

# Разработка алгоритма определения динамической скорости ветра по радиометрическим данным и измерениям с GPS-зондов в ураганных условиях

Е.И. Поплавский, Н.С. Русаков, О.С. Ермакова, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая  
poplavsky7@gmail.com  
ИПФ РАН, Нижний Новгород



В данной работе обсуждается алгоритм восстановления динамических параметров (скорости приводного ветра, динамической скорости и параметра шероховатости или связанного с ним коэффициента аэродинамического сопротивления) атмосферного пограничного слоя в урагане по данным микроволнового радиометра SFMR, совмещенным с натурными измерениями профилей скорости ветра с помощью падающих GPS-зондов NOAA.

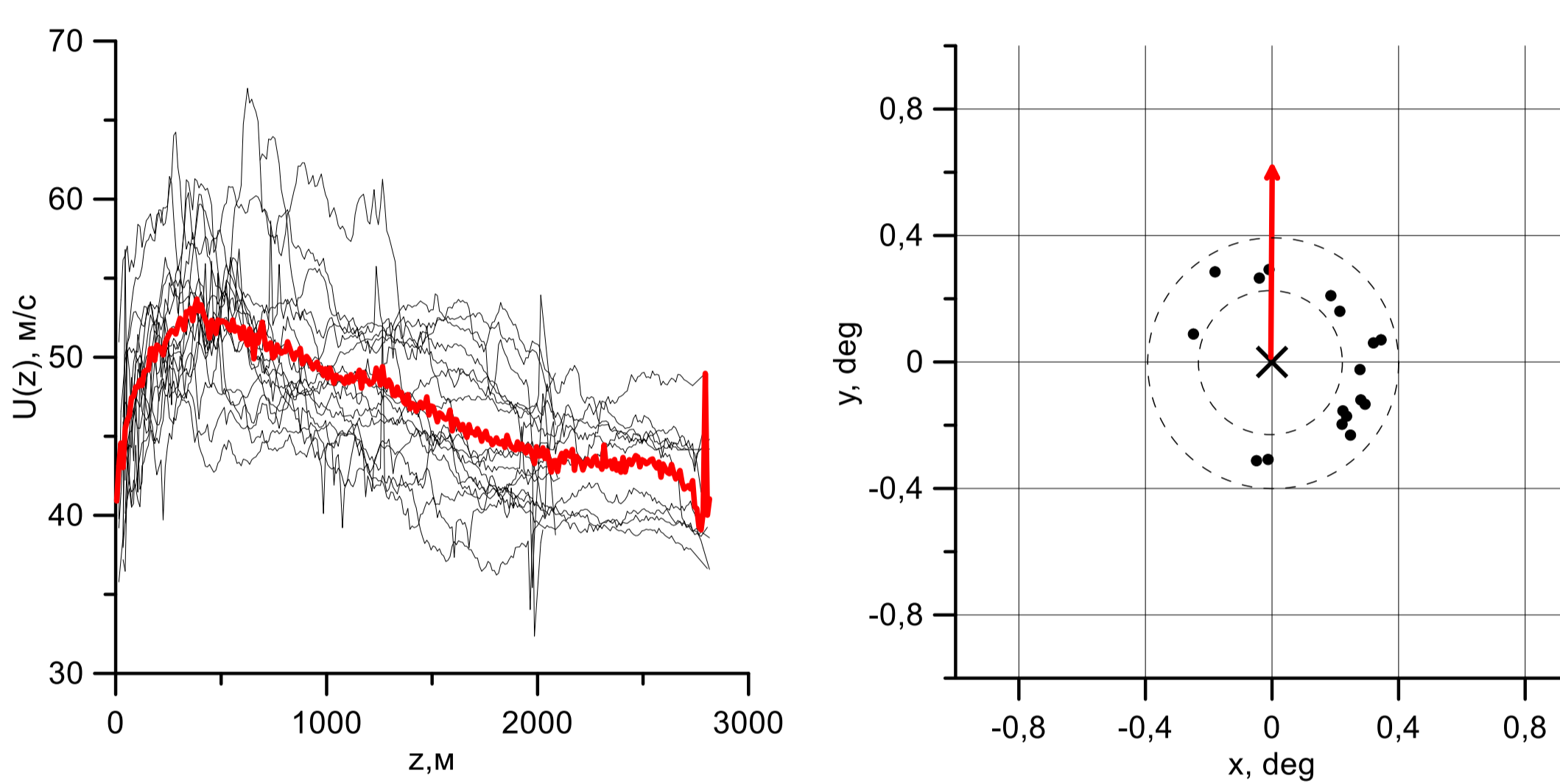
Скорость трения ветра может быть получена из профилей скорости воздушного потока, усредненных по турбулентным пульсациям (Hinze, 1959). Этот подход основан на использовании автомодельности профиля скорости в пограничном слое, который состоит из слоя постоянных потоков с логарифмическим профилем и «следной» части, в которой происходит приспособление потока к области невозмущенного течения. Преимущество этого метода заключается в возможности использовать измерения профиля скорости воздушного потока на значительном удалении от поверхности, где потери данных значительно меньше, чем у поверхности.



Структура развивающегося турбулентного пограничного слоя (Hinze, 1959)

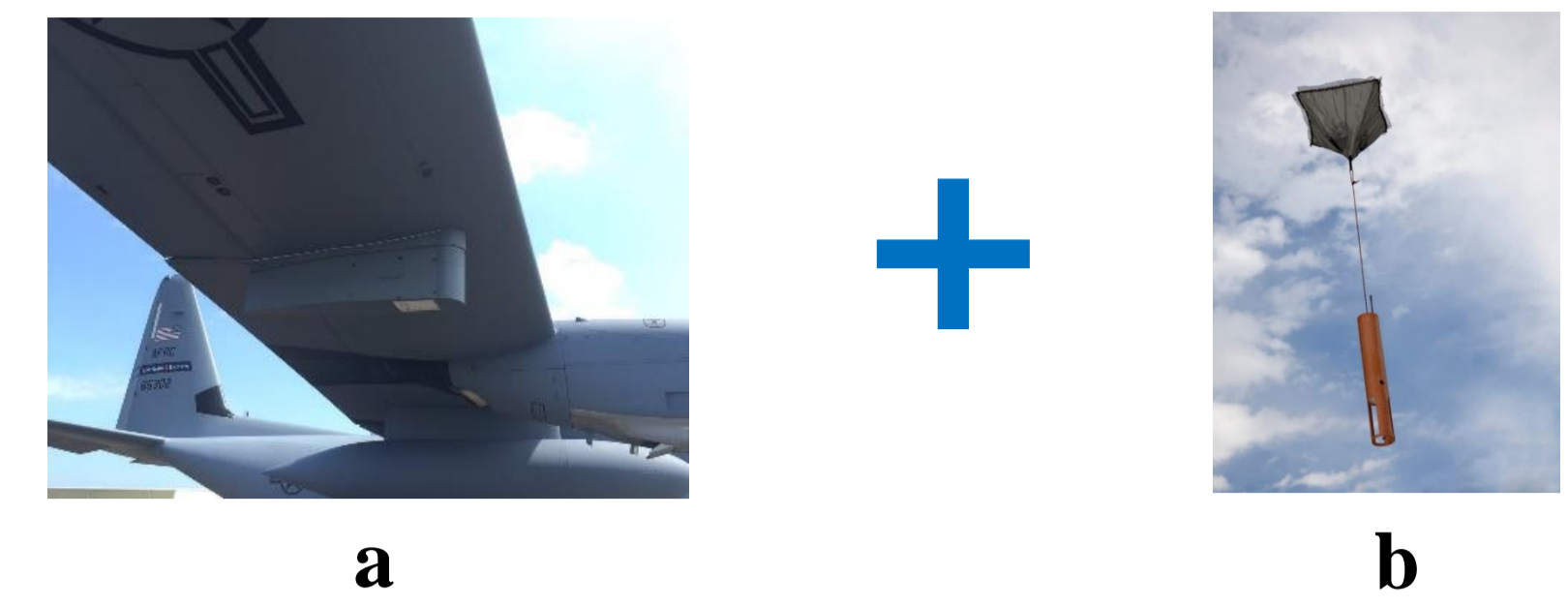
GPS-зонды измеряют вертикальные профили скорости ветра, давления, температуры и влажности во время падения с частотой 2 Гц. [www.aoml.noaa.gov/hrd/](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/)

Однако следует отметить, что автомодельные законы для профилей скорости в турбулентном пограничном слое применимы лишь к величинам усредненным по статистическому ансамблю. В данной работе в качестве статистических ансамблей использовались совокупности профилей скорости ветра, измеренных приблизительно в одинаковых условиях, а именно, примерно на одинаковом расстоянии от центра урагана и в одни и те же сутки.



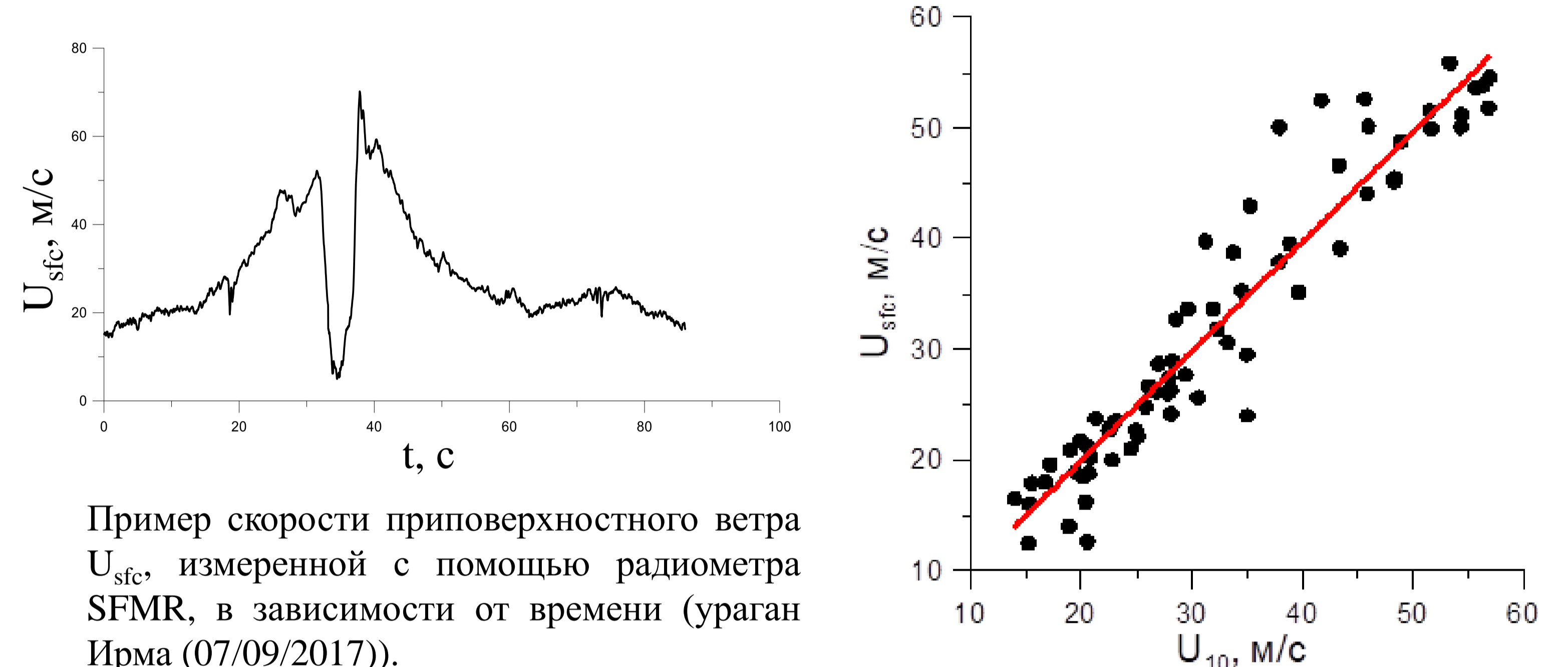
Левая панель - профили скорости воздушного потока: черные линии - отдельные измеренные профили скорости, красная линия - профиль скорости, усредненный по ансамблю. Правая панель - координаты сброса GPS-зондов (черные точки) относительно центра урагана. Стрелка указывает направление движения урагана.

## Сопоставление $U_{10}$ , полученных с GPS-зондов, с $U_{sfc}$ из данных SFMR



а) Радиометр под крылом самолета  
б) GPS-зонд

Динамические параметры атмосферного пограничного слоя, восстановленные по данным падающих GPS-зондов, сопоставлялись с дистанционными данными пассивного микроволнового инструмента SFMR, установленного на борту того же исследовательского самолета, с которого были сброшены GPS-зонды.



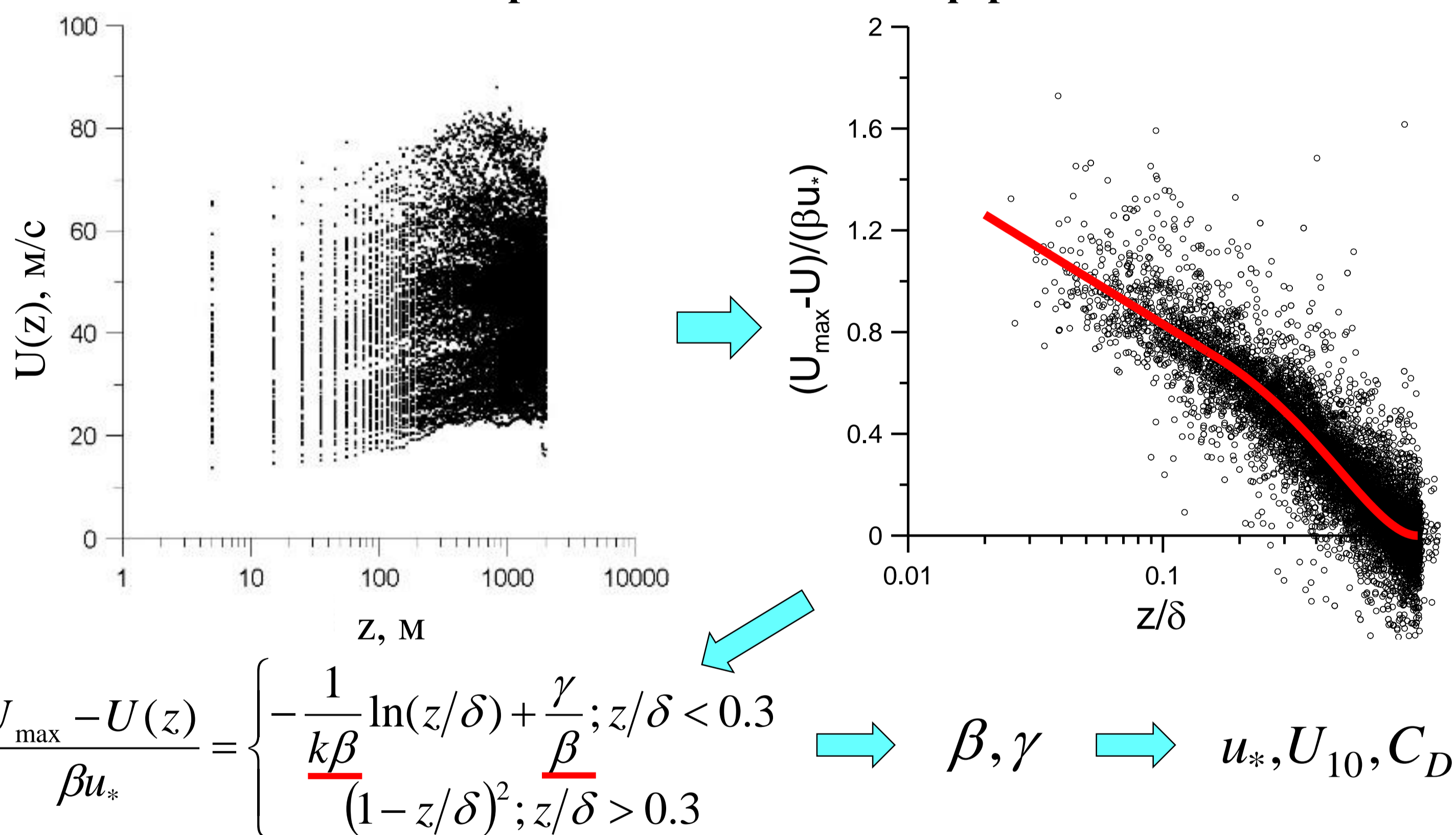
Пример скорости приповерхностного ветра  $U_{sfc}$ , измеренной с помощью радиометра SFMR, в зависимости от времени (ураган Ирма (07/09/2017)).

Сопоставление скоростей приводного ветра:  $U_{sfc}$ , определенной по данным SFMR (Uhlhorn et al., 2007) (1) и  $U_{10}$ , вычисленной методом профилирования, описанным выше, сплошная линия соответствует аппроксимации  $U_{sfc} = 0.99 U_{10} + 0.14$ .

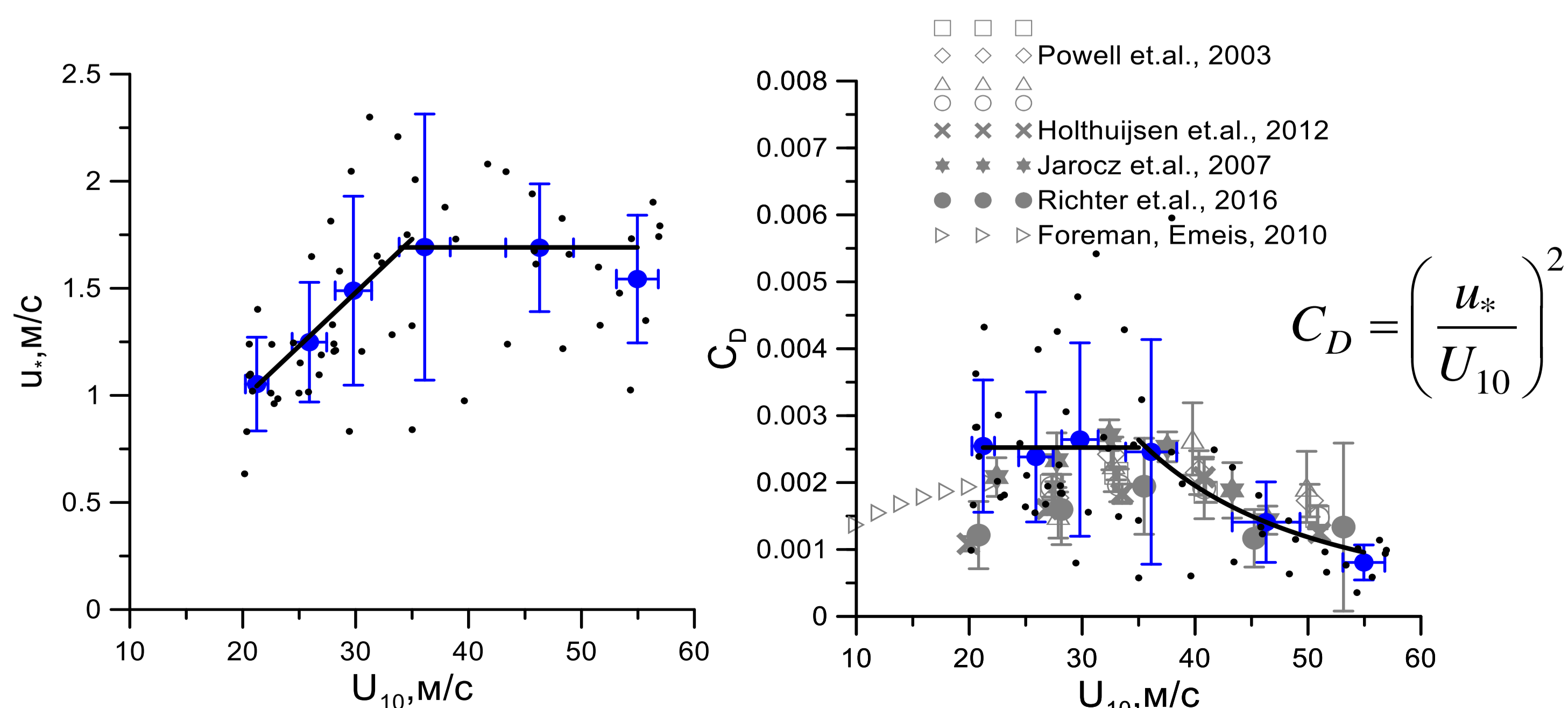
$U_{sfc}$  рассчитывается с помощью данной ГМФ (Uhlhorn et al., 2007):

$$E_w = \begin{cases} a_1 U_{sfc}, & U_{sfc} \leq 7 \text{ м/с}, \\ a_2 + a_3 U_{sfc} + a_4 U_{sfc}^2, & 7 \text{ м/с} < U_{sfc} \leq 31.9 \text{ м/с}, \\ a_5 + a_6 U_{sfc}, & U_{sfc} > 31.9 \text{ м/с} \end{cases} \quad (1)$$

## Модифицированный метод профилирования для определения параметров пограничного слоя атмосферы

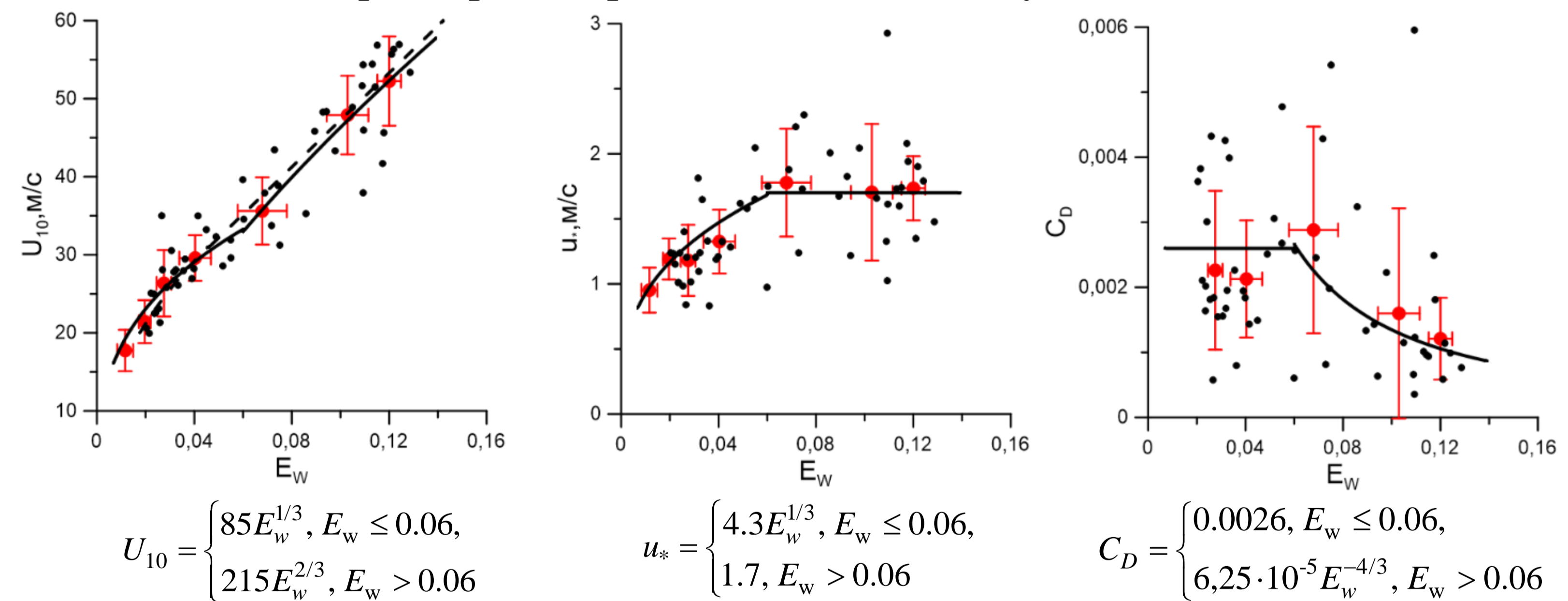


## Зависимости динамической скорости ветра и коэффициента аэродинамического сопротивления от приповерхностной скорости ветра

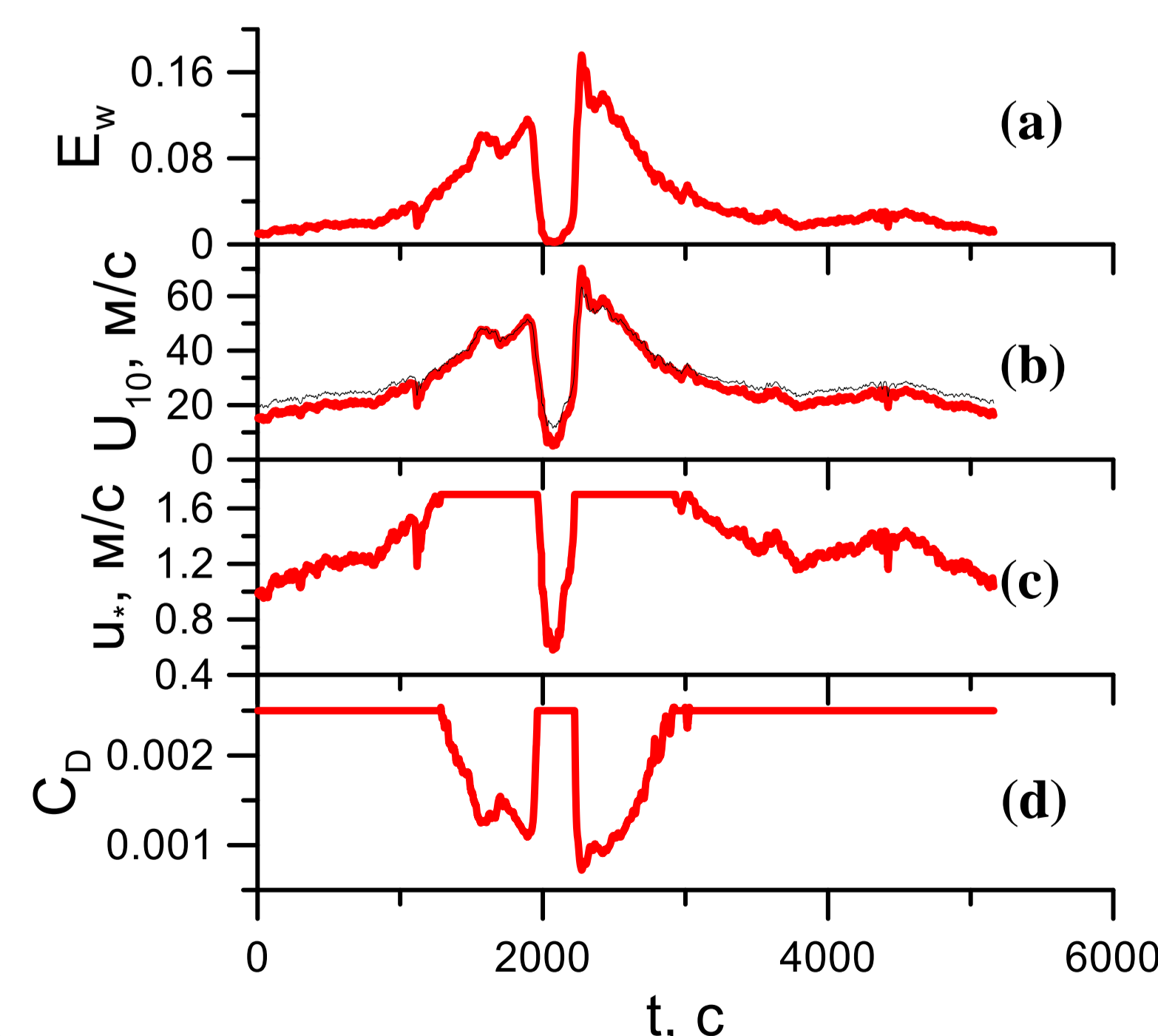


Черные точки - результаты расчетов по отдельным статистическим ансамблям, синяя кривая соответствует среднему значению полученных параметров.

## Зависимости параметров пограничного слоя от излучательной способности



Малые символы - результаты расчетов по отдельным статистическим ансамблям, составленным из профилей скорости, измеренных приблизительно в одинаковых условиях, крупные символы - усредненные значения, линии - аппроксимации соответствующими формулами. Пунктирная линия на левой панели - зависимость  $U_{sfc}$  от  $E_w$  в (Uhlhorn et al., 2007) (1).



Излучательная способность поверхности океана,  $E_w$ , измеренная вдоль трека самолета над ураганом Ирма 07/09/2017 (а). Красные линии - восстановленные значения скорости приводного ветра (б), динамической скорости (в), коэффициента аэродинамического сопротивления (с). Черная линия на (б) - скорость приводного ветра, восстановленная по формуле (Uhlhorn et al., 2007) (1).

На основе сопоставления измеренных динамических параметров и излучательной способности океана предложены эмпирические уравнения, которые учитывают обнаруженные свойства данных параметров и потенциально могут быть использованы для дистанционной диагностики параметров пограничного слоя. Однако следует отметить, что в данной работе эмпирические функции являются предварительными, так как они были получены на ограниченном экспериментальном материале. Предполагается, что они будут уточняться в дальнейшем.