An aerial photograph of a forest fire. The image shows a large area of dark, charred ground and dense, billowing white and grey smoke that rises into the sky. A bright, intense fire source is visible in the lower right corner, casting a strong light. The overall scene is dramatic and captures the scale of the wildfire.

**Разработка геофизической модельной функции для  
восстановления динамических параметров атмосферного  
пограничного слоя на основе совмещенных данных со спутника  
Sentinel-1 и радиометра SFMR**

ЕРМАКОВА О.С., РУСАКОВ Н.С., ПОПЛАВСКИЙ Е.И., СЕРГЕЕВ Д.А., ТРОИЦКАЯ Ю.И.



Активное микроволновое дистанционное зондирование является одним из самых надежных инструментов для мониторинга поверхности океана, широко используемых в частности при разработке алгоритмов восстановления скорости ветра в морском пограничном слое атмосферы, в том числе для экстремальных погодных явлений, таких как тропические циклоны (ТЦ).

Широко используется для изучения поля скоростей в тропических циклонах радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) С-диапазона, который обеспечивает высокое разрешение и меньше подвержен влиянию осадков.

Для восстановления скорости ветра широко разработаны так называемые геофизические модельные функции (ГМФ) представляющие собой зависимость удельной эффективной площади рассеяния УЭПР от скорости ветра, примерами которых для С-диапазона могут служить, в частности CMOD4, CMOD-IFR, CMOD5, CMOD5.N для сигнала на прямой поляризации. Основной их недостаток-эффект насыщения УЭПР при высоких скоростях ветра.

В связи с этим создан ряд ГМФ, разработанных для сигнала на перекрестной поляризации: C-2PO, H14E, S1IW.NR, MS1A. Однако большинство из них не имеет данных в области экстремально высоких скоростей ветра и нуждается в верификации.

Открытым остается вопрос относительно создания ГМФ для восстановления турбулентного напряжения (скорости трения ветра).



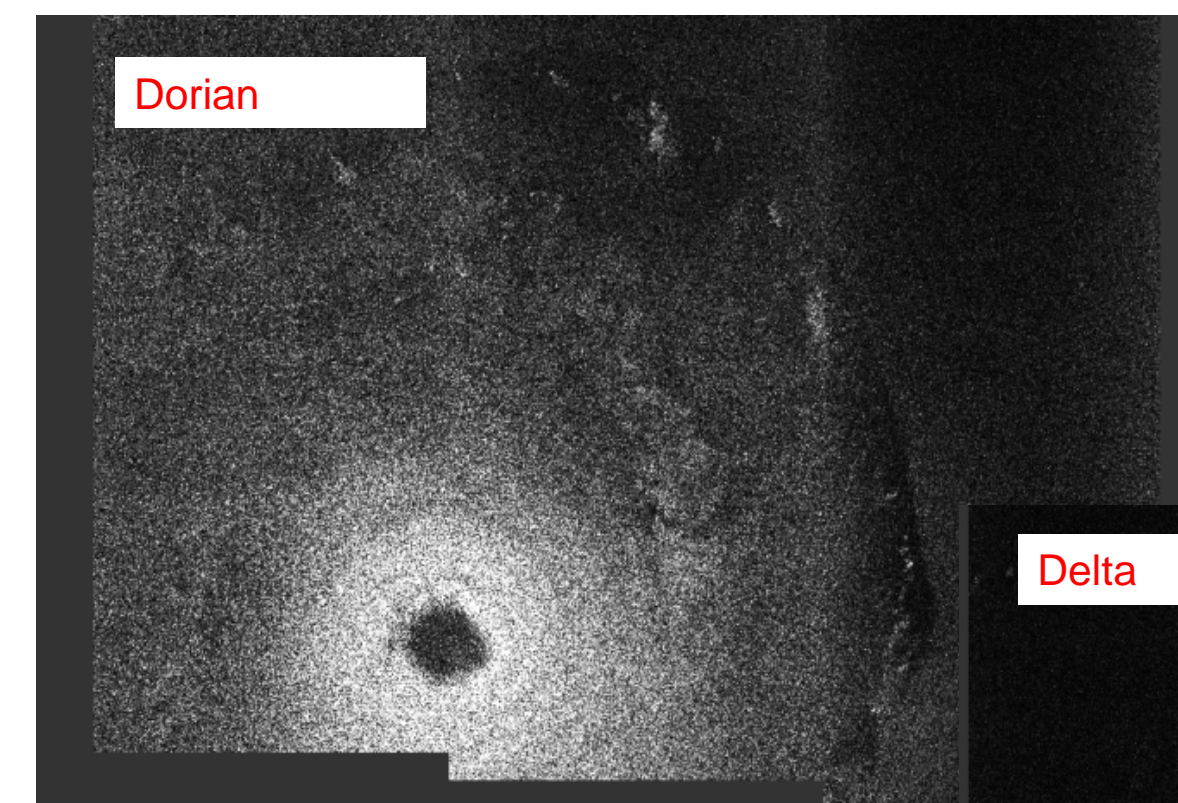
Для анализа в настоящей работе использованы PCA изображения, полученные с помощью инструмента C-SAR, базирующегося на спутниках Sentinel-1A и Sentinel-1B Европейского космического агентства (ESA) для C-диапазона (с частотой 5.405 ГГц) на перекрестной поляризации для режима обзора IW. Для рассмотрения отбирались как снимки, содержащие глаз урагана, так и снимки, содержащие внешнюю часть урагана, не содержащую глаз, но демонстрирующие высокий уровень скоростей ветра, в результате диапазон анализируемых скоростей ветра составил 15–69 м/с.

Для каждого спутникового снимка Sentinel-1 были отобраны синхронизированные с ним по времени и пространству измерения с радиометра SFMR NOAA/HRD. Микроволновый радиометр SFMR измеряет на шести рабочих частотах 4.55, 5.06, 5.64, 6.34, 6.96, 7.22 ГГц яркостные температуры океана. Пространственное разрешение измерений SFMR составляет 1.5 км при типичной скорости самолета 150 м/с, а время сбора данных для всех каналов SFMR составляет 10 секунд.

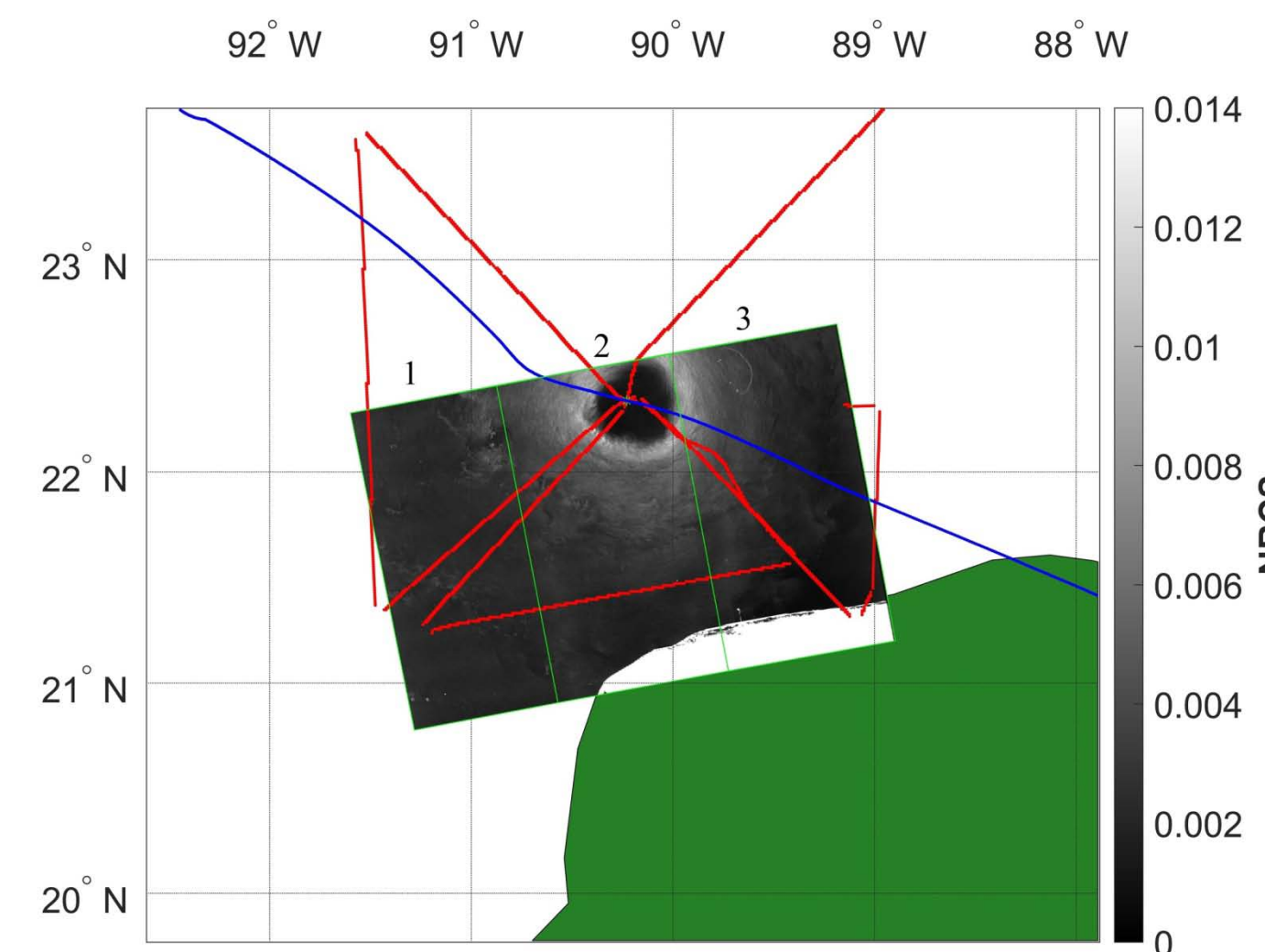
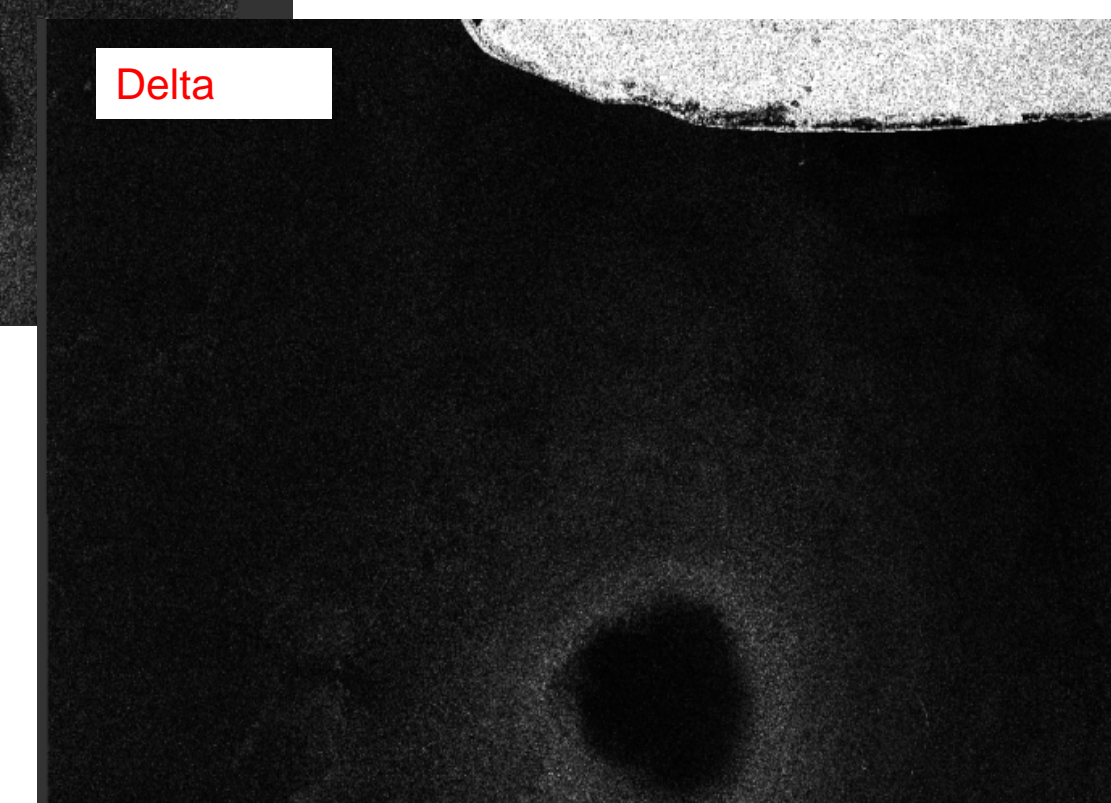


# Перечень тропических циклонов, снимков Sentinel-1 и данных SFMR

Название ТС	Категория	Время снимка (UTC)	Время сбора данных SFMR
Irma	5	2017/09/07 10:30 2017/09/07 23:01 2017/09/07 23:02	2017/09/07 08:55:03–18:20:14 UTC 2017/09/07 20:39:19–05:29:22 UTC
Maria	5	2017/09/23 10:44 2017/09/23 10:45 2017/09/20 10:22	2017/09/23 08:52:15–15:32:11 UTC 2017/09/20 01:12:01–09:17:04 UTC 2017/09/20 11:02:52–11:49:47 UTC
Dorian	5	2019/08/31 10:53	2019/08/31 09:47:23–17:33:15 UTC 2019/08/31 07:29:47–16:07:53 UTC
Delta	4	2019/08/30 22:46 2020/10/08 00:07:56 2020/10/08 00:07:31	2019/08/30 20:30:56–02:46:59 UTC 2020/10/07 20:55:24–05:28:56 UTC 2020/10/07 21:01:53–04:59:45 UTC
Larry	3	2021/09/08 09:54 2021/09/08 09:55	2021/09/08 07:49:34–14:50:44 UTC
Hermine	1	2016/09/01 23:44 2016/09/01 23:45	2016/09/01 18:53:33–00:25:50 UTC



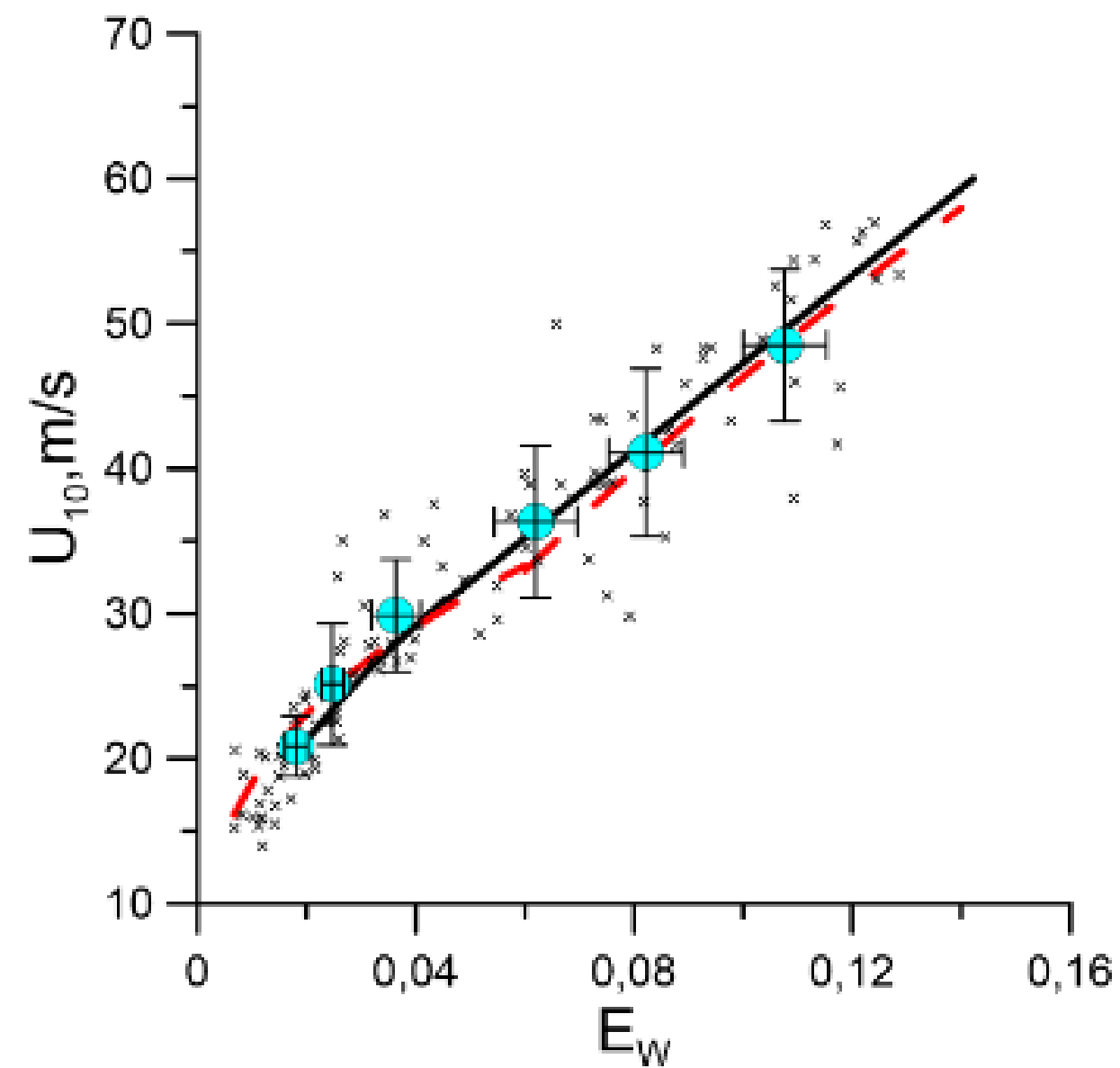
Распределение УЭПР на снимках «глаза» урагана, полученных со спутника Sentinel-1



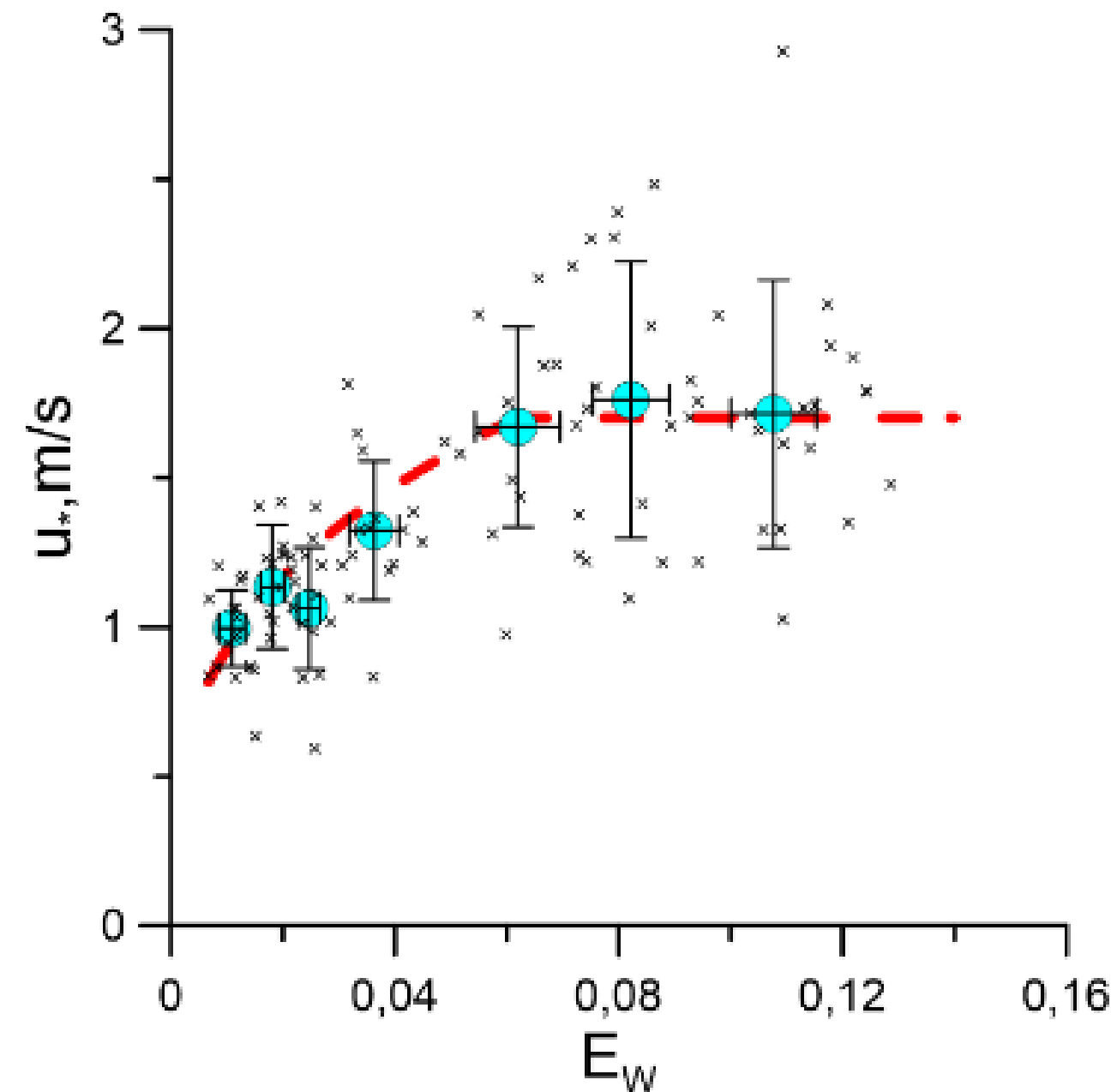
PCA изображение урагана Delta 2020/10/08, полученное со спутника Sentinel-1, красным цветом изображен трек самолета, синим цветом изображен трек урагана, зелеными линиями и цифрами на снимке отмечены различные субполосы.

## Анализ данных, полученных с радиометра SFMR

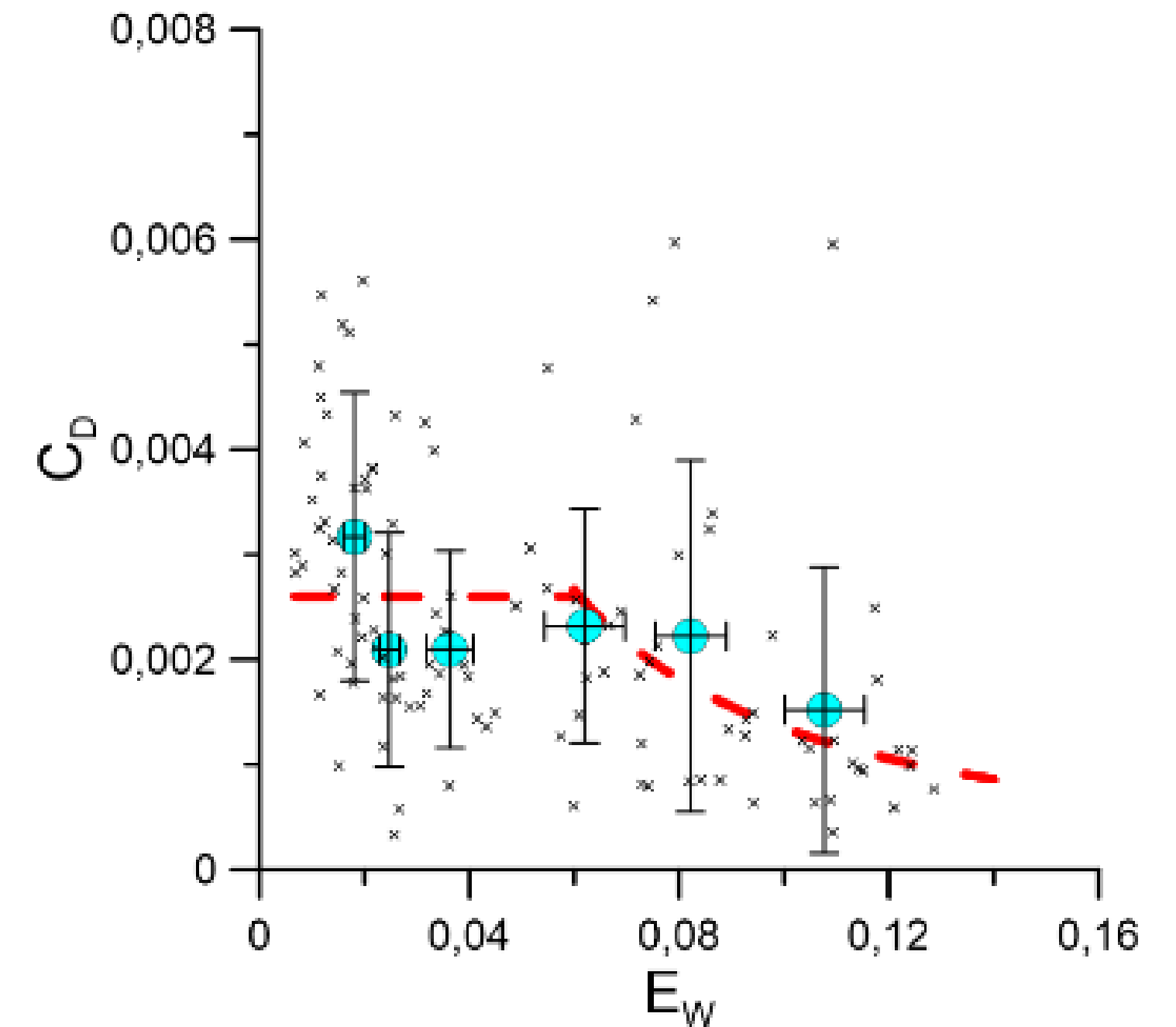
Излучательная способность была получена методом обратного пересчета по ГМФ, предложенной в (Uhlhorn et al., 2007). Этот подход был использован при конструировании альтернативной геофизической модельной функции (Poplavsky et al., 2022), которая позволяет по данным об излучательной способности поверхности океана  $E_w$  определять как скорость ветра на высоте 10 м, так и скорость трения (турбулентное напряжение):



$$U_{10} = \begin{cases} 85E_w^{1/3}, & E_w \leq 0.06, \\ 215E_w^{2/3}, & E_w > 0.06 \end{cases}$$



$$u_* = \begin{cases} 4.3E_w^{1/3}, & E_w \leq 0.06, \\ 1.7, & E_w > 0.06 \end{cases}$$



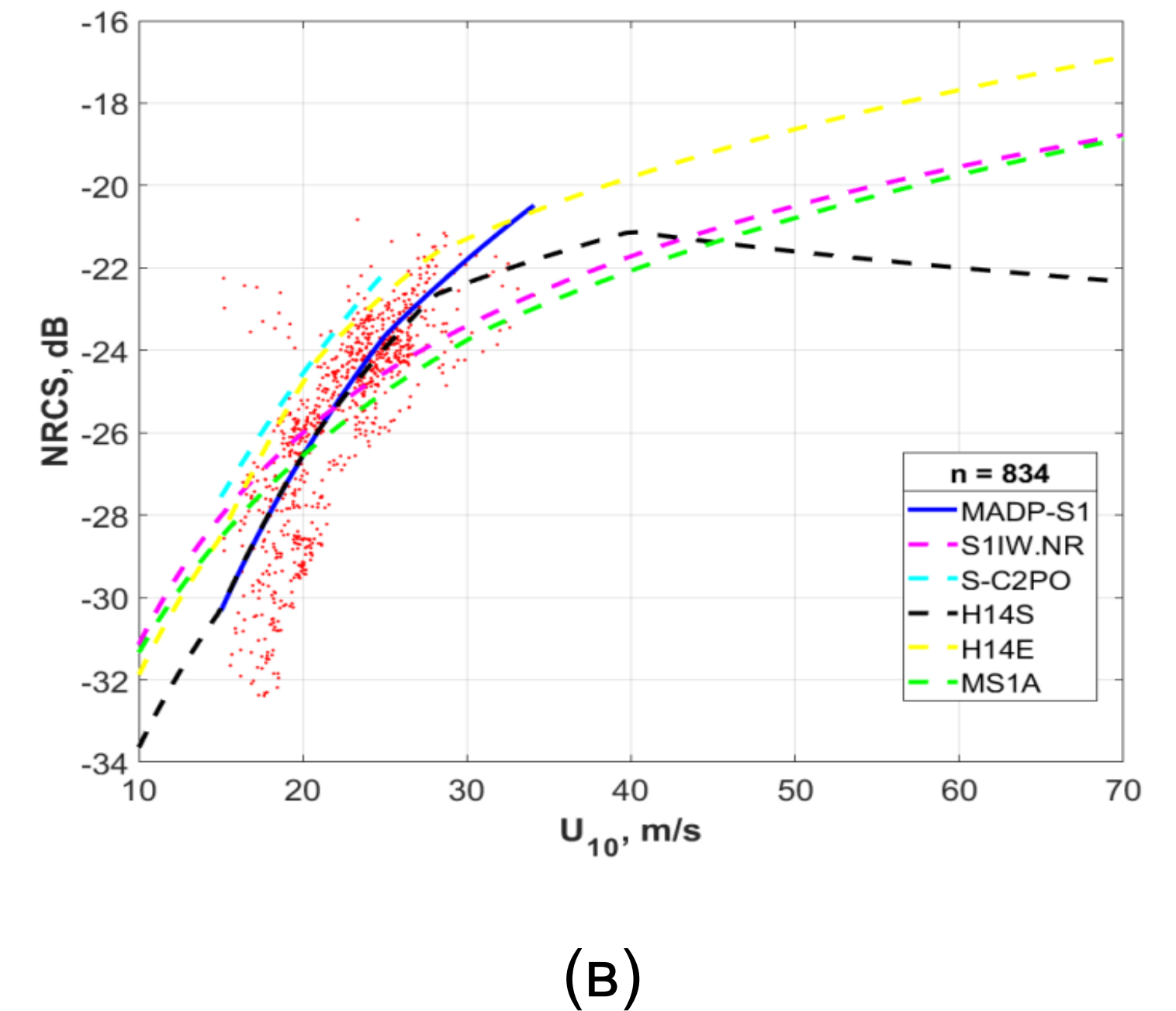
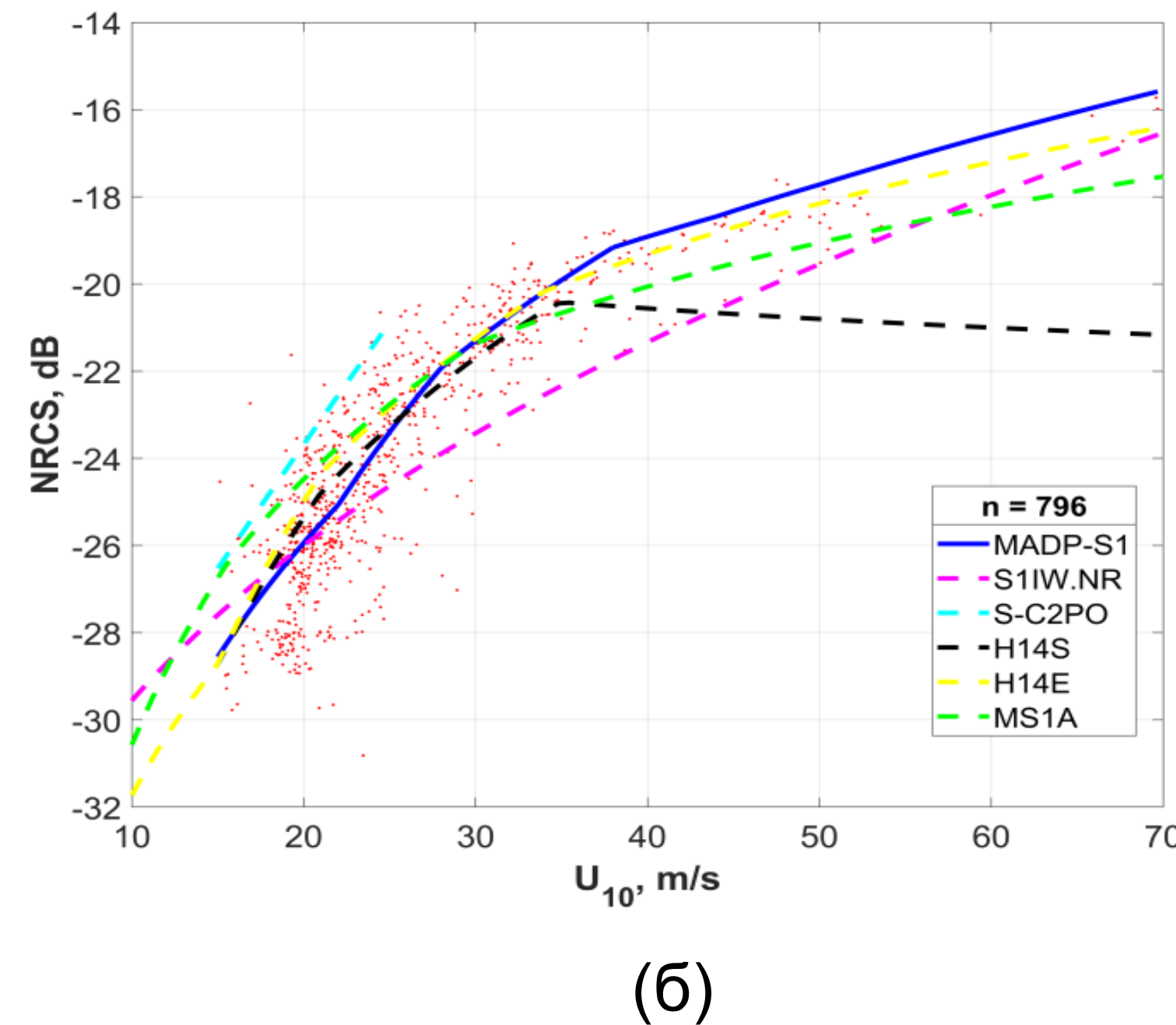
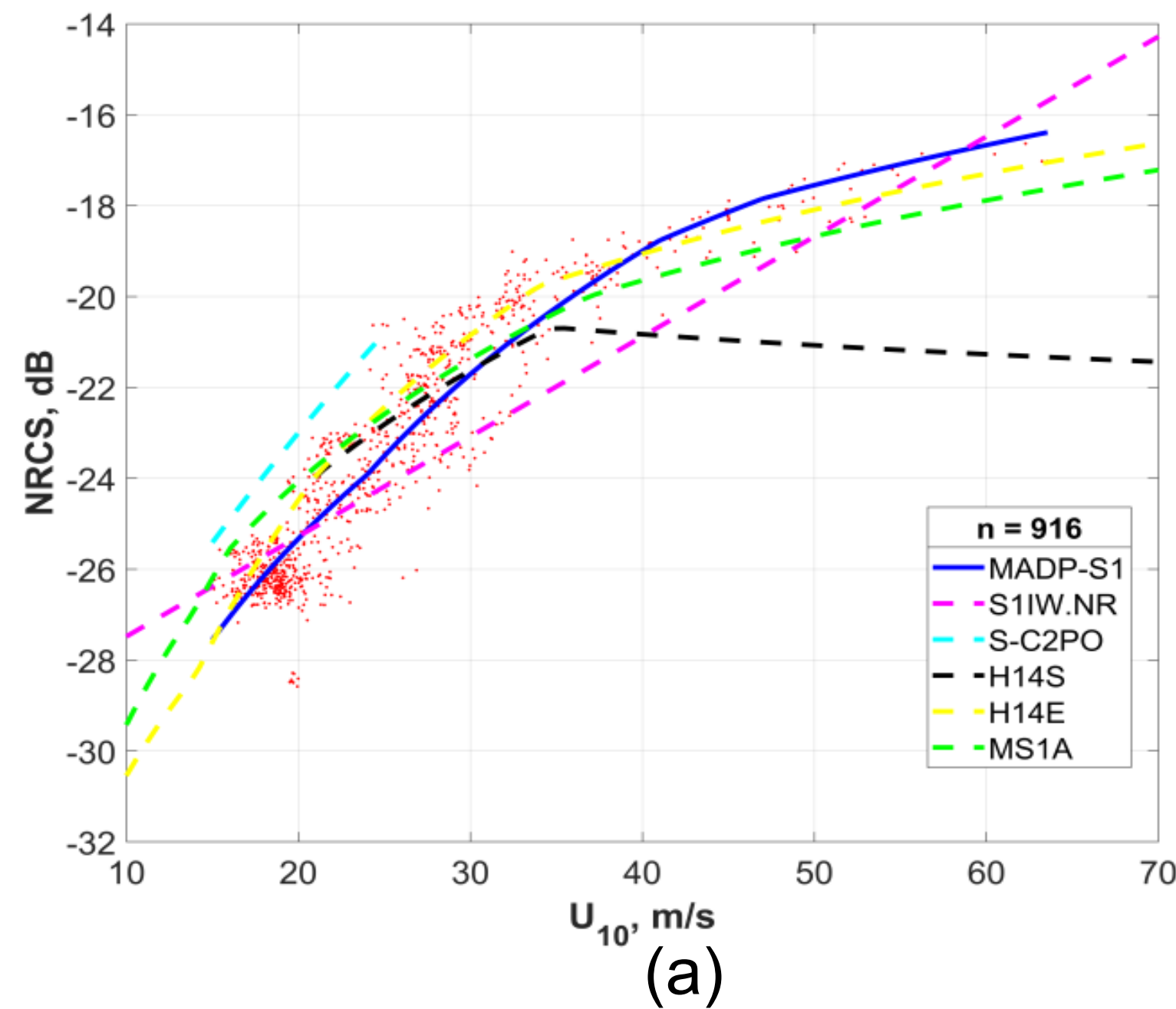
$$C_D = \begin{cases} 0.0026, & E_w \leq 0.06, \\ 6,25 \cdot 10^{-5} E_w^{-4/3}, & E_w > 0.06 \end{cases}$$

Для выбранных снимков (см. таблицу на предыдущем слайде) на основе приведенных выражений сначала производилась оценка величин скорости ветра и скорости трения ветра по данным об излучательной способности поверхности океана в заданный момент времени в определенной точке пространства, а далее полученные величины сравнивались с величинами УЭПР, полученных со спутниковых снимков в этой же пространственной точке.

## Геофизической модельная функция для восстановления динамических параметров атмосферного пограничного слоя при сильном ветре на основе изображений со спутника Sentinel-1

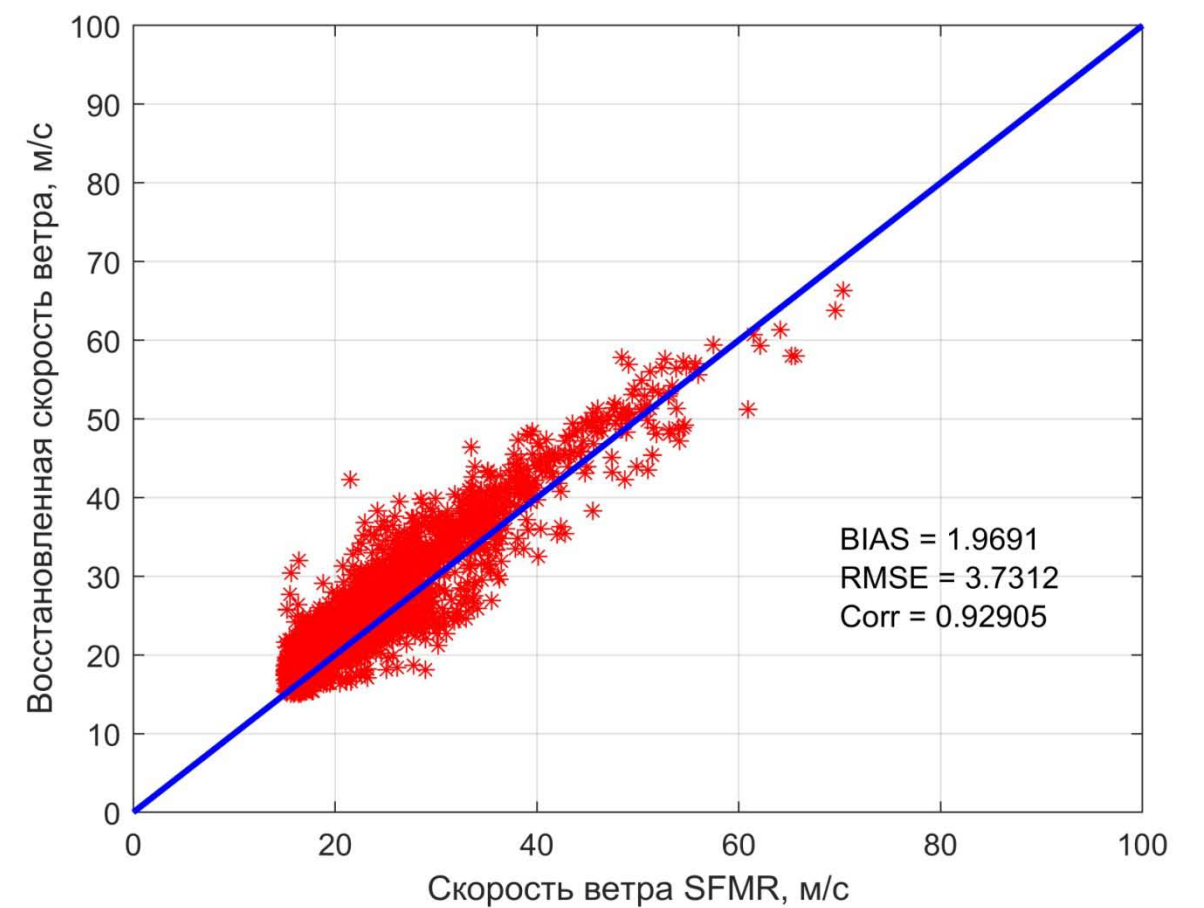
На основе сравнения данных SFMR и отобранных PCA изображений Sentinel-1 был получен массив данных УЭПР для широкого диапазона скоростей ветра  $U_{10}$  (15–69 м/с), углов падения  $30.85^\circ$ – $45.57^\circ$ . Для построения новой ГМФ, был использован подход, предложенный в (Hwang et al., 2015), для аппроксимации зависимостей УЭПР от скорости ветра или скорости трения ветра, весь диапазон скоростей ветра был разбит на подобласти, для каждой из которых были использованы кусочно-заданные степенные аппроксимации, для повышения точности аппроксимации и сшивки данных на границах выбранных областей аппроксимации дополнительно использовался вертикальный сдвиг:

$$\sigma_{VH} = A_i(\theta) X^{a_i(\theta)} + B_i(\theta), \quad X = \{U_{10}, u_*, D\}$$

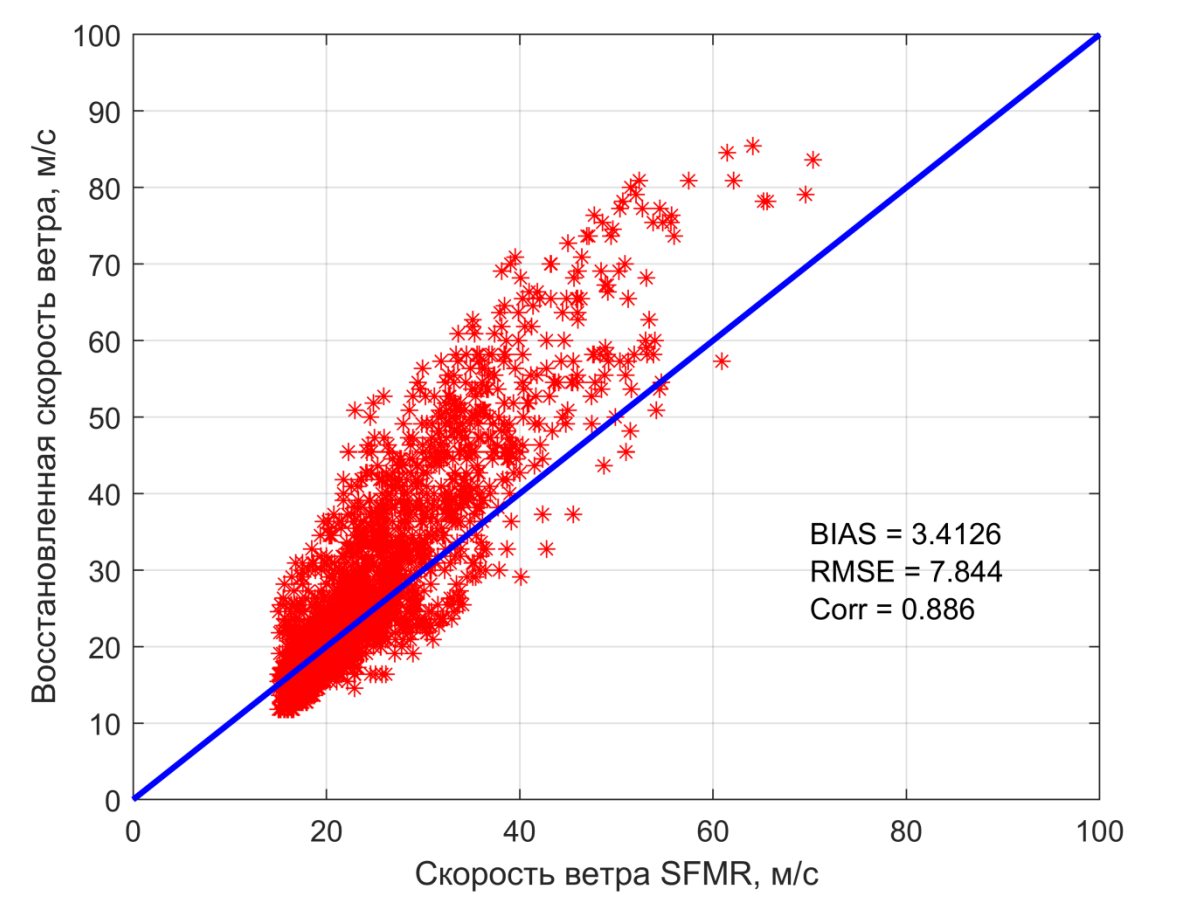


Зависимости УЭПР от скорости ветра  $U_{10}$  для 1-ой субполосы (а); для второй субполосы (б); для 3-ей субполосы (в); синяя линия – предложенная ГМФ MADP-S1, пунктирная розовая линия ГМФ S1W.NR, пунктирная зеленая линия - MS1A, желтая – H14E, черная – H14S.

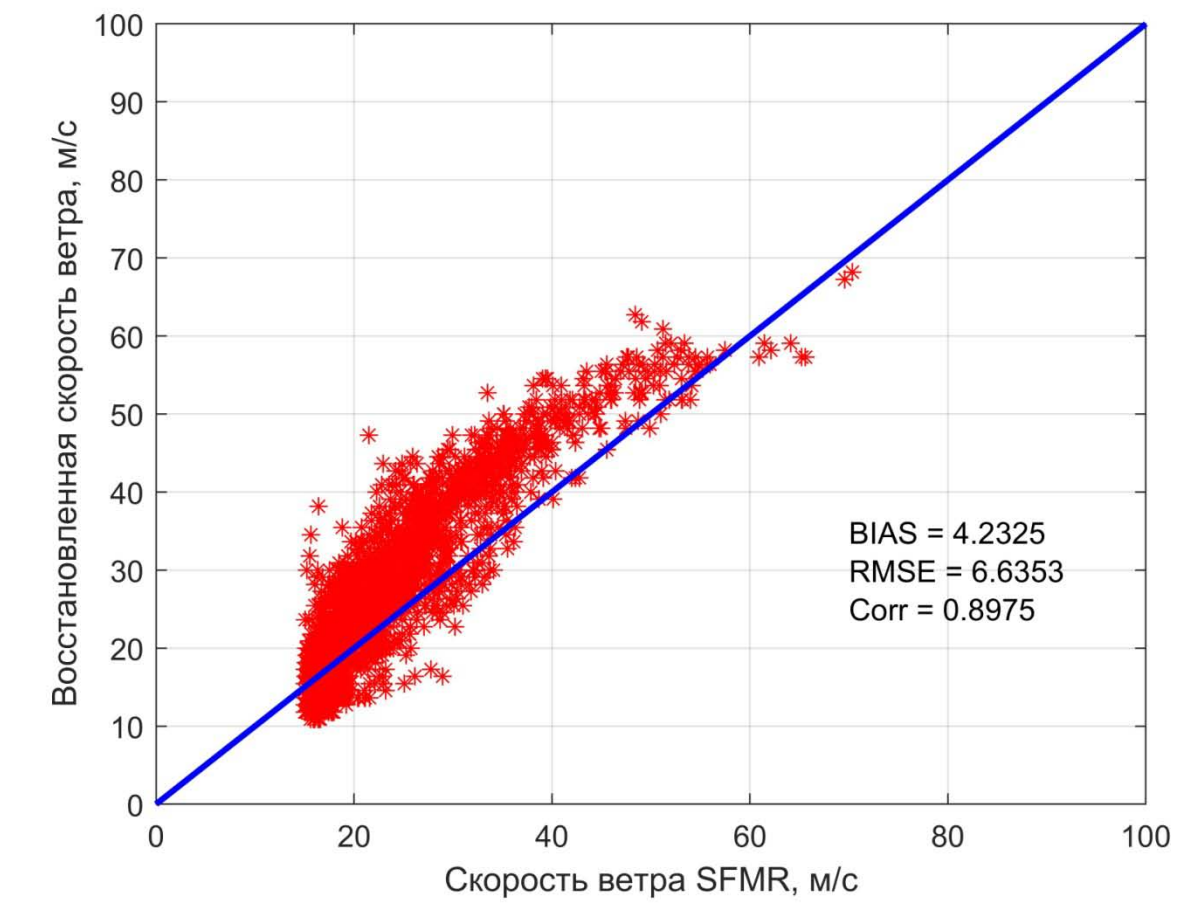
# Валидация полученной ГМФ



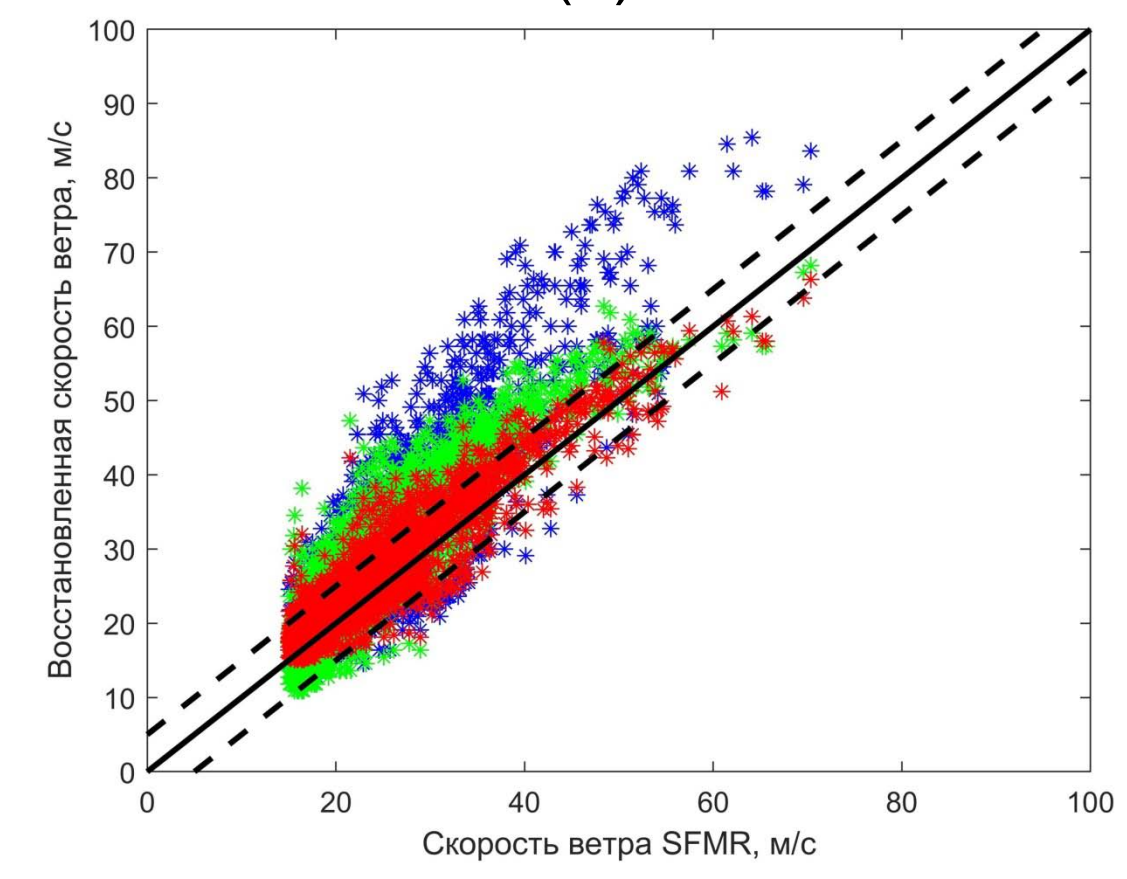
(а)



(б)



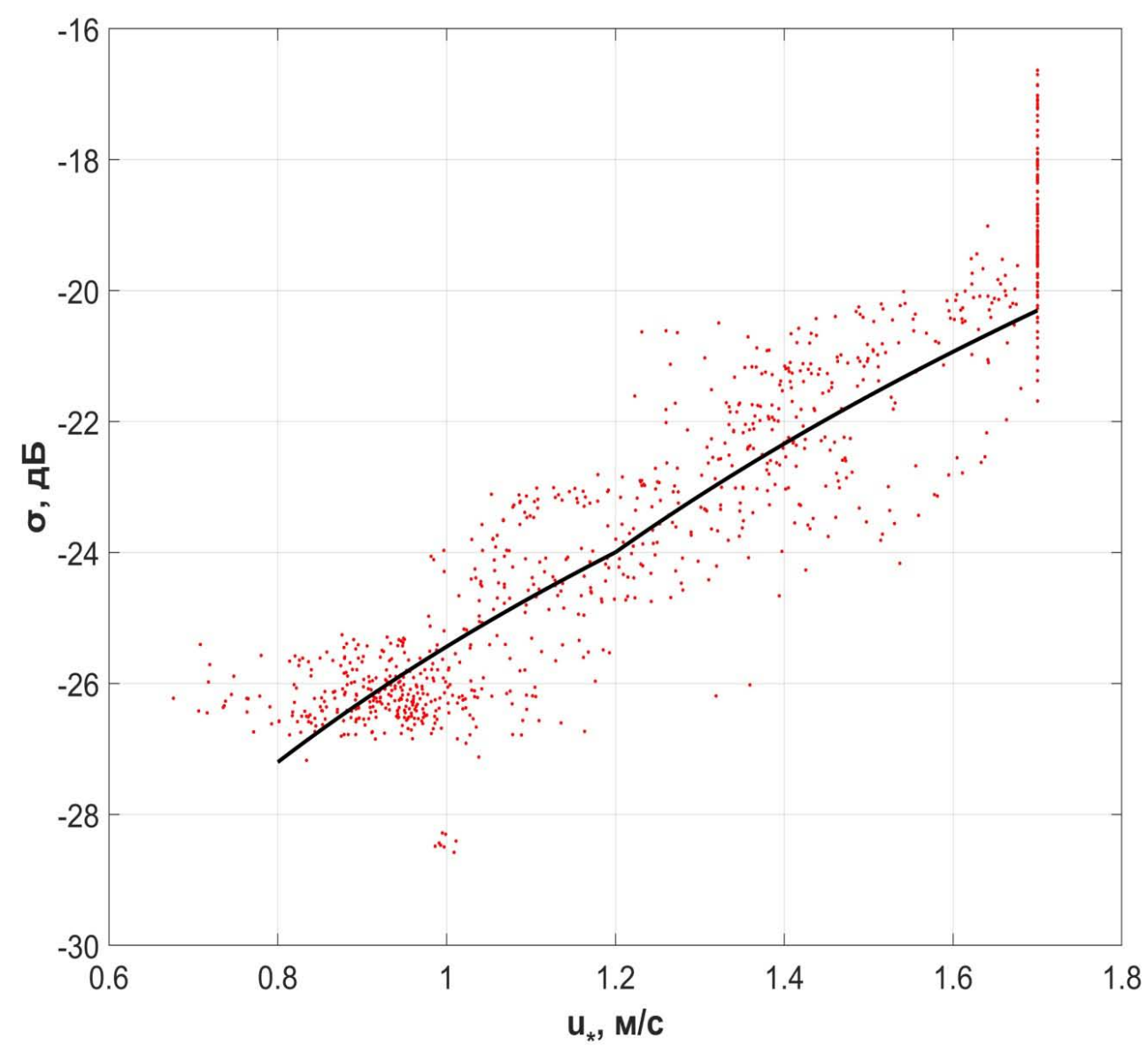
(в)



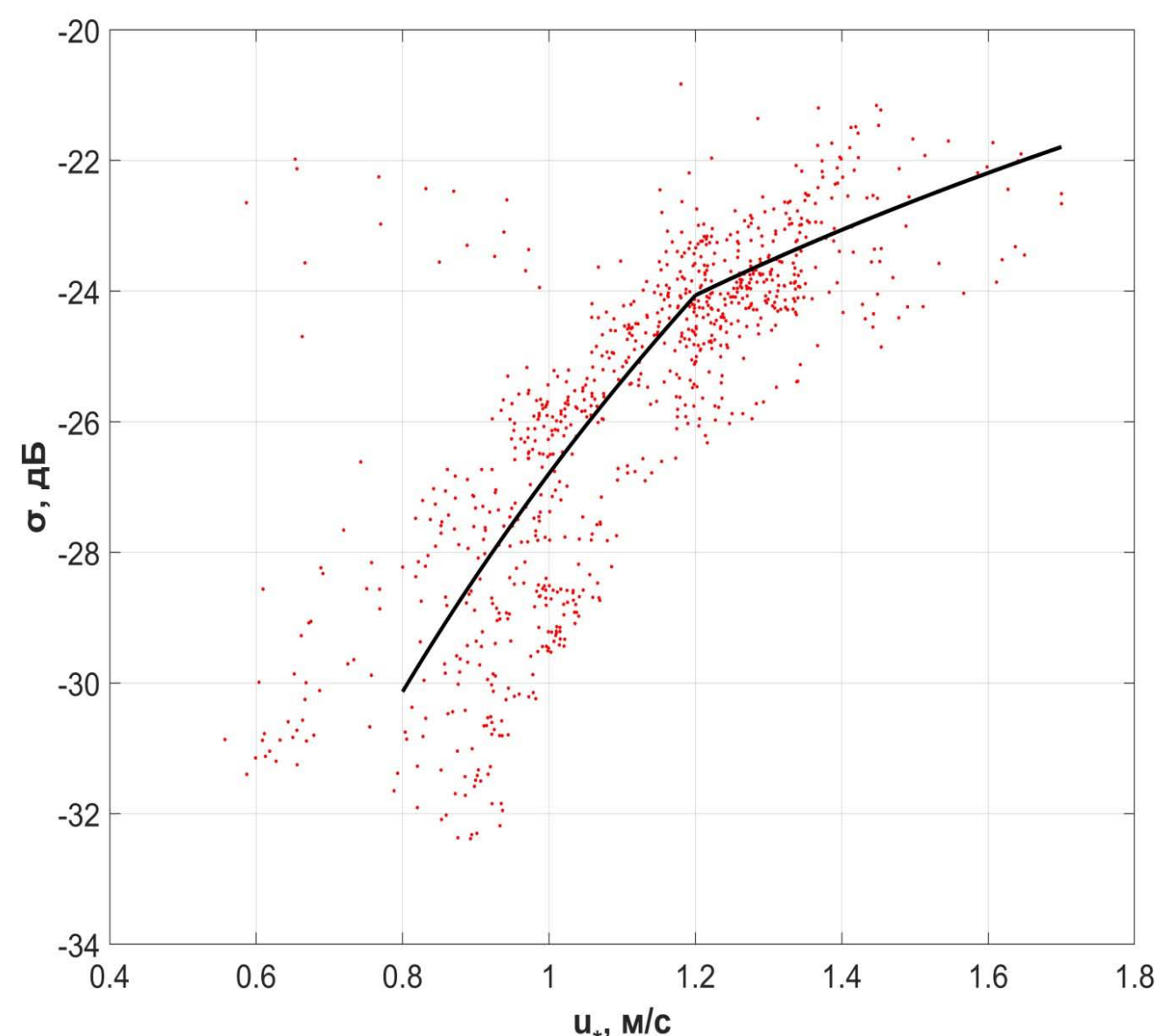
(г)

Зависимости скорости ветра, рассчитанные на основе предложенной ГМФ (а), ГМФ S1W.NR (б); ГМФ MS1A (в) от скорости ветра, восстановленной по данным SFMR; (г) зависимости скоростей ветра, рассчитанных на базе предложенной ГМФ (красный цвет), S1W.NR (зеленый цвет); ГМФ MS1A (синий цвет) от скорости, измеренной с помощью SFMR, пунктирными линиями изображен интервал скоростей 5м/с.

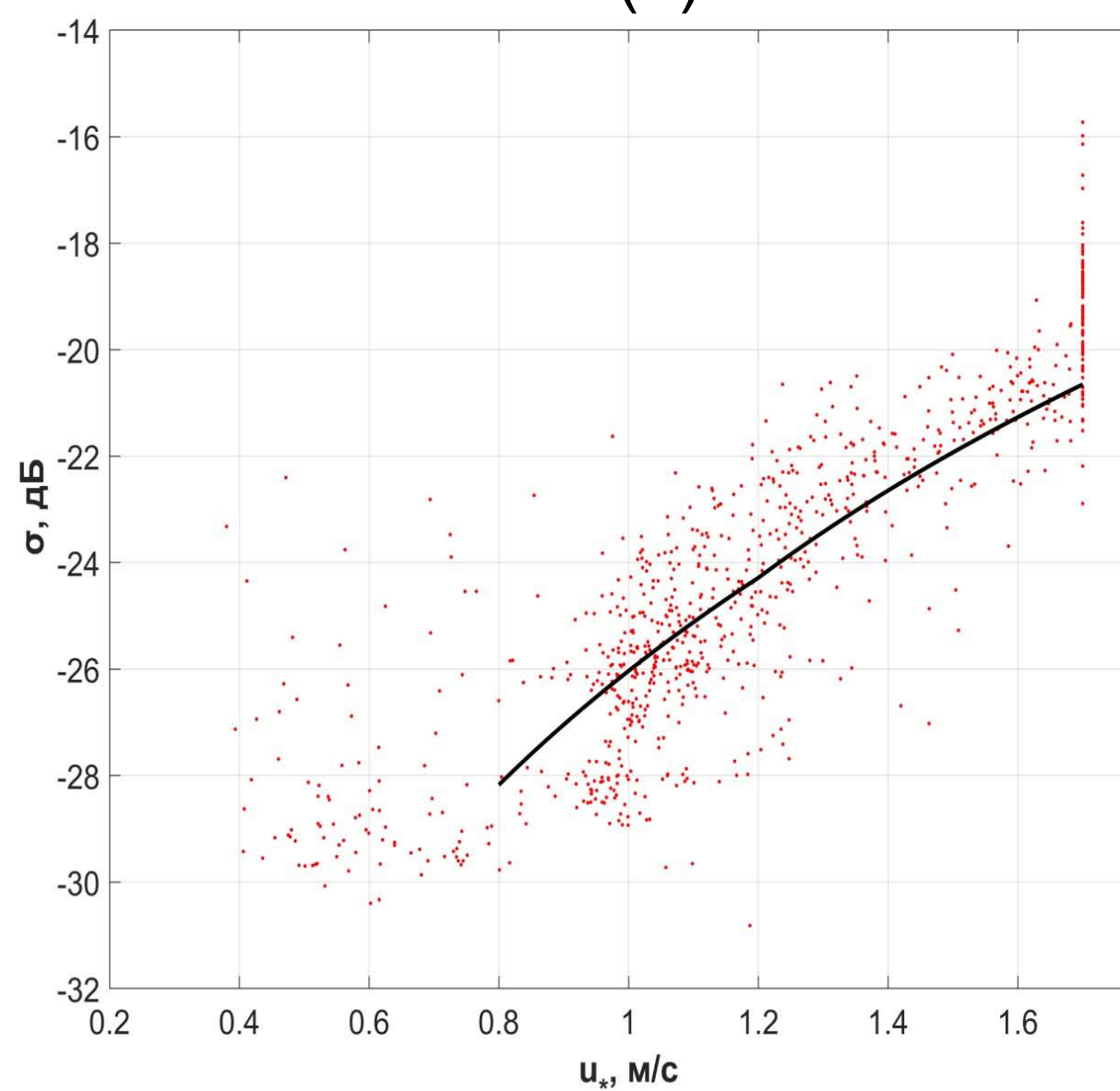
## Двумерное распределение скорости ветра, скорости трения и коэффициента сопротивления



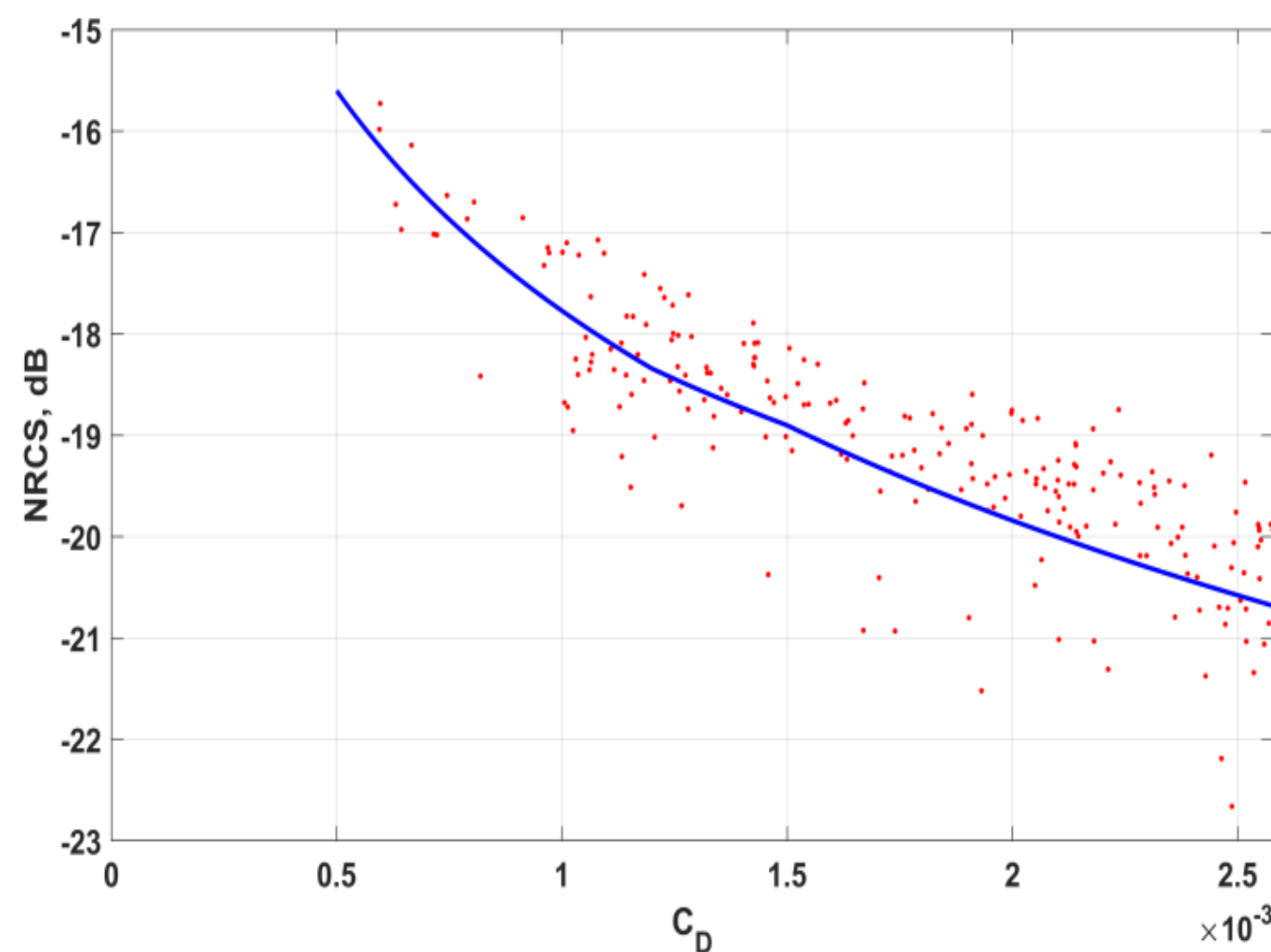
(а)



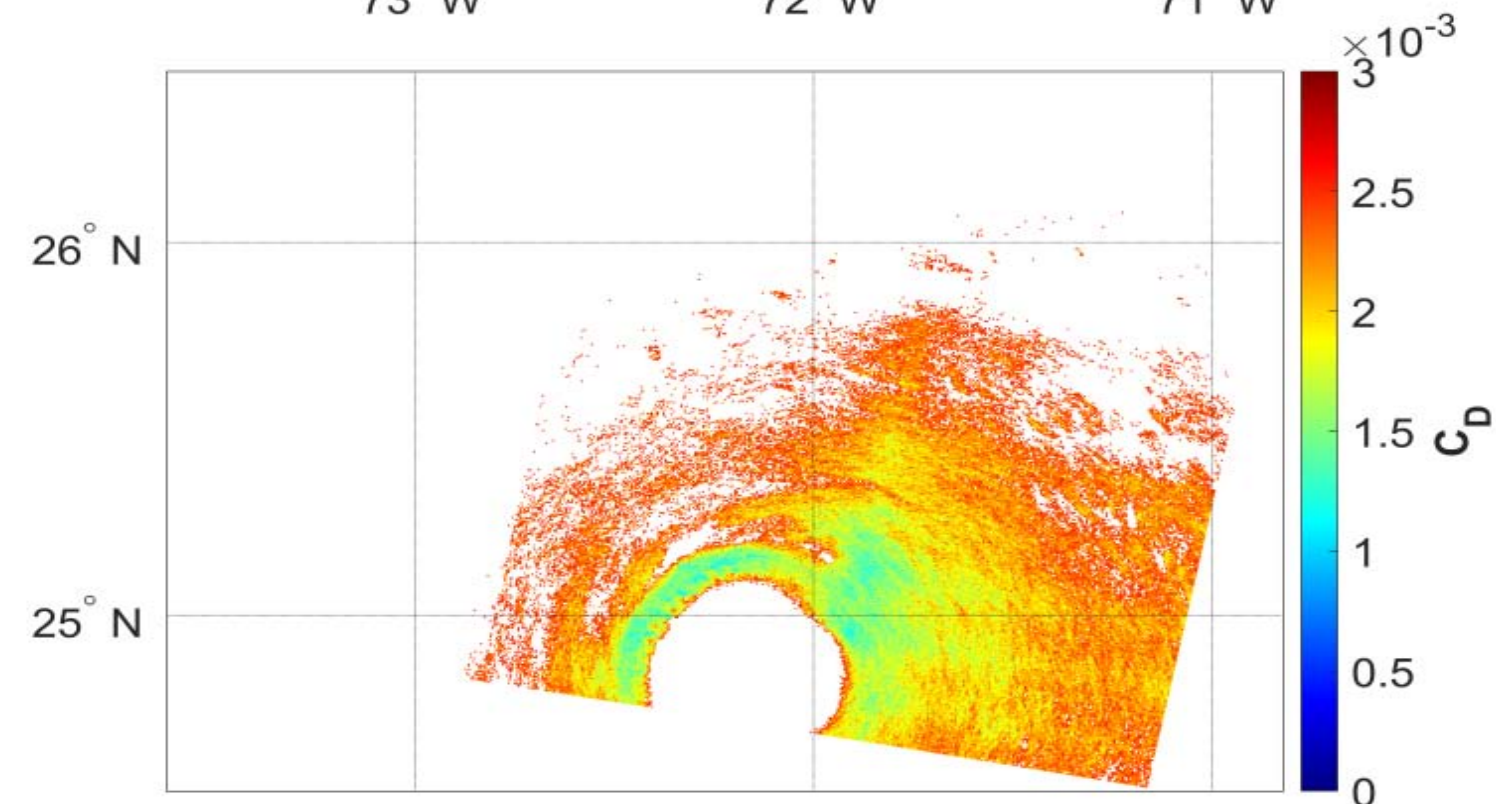
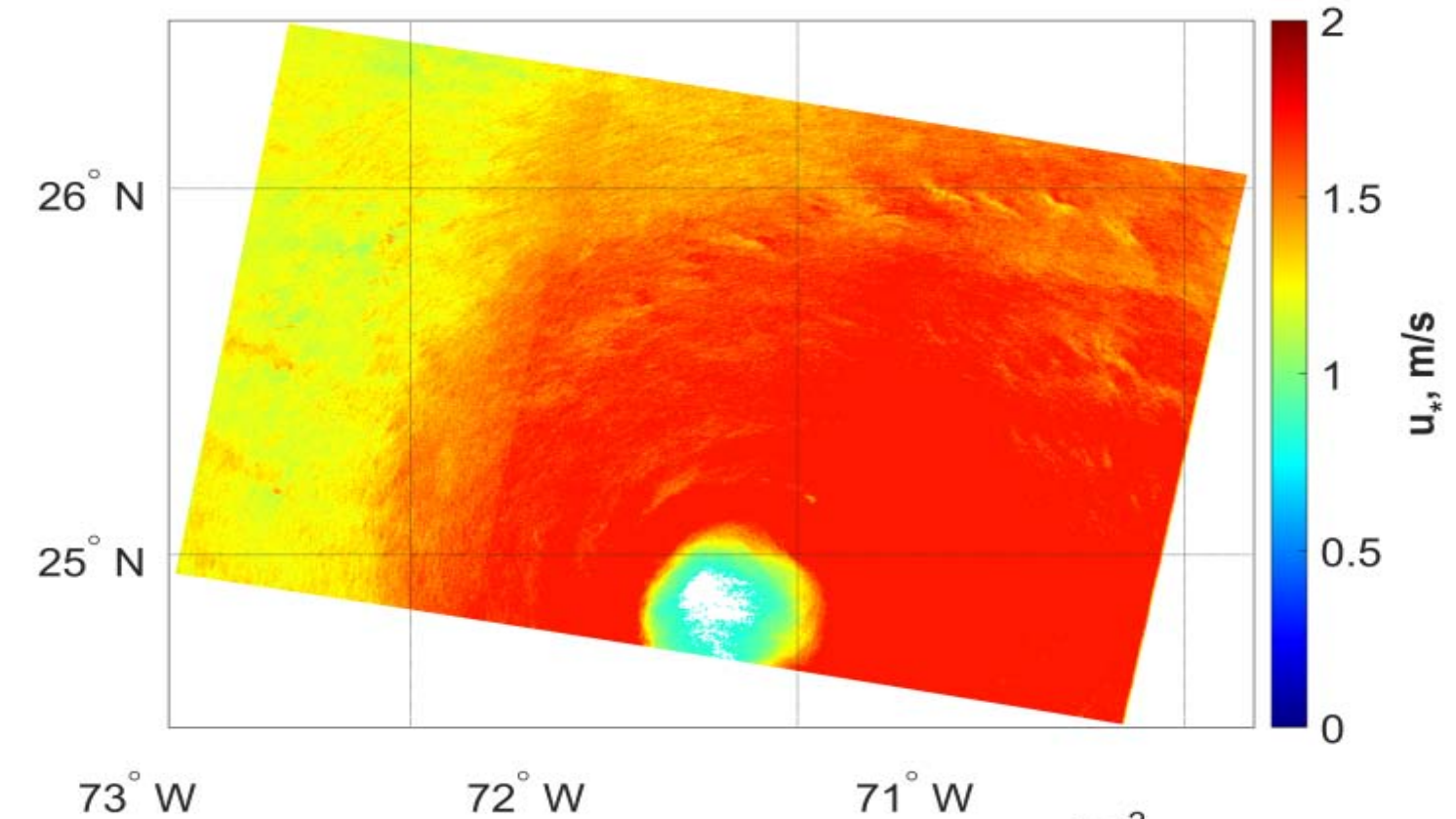
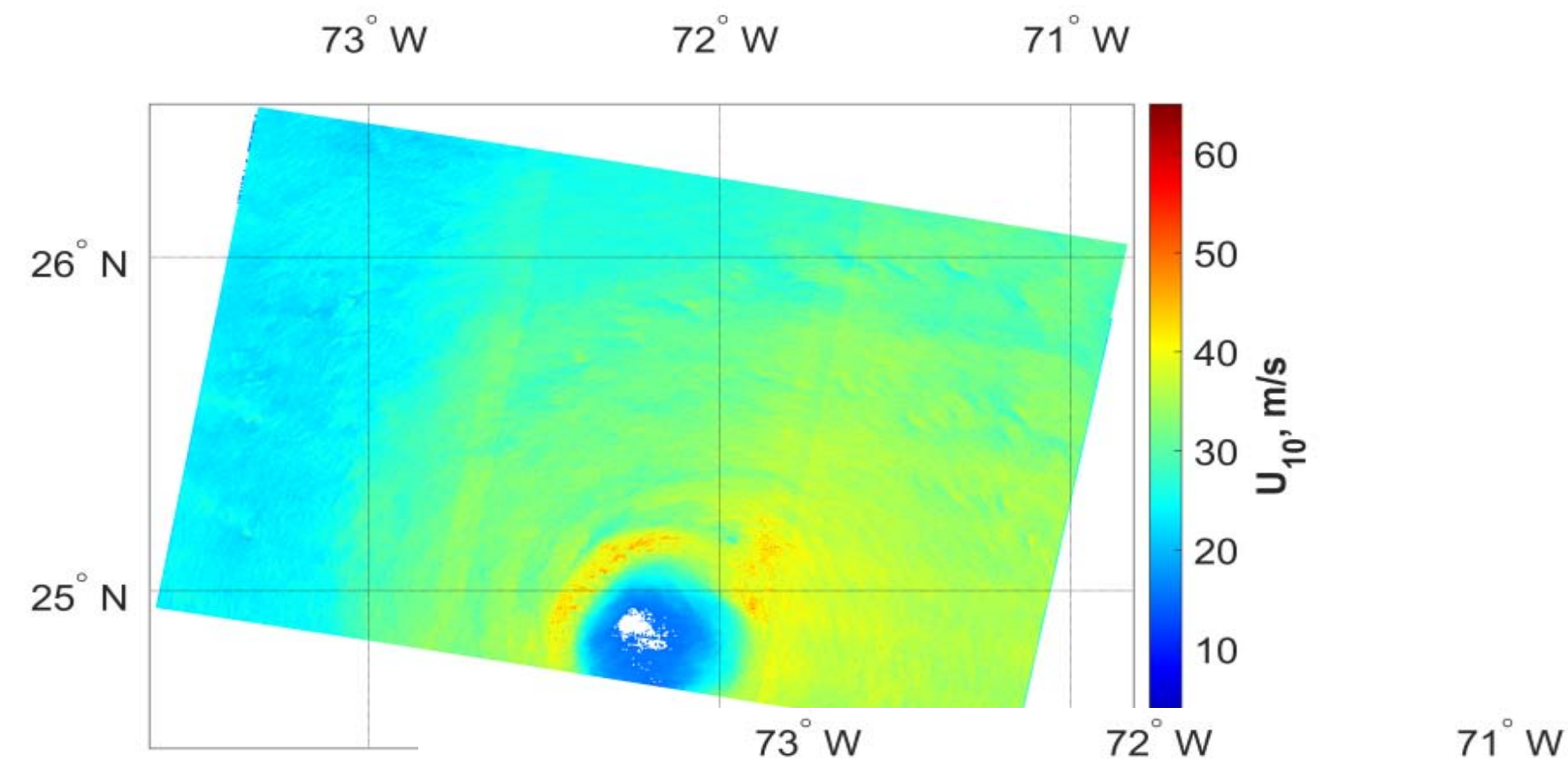
(б)



(в)



(г)



Зависимости УЭПР от скорости трения (а), (б), (в) и коэффициента сопротивления (г), сплошная линия – предложенная геофизическая модельная функция



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена ГМФ, которая позволяет получать значения сразу трех параметров – *скорости ветра, скорости трения и коэффициента сопротивления* непосредственно на основе PCA-изображений с C-SAR инструмента, базирующегося на спутниках Sentinel-1A, Sentinel-1B, для кросс-поляризованного сигнала и режима обзора IW. Предлагаемая ГМФ построена для трех субполос, с интервалом скоростей ветра 15–63.55 м/с для 1-й субполосы, 15–69.68 м/с для 2-й субполосы и 15–40 м/с для 3-ей субполосы и скоростей трения в пределах 0.8–1.7 для всех субполос.

Предложенная геофизическая модельная функция была сравнена с существующими ГМФ, было показано, что разработанная ГМФ лучше всего согласуется с MS1A и H14E для первых двух субполос, но при этом позволяет восстанавливать более высокие скорости ветра, в то время как для MS1A и H14E предельные значения восстанавливаемых скоростей ветра не превышает 50 м/с, а также были получены более высокие предельные значения скорости ветра для второй субполосы (63.55 м/с), чем у ГМФ S1IW.NR (53 м/с).

Была проведена валидация и оценка точности предложенной ГМФ в сравнении с другими моделями, для этого был проанализирован процент восстановленных величин скоростей ветра, отклоняющихся от скорости, измеренной на основе радиометра SFMR не более чем на 5 м/с. Было показано, что для предложенной модели процент рассчитанных значений, близких к измеренным, оказывается наибольшим (85%) по сравнению с аналогичными моделями S1W.NR и MS1A, (56% и 68%). Кроме того для разработанной модели существенно более низким оказалось и значение среднеквадратичного отклонения, что указывает на более высокий уровень точности восстановления скоростей ветра.

Предложенная модель позволила достаточно полно восстановить поле скоростей на примере изображения урагана Maria 2017/09/23. При этом восстановленные скорости хорошо совпали на границах субполос, что также подтверждает достоверность приближений, использованных для предложенной ГМФ.