



**Результаты натуральных измерений  
эффективной излучательной способности водной  
среды в присутствии ветрового волнения**

**Садовский И.Н., Сазонов Д.С.**

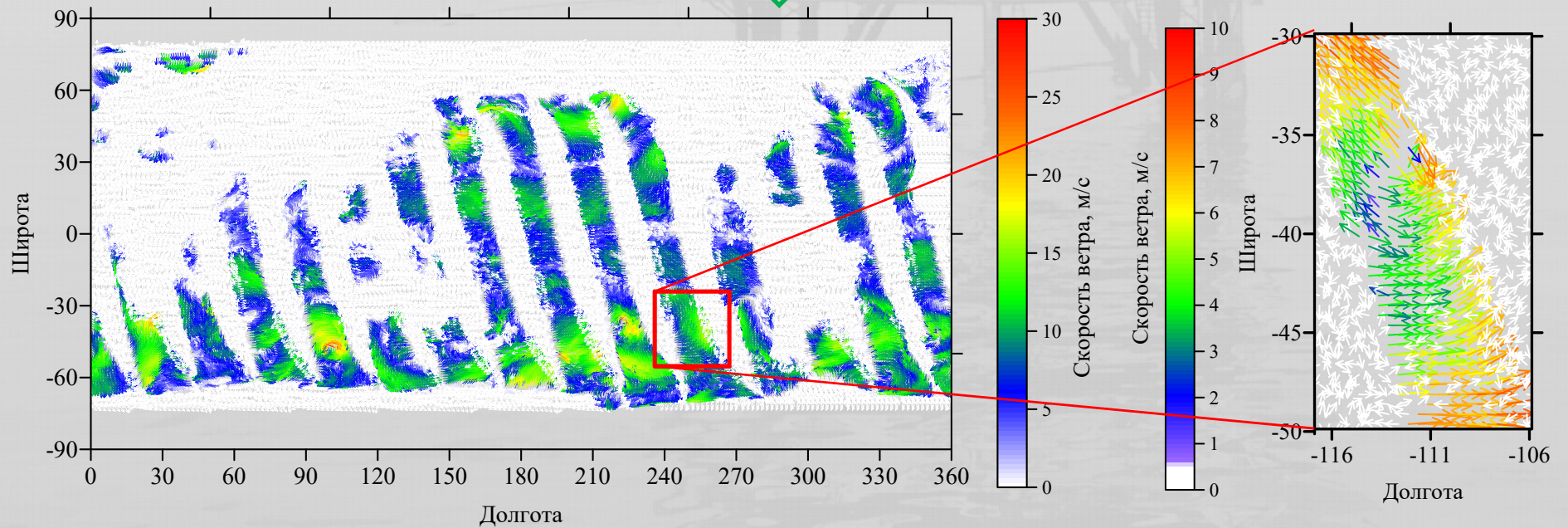
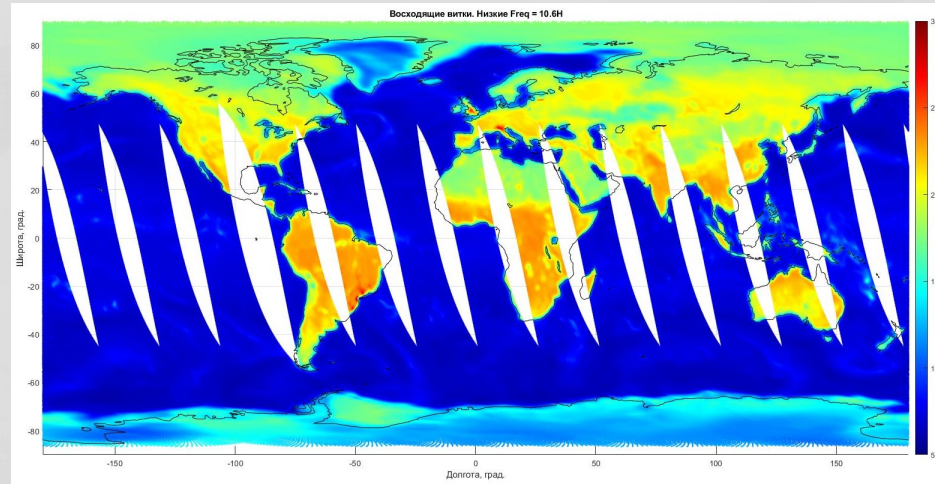
Институт космических исследований РАН, Москва

E-mail: [Ilya\\_Nik\\_Sad@mail.ru](mailto:Ilya_Nik_Sad@mail.ru)



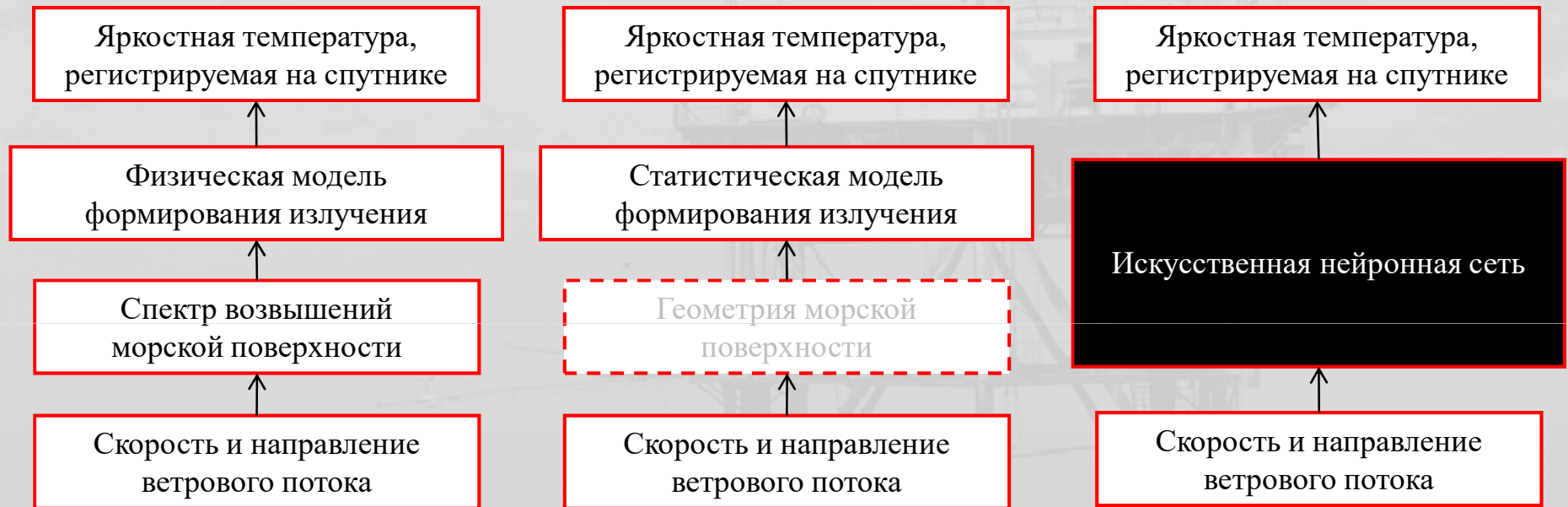
**Институт Космических Исследований  
Space Research Institute**

# Актуальность работы



## Актуальность работы

### Модель переноса излучения (Radiative transfer model)

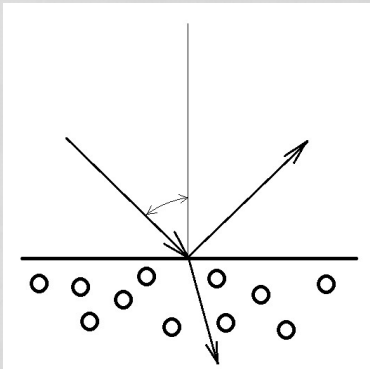


Трохимовский Ю.Г. Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.

Meissner Th., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incident angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. Vol. 50. N. 8. P. 3004–3026.

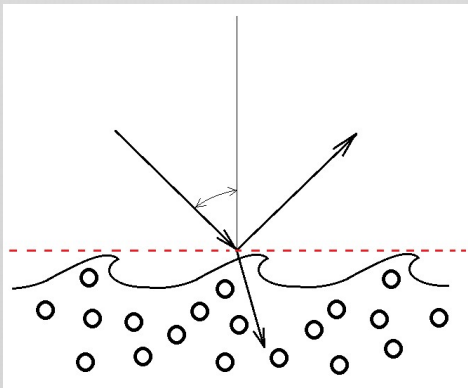
## Актуальность работы

Модель переноса излучения. Гладкая водная поверхность.



$$T_B = T_{BU} + \tau' \cdot (1 - R_0) \cdot T_S + \tau' \cdot R_0 \cdot (T_{BD} + \tau' \cdot T_{cold})$$

Модель переноса излучения. Взволнованная водная поверхность.



$$T_B = T_{BU} + \tau' \cdot E \cdot T_S + \tau' \cdot T_{B\Omega} ,$$

$$T_{B\Omega} = R \cdot (T_{BD} + \tau' \cdot T_{cold}) + T_{B\text{scat}} \cdot$$

$$R = 1 - E$$

$$E = E_0 + \Delta E_W + \Delta E_\varphi$$

Meissner Th., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incident angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. Vol. 50. N. 8. P. 3004–3026.

## Актуальность работы

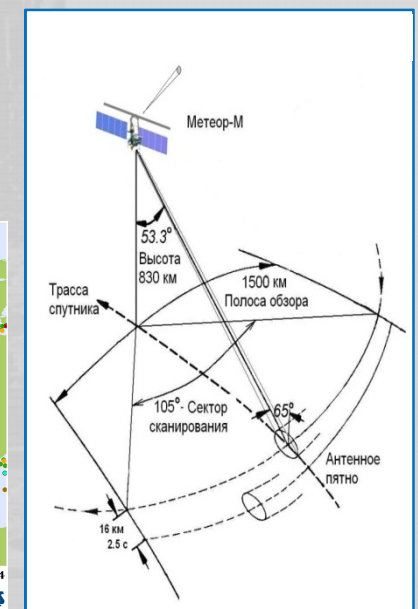
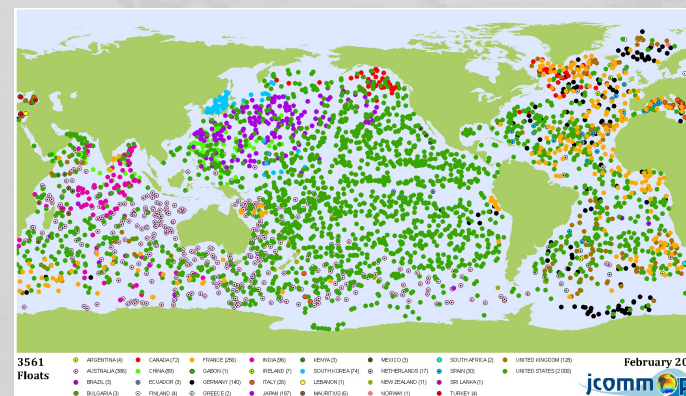
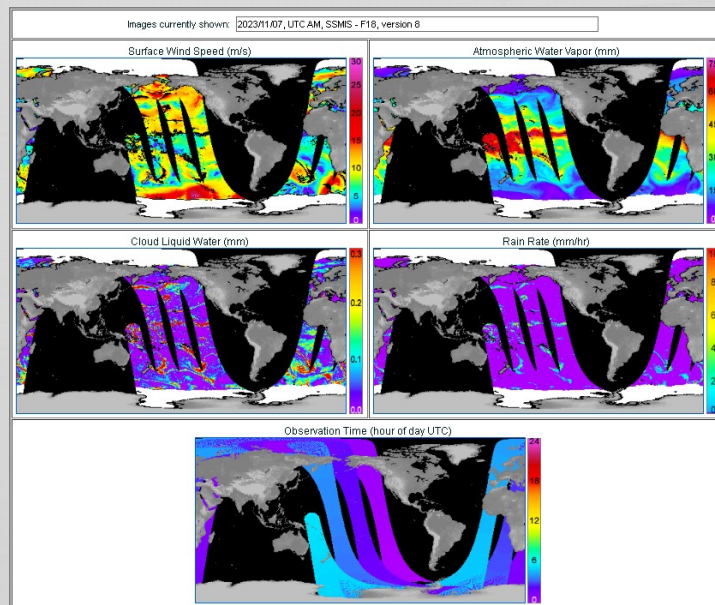
*Достоинства подхода:*

- Модель «рабочая», позволяет уже сейчас решать множество задач ДЗЗ.
- Высокая статистическая обеспеченность.

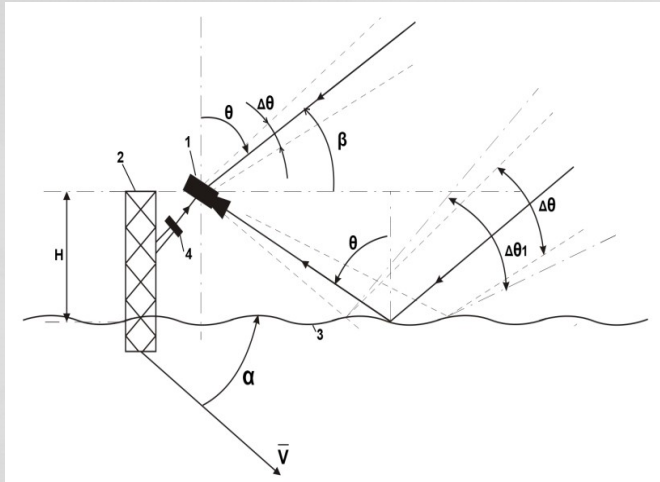
*Недостатки:*

- Получаемые аппроксимации действительны только для параметров наблюдения системы, с помощью которой они получены. Это касается геометрии, частотно-поляризационного плана и т.д.
- Интерполяция и экстраполяция «модели» в другие области частот, углов наблюдения и т.п., является некорректной.
- Последнее касается и экстремальных значений восстанавливаемых физических параметров.

*Вывод:* дальнейшее развитие/уточнение модели переноса излучения, построенной на основе понятия «эффективного коэффициента отражения/излучения», требует проведения натурных исследований в широком диапазоне углов, частот, поляризаций и т.д.



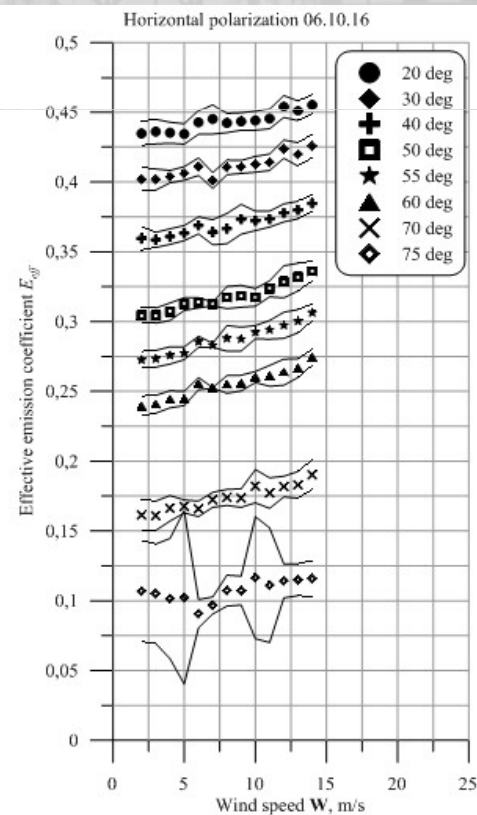
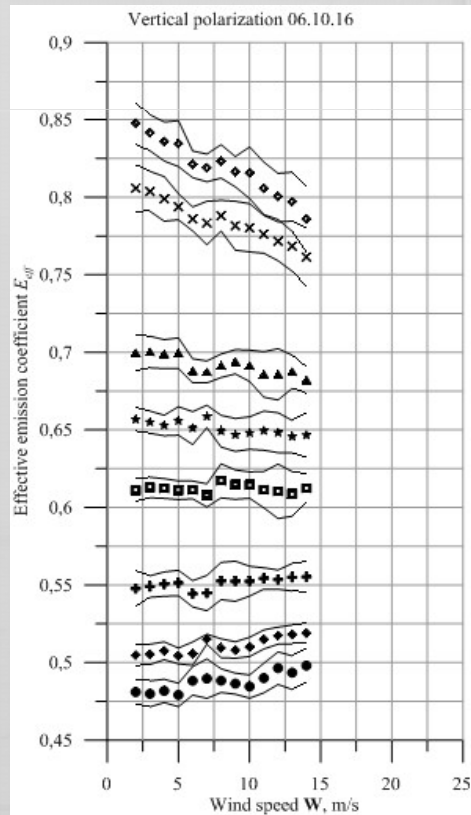
## Ранее полученные результаты



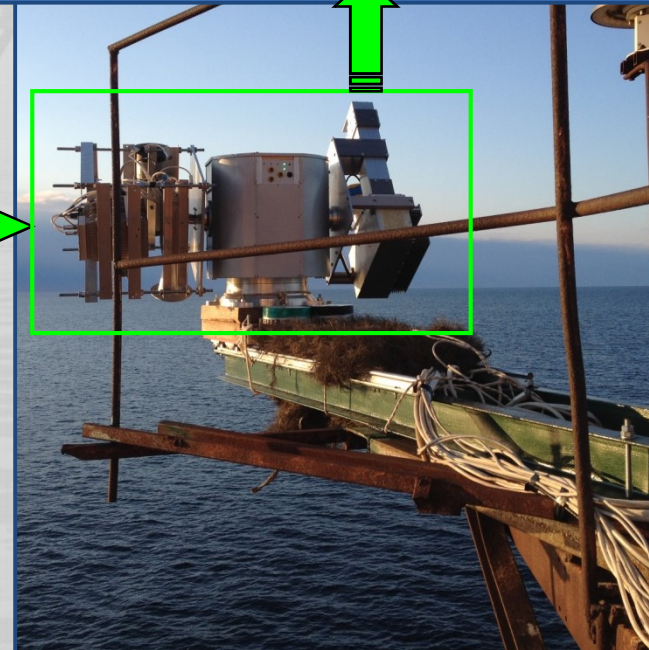
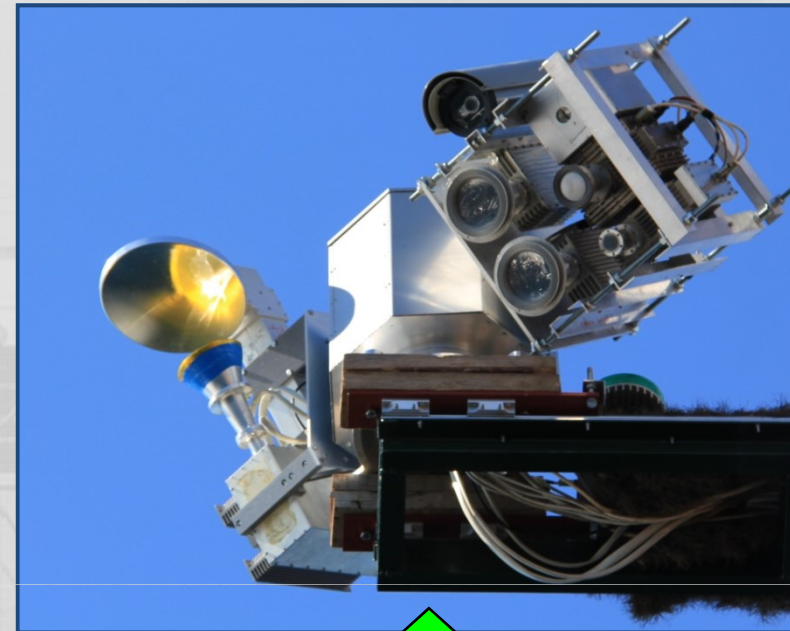
Стерлядкин В.В., Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Шарков Е.А. Наземные радиометрические измерения эффективной излучательной способности морской поверхности без абсолютной калибровки// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 29–41.

$$T_B = T_{BU} + \tau' \cdot E_{eff} \cdot T_S + \tau' \cdot R_{eff} \cdot (T_{BD} + \tau' \cdot T_{cold})$$

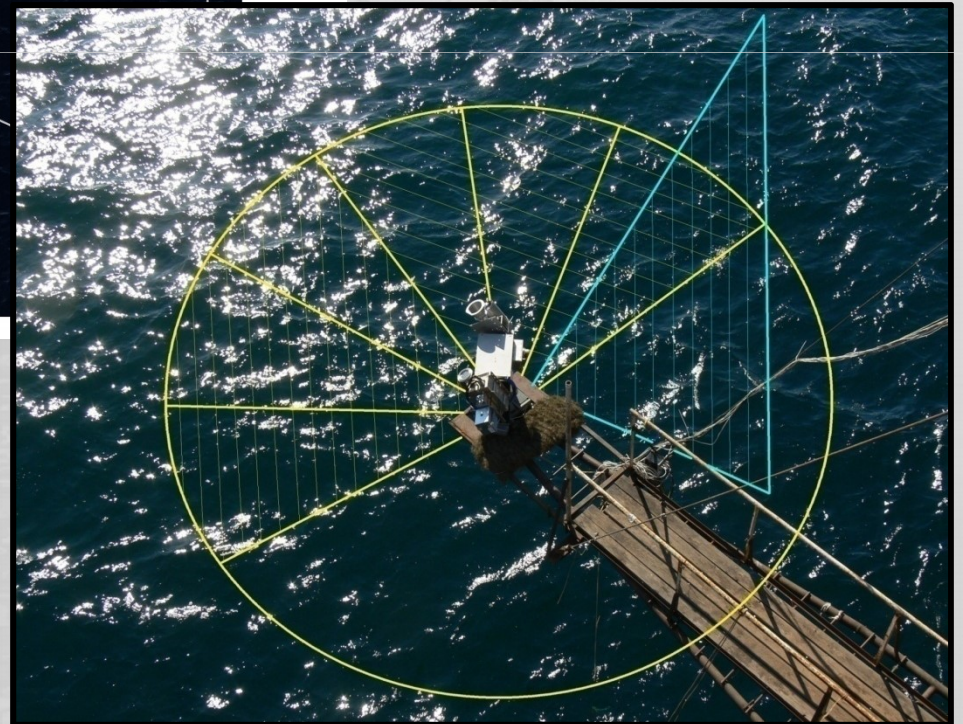
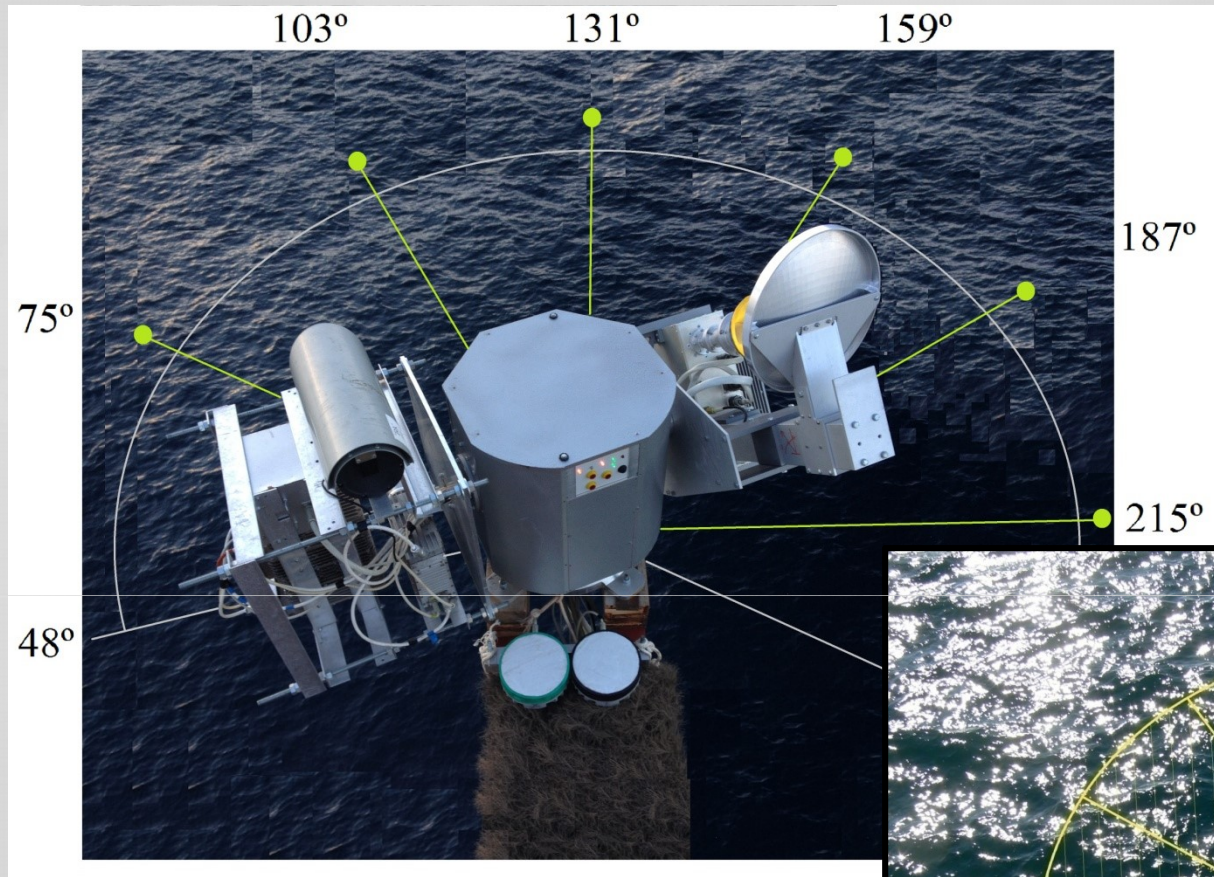
$$E_{eff} = f(\lambda, pol, \theta, |\vec{V}|, \varphi, \tau, \dots)$$



# Описание эксперимента 2018 г.



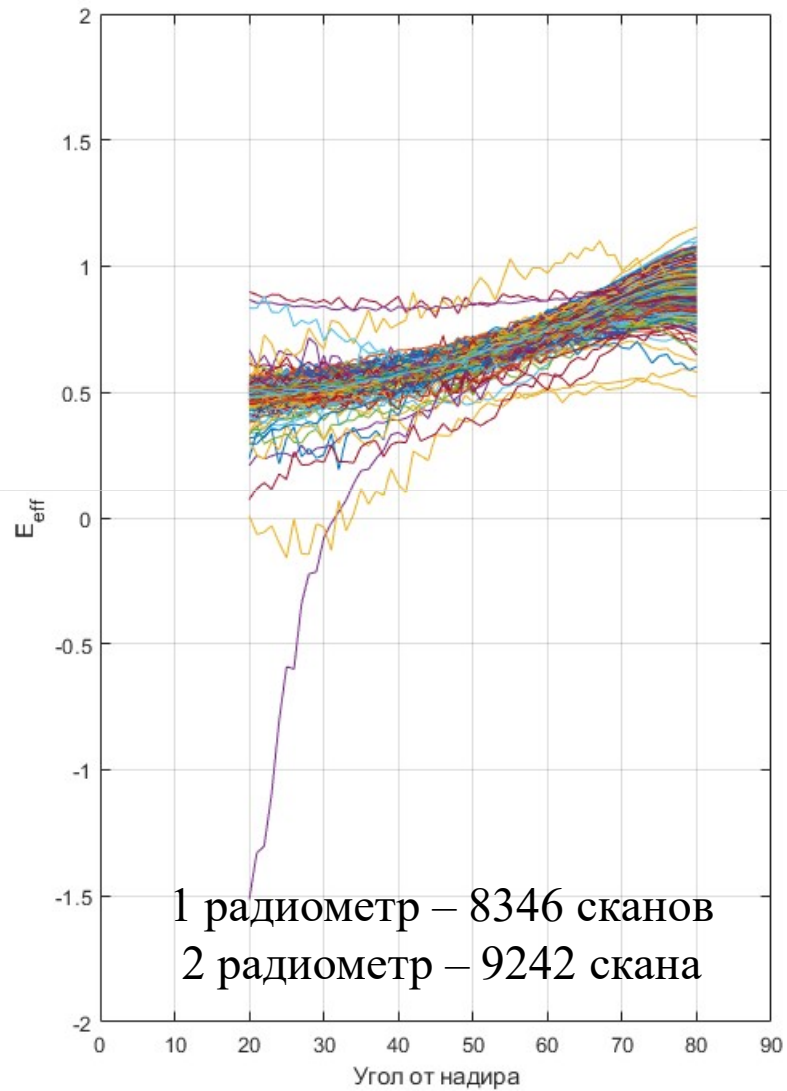
## Описание эксперимента 2018 г.



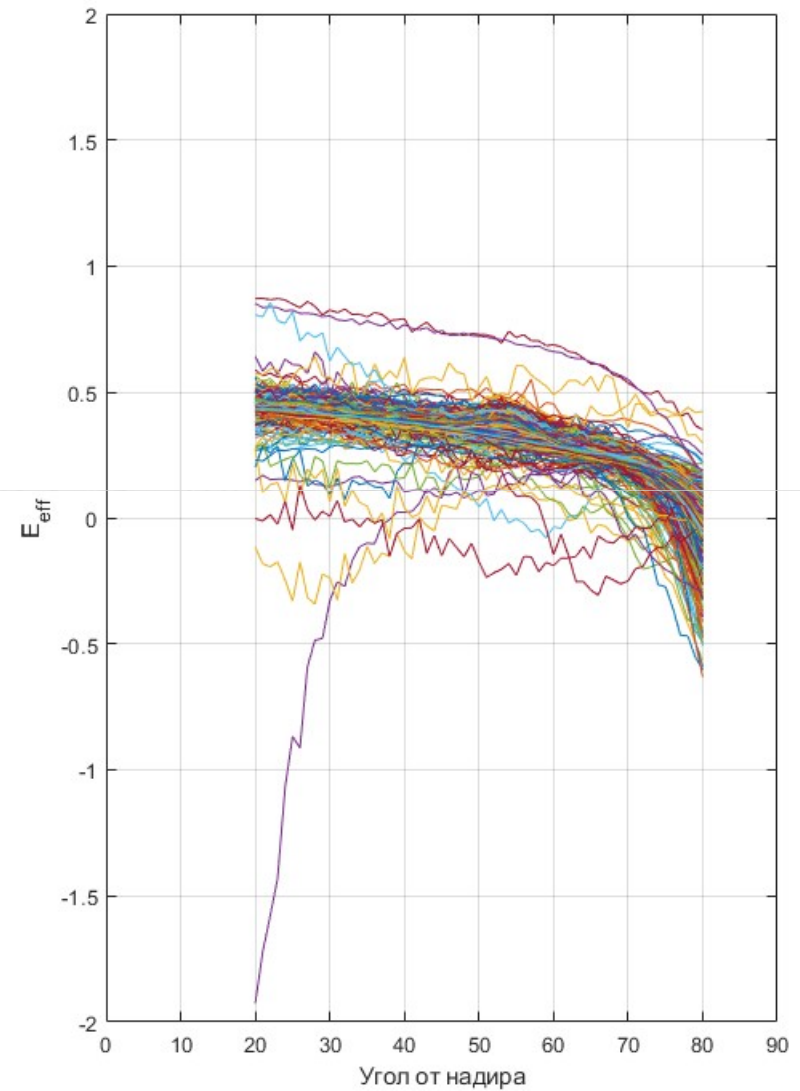


# Оценка влияния состояния атмосферы

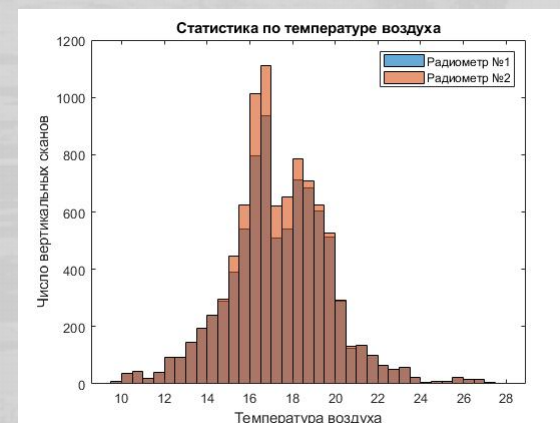
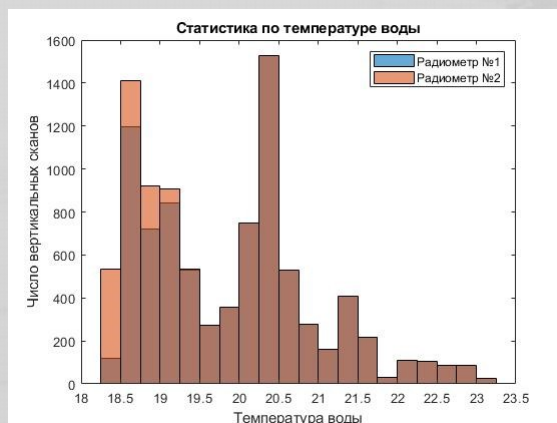
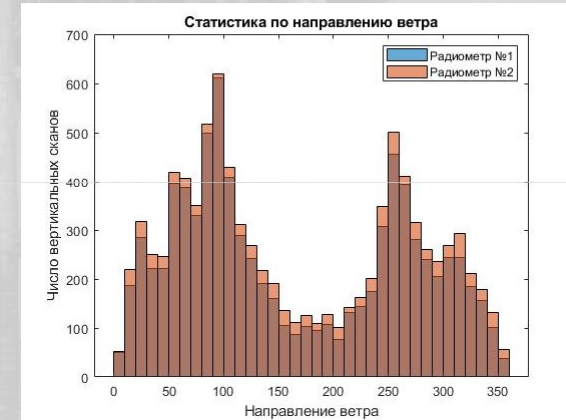
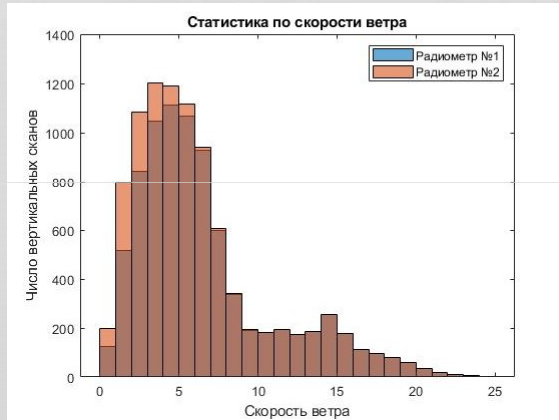
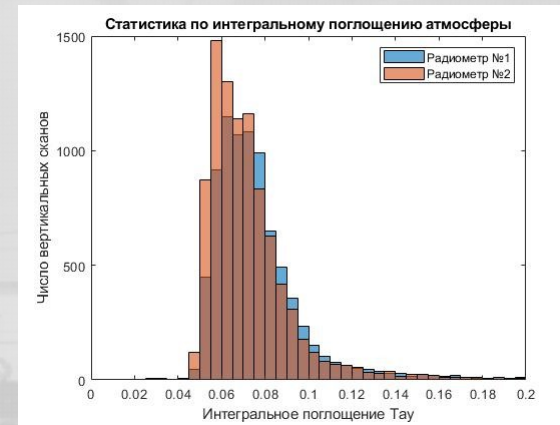
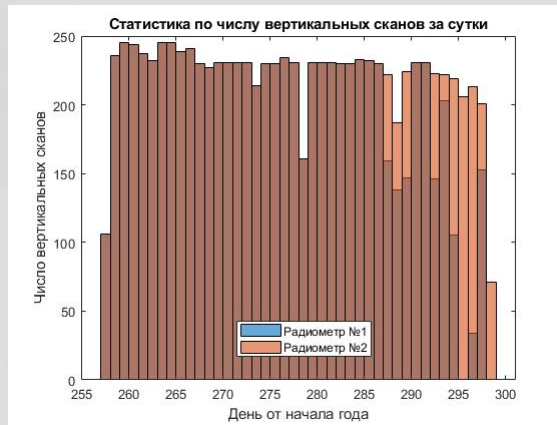
## Вертикальная поляризация



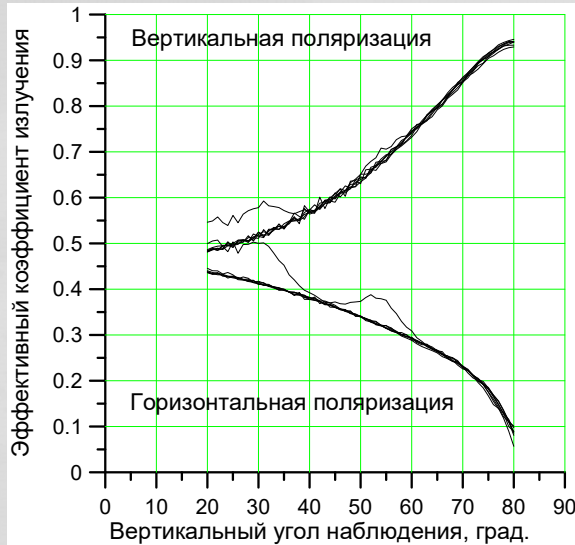
## Горизонтальная поляризация



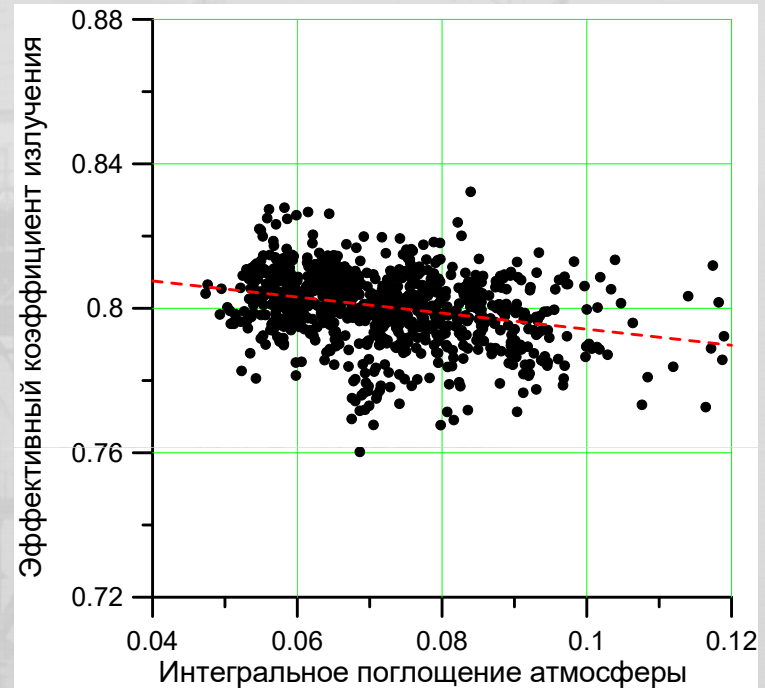
# Оценка влияния состояния атмосферы



# Оценка влияния состояния атмосферы

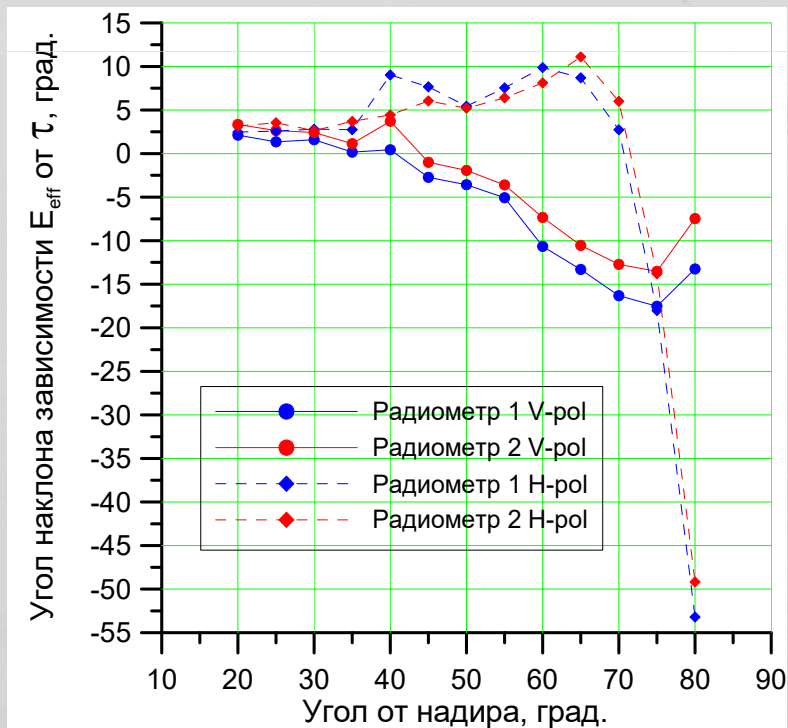


Вертикальная поляризация  
 Скорость ветра 5 м/с  
 Надирный угол 65 градусов

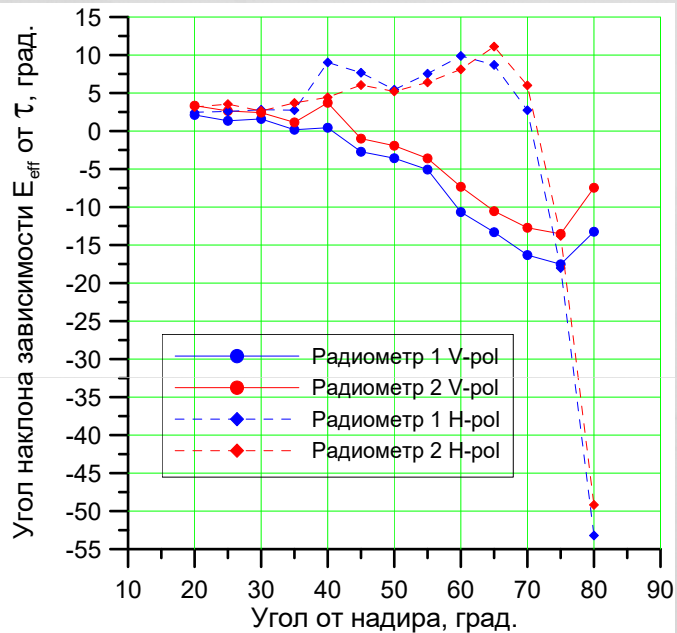


$$E_{eff}(\tau) = -0,2226143739 \cdot \tau + 0,8164826933$$

$$-12,55^\circ$$



## Оценка влияния состояния атмосферы



□ Как и ожидалось, эффективный коэффициент излучения демонстрирует четкую зависимость от состояния атмосферы.

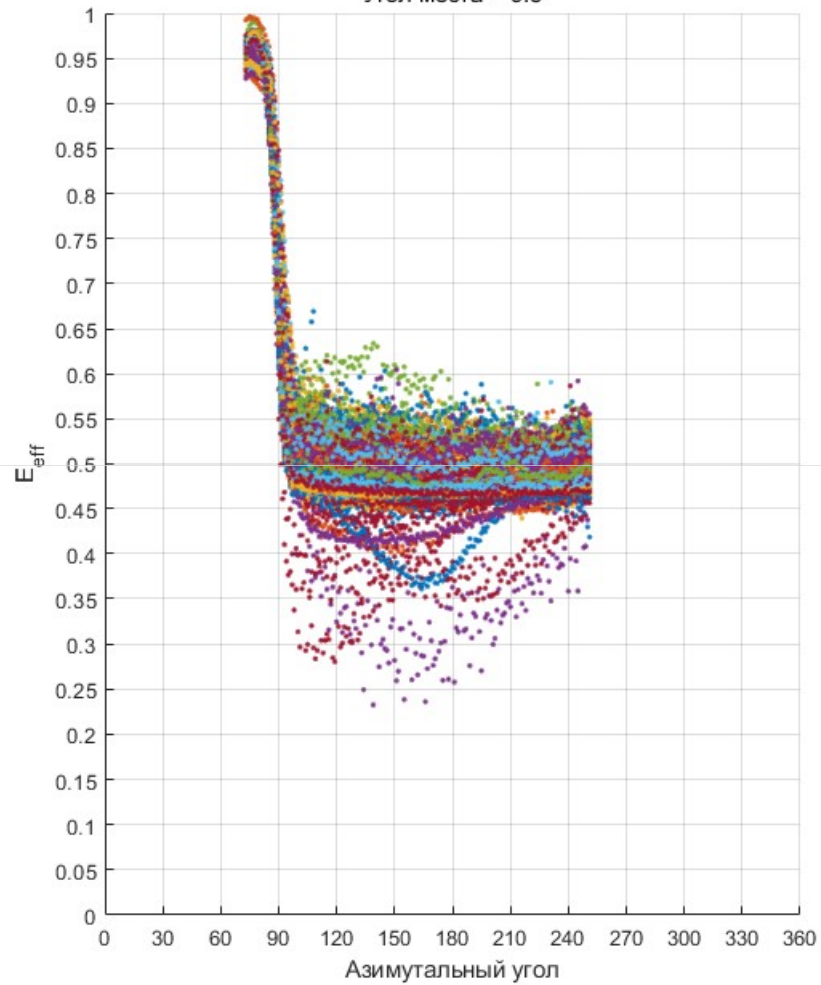
□ Изменение чувствительности эффективный коэффициент излучения к состоянию атмосферы с ростом надирного угла является «зеркальной» к функции эффективного коэффициента излучения от угла визирования.

□ Для углов визирования, близких к надиру, на обеих поляризациях увеличение интегрального поглощения атмосферы приводит к росту эффективного коэффициента излучения. Дальнейшее изменение угла сопровождается усилением указанного эффекта на горизонтальной поляризации, вплоть до 70 градусов от надира, в то время как для вертикальной поляризации имеет строго обратный эффект.

# Азимутальная анизотропия эффективного коэффициента излучения

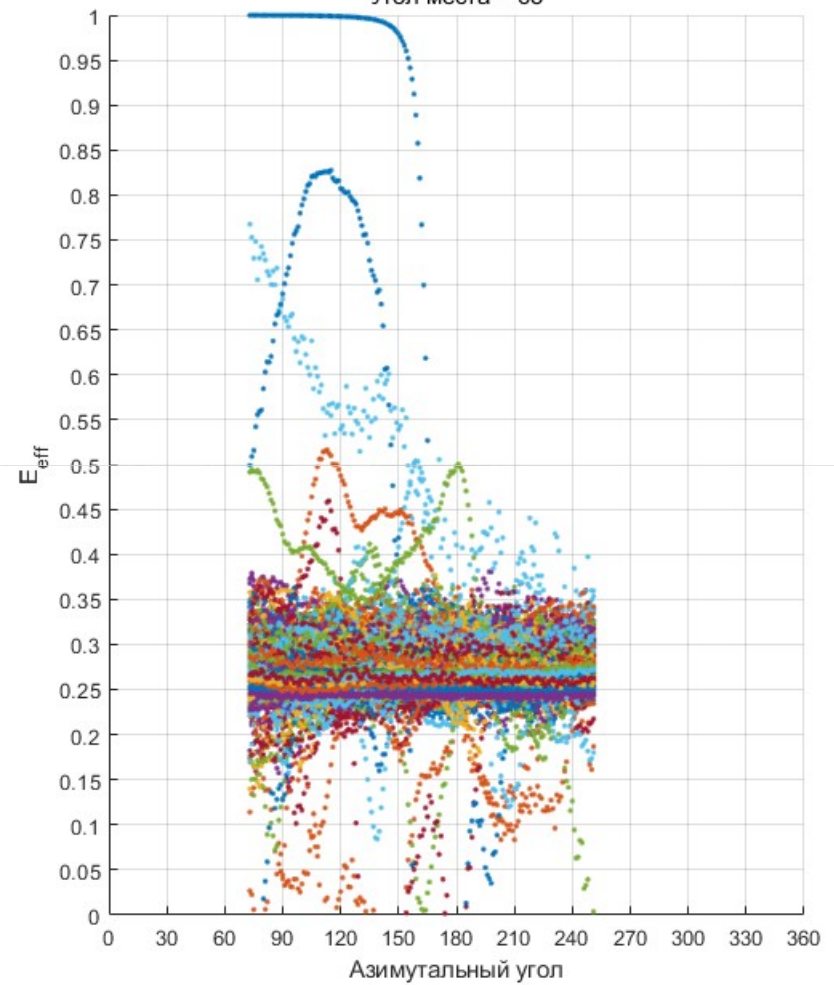
Вертикальная поляризация, Радиометр 8мм № 2

Угол места = 9.5

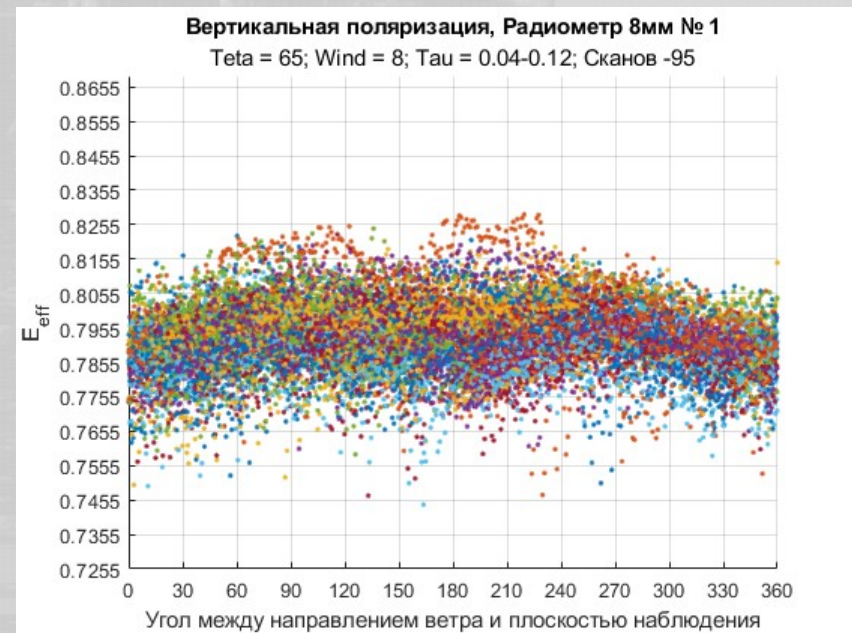
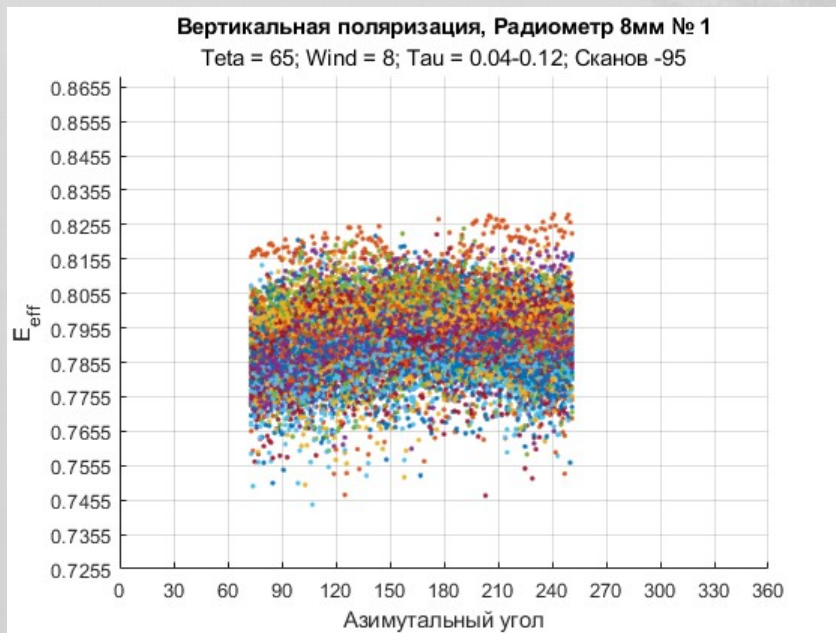
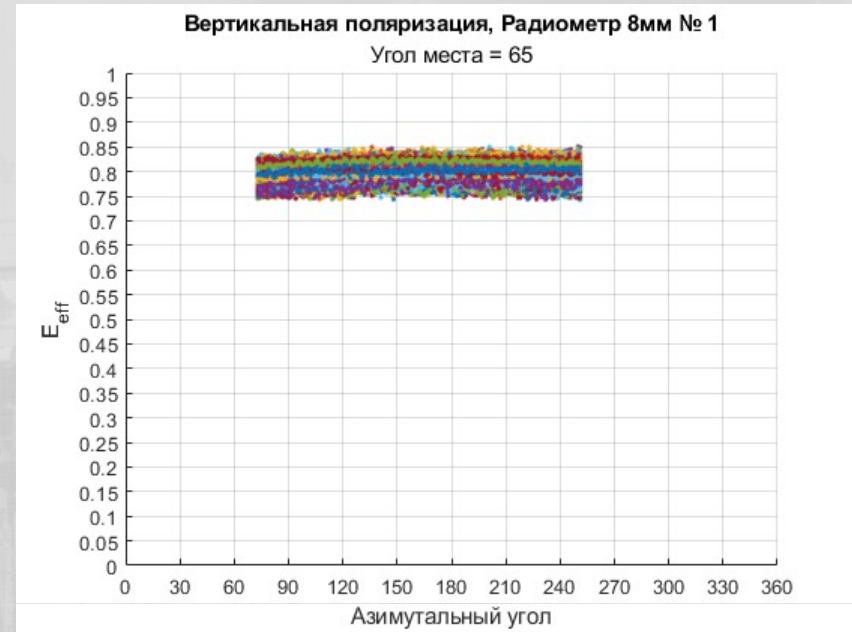
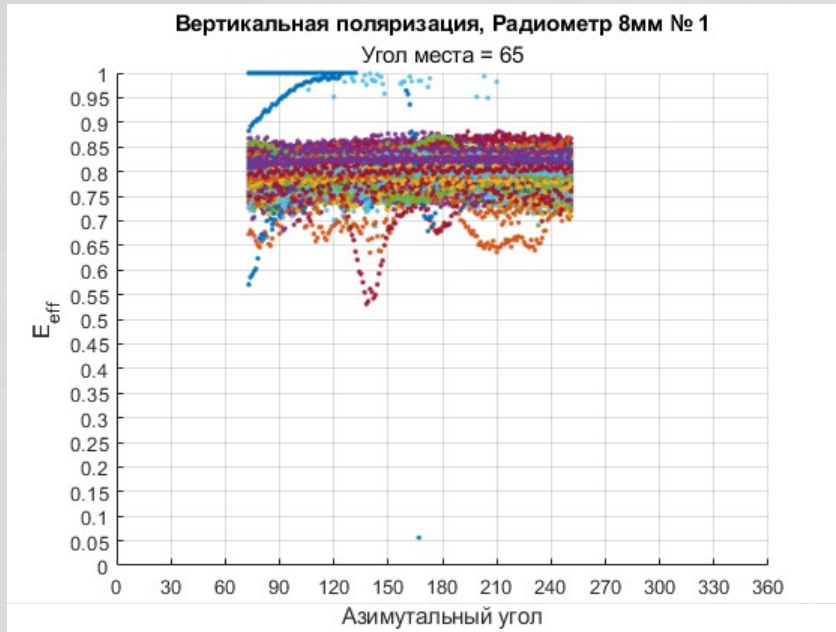


Горизонтальная поляризация, Радиометр 8мм № 1

Угол места = 65



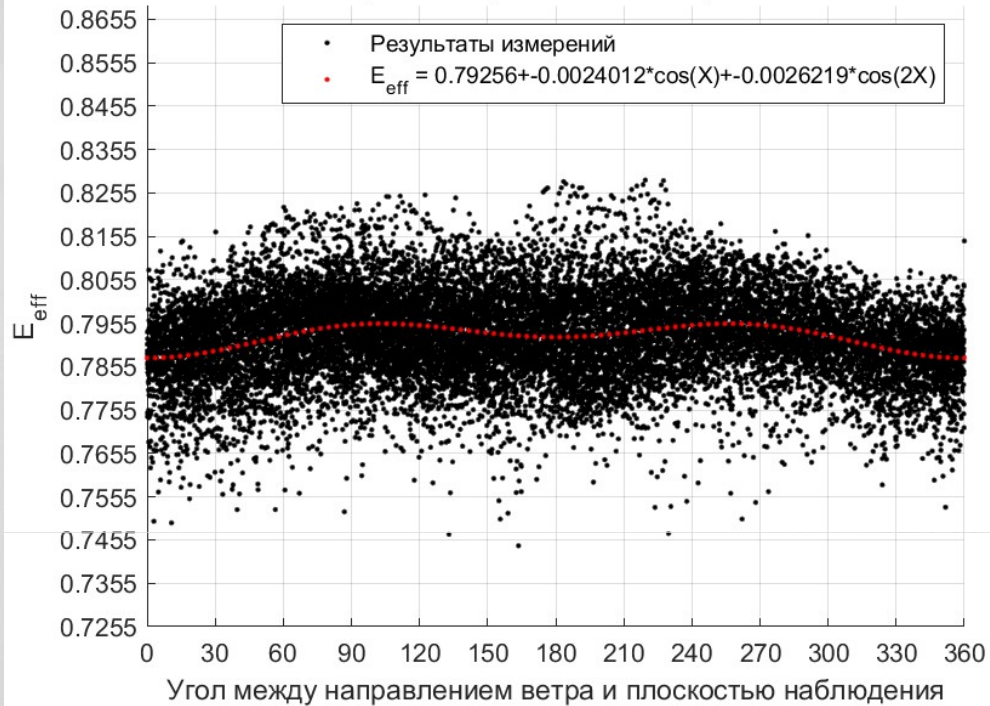
# Азимутальная анизотропия эффективного коэффициента излучения



# Азимутальная анизотропия эффективного коэффициента излучения

Вертикальная поляризация, Радиометр 8мм № 1

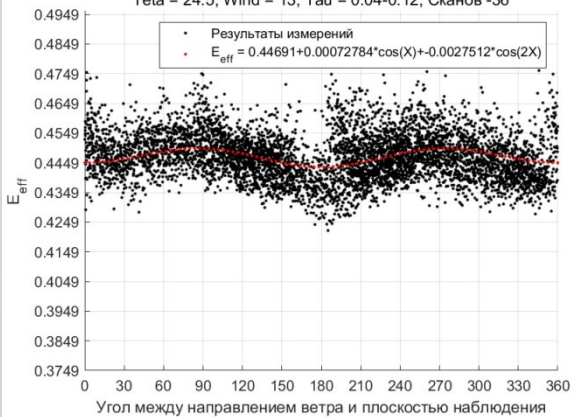
Teta = 65; Wind = 8; Tau = 0.04-0.12; Сканы -95



$$E_{\text{eff}}(\varphi) = a_0 + a_1 \cos(\varphi) + a_2 \cos(2\varphi)$$

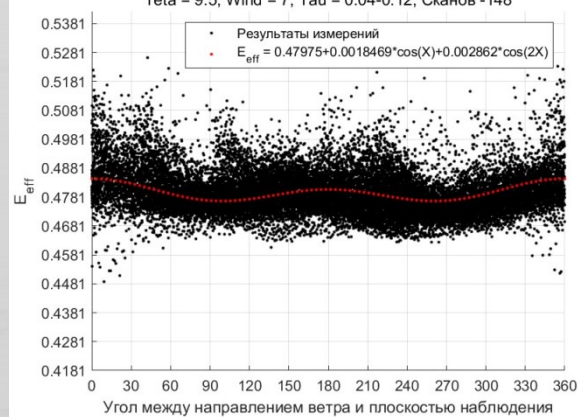
Горизонтальная поляризация, Радиометр 8мм № 2

Teta = 24.5; Wind = 13; Tau = 0.04-0.12; Сканы -36



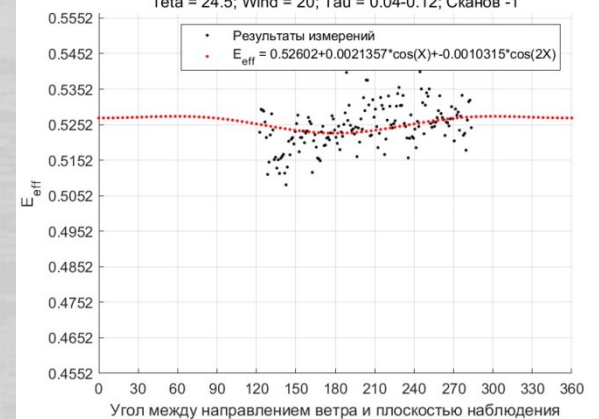
Вертикальная поляризация, Радиометр 8мм № 2

Teta = 9.5; Wind = 7; Tau = 0.04-0.12; Сканы -148

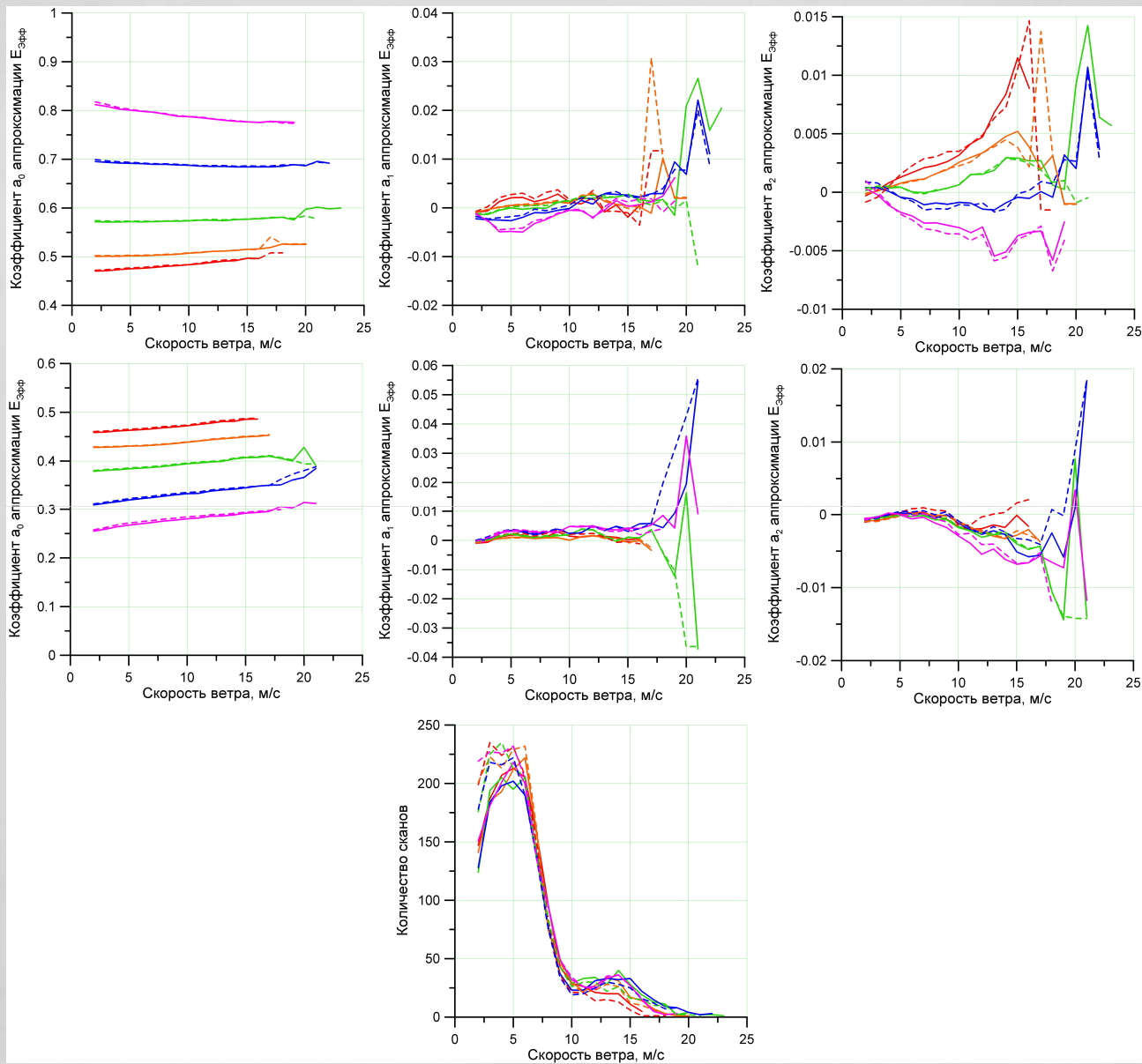


Вертикальная поляризация, Радиометр 8мм № 2

Teta = 24.5; Wind = 20; Tau = 0.04-0.12; Сканы -1

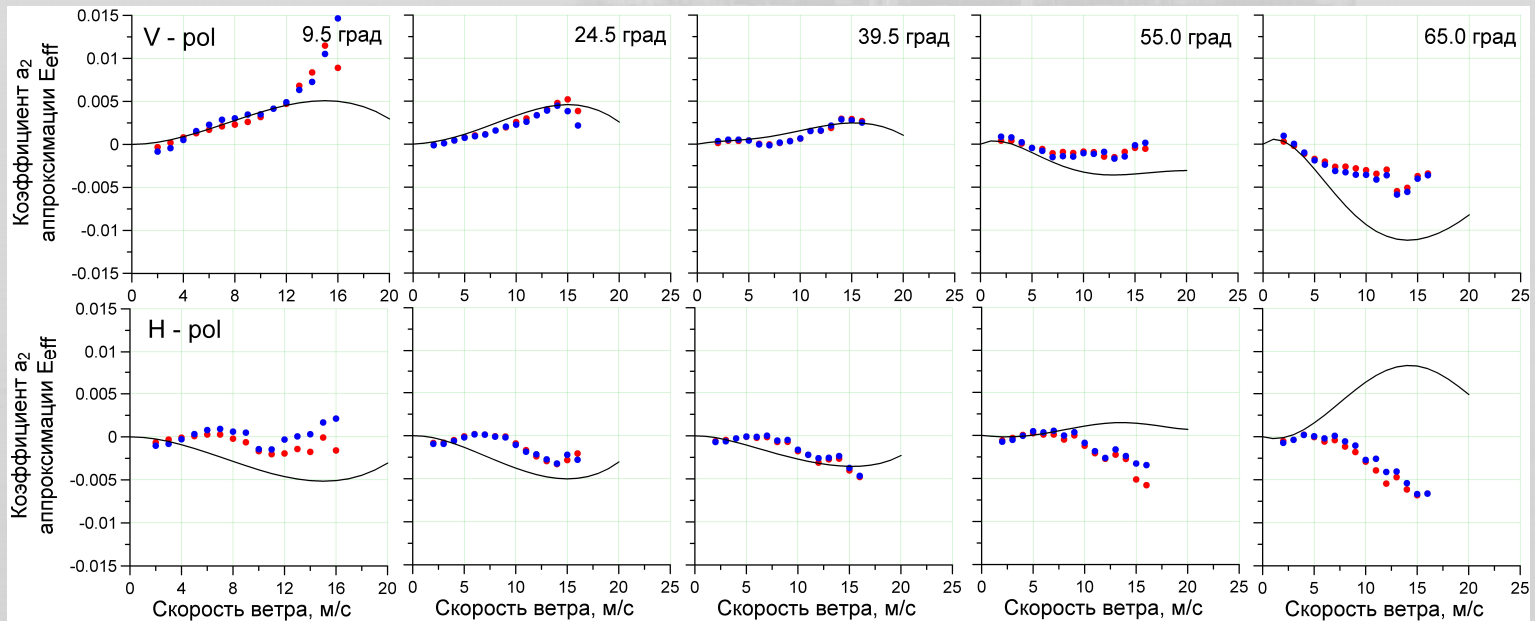
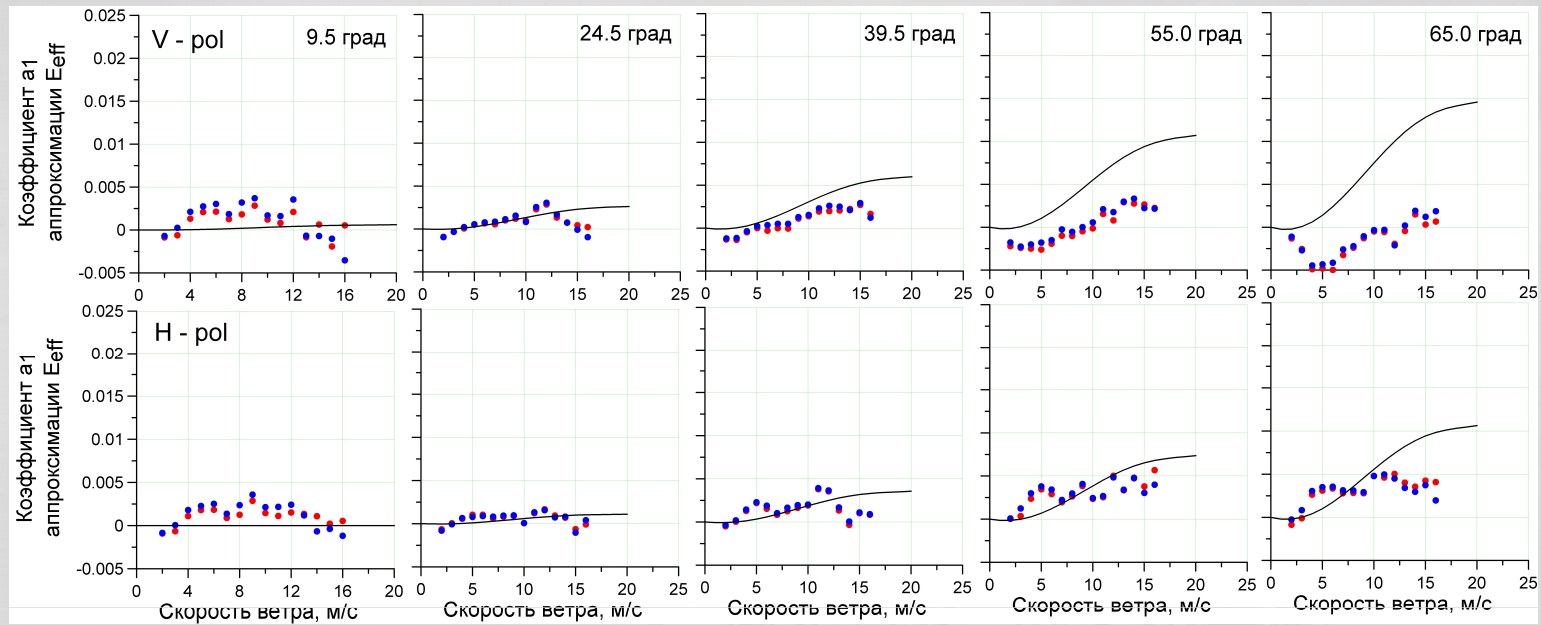


# Азимутальная анизотропия эффективного коэффициента излучения






# Азимутальная анизотропия эффективного коэффициента излучения



## Азимутальная анизотропия эффективного коэффициента излучения

- ❑ Масштаб продемонстрированного эффекта азимутальной анизотропии эффективного коэффициента отражения имеет значения, схожие с представленными в литературе.
- ❑ Результаты, полученные с помощью двух, идентичных по характеристикам радиометрических приемников свидетельствуют о корректности проведенных измерений и последующей обработки.
- ❑ Наилучшее совпадение результатов моделирования и экспериментальных исследований наблюдается для коэффициента  $a_1$ , полученного для горизонтальной поляризации, а также для коэффициента  $a_2$ , на вертикальной.
- ❑ В свою очередь, коэффициент  $a_1$ , соответствующий горизонтальной поляризации, на настильных углах ( $55^\circ$  и выше), демонстрирует наибольшие отличия от модели, соответствующие прямо противоположным эффектам.
- ❑ Разброс полученных значений, наблюдаемый для скоростей ветра более 10 м/с, соответствует существенному снижению объемов выборки анализируемых данных.
- ❑ Резкое уменьшение объема выборок анализируемых данных с ростом скорости ветра не позволяет говорить о достоверности результатов, соответствующих скоростям ветра более 14-15 м/с.
- ❑ Наблюдаемые отличия в области малых скоростей ветра (несмотря на большую статистическую обеспеченность), такие как возникновение максимумов и параллельное смещение вдоль горизонтальной оси, могут быть вызваны существенными отличиями состояния водной поверхности в точке реализации измерений от условий развитого волнения в открытом океане.



Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского научного фонда (проект №23-17-00189).

**Спасибо за внимание!**



**Институт Космических Исследований  
Space Research Institute**