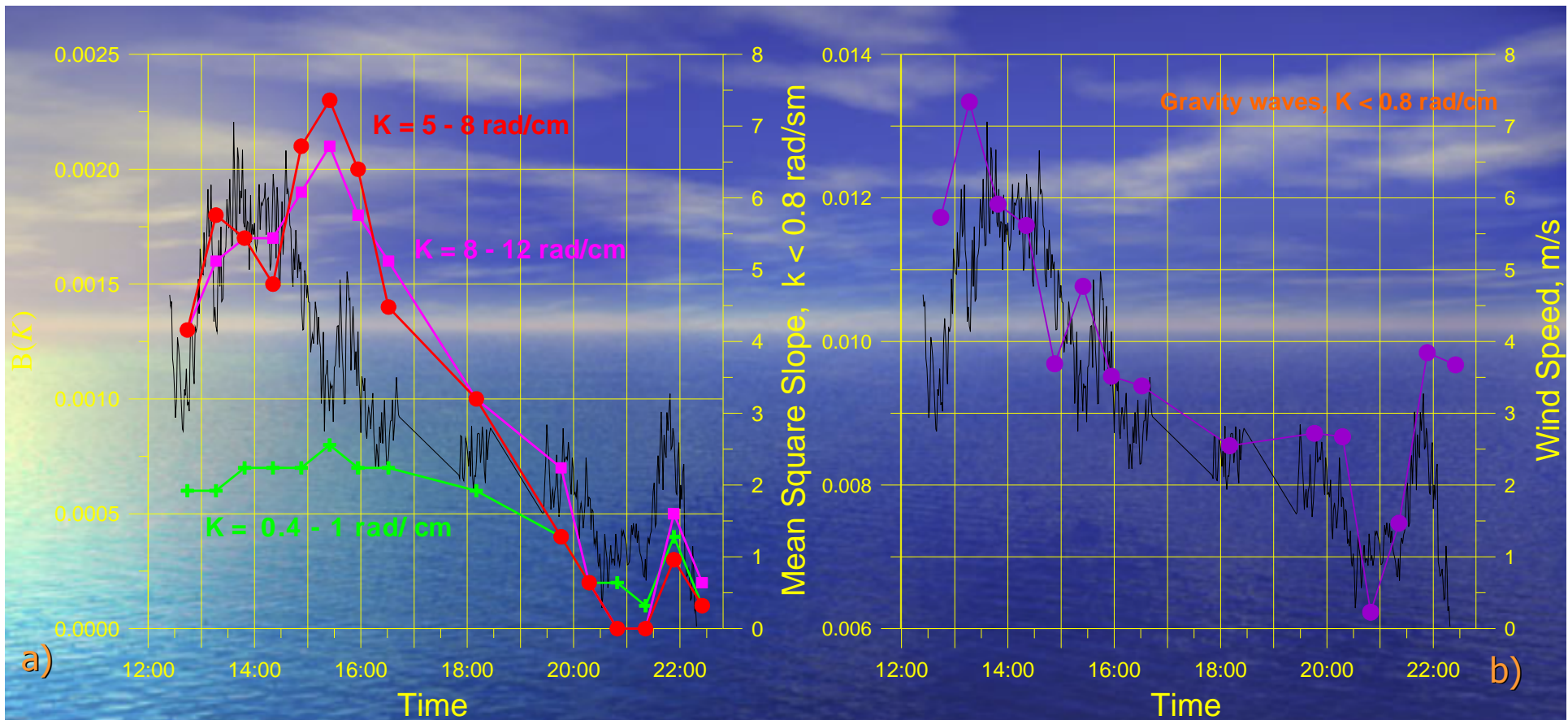
Instruments	RP-15	RP-08	R-05	R-03
Wave length $\lambda$ (cm)	15	8	5	3
F (GHz)	20.0	37.0	60.0	94.0
Polarizations	V, H, $\pm 45$	V, H, $\pm 45$	V	V, H
Frequency band $\Delta F$ (MHz)	2000	1600	4000	4000
Sensitivity $\delta T$ (K)	0.15	0.15	0.05	0.05



Результаты восстановления спектра кривизны, усредненного по азимутальным направлениям. Спектры построены для моментов времени отмеченных на правом рисунке теми же символами. Нормировка спектра кривизны выбрана так, что среднеквадратичный уклон поверхности будет равен:

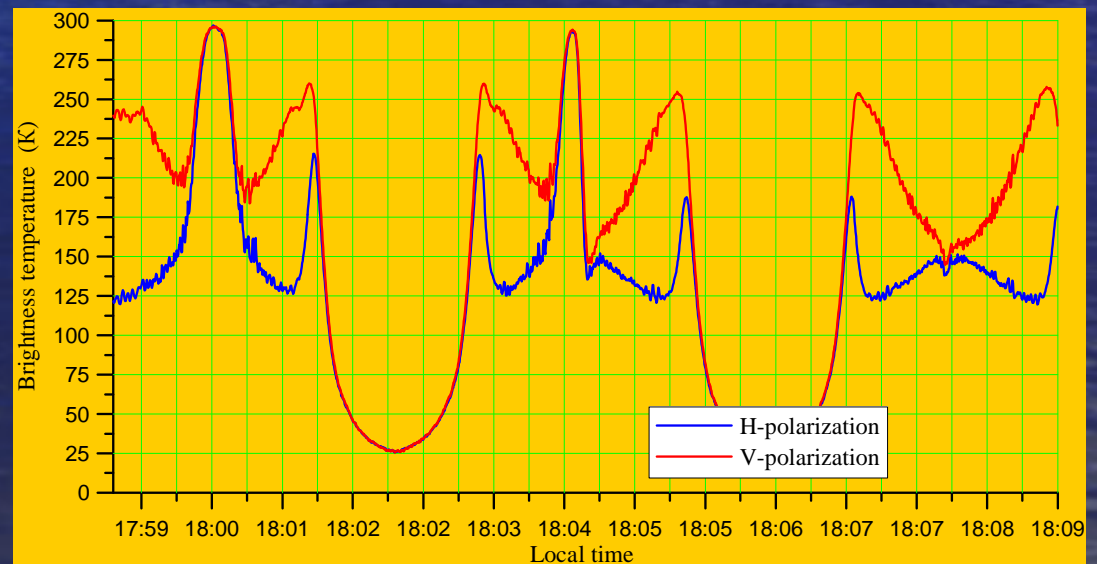
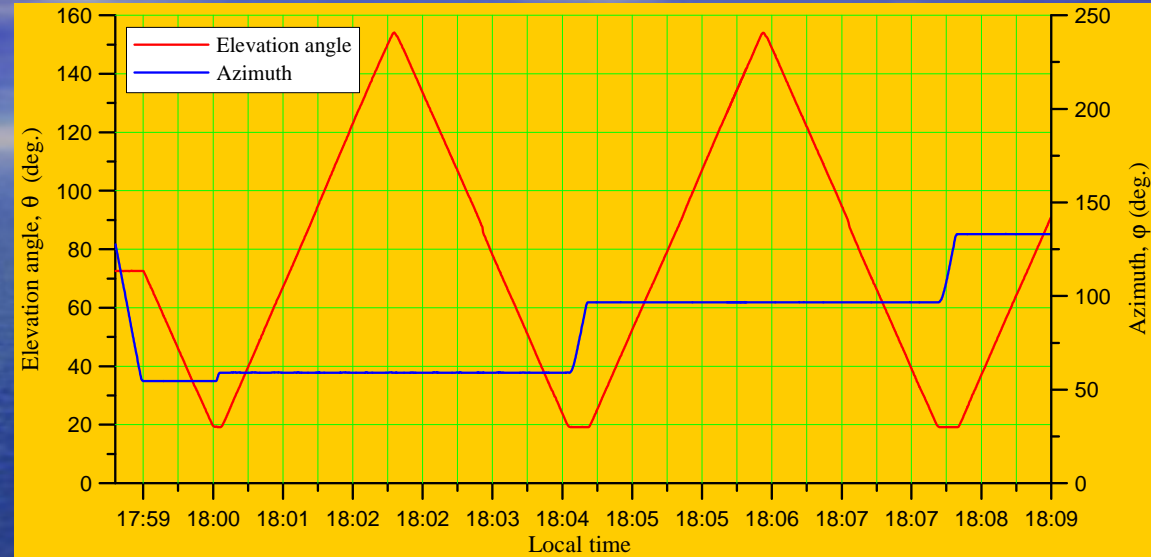
$$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = 2\pi \int_0^{\infty} K^{-2} B(K) K dK$$

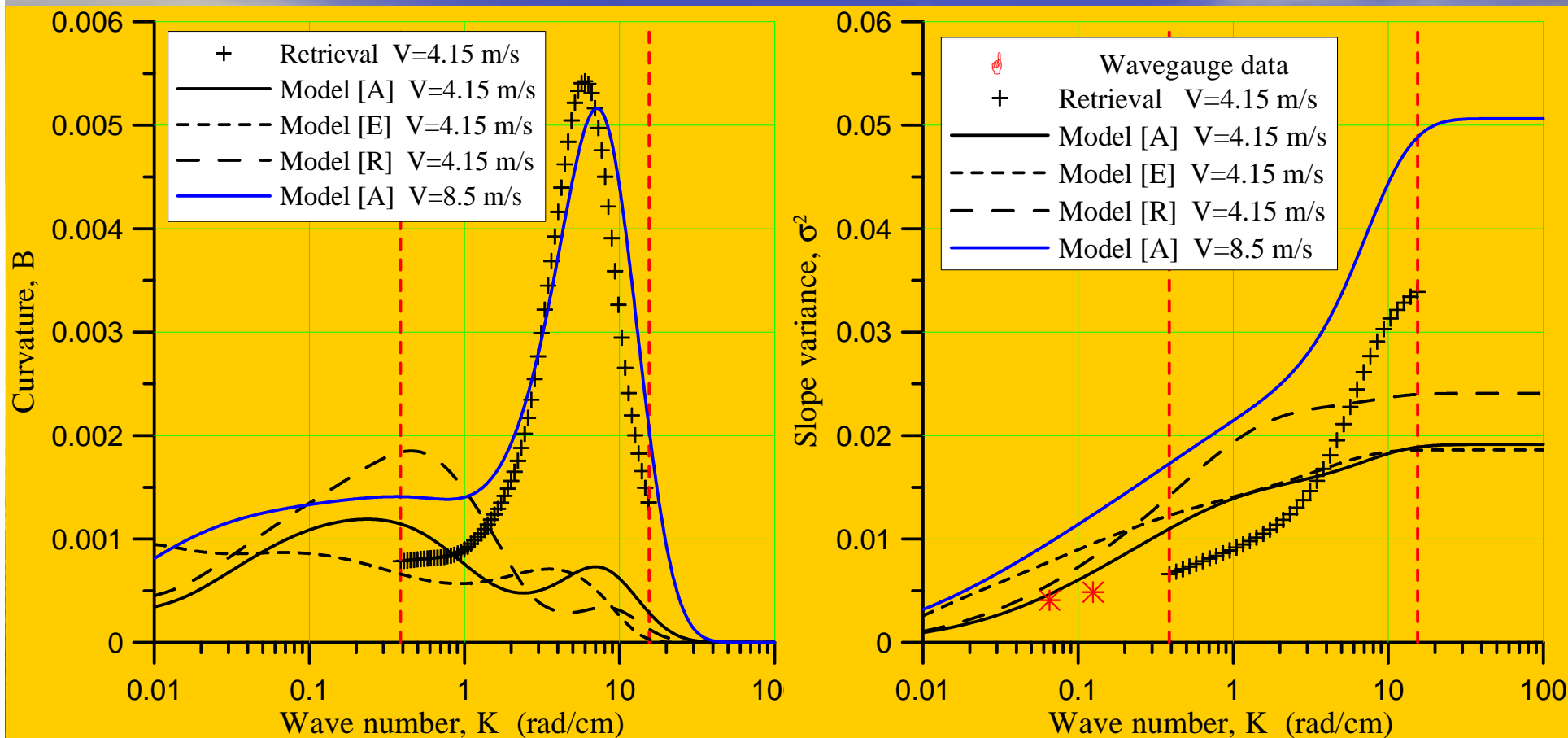




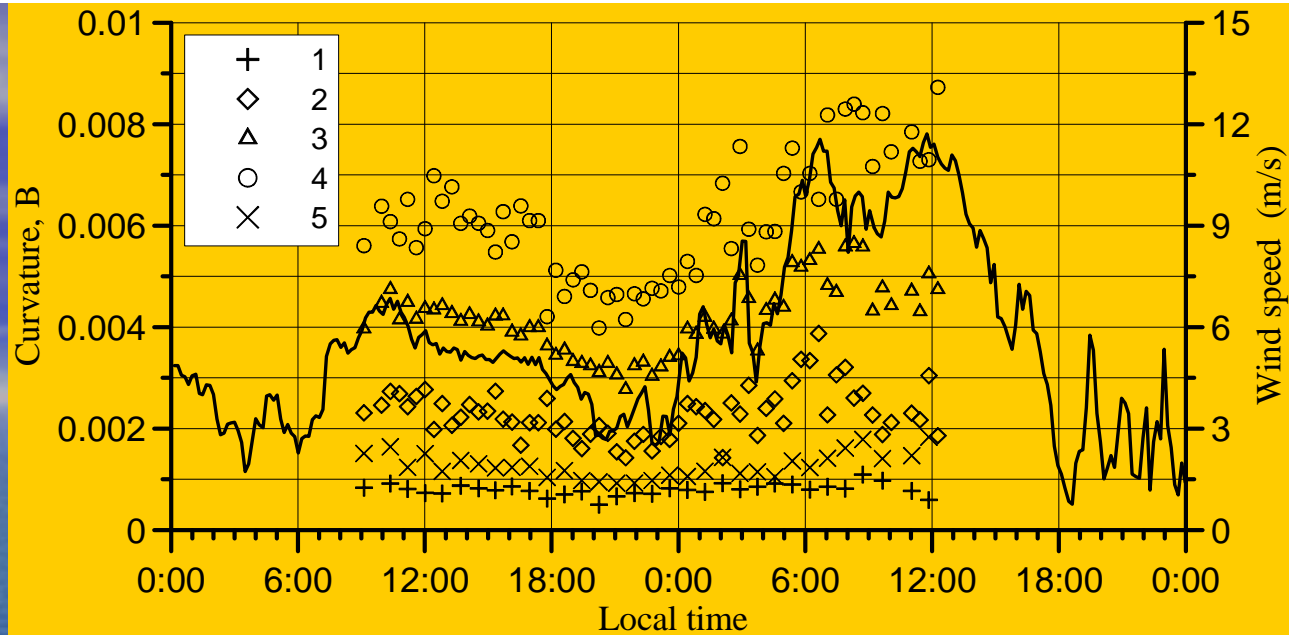
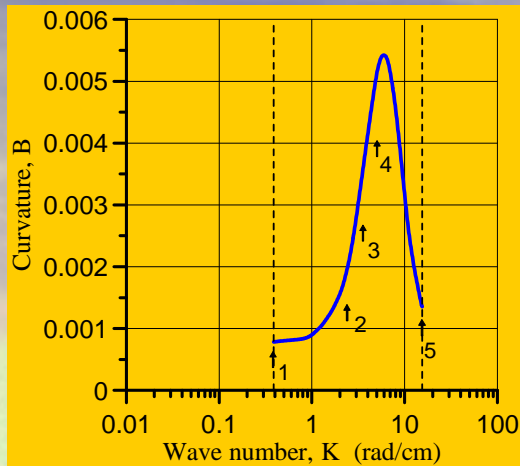
Восстановление спектров кривизны позволило лучше понять природу гистерезиса в характере отклика радиояростной температуры на изменения скорости приводного ветра. На рисунке показан временной ход скорости ветра и спектральной плотности гравитационно-капиллярных волн в трех интервалах волновых чисел: 0.4-1; 5-8 и 8-12 рад/см. Видно, что максимум спектральной плотности смещен относительно максимума скорости ветра на 1.5-2 часа. Интересно, что для уклонов гравитационных волн, показанных на рис. б, подобное запаздывание отсутствует. Напротив, резкое увеличение уклона возникает на начальном участке, когда происходит увеличение скорости ветра.

# Эксперименты SARMOС'05 и SARMOС'07 на платформе «Кацивели»

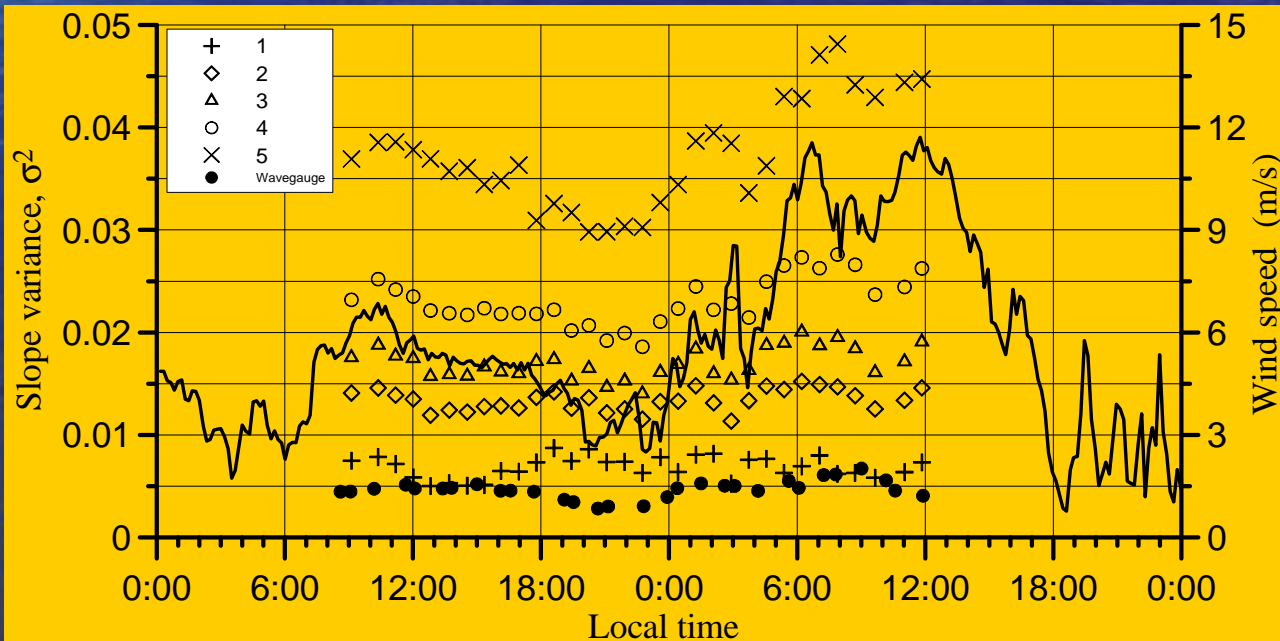
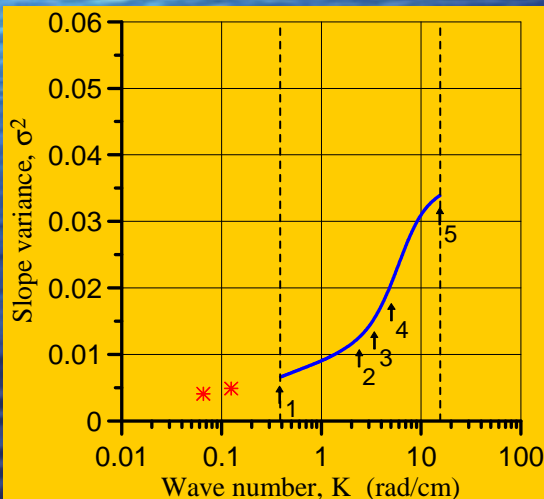




Пример восстановленного спектра  $B(K)$  (левый график) и дисперсии уклонов  $\sigma^2$  (правый график), скорость ветра 4.15 м/с. Красные звездочки – данные струнных волнографов, цветные кривые – модельные спектры различных авторов.



Временные зависимости восстановленных значений спектра кривизны (вверху) и функции дисперсии уклонов (внизу), рассчитанных для различных волновых чисел.



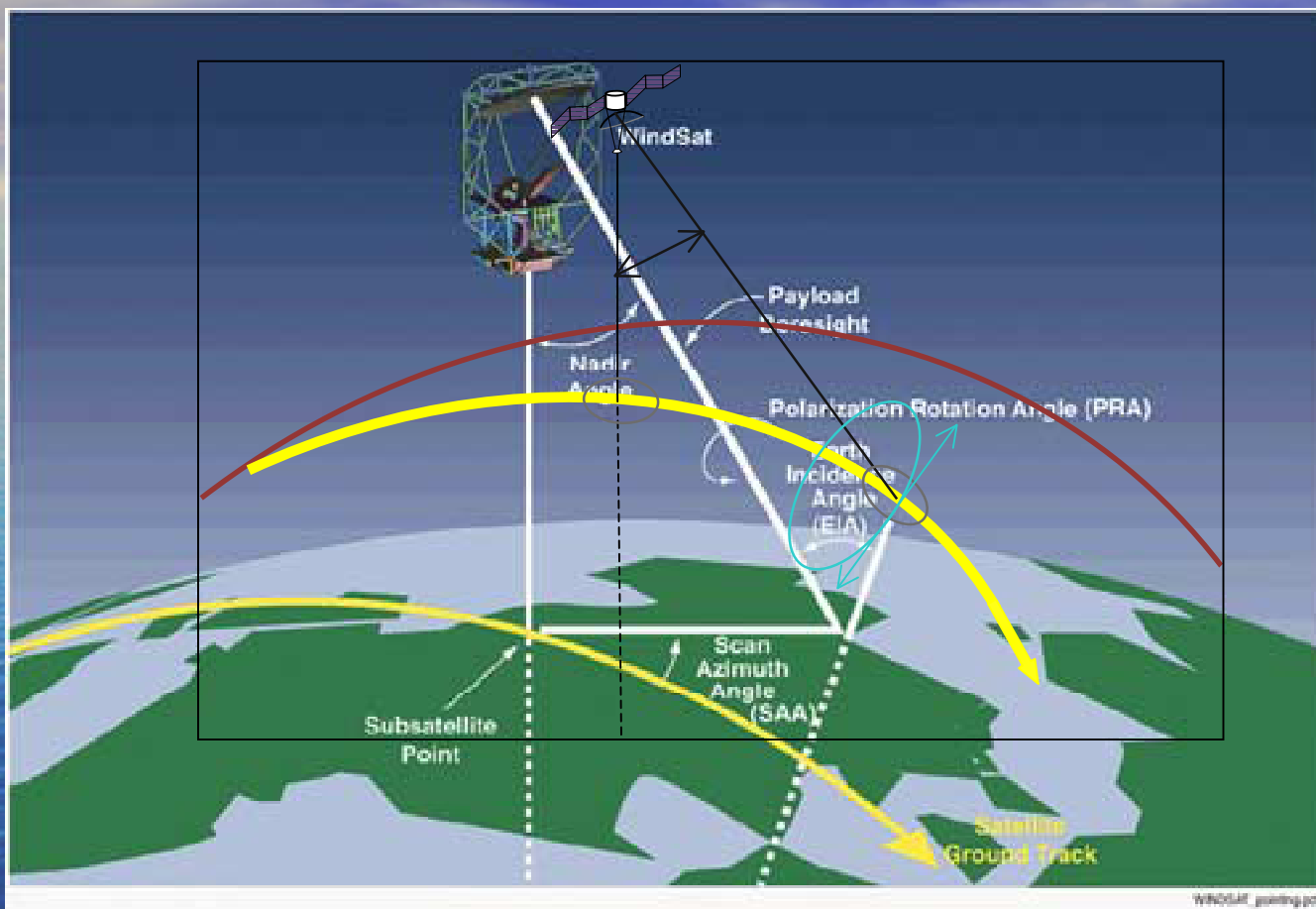
# Заключение

- Представленные результаты свидетельствуют о возможности применения метода НРРС для восстановления параметров спектра ГКВ и мониторинга состояния водной поверхности.
- Восстановленные дистанционно значения дисперсии уклонов и спектра кривизны демонстрируют зависимость от величины скорости приповерхностного ветра.
- Использование методики нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС) позволило детально исследовать динамику радиометрического отклика в условиях переменного ветра, обнаружить новый эффект, заключающийся в том, что при уменьшении скорости ветра яркостная температура уменьшается с некоторым запаздыванием, величина которого составляет 1–2 часа.
- Полученные результаты могут использоваться для интерпретации спутниковых данных и разработке новых алгоритмов определения параметров морской поверхности по многоканальным радиометрическим измерениям с аэрокосмических носителей.

# Дальнейшие исследования

- Усовершенствование аппаратуры
- Усовершенствование модели морской поверхности и методики решения обратной задачи;
- Сравнение НРРС с оптическими методами;
- Исследование динамики пространственного спектра ГКВ в натуральных условиях и изучение влияния на него параметров ветрового потока, энергонесущих компонент волнения, поверхностно-активных веществ, турбулентности в приповерхностном слое и т.д.

# Измерения из космоса





**Спасибо за внимание**