

Восстановление коэффициентов обмена при ураганных ветрах на основе данных GPS-зондов и радиометра SFMR

Русаков Н.С.¹, Поплавский Е.И.¹, Троицкая Ю.И.¹, Ермакова О.С.¹, Сергеев Д.А.¹, Баландина Г.Н.¹
nikitarusakov228@yandex.ru



(1) ИПФ РАН, Нижний Новгород

Данная работа посвящена восстановлению зависимостей энтальпии в ураганных условиях по данным с GPS-зондов с привлечением измерений SFMR. Массивы данных, получаемых с GPS-зондов NOAA, несут информацию о скорости ветра, влажности, температуре и давлении окружающей среды, что позволяет вычислить вертикальные профили удельной энтальпии. По аналогии с профилями скорости ветра, эмпирические формулы применимы лишь к средним профилям перепада энтальпии относительно энтальпии на поверхности океана. Таким образом, появляется потребность не только в данных о вертикальной зависимости энтальпии, но и о ее величине на поверхности океана, которые были получены по данным измерений шестиканального радиометра SFMR.

Для анализа использовались данные с падающих GPS-зондов NOAA, измеряющих скорость ветра, высоту, температуру и давление с частотой 2 Гц. (http://www.aoml.noaa.gov/hrd/data_sub/hurr.html)



Исследовательский самолет N49RF, летающий над тропическими циклонами для сбора данных

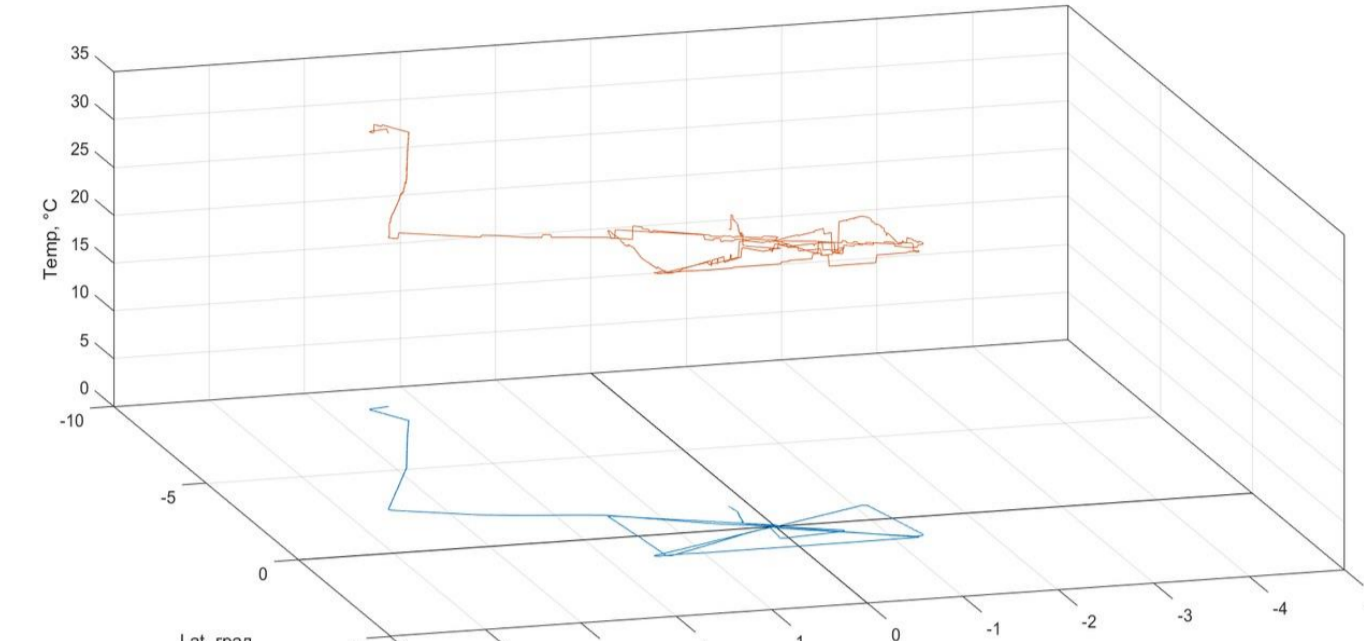
Трек полета самолета, белые круги – координаты сброса GPS-зондов, красный круг – центр тропического циклона.

1

Синхронно с этими метеорологическими измерениями также производится радиометрическая съемка поверхности океана с помощью прибора SFMR (Stepped Frequency Microwave Radiometer), установленного на борту тех же исследовательских самолетов. SFMR - пассивный радиолокационный прибор, который измеряет яркостную температуру на шести микроволновых частотах (4.55, 5.06, 5.64, 6.34, 6.96, 7.22 ГГц) и предоставляет информацию о величине температуры поверхности моря.



Радиометр SFMR, размещенный под крылом самолета NOAA

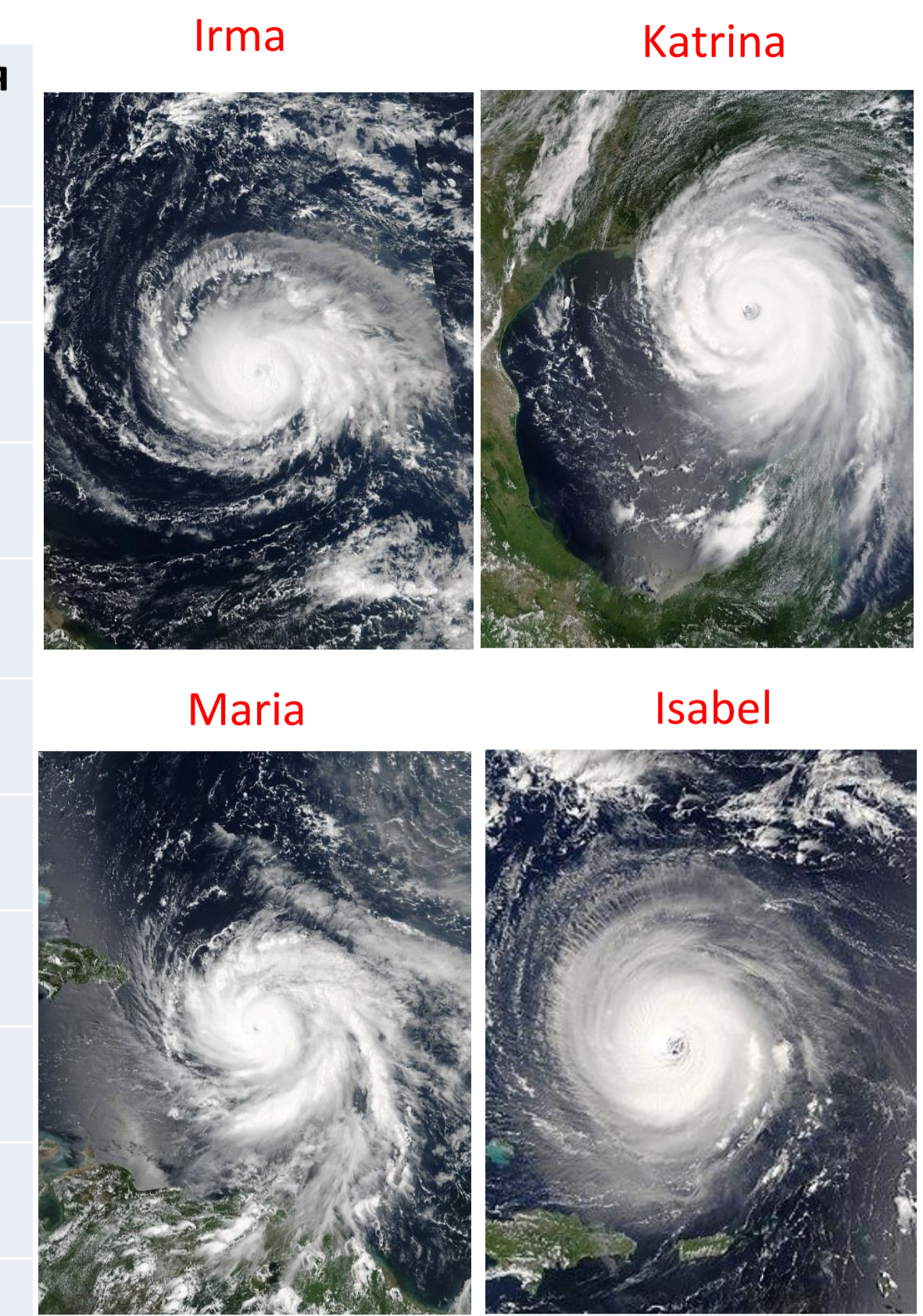


Трек полета исследовательского самолета и измеренная им температура поверхности океана на примере урагана Irma, 2017.09.07

2

Ураганы, использовавшиеся для статистического анализа

№	Ураган	Дата	Категория
1	Irma	2017/09/03-2017/09/10	5
2	Dean	2007/08/16-2007/08/22 (исключая 2007/08/18)	5
3	Isabel	2003/09/12-2003/09/18	5
4	Ivan	2004/09/07-2004/09/15 (исключая 2004/09/08)	5
5	Jose	2017/09/09, 2017/09/17-2017/09/20	4
6	Katrina	2005/08/26-2005/08/29	5
7	Maria	2017/09/18-2017/09/27	5
8	Matthew	2016/09/29, 2016/10/01-2016/10/08	5
9	Rita	2005/09/19-2005/09/24	5
10	Wilma	2005/10/18, 2005/10/20-2005/10/24	5



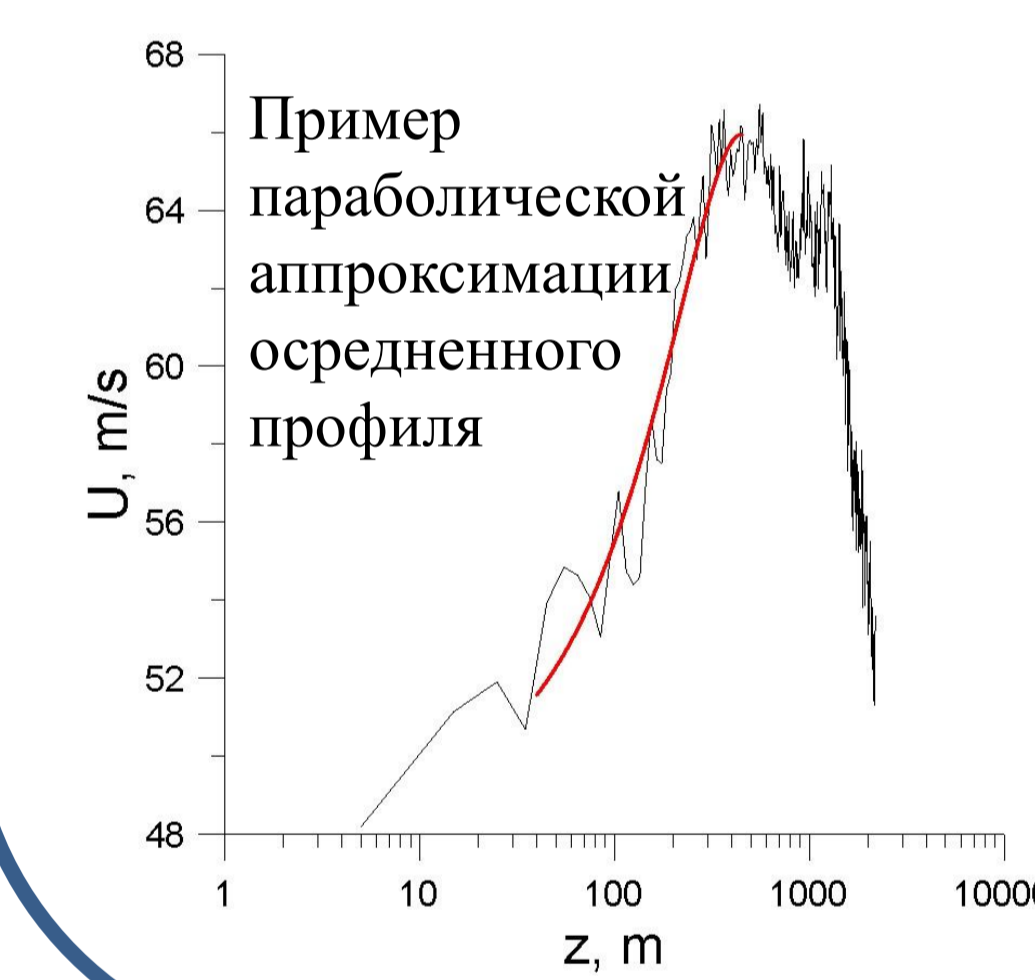
3

Получение зависимостей в автомоделных переменных

Основная проблема при восстановлении профиля скорости сбрасываемыми GPS-зондами в ураганах - большие ошибки измерения вблизи поверхности. Здесь мы используем метод, успешно применяемый в технической гидродинамике. Он основан на использовании автомоделности дефекта скорости в пограничном слое, который включает слой постоянных потоков с логарифмическим профилем и «следную» часть, где поток адаптируется к невозмущенному:

$$U_{max} - U(z) = \begin{cases} u_* \left(-\frac{1}{\kappa} \ln(z/\delta) + \gamma \right); & z/\delta < 0.3, \text{ - логарифмическая часть} \\ \beta u_* (1 - z/\delta)^2; & z/\delta > 0.3, \text{ - «следная» часть} \end{cases}$$

$$U(z) = p_3 + p_2 z + p_1 z^2 \text{ - Аппроксимация «следной» части полиномом второй степени}$$



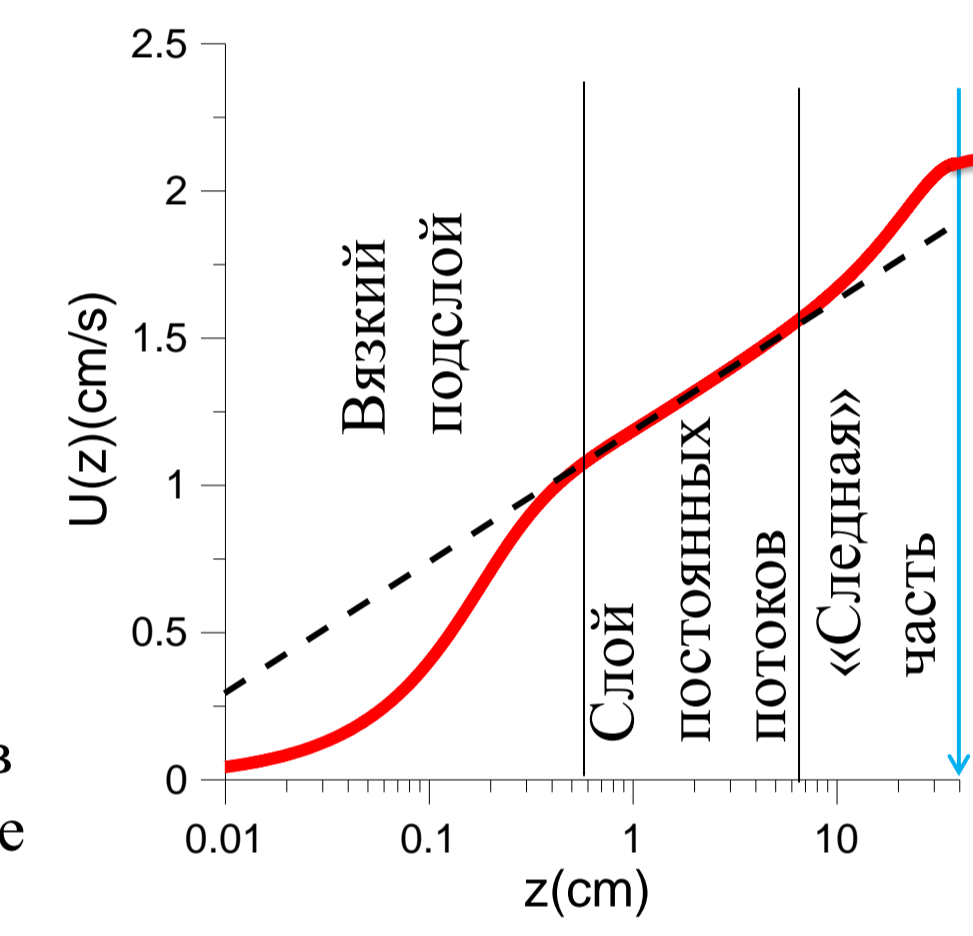
Пример параболической аппроксимации осредненного профиля

$$\beta u_* = -\frac{p_2^2}{4p_1} \text{ - Параметры пограничного слоя в урагане, полученные из параболической аппроксимации}$$

$$\delta = -\frac{p_2}{2p_1}$$

$$U_{max} = p_3 + \beta u_*$$

$$U_{max} - U(z) = \begin{cases} -\frac{1}{\kappa\beta} \ln(z/\delta) + \frac{\gamma}{\beta}; & z/\delta < 0.3, \text{ - Профиль скорости ветра в автомоделных переменных} \\ (1 - z/\delta)^2; & z/\delta > 0.3. \end{cases}$$



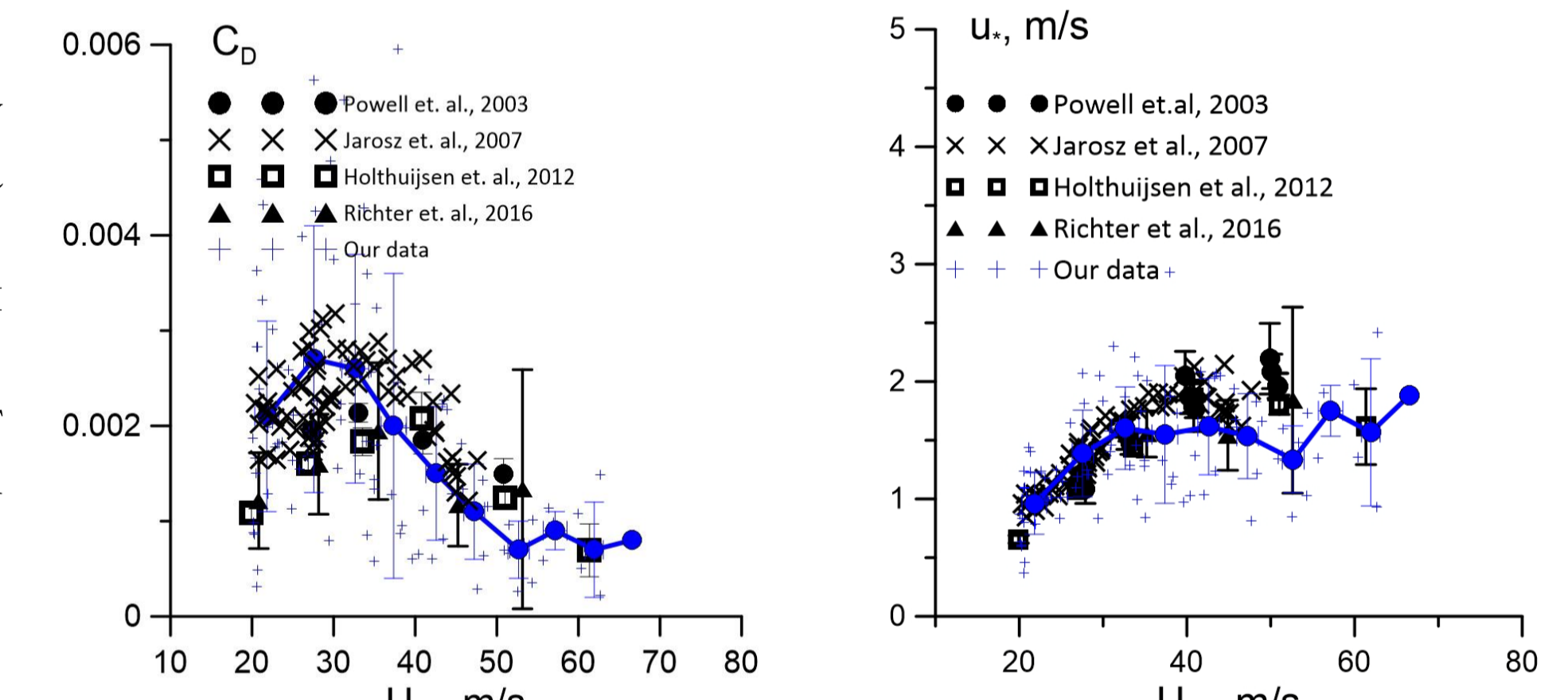
5

Зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления и динамической скорости ветра от скорости ветра

$$C_D = \frac{\kappa^2}{(\kappa U_{max}/u_* - \gamma\kappa + \ln(H_{10}/\delta))^2} \text{ - коэффициент аэродинамического сопротивления}$$

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z/z_0) \text{ - формула для вычисления скорости ветра}$$

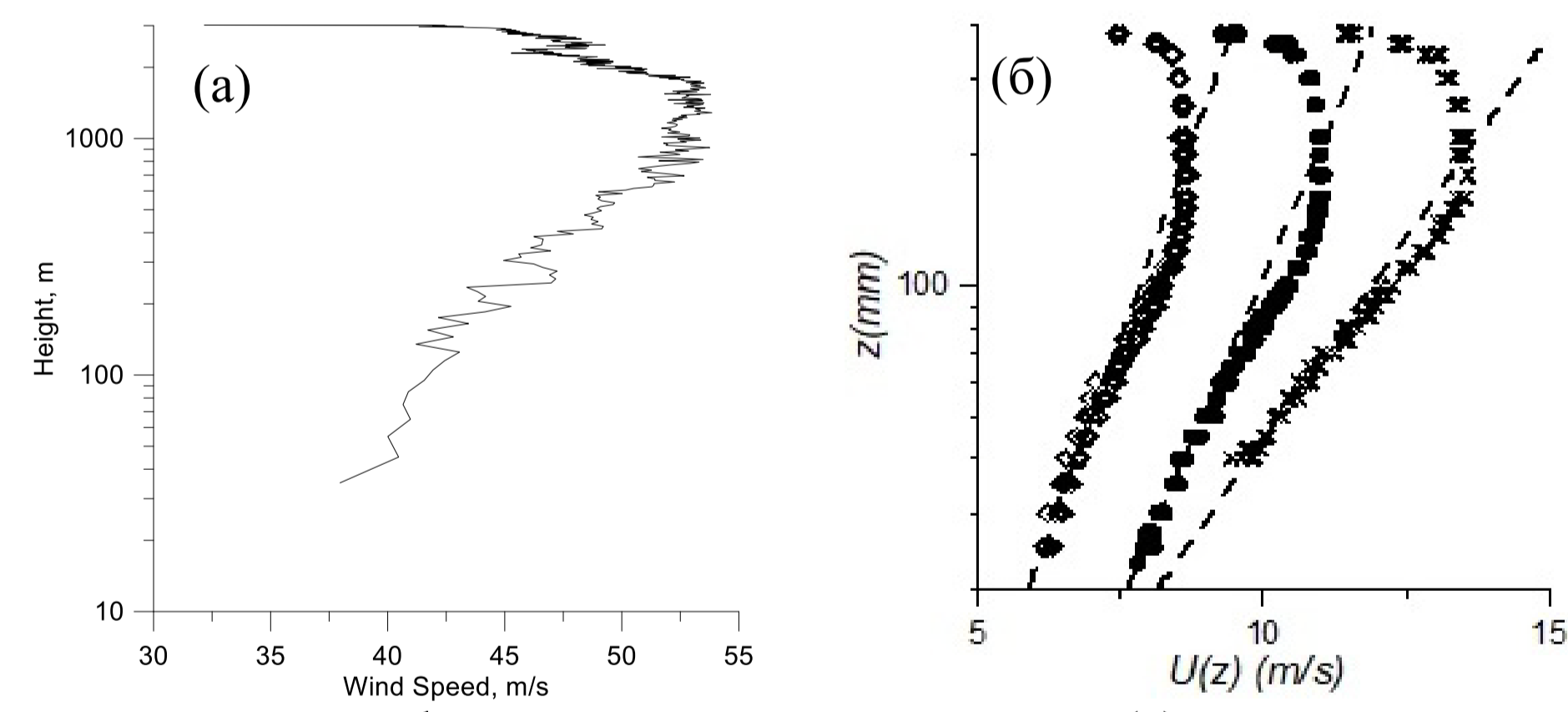
Усредненные по азимуту зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления и динамической скорости ветра. Синяя кривая соответствует аппроксимации полученных значений.



6

Статистический анализ профилей скорости ветра

Автомоделные профили скорости в турбулентном пограничном слое применимы только к значениям, усредненным по статистическому ансамблю. Здесь статистический ансамбль представляет собой набор профилей скорости ветра, измеренных в примерно одинаковых условиях, то есть в определенное время в конкретном урагане. Кроме того, предполагается, что поле скорости урагана близко к радиально-симметричному. В этом исследовании статистический ансамбль включает профили скорости, измеренные на определенном расстоянии от центра урагана. Для каждого урагана положение сбрасываемых зондов считалось относительно текущего положения его центра в соответствии с данными трека с сайта миссии NOAA Hurricane Research.



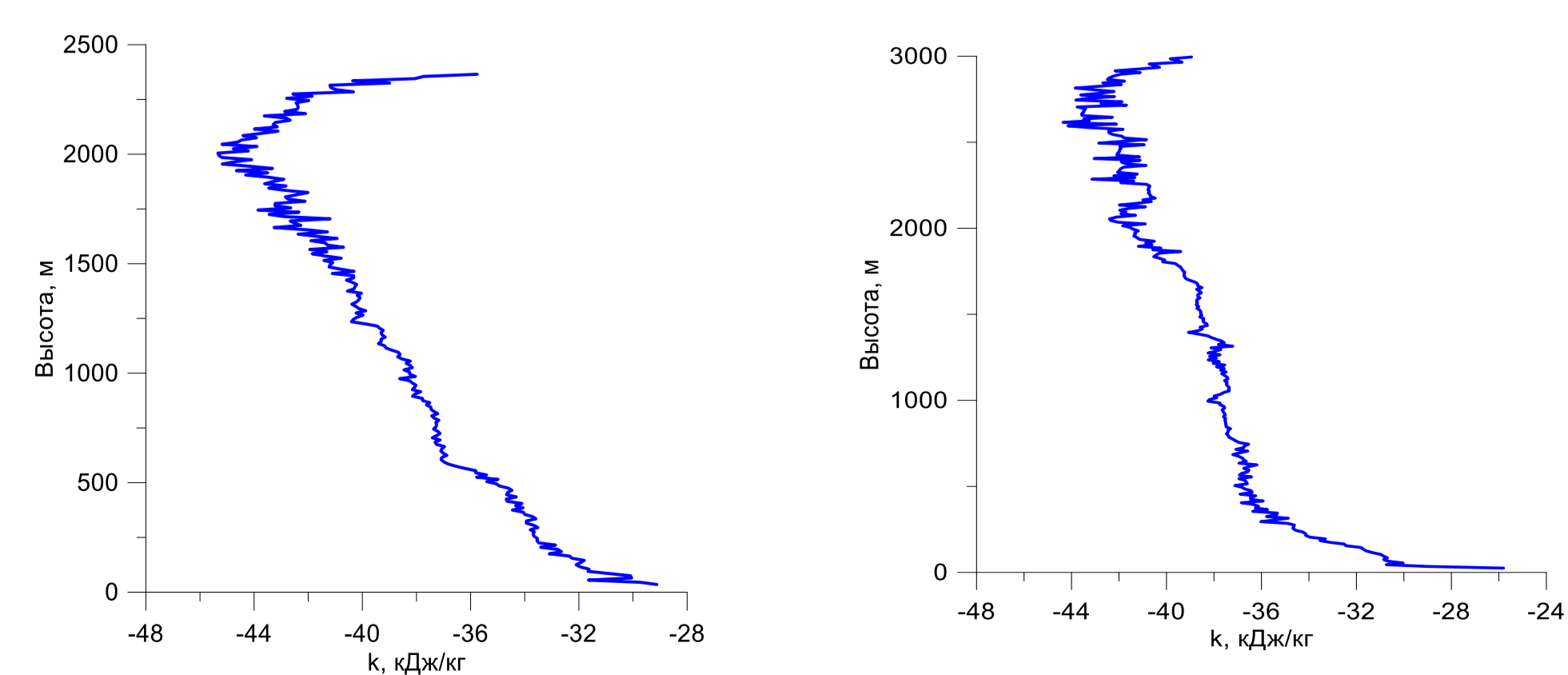
Типичные профили скорости ветра в урагане (а) аналогичны профилям, полученным в ветро-волновом канале (б) (Троицкая и др., 2017). Роль крышки, ограничивающей поток воздушной массы сверху, играет атмосферная инверсия.

4

Статистический анализ профилей энтальпии

Ансамбли для получения средних профилей энтальпии были получены из групп GPS-зондов, сформированных для расчета параметров ветра. Энтальпия вычислялась по следующей формуле и нормировалась на величину энтальпии на поверхности моря:

$$k = \left((1 - q)C_p + qC_{liq} \right) \theta + qL_v, \text{ где } q \text{ - удельная влажность воздуха, } C_p \text{ и } C_{liq} \text{ - теплоемкость воздуха и воды, } \theta \text{ - потенциальная температура воздуха, } L_v \text{ - температура парообразования.}$$



Усредненные профили энтальпии для урагана Irma, 2017.09.08, расстояние от центра урагана 70-80 км и 80-90 км соответственно

7

Получение профилей энтальпии в автомоделных переменных

Метод профилирования, использованный выше для восстановления коэффициентов аэродинамического сопротивления и динамической скорости ветра, также подходит для расчета коэффициентов термодинамического обмена.

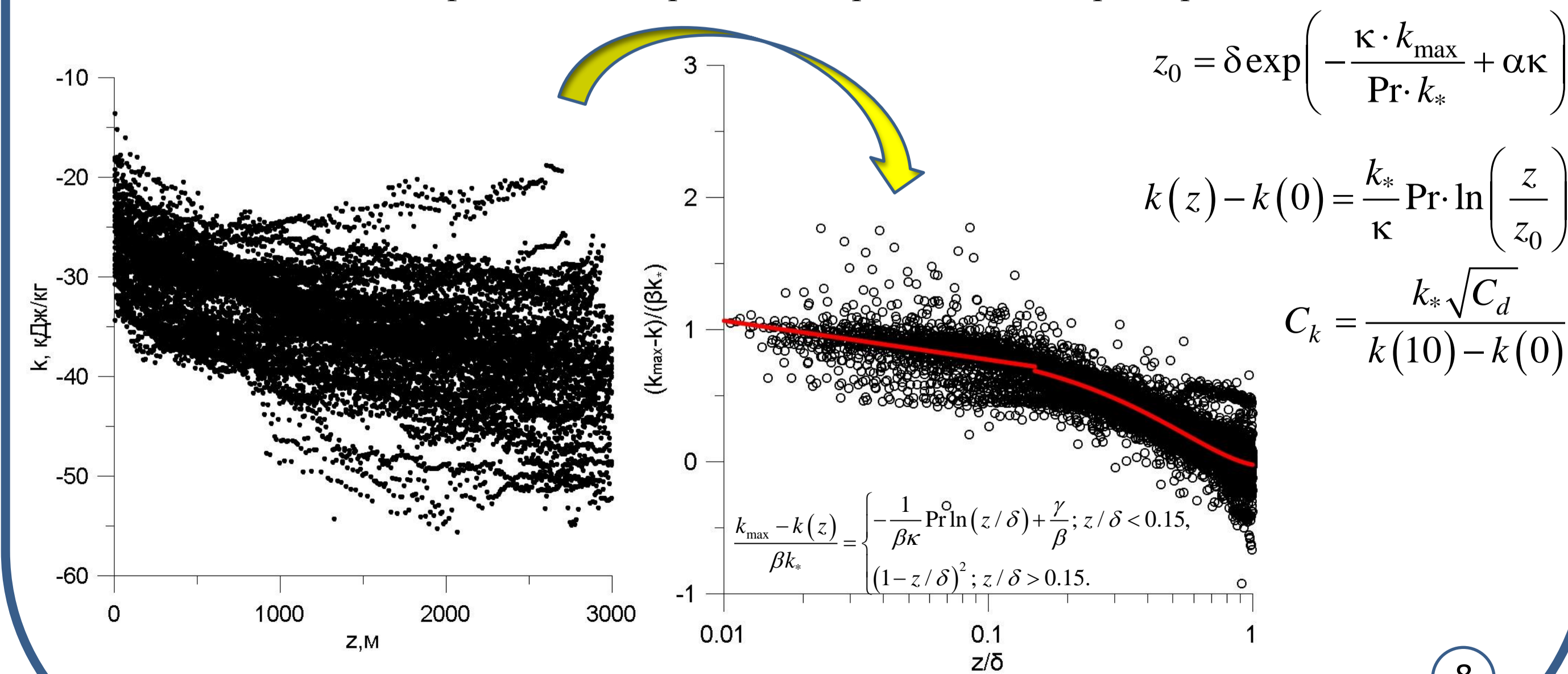
$$\beta k_* = -\frac{p_2^2}{4p_1}$$

$$k_{max} - k(z) = \begin{cases} k_* \left(-\frac{1}{\kappa} \text{Pr} \ln(z/\delta) + \gamma \right); & z/\delta < 0.15, \\ \beta k_* (1 - z/\delta)^2; & z/\delta > 0.15. \end{cases}$$

$$\delta = -\frac{p_2}{2p_1}$$

$$k_{max} = p_3 + \beta k_*$$

$$k(z) = p_3 + p_2 z + p_1 z^2 \text{ С помощью рассчитанных параметров профили в физических переменных приводятся к безразмерным}$$



$$z_0 = \delta \exp \left(-\frac{\kappa \cdot k_{max}}{\text{Pr} \cdot k_*} + \alpha \kappa \right)$$

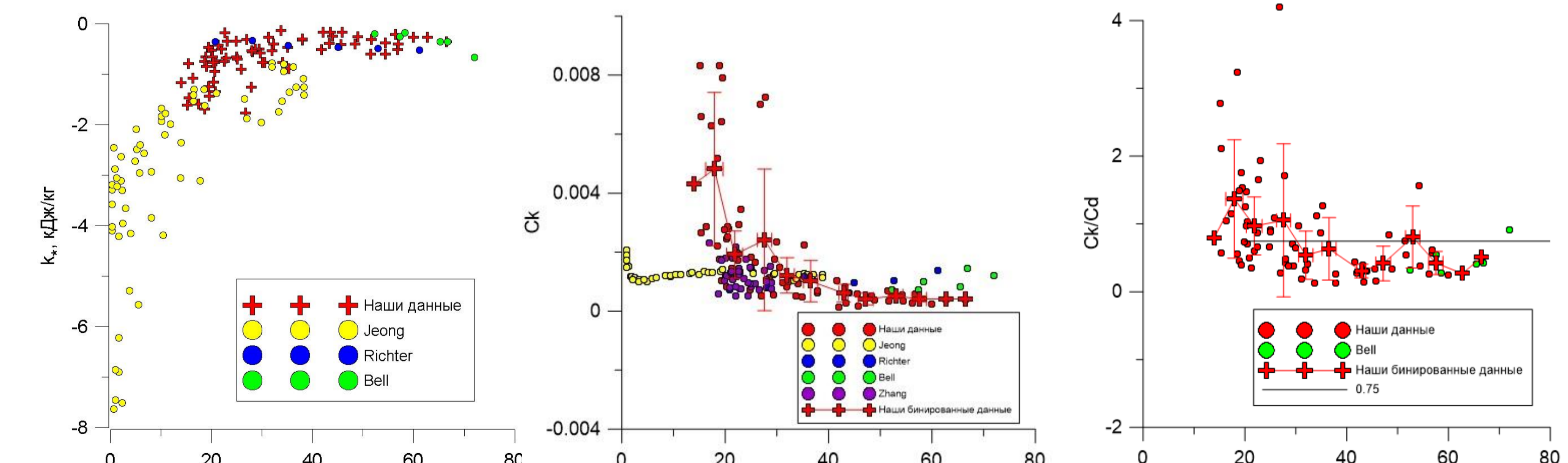
$$k(z) - k(0) = \frac{k_*}{\kappa} \text{Pr} \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

$$C_k = \frac{k_* \sqrt{C_D}}{k(10) - k(0)}$$

$$k_{max} - k(z) = \begin{cases} -\frac{1}{\beta\kappa} \text{Pr} \ln(z/\delta) + \frac{\gamma}{\beta}; & z/\delta < 0.15, \\ (1 - z/\delta)^2; & z/\delta > 0.15. \end{cases}$$

8

Зависимости коэффициентов обмена от скорости ветра



Сравнение зависимостей k_* , коэффициента обмена энтальпией C_k и отношения C_k/C_d с данными исследований (Bell et al, 2012, Richter et al, 2016, Jeong et al., 2012)

9

Заключение

В данной работе предлагается подход к описанию турбулентного пограничного слоя, образующегося в тропических циклонах, основанный на использовании свойств автомоделности профилей скорости ветра и энтальпии в пограничном слое. Преимущество такого подхода - возможность использовать измерения GPS-зондов на значительном расстоянии от поверхности (в «следной» части). Этот подход был применен к термодинамическим параметрам пограничного слоя для получения коэффициентов обмена энтальпии, которые играют важную роль в прогнозировании интенсивности урагана. Для анализа были использованы данные, полученные с GPS-зондов и радиометра SFMR для десяти ураганов Атлантического бассейна 4 и 5 категории.