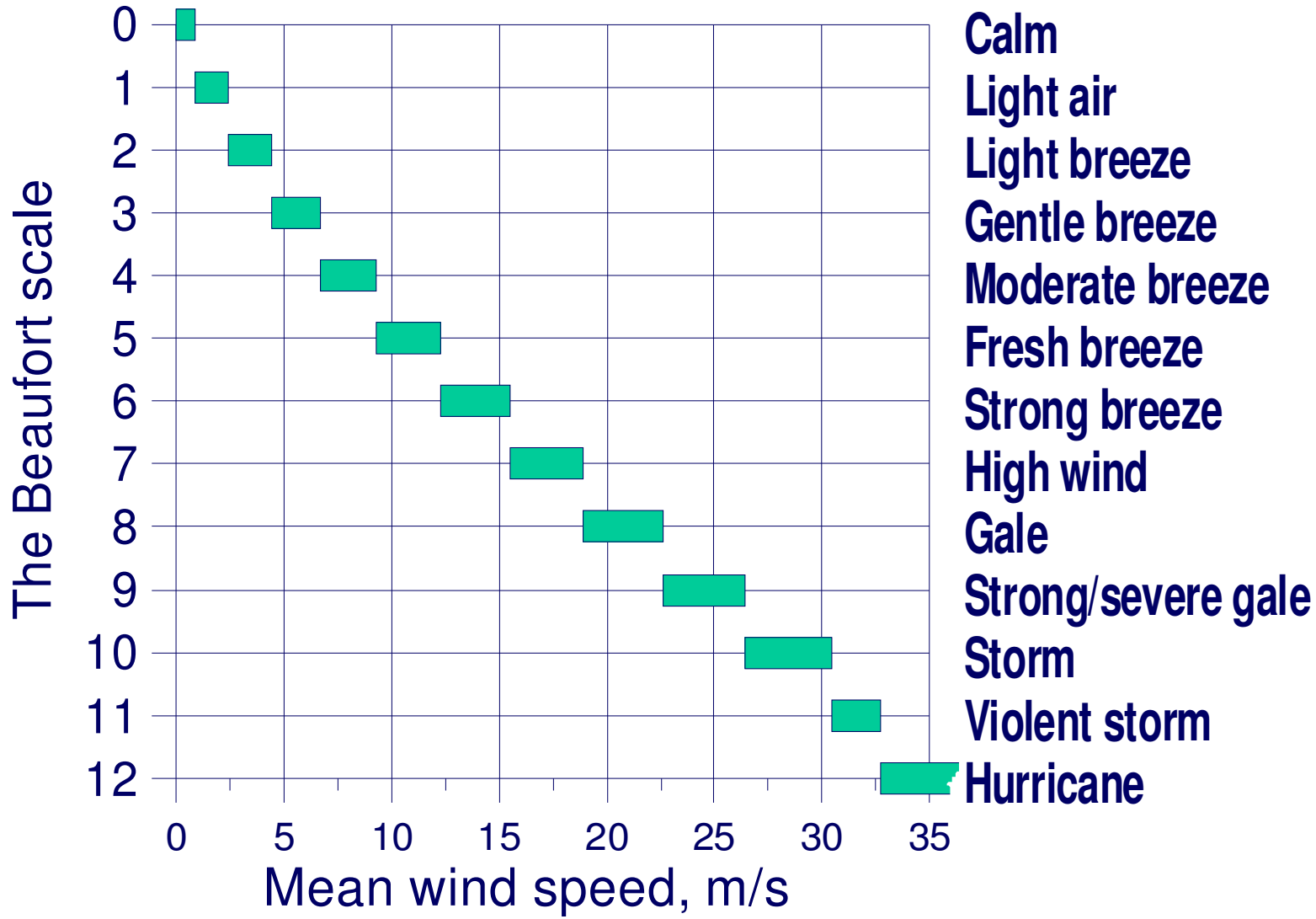
# Морские брызги при сильных ветрах: механизмы генерации и роль в механике и термодинамике ураганов

**Юлия Троицкая**
**ИПФ РАН,**
**Н. Новгород**

# Классификация ветров



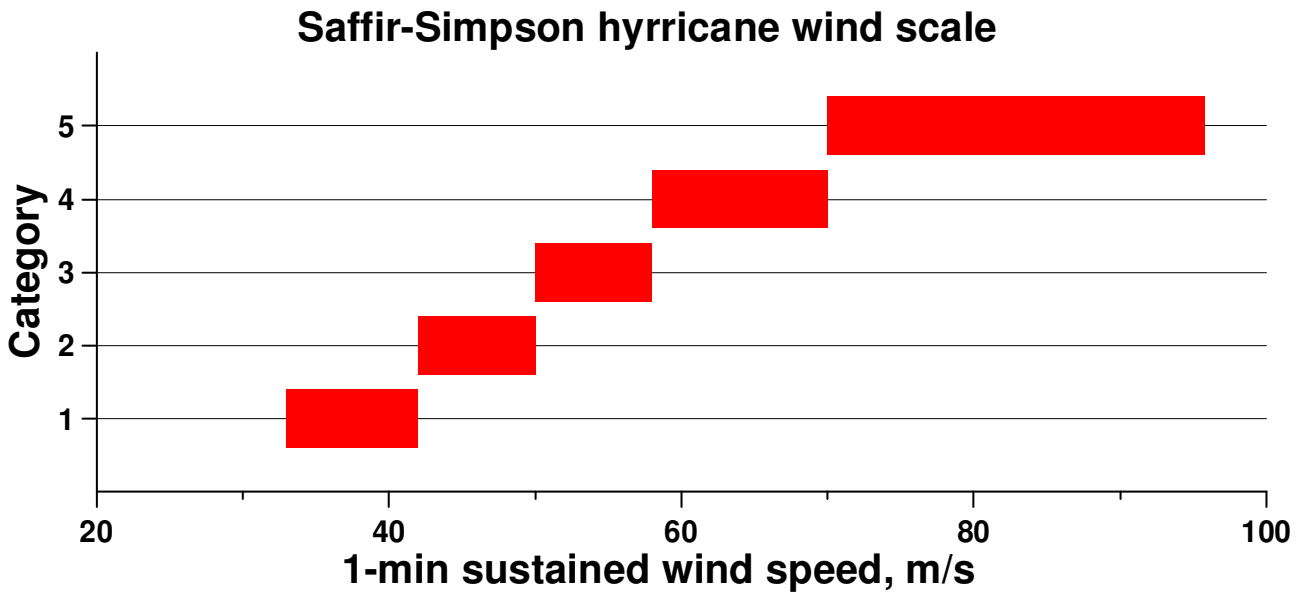
# The state-of-sea scale

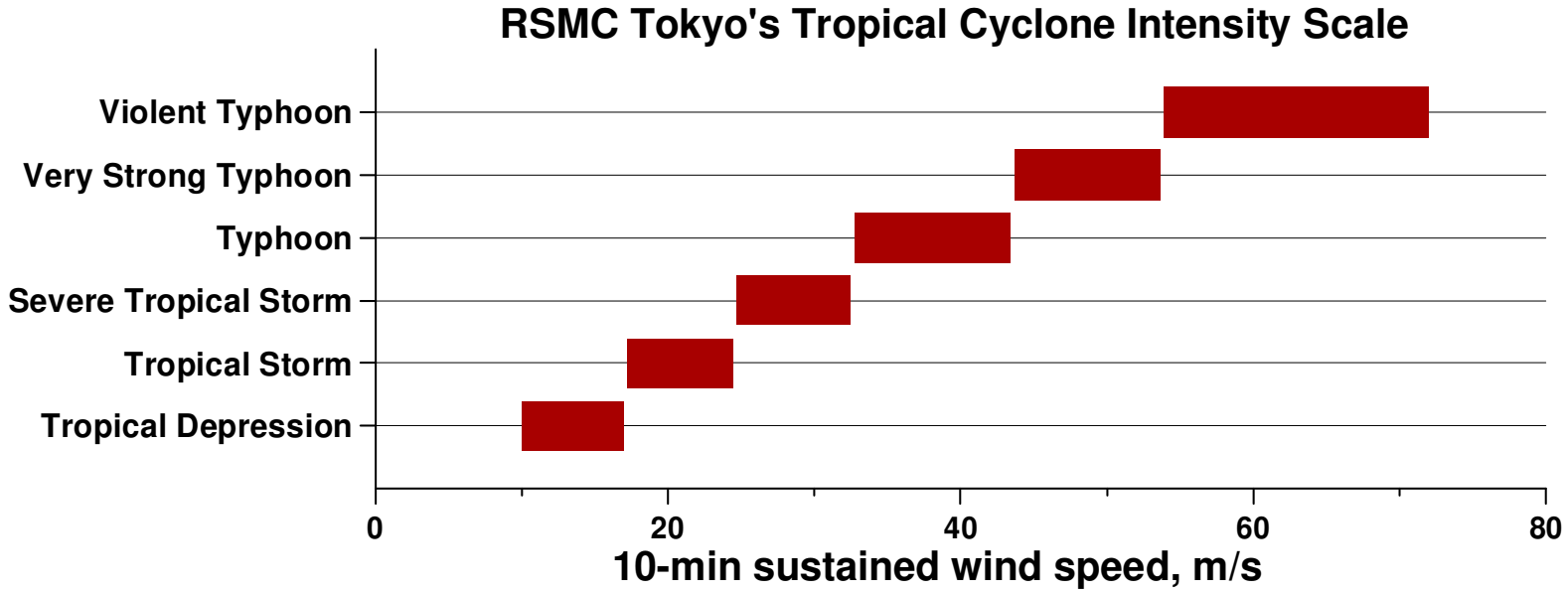
| | | |
|---|---|---|
| *6 Bft* 11,32 ≦ V < 14,40 m/s | Starker Wind | größere Wellen mit brechenden Köpfen, überall weiße Schaumflecken |
| ***7 Bft*** 14,40 ≦ V < 17,49 m/s | steifer Wind | weißer Schaum von den brechenden Wellenköpfen legt sich in Schaumstreifen in die Windrichtung |
| ***8 Bft*** 17,49 ≦ V < 21,09 m/s | stürmischer Wind | ziemlich hohe Wellenberge, deren Köpfe verweht werden, überall Schaumstreifen |
| ***9 Bft*** 21,09 ≦ V < 24,69 m/s | Sturm | hohe Wellen mit verwehter Gischt, Brecher beginnen sich zu bilden |
| ***10 Bft*** 24,69 ≦ V < 28,81 m/s | schwerer Sturm | sehr hohe Wellen, weiße Flecken auf dem Wasser, lange, überbrechende Kämme, schwere Brecher |
| ***11 Bft*** 28,81 ≦ V < 32,92 m/s | orkanartiger Sturm | brüllende See, Wasser wird waagerecht weggeweht, starke Sichtverminderung |
| ***12 Bft*** V ≥ 32,92 m/s | Orkan | See vollkommen weiß, Luft mit Schaum und Gischt gefüllt, keine Sicht mehr |

P. Petersen. Zur Bestimmung der Windstärke auf See. Für Segler, Dampfer und Luftfahrzeige. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*. March 1927, pages 69-72.

Prager. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*. 1905,

# Классификация тропических циклонов

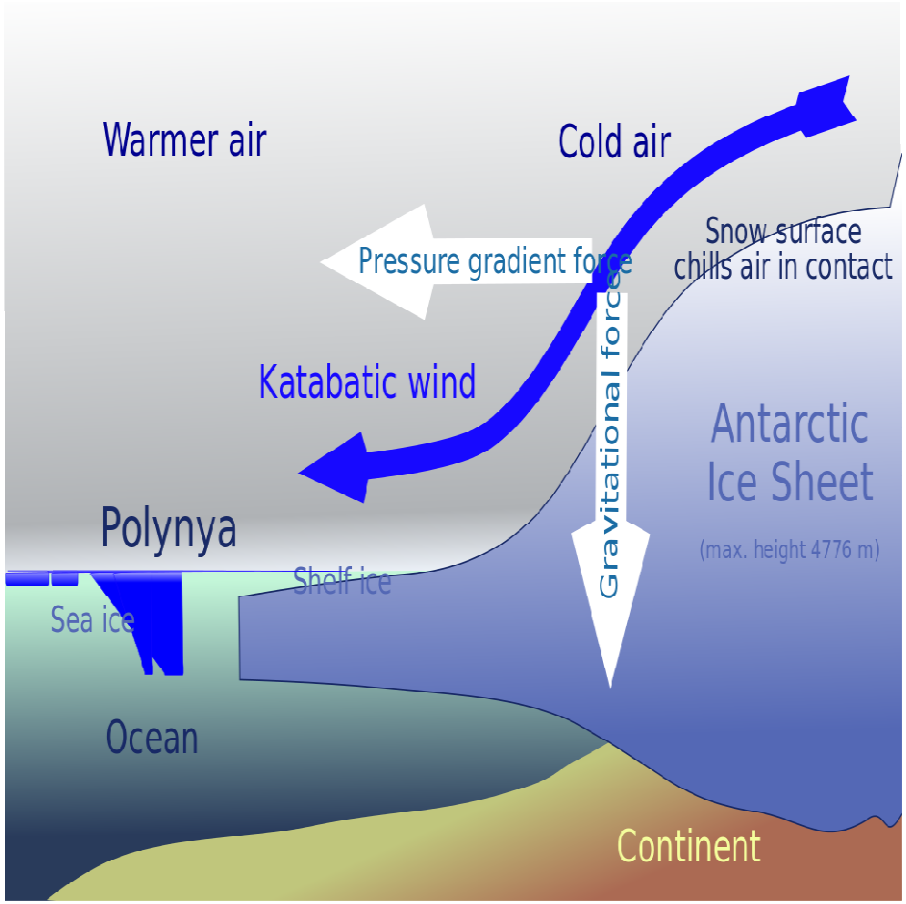


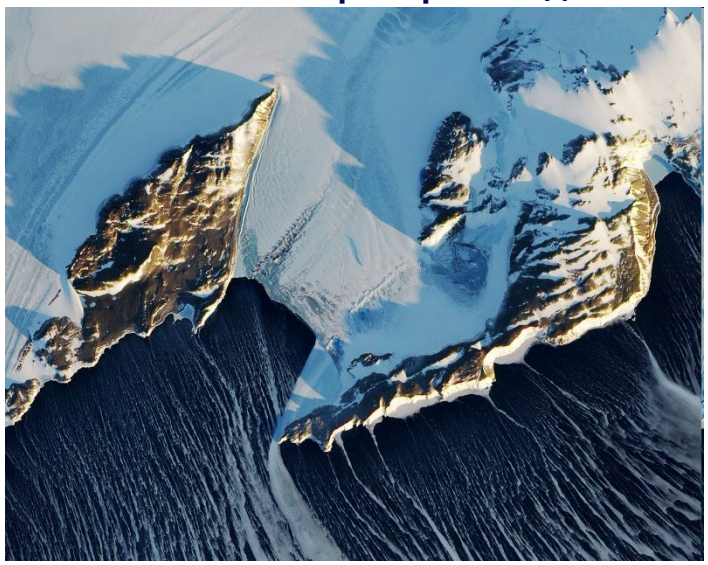
## Условия, когда реализуется штормовой или ураганный ветер

# Катабатический ветер

## бора, ледниковый ветер, стоковый ветер, и мистраль

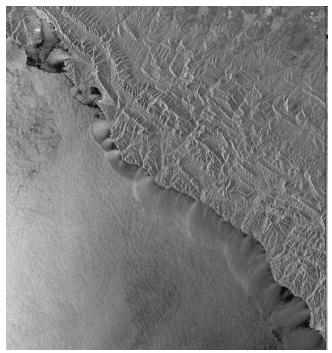



Стоковый ветер в Гренландии



Средиземное море

Новороссийская бора

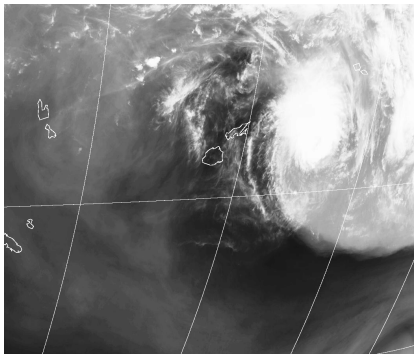


## Условия, когда реализуется штормовой или ураганный ветер

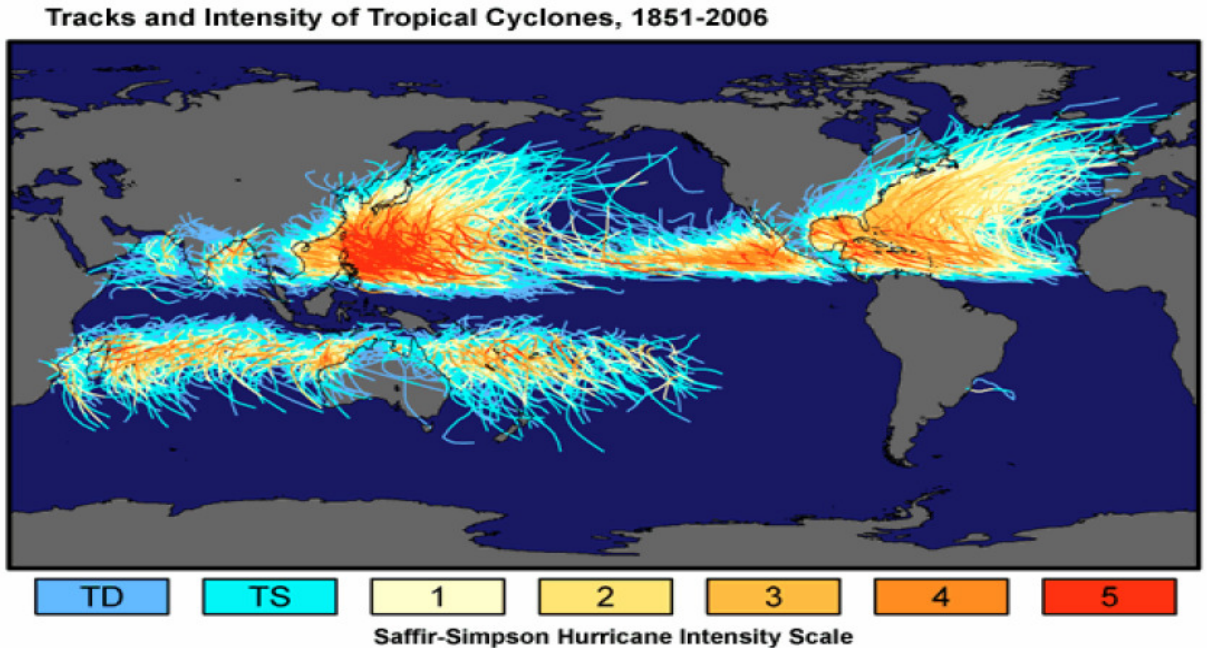
# Тропические циклоны

**ТЦ - самые опасные тропические погодные системы**

- Сильный ветер и ветровые нагрузки
- Штормовой нагон (метео-цунами)
- Ветровые волны
- Ливневые осадки и наводнение
- Торнадо
- Молния



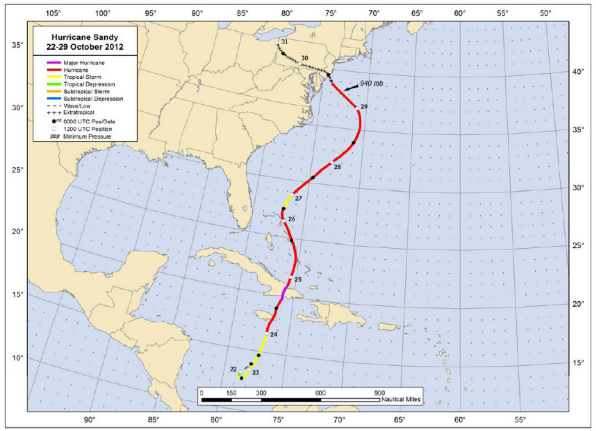
**ТЦ Winston, 19-22.02.2016**

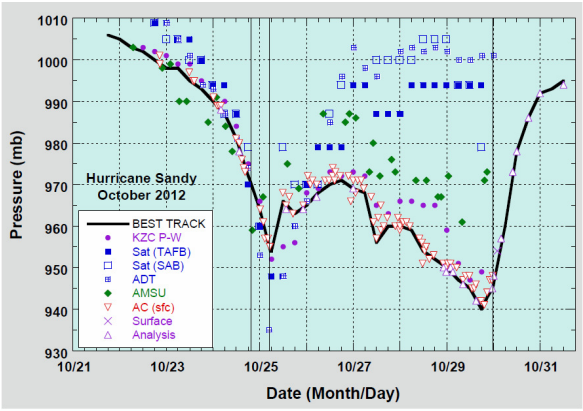


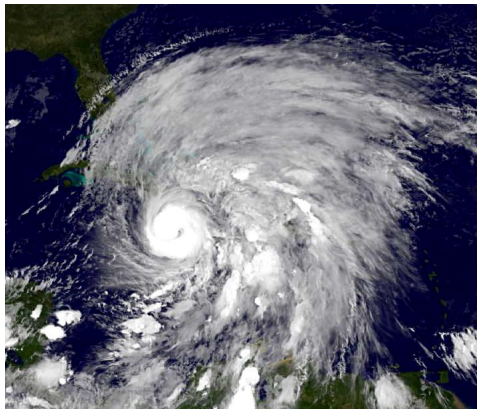
## Условия, когда реализуется штормовой или ураганный ветер

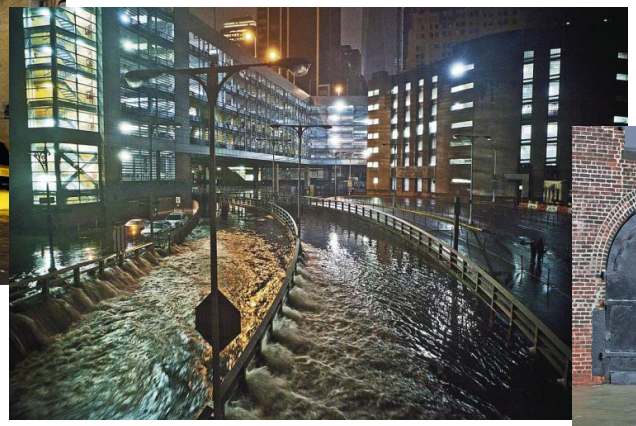
# ТЦ как источник внетропических циклонов

## Superstorm Sandy 2012

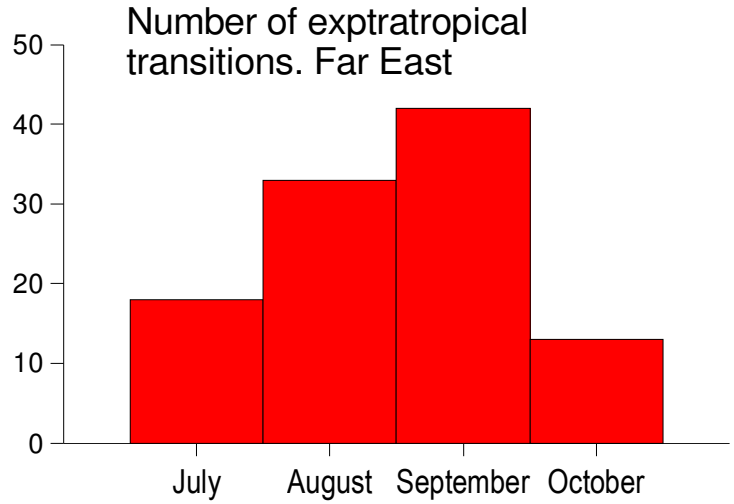




# Число выходов ТЦ, оказавших влияние на регионы Дальнего Востока России за период 1970 – 2011 гг

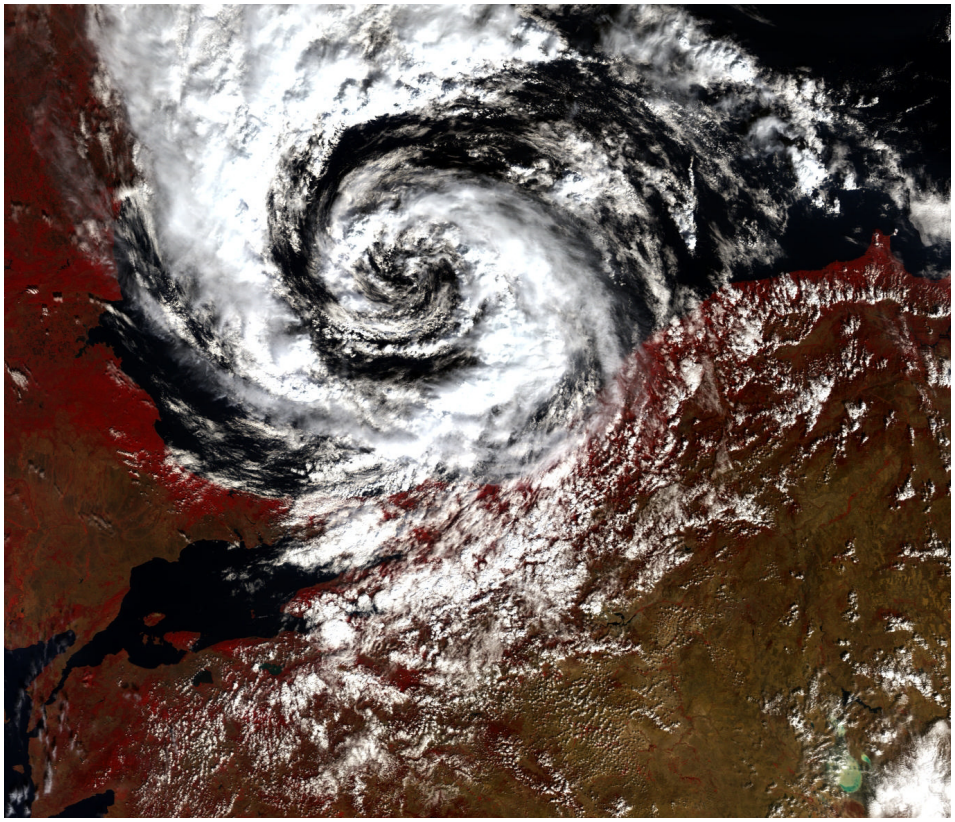



Средняя за 40 лет повторяемость экс-ТЦ на Дальнем Востоке составляет 2,53

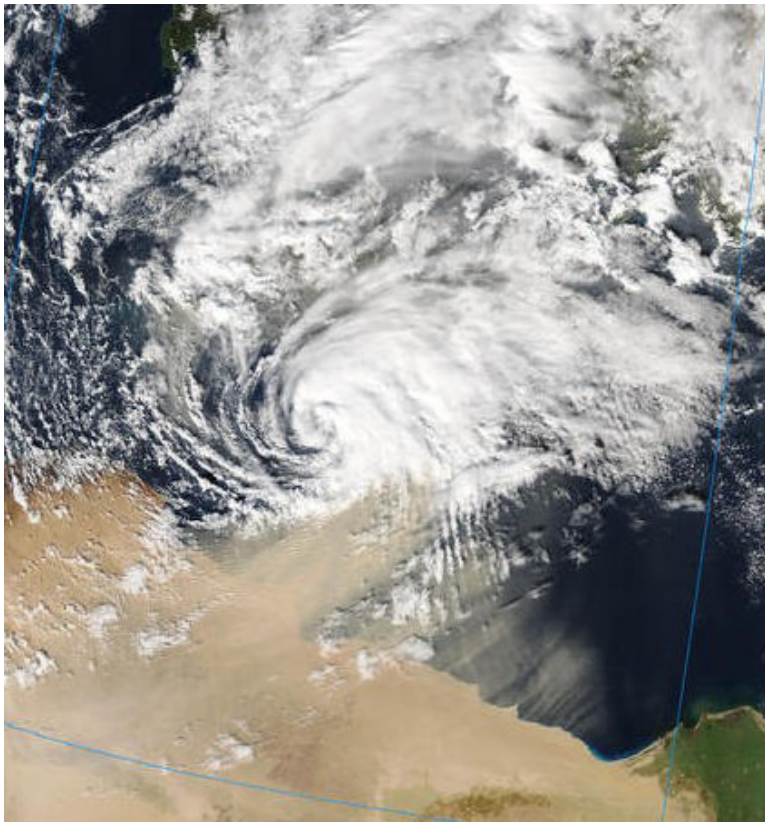
**Август - сентябрь 2013 г.**

# Квазитропические циклоны умеренных широт

**Черное море 27 Сентября 2005**



**15 Dec 2005, 11:25 UTC,
Terra MODIS**

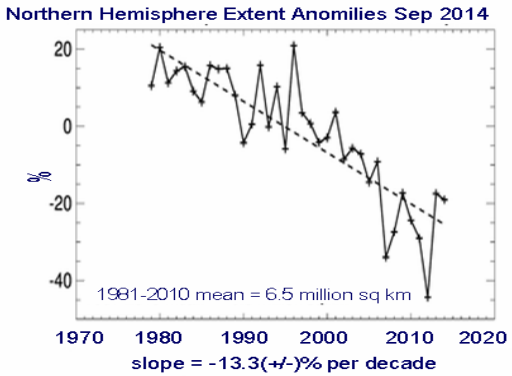


# Условия, когда реализуется штормовой или ураганный ветер

Animation 13-16 October 1993.

**Infrared images 04+14 UTC 13th, 06+14 UTC 14th, 05+13 UTC 15th and 05+13 UTC 16th October.**

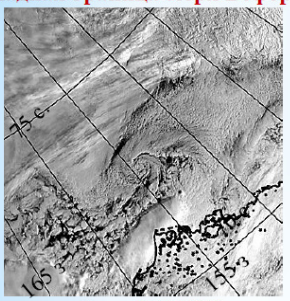
## Полярные ураганы




### Типы мезомасштабных циклонов над восточной Арктикой

**Кромка льда, центральная часть окклюдированных циклонов, орография. Размеры ≤ 200 км, спирали ≈ 90%, облачные запятые ≈ 10% (период август-октябрь 2012-2013 гг.)**

Западная граница моря Бофорта

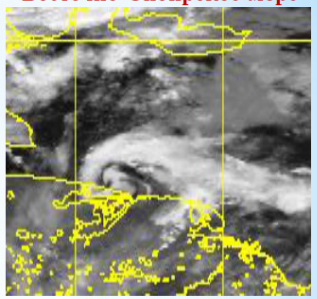


Aqua MODIS
16.09.2013 19:55 UTC

Чукотское море

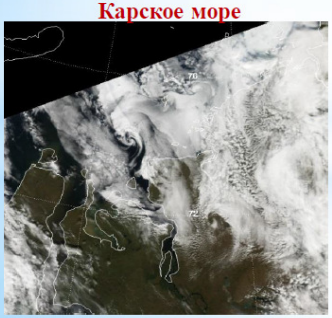
Aqua MODIS
30.08.2012 23:00 UTC

Восточно-Сибирское море



Terra MODIS
04.10.2012 11:01 UTC

Карское море

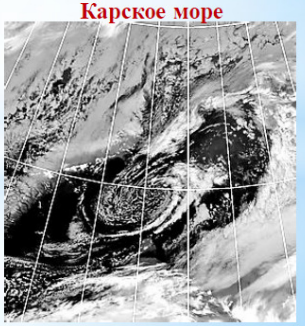


Aqua MODIS
24.08.2013 06:35 UTC

Север Восточно-Сибирского моря

Aqua MODIS
05.09.2007 00:05 UTC

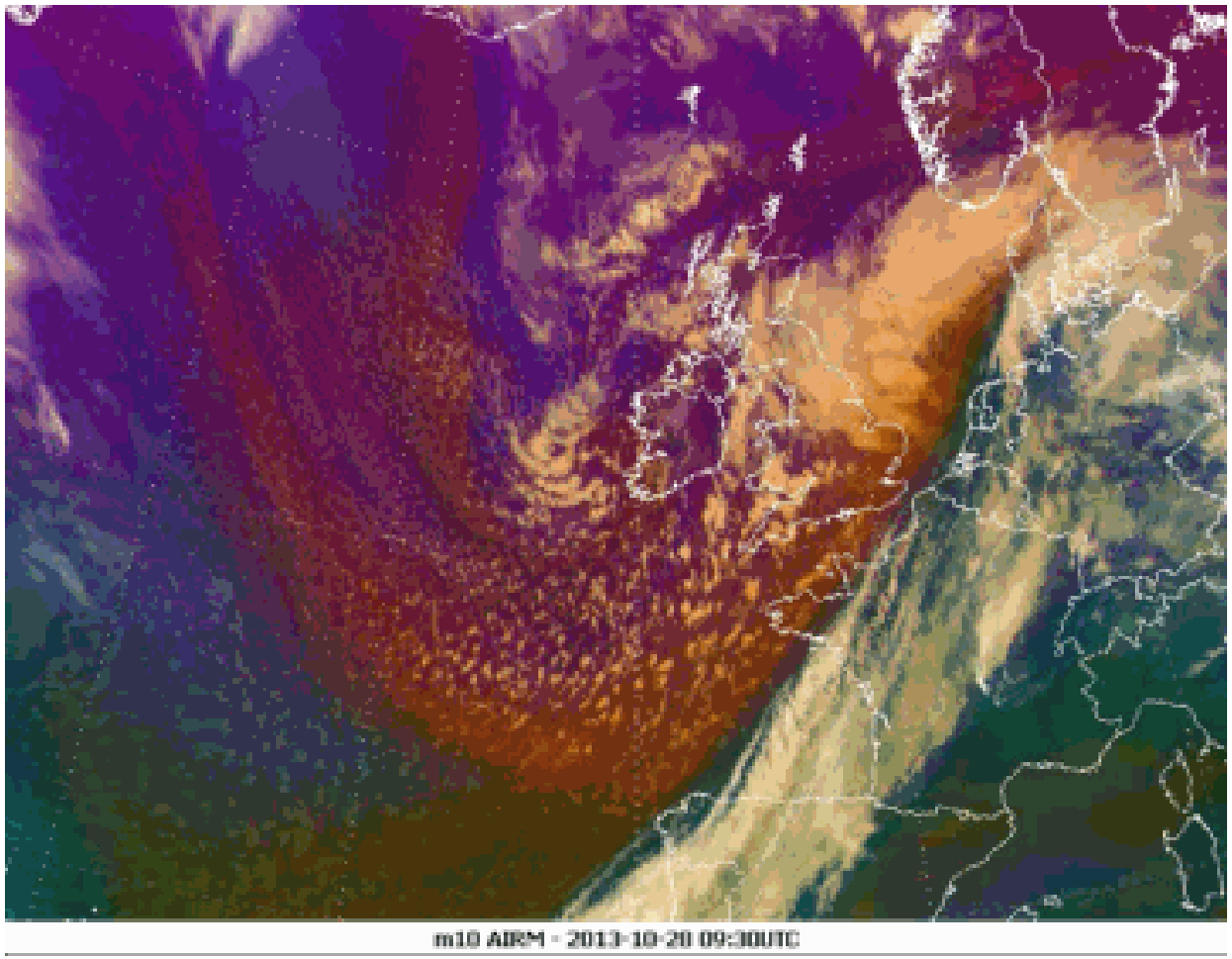
Карское море



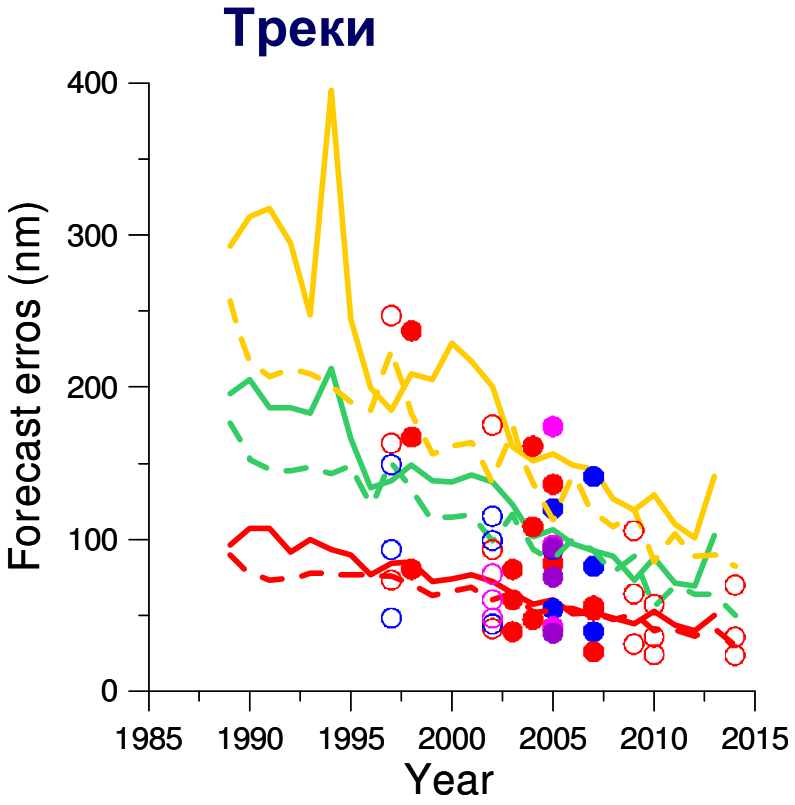
Terra MODIS
29.09.2012 08:00 UTC

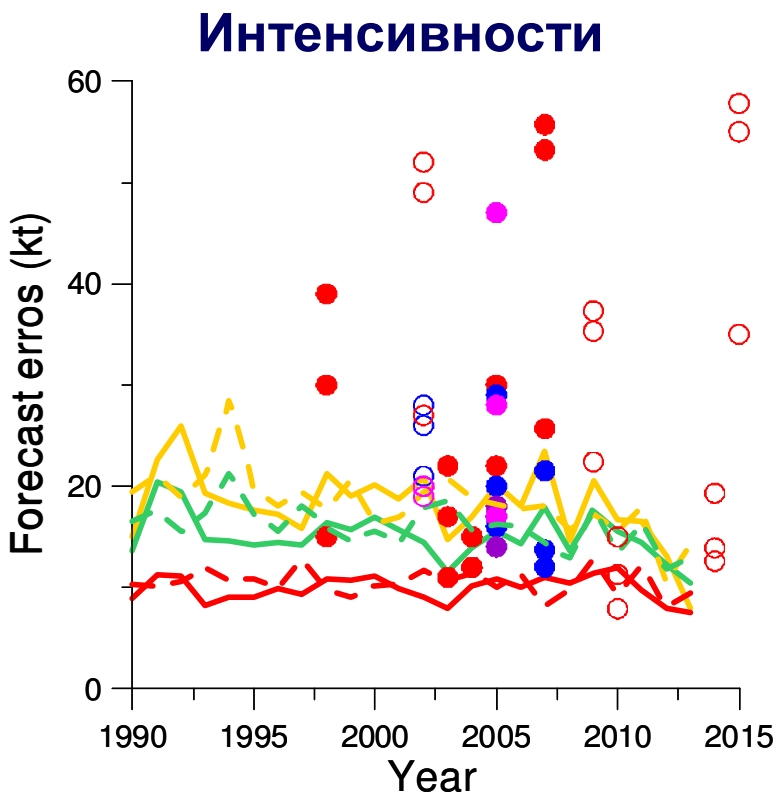
# Глубокие циклоны средних широт

**Storm St. Jude, 2013**
27 October 18:00 UTC–28 October 9:30 UTC



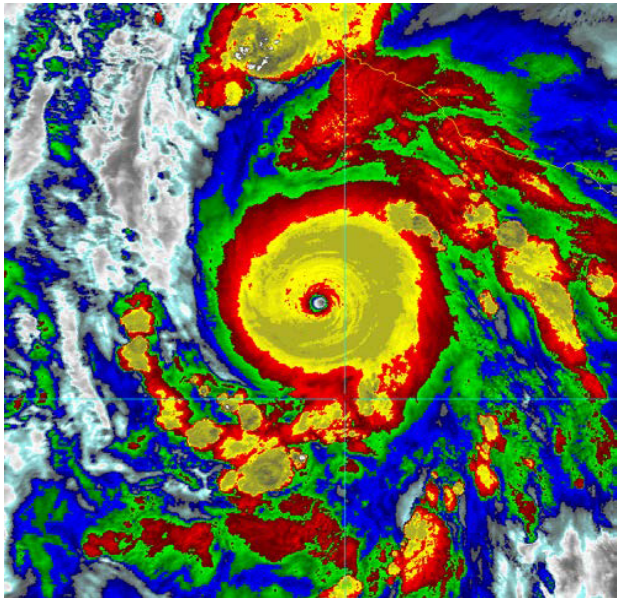
# NHC Official Annual Average Errors
# Atlantic (closed symbols) and
# East Pacific (symbols solid ) Basin
# Tropical Storms and Hurricanes



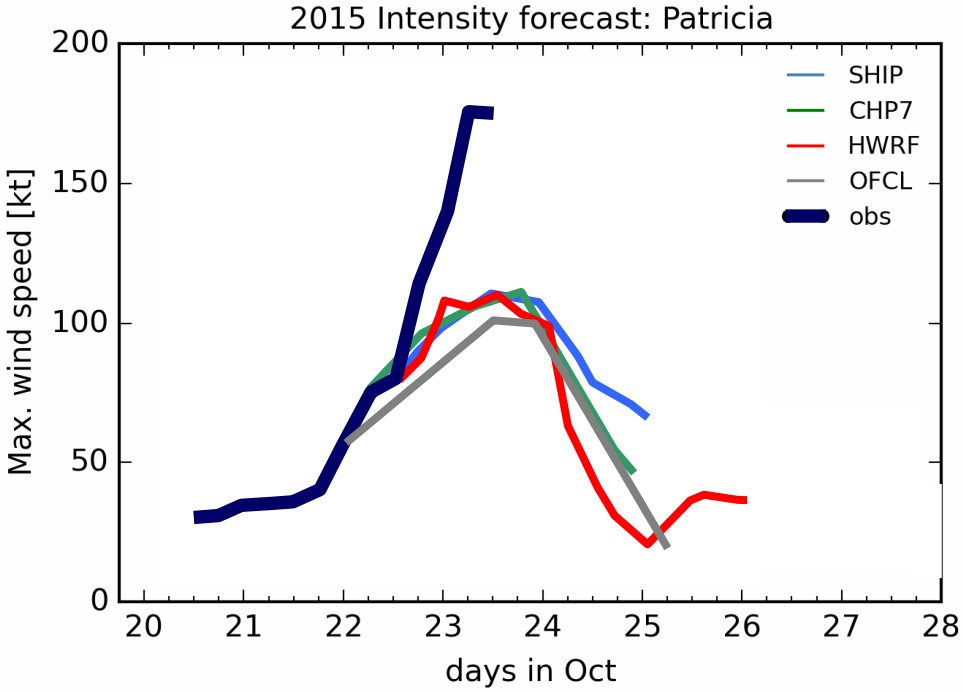




Symbols are forecast errors of the category 5 hurricanes

# Hurricane Patricia,
# 20 – 24 October 2015, East Pacific



METOP-B ENHANCED INFRARED SATELLITE IMAGE AT 0323 UTC 23 OCTOBER.




Intensity forecasts for Hurricane Patricia from three different models (blue, green, and red lines) and the National Hurricane Center (gray line). The different lines represent forecasts started at different times over the last few days. The black line shows the observed maximum wind speed.

**By Allison A. Wing and Chia-Ying Lee**

http://blogs.ei.columbia.edu/2015/10/23/historic-hurricane-nears-landfall-on-southwest-coast-of-mexico/

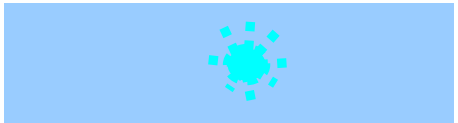
# Масштабы процессов в урагане

Усиление потока тепла из океана в атмосферу (энтальпии влажного воздуха) при высоких скоростях ветра морскими брызгами (Riehl H. 1954. *Tropical Meteorology*)

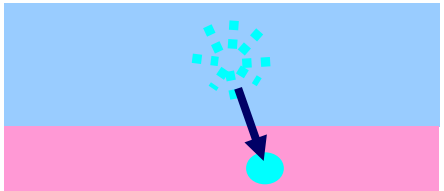
**Концепция возвращающихся капель Andreas, Emanuel (2001): вклад в поток энтальпии из океана в атмосферу вносят только капли, которые не испаряются полностью, а падают в океан.**

# Как капля обменивается теплом с атмосферой?

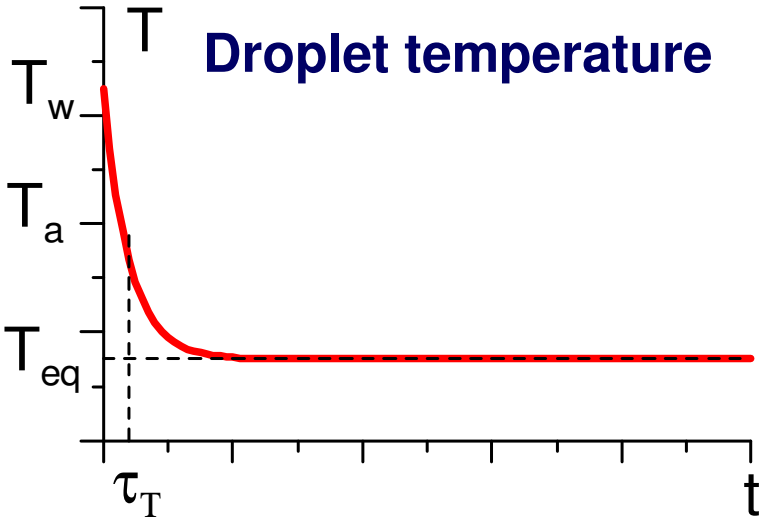
Капли, инжектированные в атмосферу имеют температуру равную температуре воды $T_w$



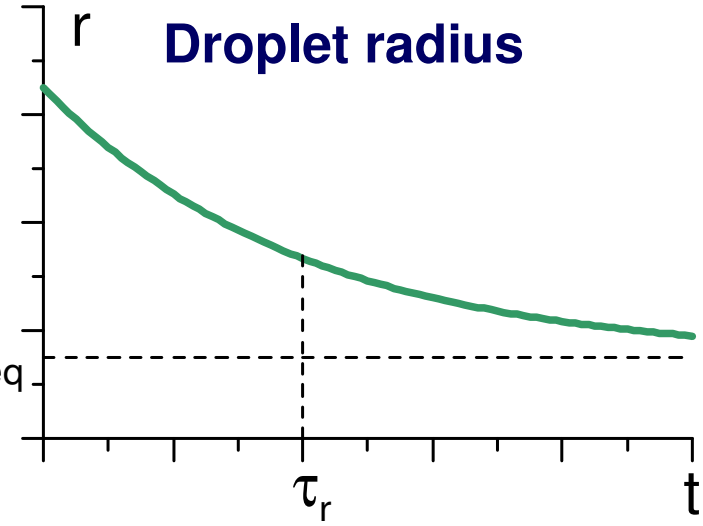
Капли охлаждаются за счет испарения до точки росы $T_{eq}$



Капли падают обратно в океан через промежуток времени $\tau_f$




время установления температуры




время испарения

$$\tau_T / \tau_r \sim 10^{-3}$$

**Общий поток тепловой энергии из атмосферы к капле (**Pruppacher, H. R. and J. D. Klett, 1978: Microphysics of Clouds and Precipitation**)**

$$C_w m \frac{dT}{dt} = -k\left(T - T_a\right) + L_v \frac{dm}{dt}$$

**Количество энтальпии, попадающей в атмосферу на протяжении всего жизненного цикла капли от ее инжекции до падения обратно в океан**

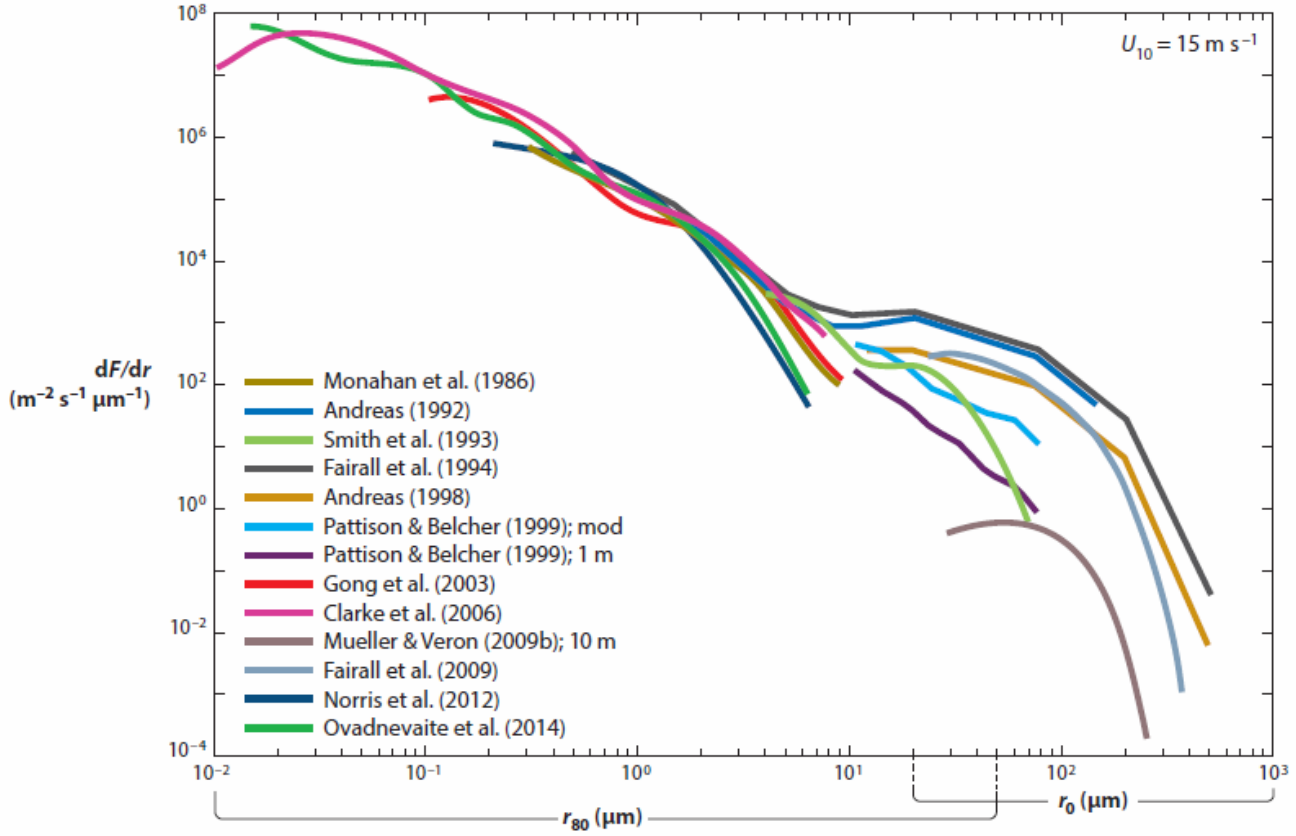
$$Q_k = -C_w \int_0^{\tau_f} m \frac{dT}{dt} dt = C_w m_0 \left(T_w - T\left(\tau_f\right)\right) = \frac{4}{3}\pi r_0^3 C_w \rho_w \left(T_w - T\left(\tau_f\right)\right)$$

**If $\tau_f >>> \tau_T$,** $$Q_k = \frac{4}{3}\pi r_0^3 C_w \rho_w \left(T_w - T_{eq}\right)$$

**After t>> $\tau_T$** $$k\left(T - T_a\right) = L_v \frac{dm}{dt}$$

**Поток скрытого тепла, поступающий в атмосферу, уравновешивается потоком тепла из атмосферы, который расходуется на испарение капель, при этом капля не вносит вклада в суммарный поток энтальпии в атмосферу**

# Функция генерации брызг, $U_{10}$ = 15 m s$^{-1}$ из Veron, ARFM, 2015

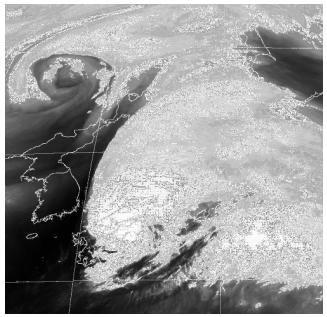



Неопределенность числа брызг достигает 3 порядков

<u>Причинами этой неопределенности являются</u>

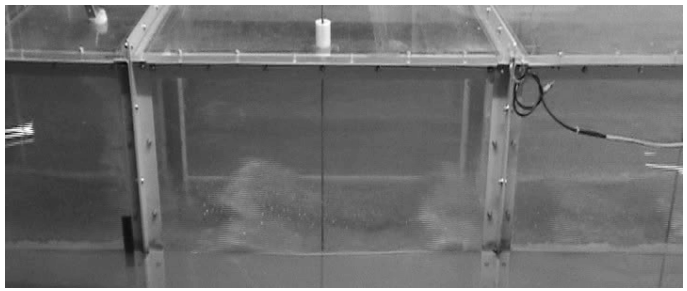
- Трудности для прямых измерений при сильном ветре
- Недостаточное знание механизма генерации брызг.

## Натурные условия. 18 сентября 2017, залив Анива, о. Сахалин, тайфун Талим

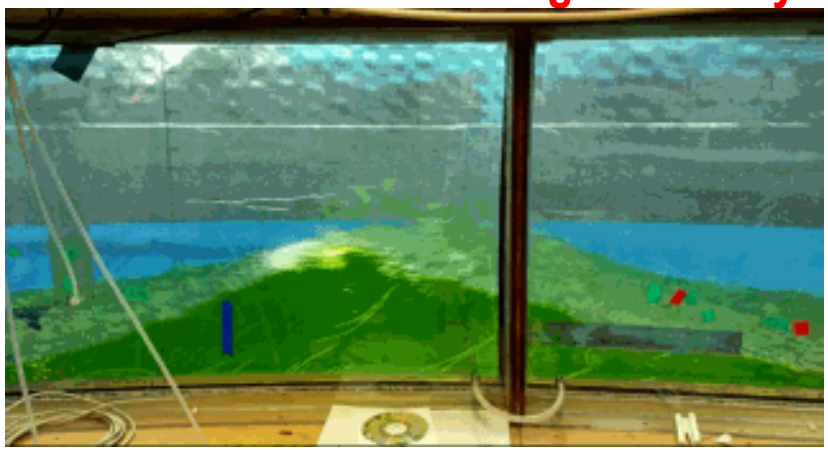


**Полярный ураган в Карском море, 4 октября 2007**
**На борту НИС Виктор Буйницкий (видео проф. Ирины Репной, ИФА РАН)**

## Wind-wave tank IAP RAS



**AEOLOTRON Heiderberg University**



# Целью этой работы является

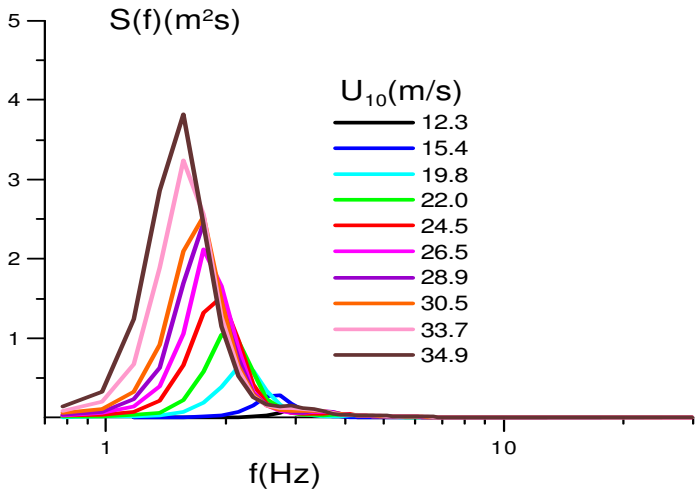
- Исследование механизмов генерации брызг при сильном ветре, их классификация и количественное описание эффективности обнаруженных механизмов.
- Построить функцию генерации брызг на основе обнаруженных механизмов их генерации
- Оценить вклад брызг в потоки импульса, энтальпии влажного воздуха, влаги при штормовых условиях

# Высокоскоростной ветро-волновой канал

## Гребень волны, $U_{10}$=29 m/s

**Размеры канала, 10m x 0.4m x 0.4 m,**
**Скорость воздушного потока на оси канала 3 - 25 m/s,**
**Эквивалентная скорость ветра на высоте 10 м $U_{10}$ 4 - 40 m/s.**

Частотный спектр поверхностных волн



# MEMRECAM HX-3

## High Speed Camera System

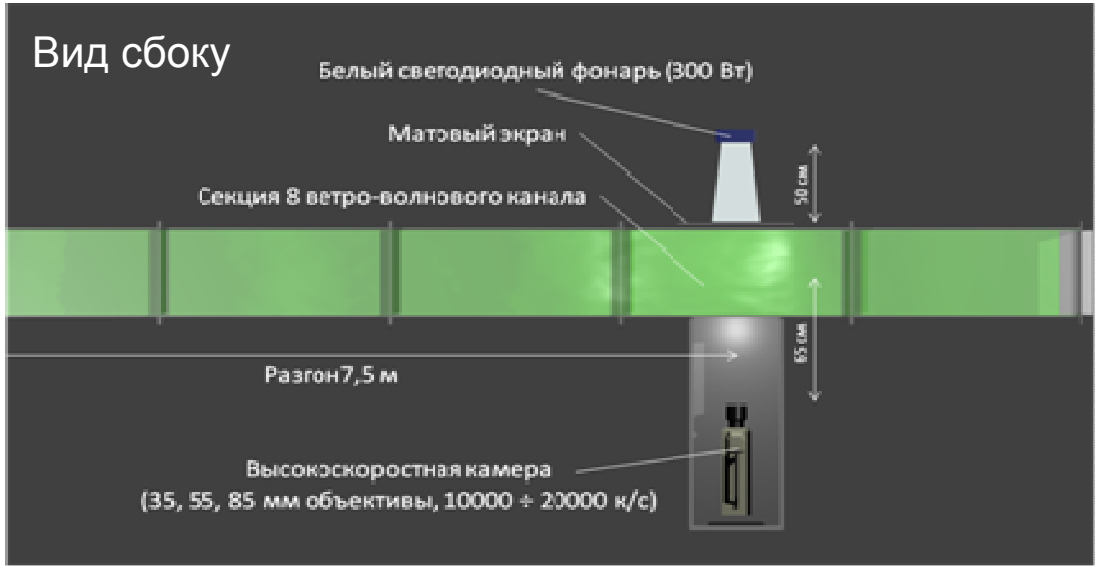
| Memrecam HX3 High Resolution Mode | | |
|---|---|---|
| Max Res (pixels) | 2560 X 1920 | |
| Optical Format | 35.20 mm | |
| fps @ Max Res | 2,000 | |
| | Mono | Color |
| ISO Rating | 10,000 | 2,500 |

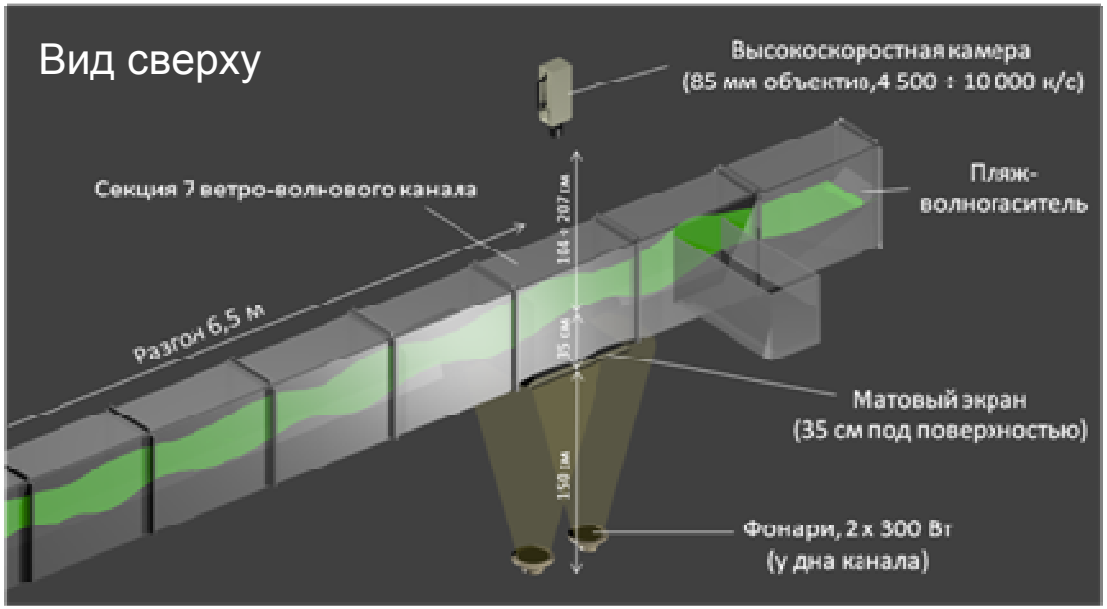
| Memrecam HX3 High Speed Mode | | |
|---|---|---|
| Max Res (pixels) | 1280 X 960 | |
| Optical Format | 35.20 mm | |
| fps @ Max Res | 7,690 | |
| | Mono | Color |
| ISO Rating | 40,000 | 10,000 |

| | |
|---|---|
| Memory Option | 16GB, 32GB, 64GB |
| Maximum fps | 1,300,000 |

| Imaging Formats | Max fps @ Format |
|---|---|
| High Def: 16 X 9 | |
| 1920 X 1080 | 4,670 |
| 1280 X 720 | 10,230 |
| Other Formats | |
| 4 Mega Pixel | 2,400 |
| 2 Mega Pixel | 4,740 |
| 1 Mega Pixel | 9,220 |
| XGA (1024 X 768) | 11,780 |
| 768 X 576 | 20,230 |
| VGA (640 X 480) | 28,310 |
| 512 X 512 | 32,410 |
| 512 X 384 | 43,000 |
| 320 X 320 | 74,340 |
| 320 X 240 | 105,800 |
| 320 X 192 | 130,700 |
| 320 X 96 | 246,880 |
| 320 X 48 | 444,400 |
| 320 X 24 | 740,660 |

# Схема оптических измерений при теневом методе

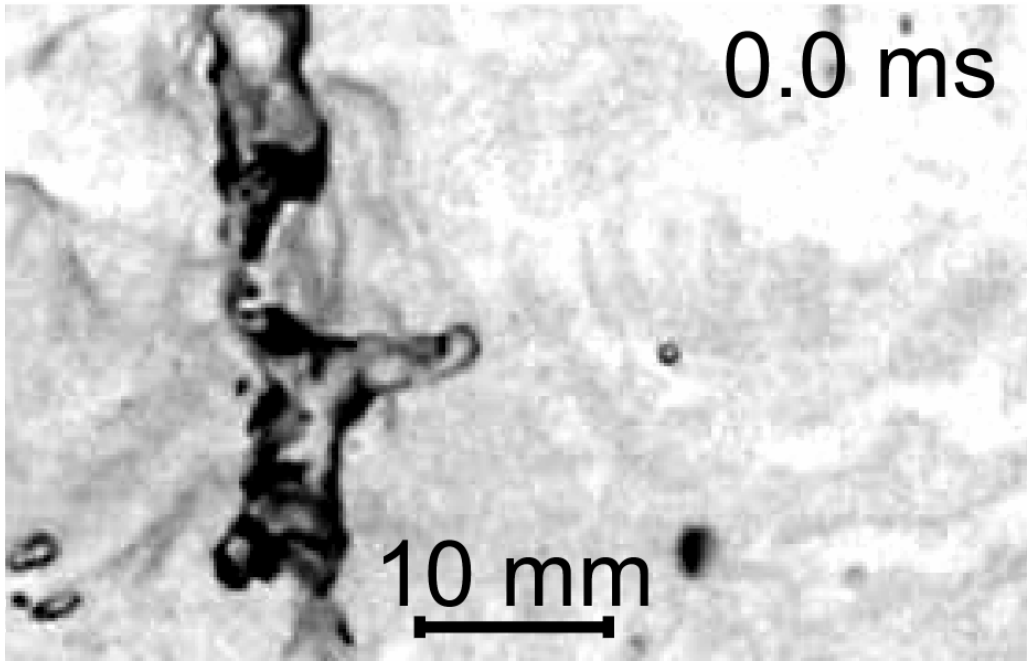


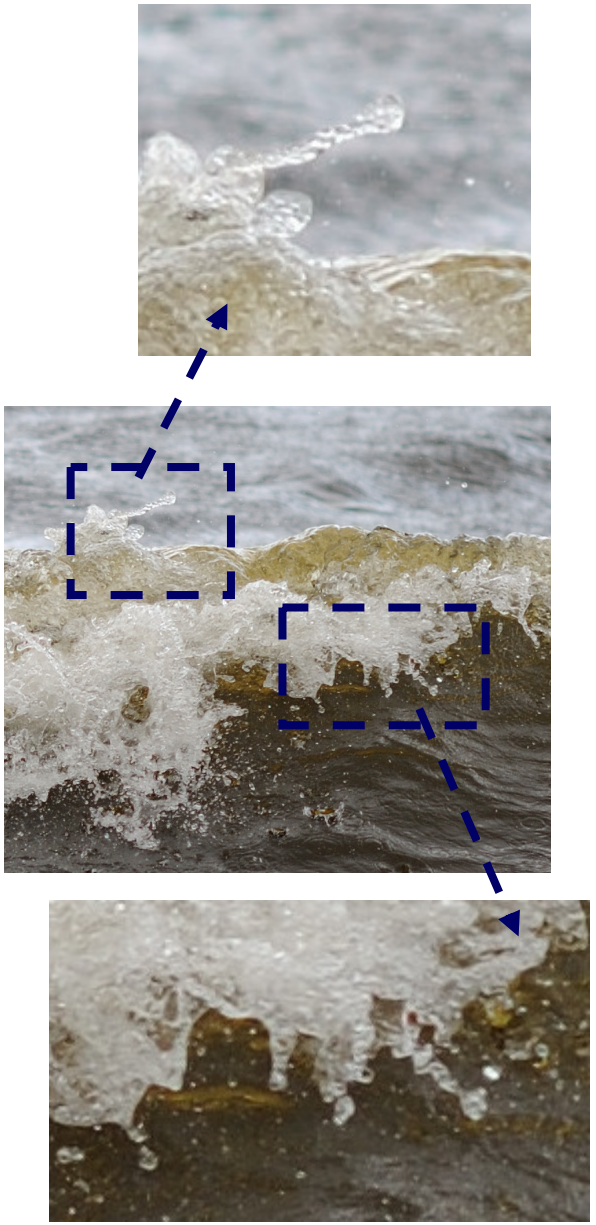



# Гребень волны, $U_{10}$=29 m/s

2500 fps, Nikkor35 f1.4, Distance = 100-140 cm

# Капли, срываемые с гребней волн (жидкие нити) Koga, Tellus, 1981



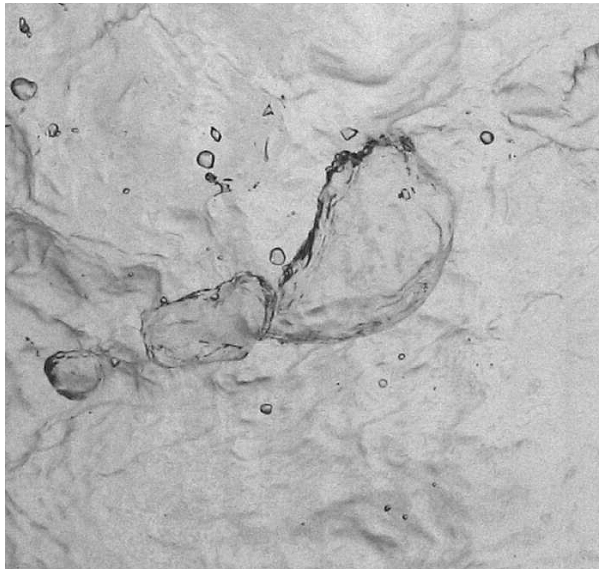



**Wind speed**
**$U_{10}$=25.9 m/s**

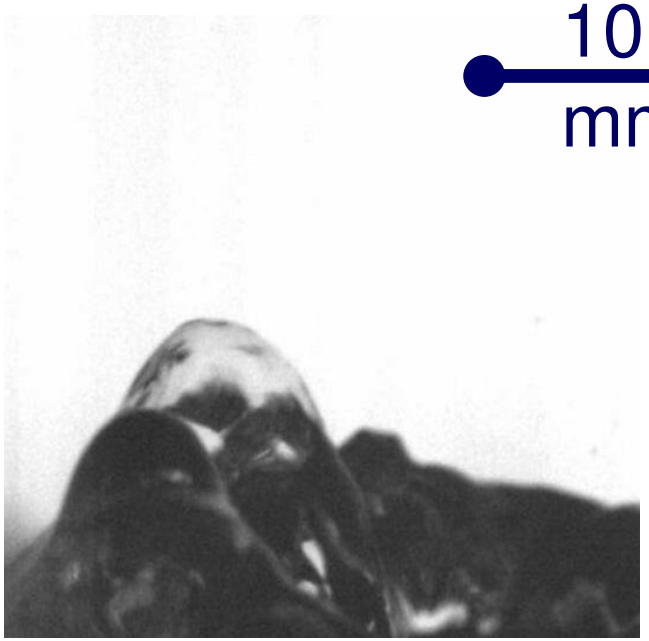
f = 85 mm
Samyang 85 mm f/1.4
Distance = 207 cm
Scale = 256 μm/px
4500 fps

## Капли, срываемые с гребней волн (подводные пузыри)

135 мм



10 mm



**Top view**

**Wind speed**

**$U_{10}$=25.9 m/s**

**f = 85 mm**

**Samyang 85 mm f/1.4**

**Distance = 65 cm**

**Scale = 73 μm/px**

**10000 fps**

**Side view**

**Wind speed**

**$U_{10}$=27.8 m/s**

**•f = 55 mm**

**Samyang 85 mm f/1.4**

**•Distance = 65 cm**

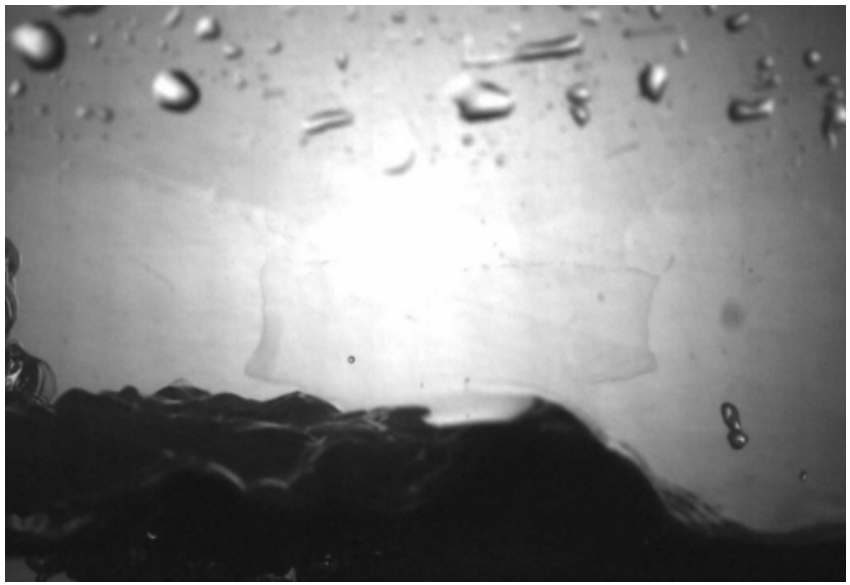
**•Scale = 73 μm/px**

**•2000 fps**

**H. Lhuissier, E. Villermaux, *J. Fluid Mech.* 696, 5–44 (2012).**

# Генерация брызг на гребнях волн (фрагментация типа“парашют”)

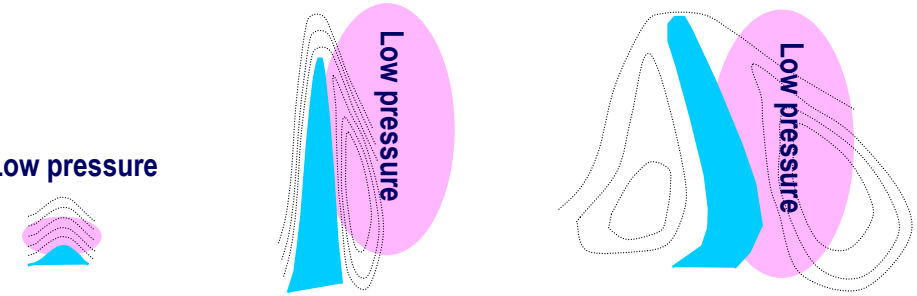
(вид сбоку )



Wind speed
$U_{10}$=27.7 m/s

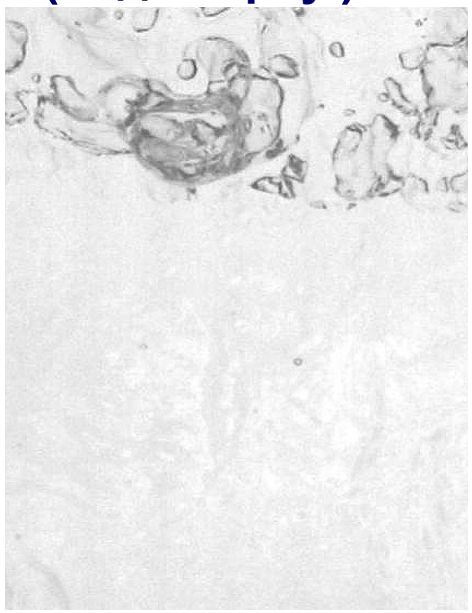
Width 74 mm

f = 85 mm (Samyang 85 mm f/1.4)
Distance = 65 cm
Scale = 73 μm/px
10000 fps




H. Branger, private communication

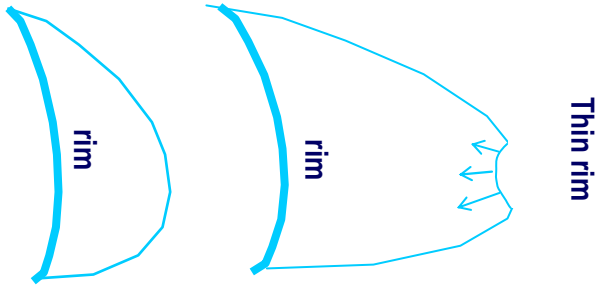
(вид сверху )



Wind speed
$U_{10}$=26.7 m/s

Width 70 mm

f = 85 mm (Samyang 85 mm f/1.4)
Distance = 207 cm
Scale = 256 μm/px
4500 fps

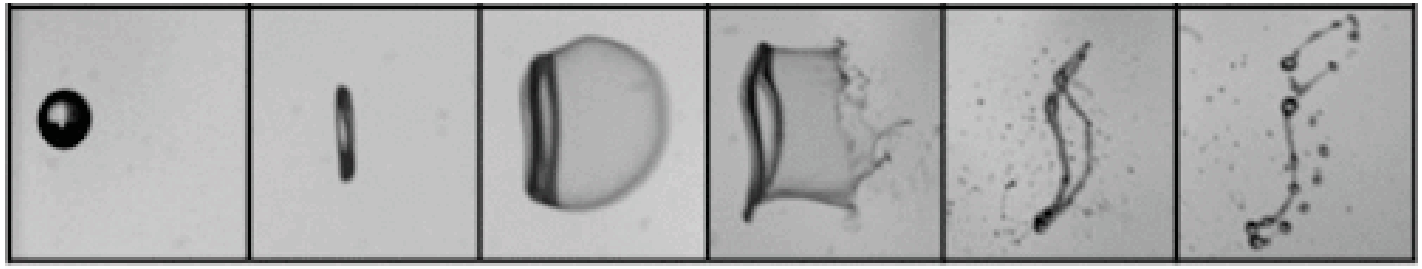



F. Veron, etal, 2012

# Фрагментация типа“парашют” (средние значения числа $We = \frac{\rho_a U^2 R}{\sigma}$)

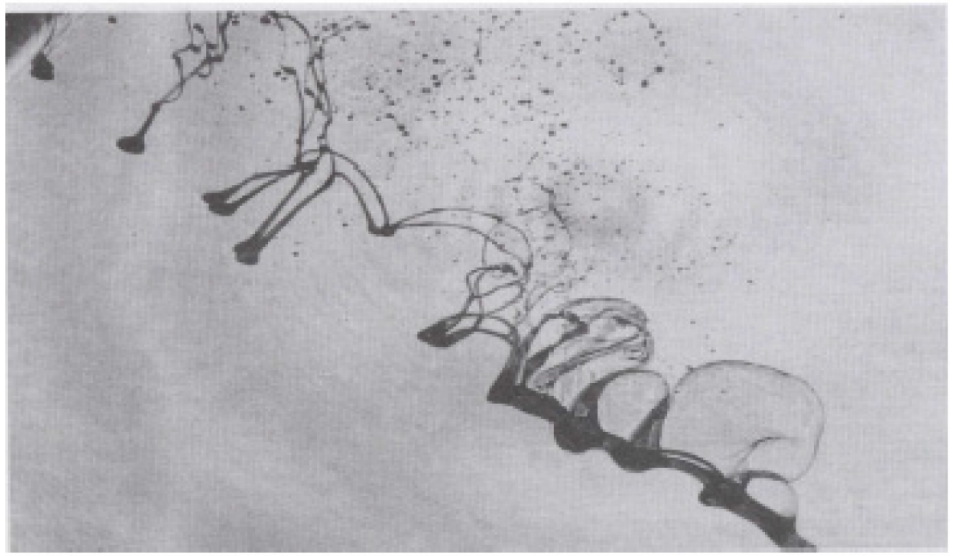
## Фрагментация капли типа“парашют”

V. Kulkarni and P. Sojka Phys. Fluids 26, 072103 (2014)



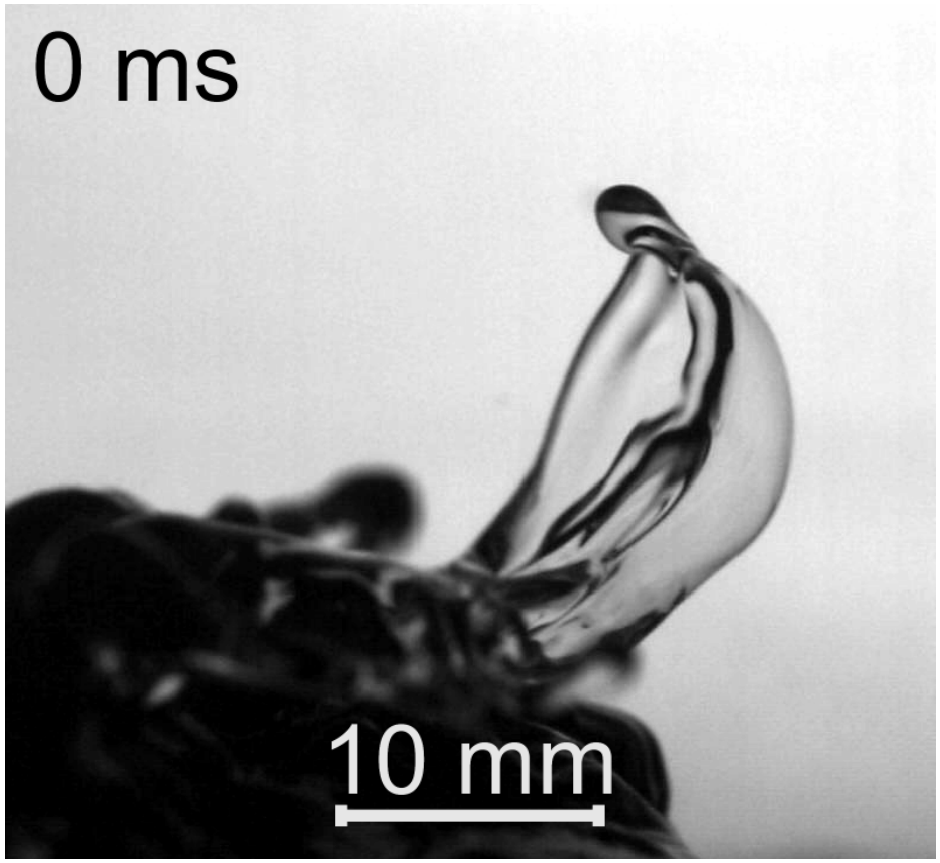

## Фрагментация типа“парашют” струи жидкости в скрещенном потоке газа

Ashgriz, N. Atomization of a liquid jet in a crossflow. In Proceedings of the 4th International Meeting of Advances in Thermofluids, Melaka, Malaysia, 3–4 October 2011.



# Фрагментация типа“парашют”

(вид сбоку)




10 mm

**Wind speed**
**$U_{10}$=27.8 m/s**

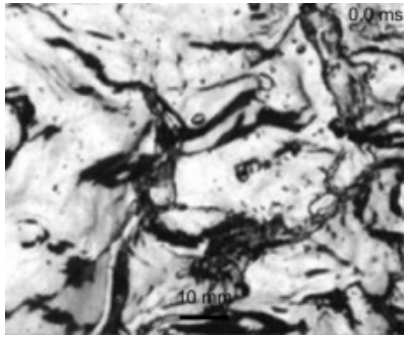
- **f = 55 mm**

**Samyang 85 mm f/1.4**

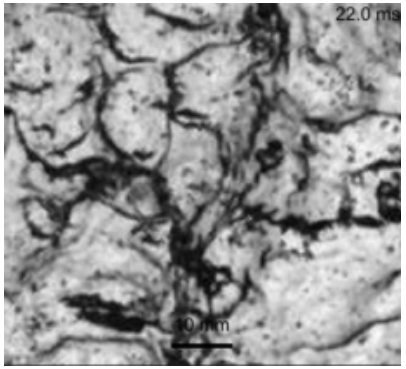
- **Distance = 65 cm**
- **Scale = 73 μm/px**
- **2000 fps**

**SUSTAIN,** The Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science
(Miami, FL, USA, videos by Jan Bug)

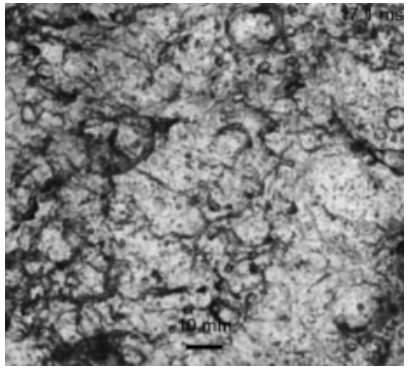
**30 m/s**



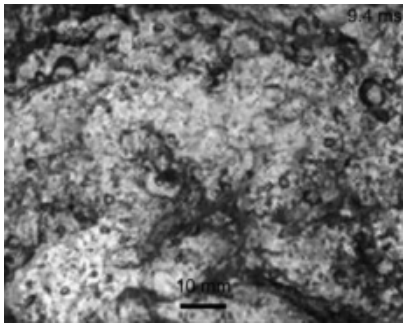

**36.5 m/s**

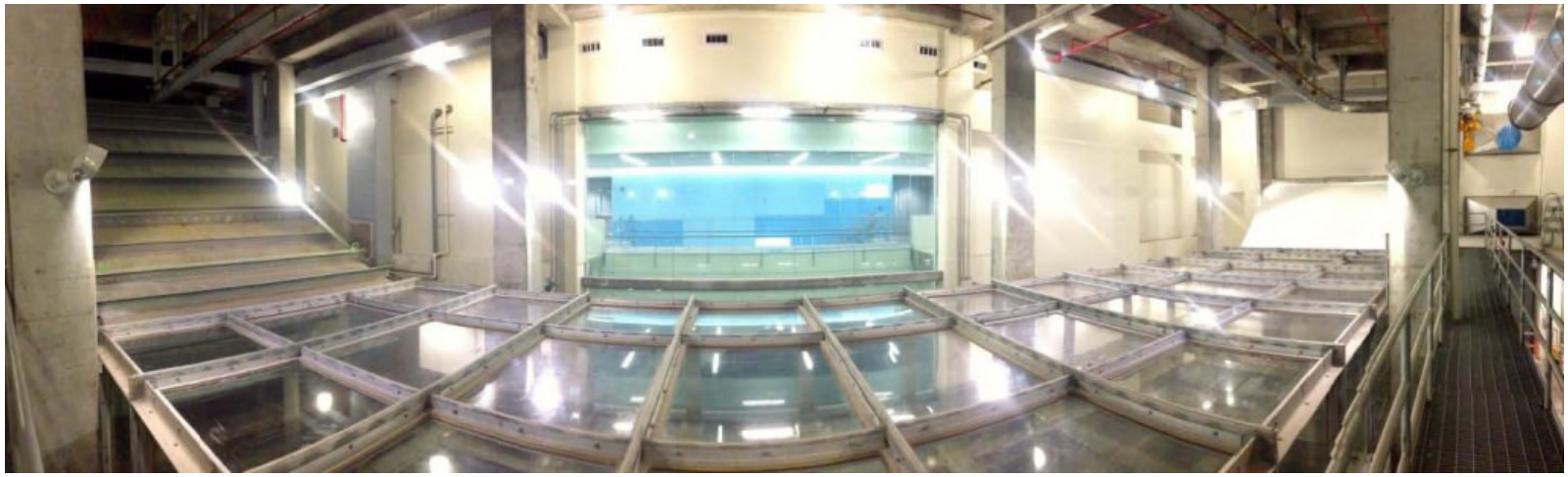



**49.5 m/s**



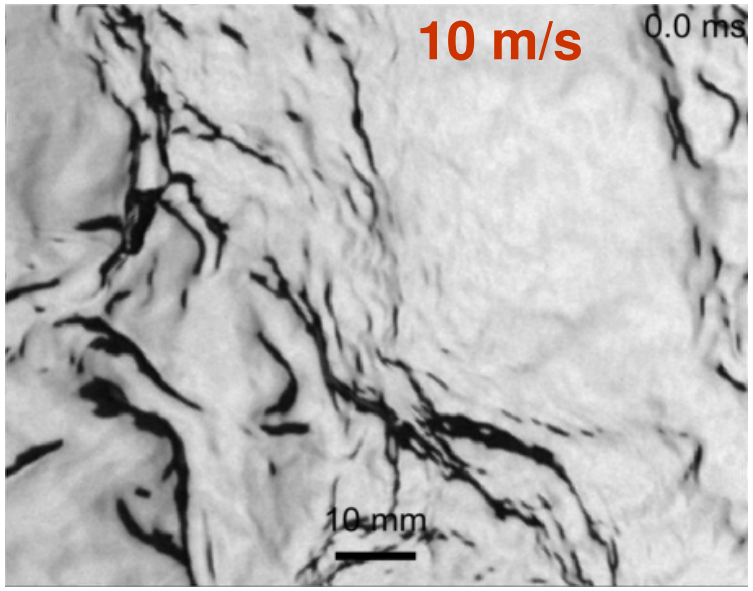

**56.3 m/s**

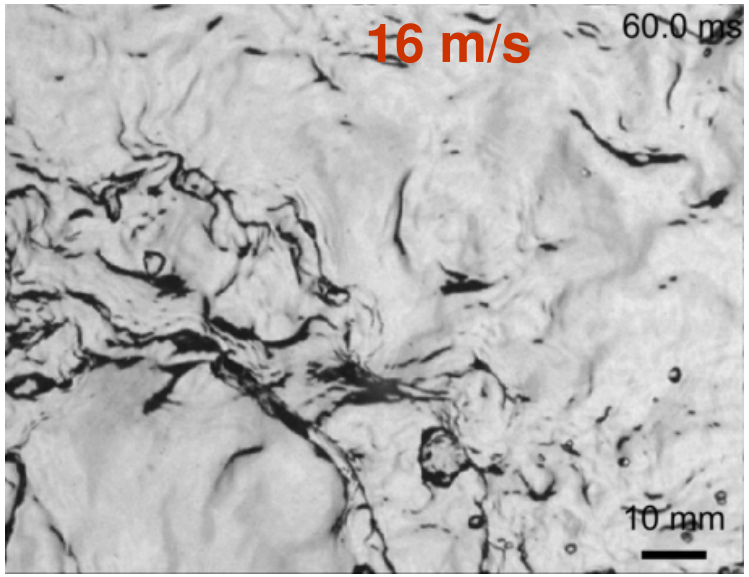


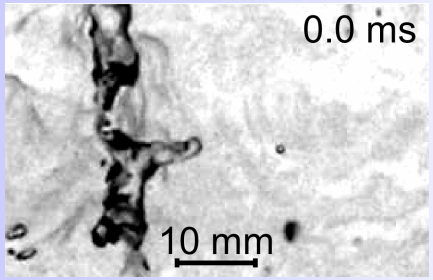
# Aeolotron: The Heidelberg wind/wave facility

## Bag-breakup



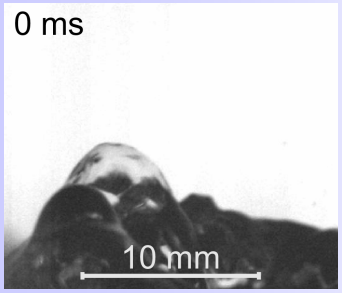
# Механизмы генерации брызг




## Жидкие нити (вид сверху)

**Wind speed**
**$U_{10}$=25.9 m/s**

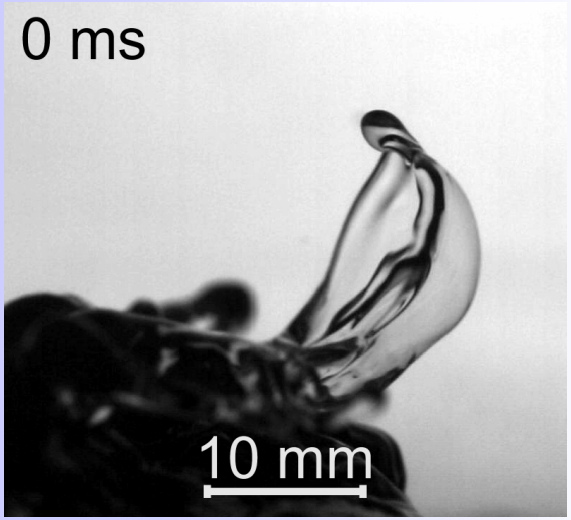
f = 85 mm
Samyang 85 mm f/1.4
Distance = 65 cm
Scale = 73 μm/px
10000 fps




## Подводные пузыри (вид сбоку)

**Wind speed**
**$U_{10}$=27.8 m/s**

•f = 55 mm
Samyang 85 mm f/1.4
•Distance = 65 cm
•Scale = 73 μm/px
•2000 fps

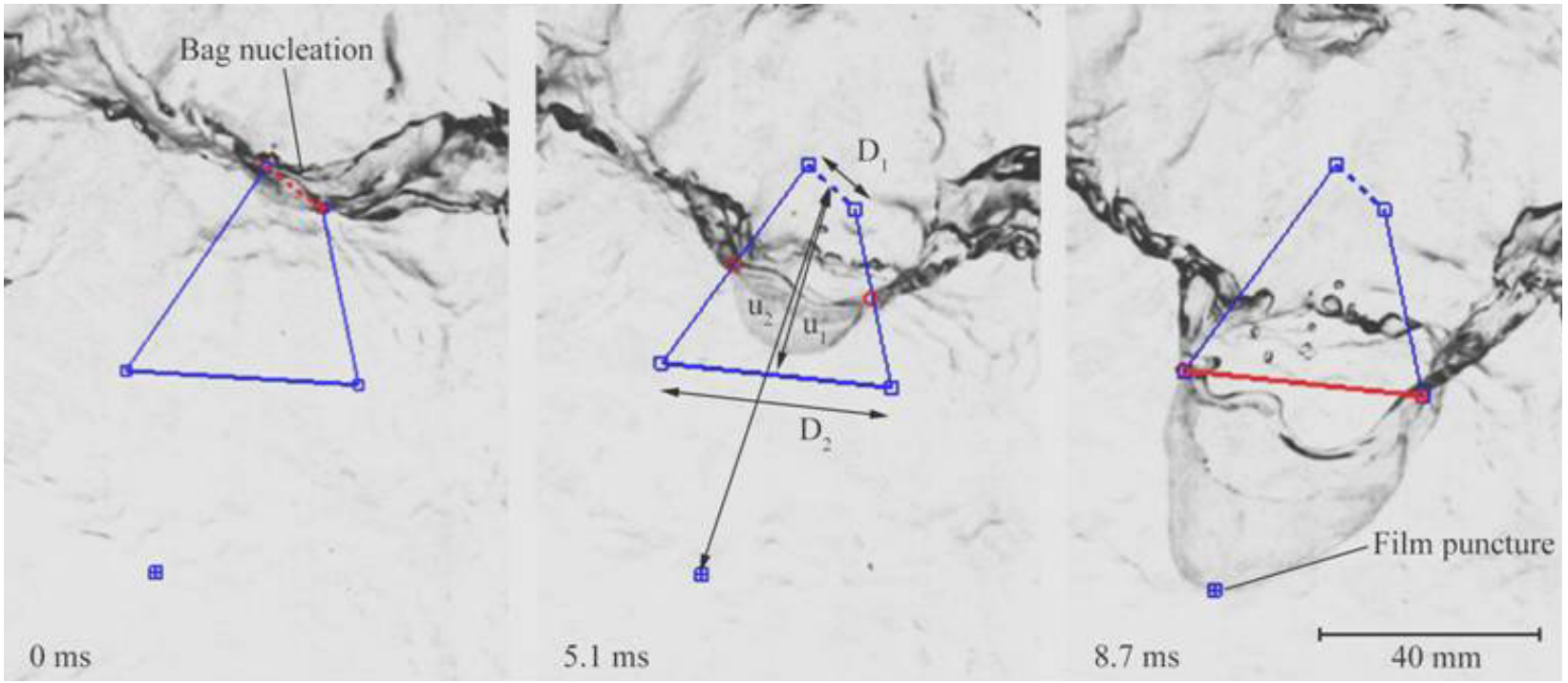



## Фрагментация типа“парашют”(вид сбоку)

**Wind speed**
**$U_{10}$=27.8 m/s**

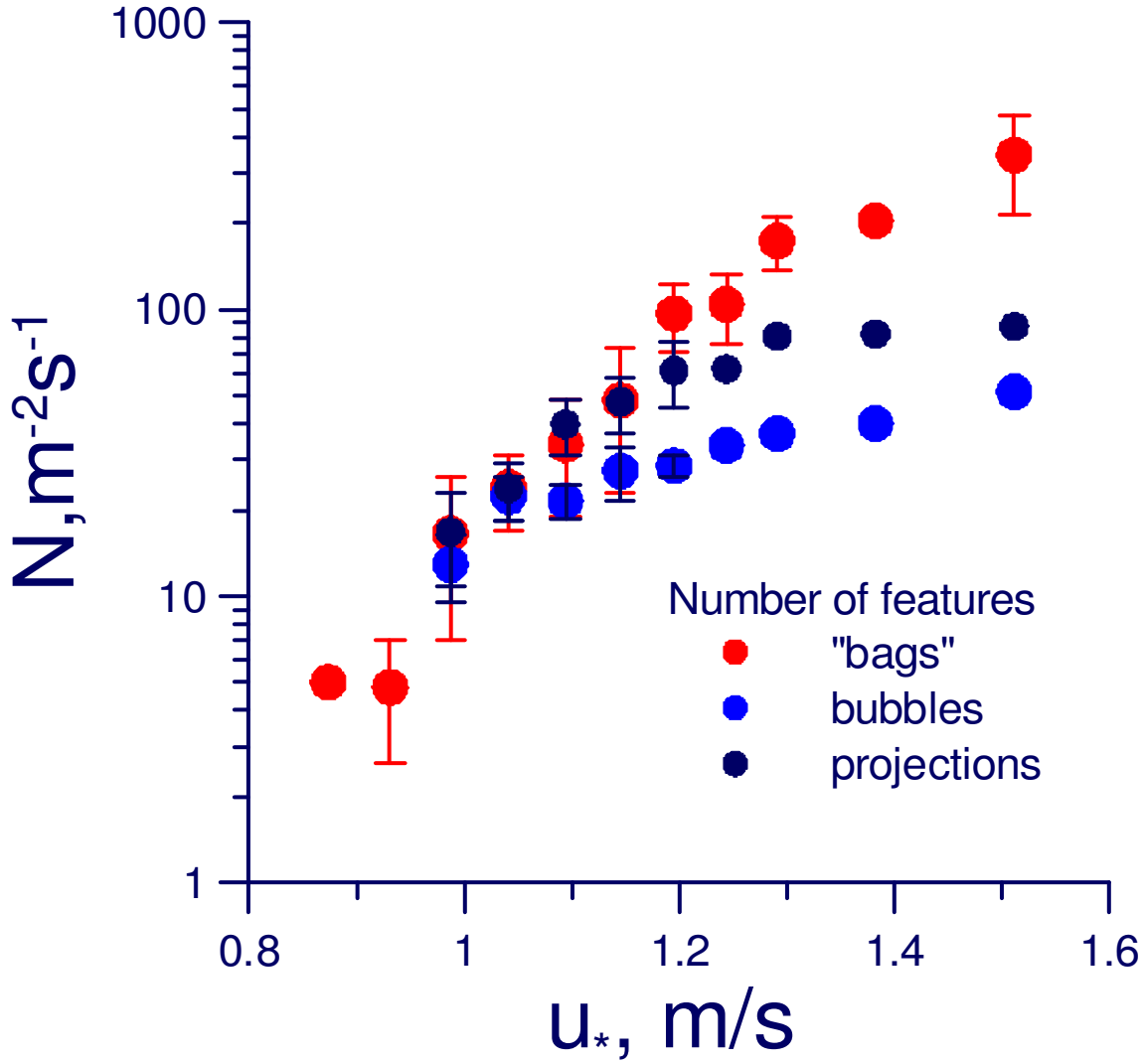
•f = 55 mm
Samyang 85 mm f/1.4
•Distance = 65 cm
•Scale = 73 μm/px
•2000 fps

## Semi-automatic processing of images

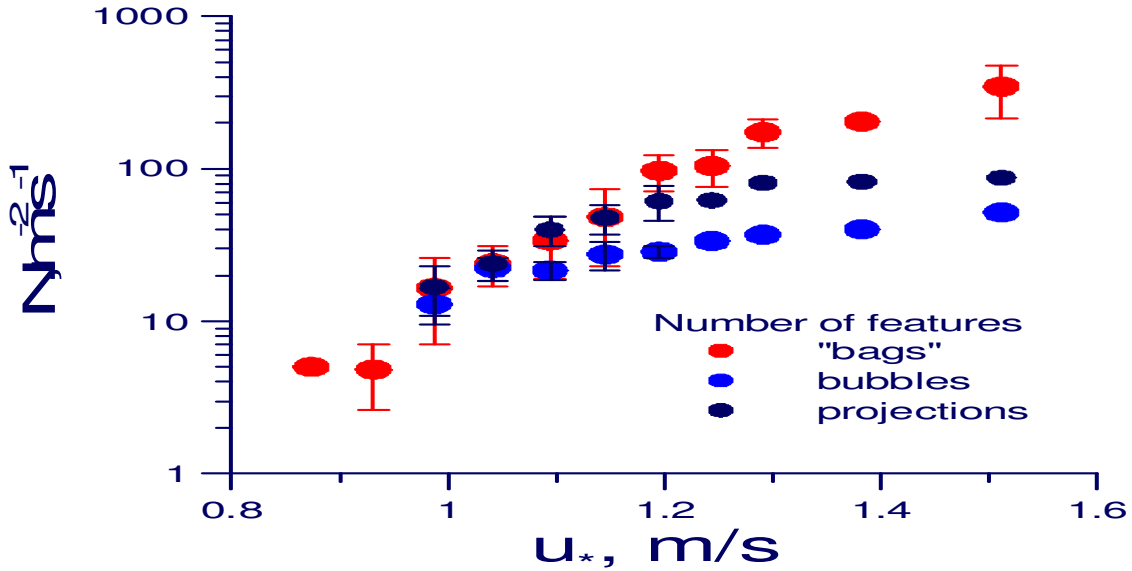



Statistics: about 70 video containing about 33000 frames each

## Число разных явлений приводящих к генерации брызг, срываемых с гребней волн в зависимости от скорости ветра



## Число разных явлений приводящих к генерации брызг, срываемых с гребней волн в зависимости от скорости ветра



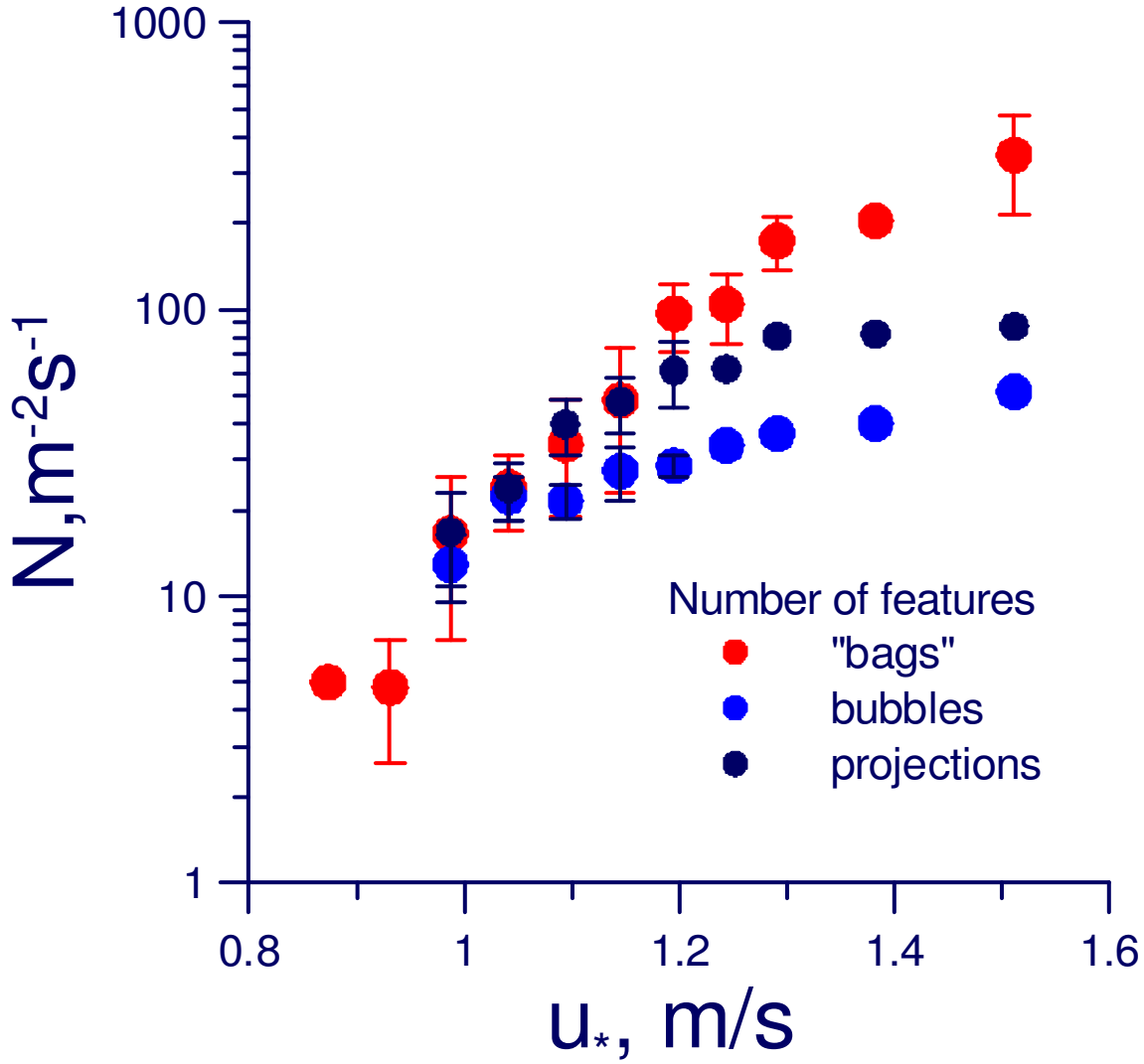

### Динамическая скорость ветра

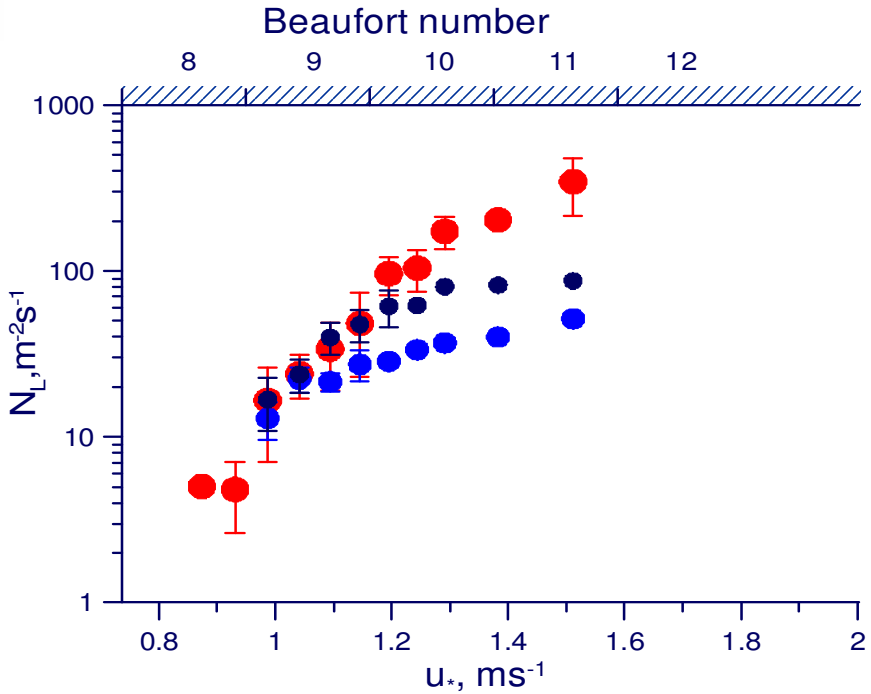
$F_M = \rho_a u_*^2$ - касательное турбулентное напряжение

$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$ - средняя скорость в турбулентном пограничном слое

$C_{D10} = \frac{F_M}{\rho_a \left(U(10\text{m})\right)^2}$ - коэффициент аэродинамического сопротивления, эмпирическая функция от скорости ветра

## Число разных явлений приводящих к генерации брызг, срываемых с гребней волн в зависимости от скорости ветра



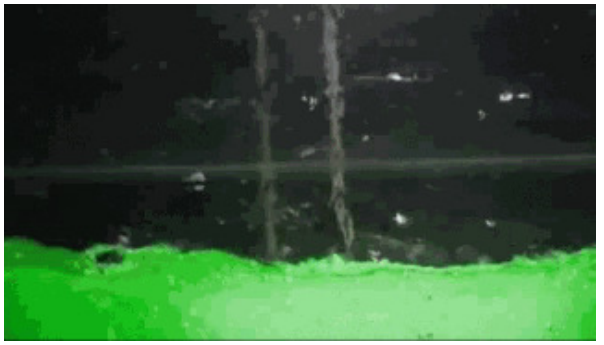



**Активация режима фрагментации типа «парашют» $u_*$ приблизительно соответствует силе ветра 20 м/с (8 баллов по шкале Бофорта).**

**Шкала Бофорта по явлениям на поверхности моря для силы ветра в 8 баллов "***Moderately high waves with breaking crests forming* ***spindrift".***

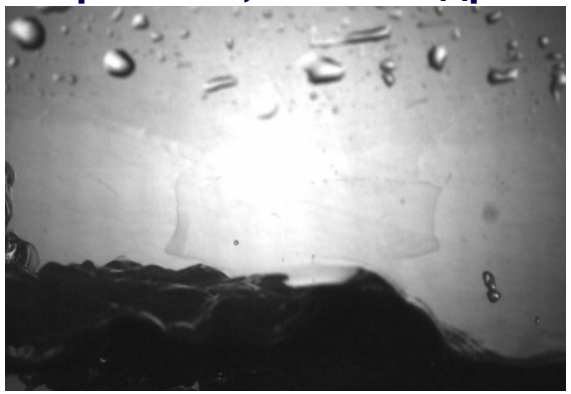
**spindrift** —► spray blown from the crests of waves by the wind

**"Spindrift", 25 fps**



**Гребень волны, 2000 кадров**

**«Парашют», 10000 кадров**



# «Термодинамический» подход для описания статистики числа “bags”

Рассмотрим гребни волн, которые потенциально могут быть преобразованы в bags (а затем в брызги), как "подсистемы" в равновесии с «термостатом» - приводным пограничным слоем атмосферы. Тогда статистическое распределение энергетических состояний этой подсистемы определяется уравнением Гиббса или каноническим распределением

$$dW = \alpha e^{-\frac{E}{\beta}} dE$$

$\alpha$ и $\beta$ - функции разгона и скорости трения ветра

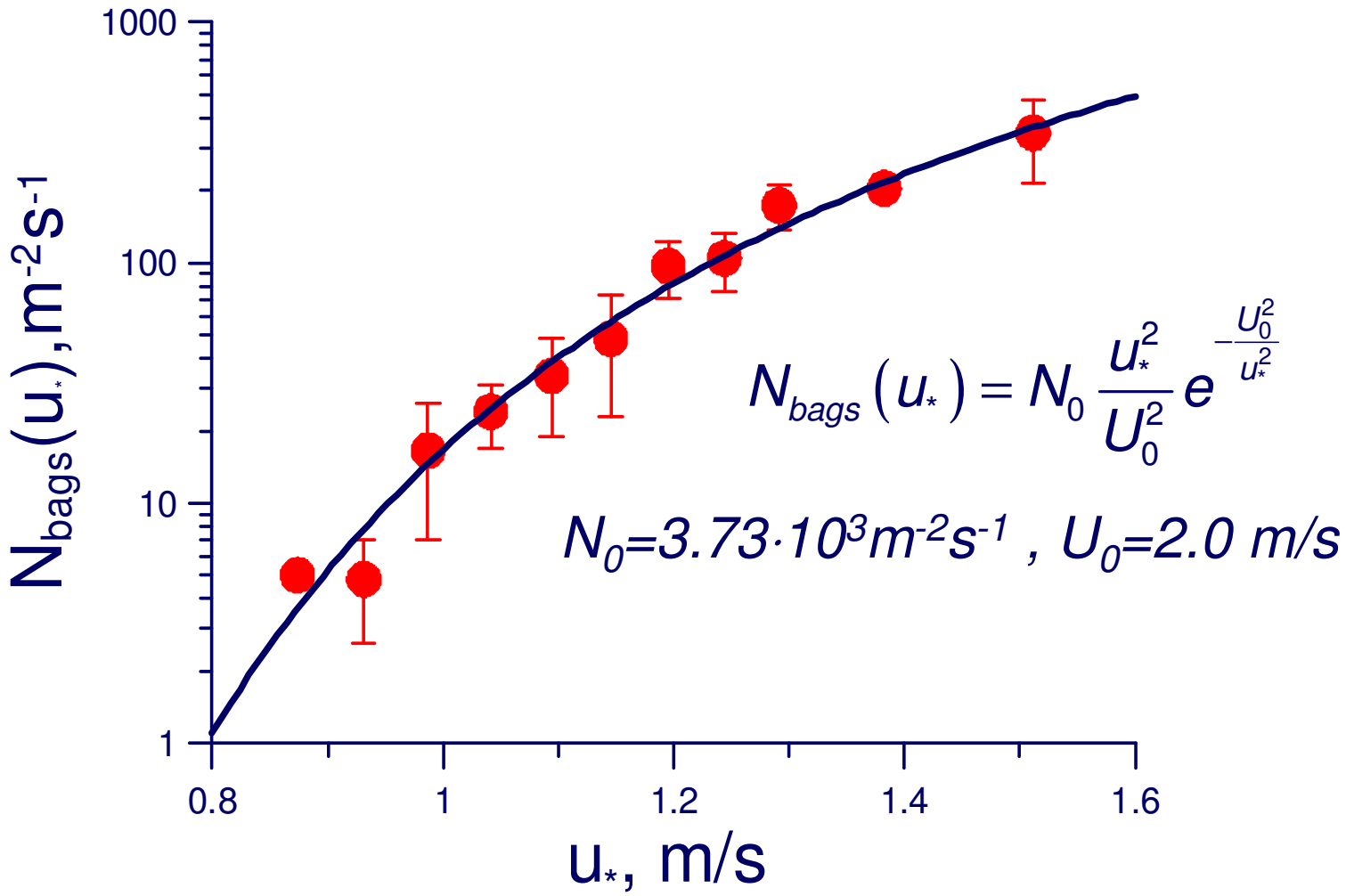
По аналогии с термодинамикой $\beta \sim u_*^2$

( Гипотеза Буссинеска: турбулентные пульсации скорости аналогичны тепловому движению молекул )

Очевидно, что режим ”bags” требует некоторой конечной минимальной энергии для активации. Поэтому их полное число будет пропорционально вероятности того, что плотность энергии подсистемы превышает это минимальное значение, которое обозначим $U_0^2$

$$N_{bags}(u_*) = \int_{U_0^2}^{\infty} A e^{-\frac{E}{u_*^2}} dE = A u_*^2 \exp\left(-\frac{U_0^2}{u_*^2}\right)$$

## Число “парашютов” в единицу времени на единицу площади



# Перенос на натурные условия

**Toba, Koga (1986)**

**The windsea Reynolds number**

$$Re_B = \frac{u_*^2}{\omega_p \nu} = \frac{U_{10}^3 C_D}{g\nu\Omega}$$

**Параметр возраста волнения**

$$\Omega = \frac{U_{10}}{c_p}$$

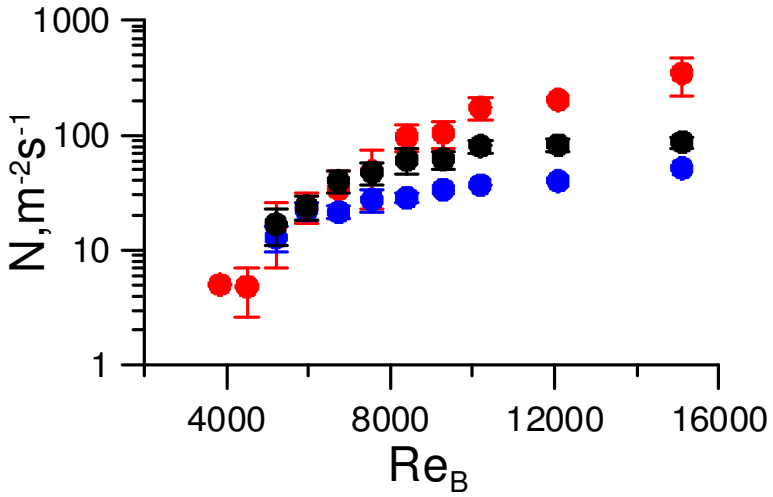
**В натурных условиях**

**Ω=1-3**

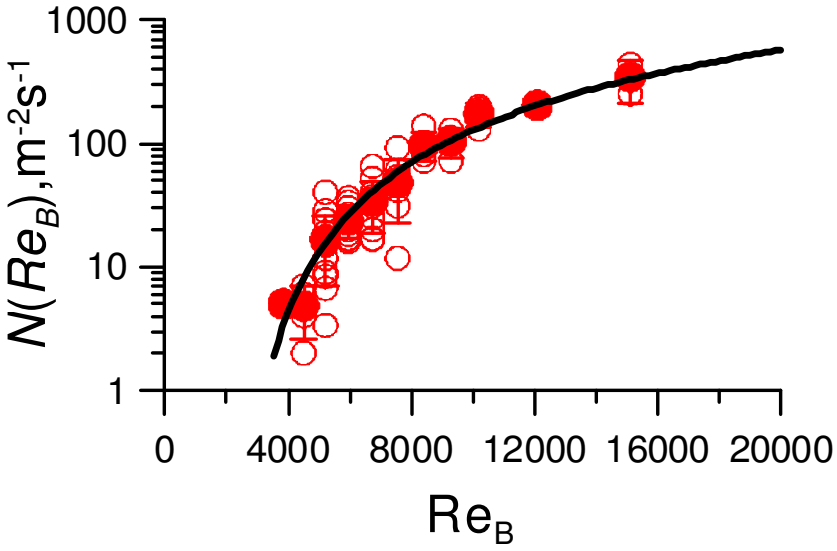
**В лабораторных условиях**

**Ω=20-30**

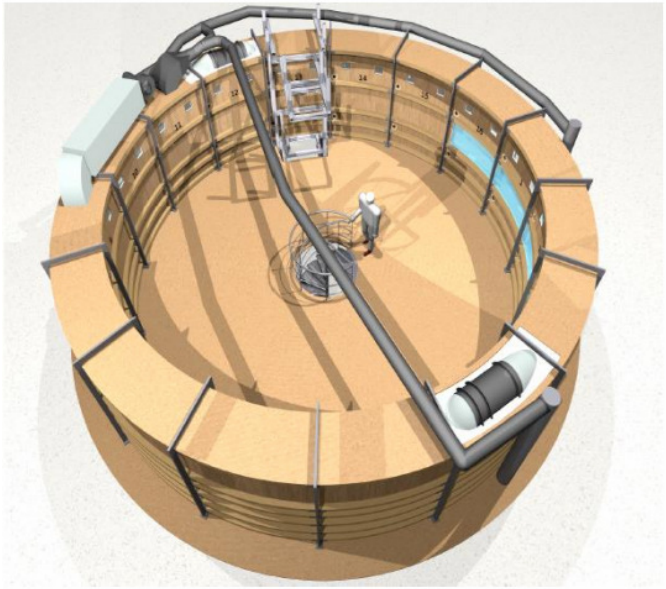
**Число разных явлений приводящих к генерации брызг, срываемых с гребней волн в зависимости от $Re_B$**




**Число "парашютов" в единицу времени на единицу площади**



# Исследование генерации брызг при длинных разгонах

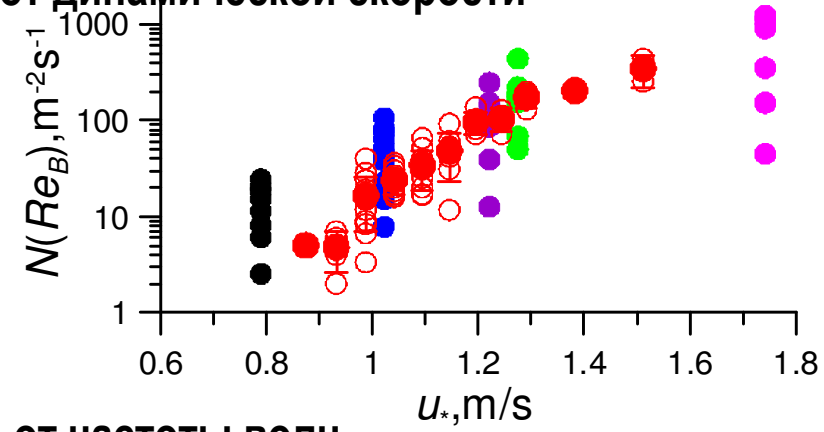


Исследования проводились на кольцевом ветро-волновом канале Аэолотрон в Университете Гейдельберга, Германия
60 cm width,
2.4 m height,
circumference of 27.3 m at the inner wall, water depth during experiments 1.0 m,
water volume 18.0 $m^3$,
air space volume 24 $m^3$

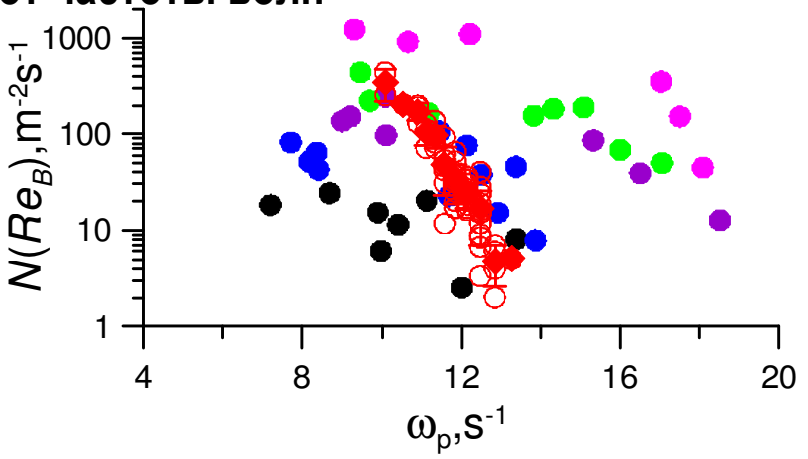
# Исследование генерации брызг при длинных разгонах

## Зависимость числа возникающих «парашютов»(на единицу площади за единицу времени)

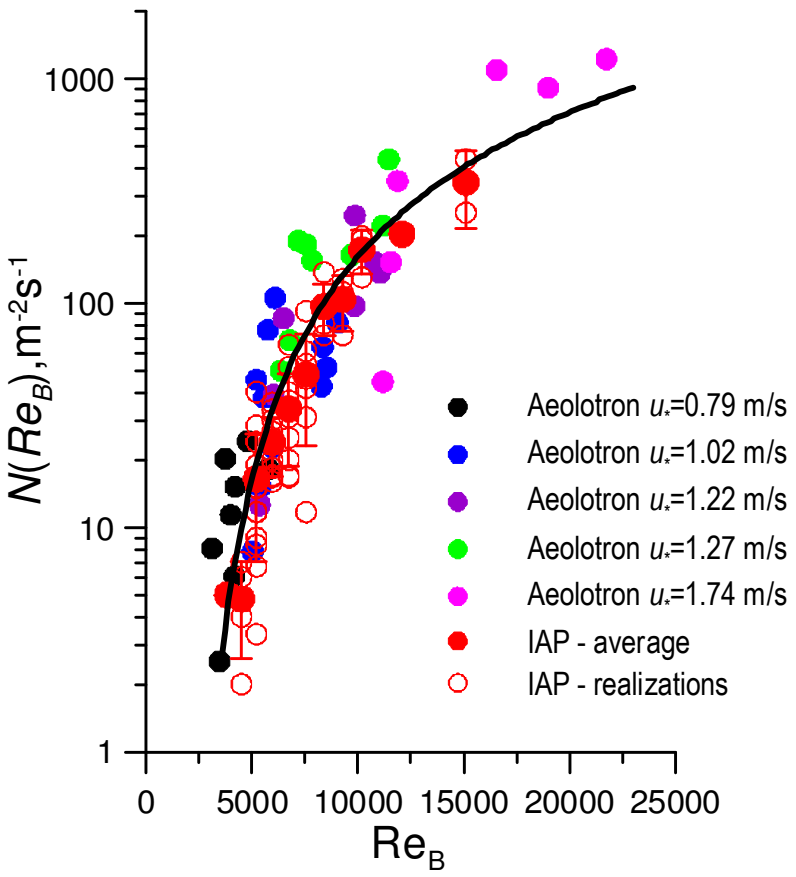
**от динамической скорости**




**от частоты волн**



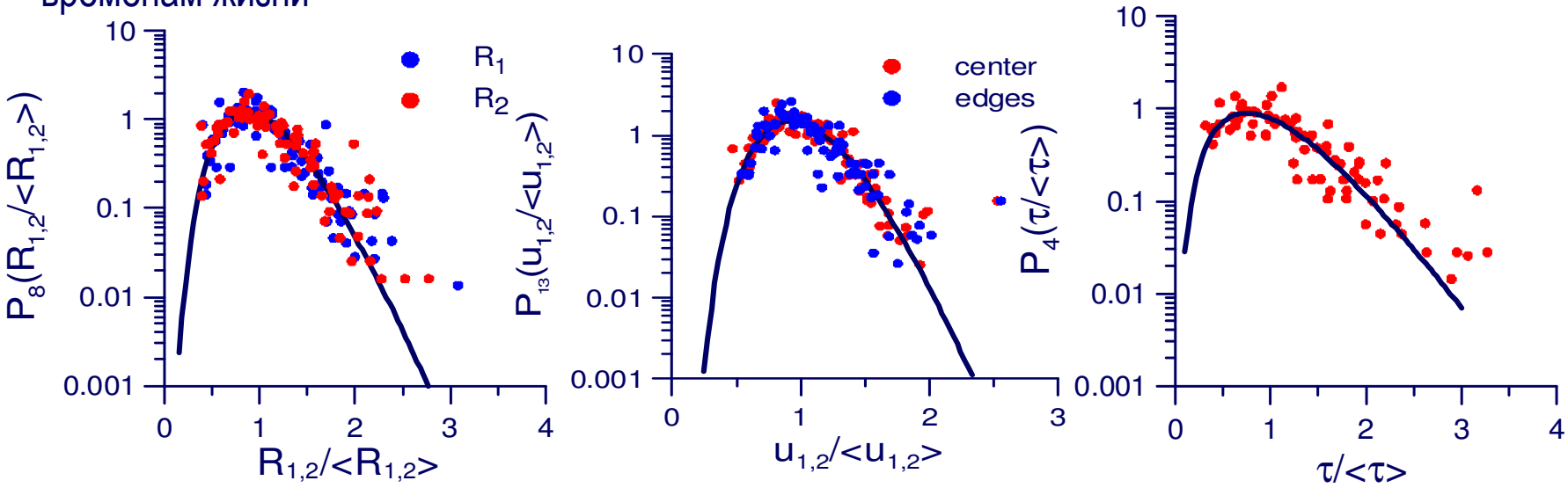

**от windsea Reynolds number**



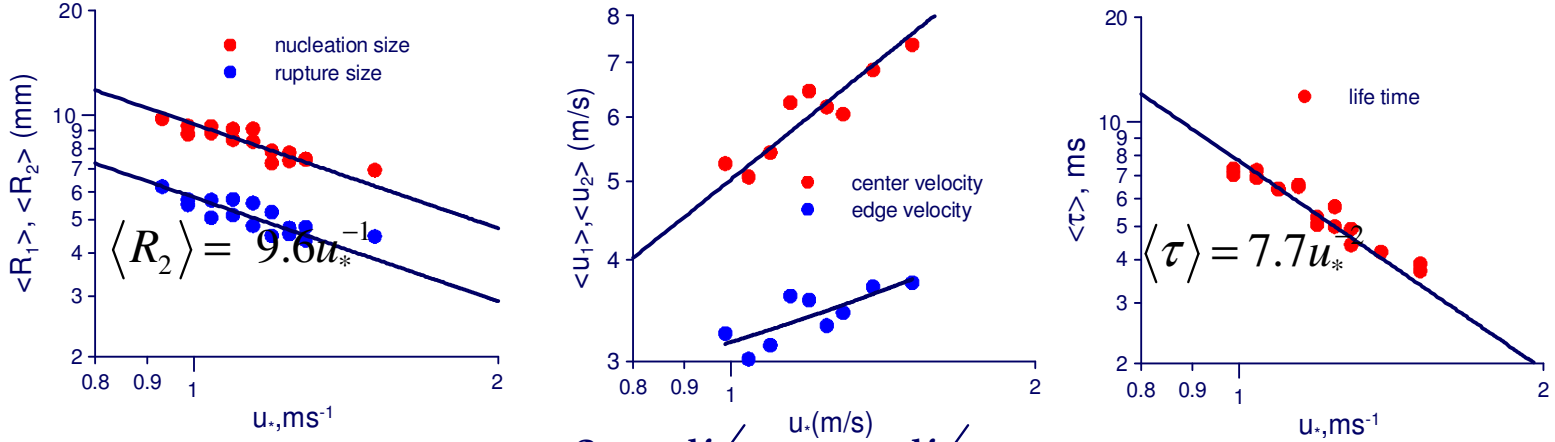

$$N = 2.58 \cdot 10^{-4}\, Re_B^{3/2}\, exp\left(-\frac{6.93 \cdot 10^5}{Re_B^{3/2}}\right)$$

Функции распределения “парашютов” по размерам, скоростям и временам жизни

$$P_n(x) = \frac{n^n}{(n-1)!} x^{n-1} e^{-nx}$$




Средний размер “парашютов”, их скорость и время жизни от скорости трения ветра



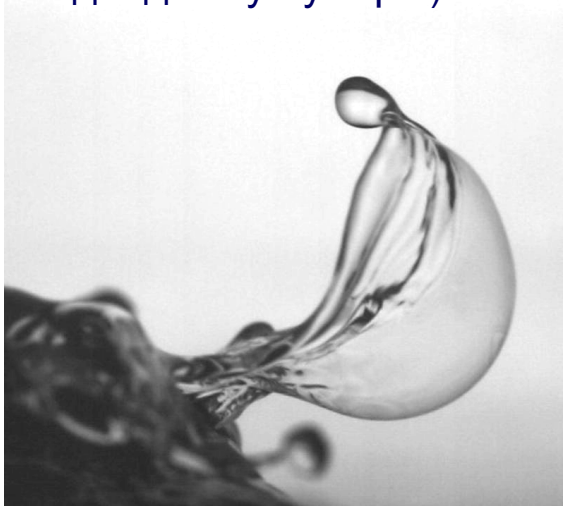

Масштабы “парашютов” $\delta_{vis} \sim \nu / u_*$; $\tau_{vis} \sim \nu / u_*^2$ определяются вязкостью

**Функция генерации брызг – свертка функции генерации “парашютов” и функции распределения брызг от одного “парашюта”**

$$\frac{dF(r)}{dr} = \frac{N_{bags}(u_*)}{\langle R \rangle (u_*)} \int P_8\left(\frac{R}{\langle R \rangle (u_*)}\right) F_{drops}(r,R)\, dR$$

**Генерация капель от “парашютов” за счет двух механизмов**

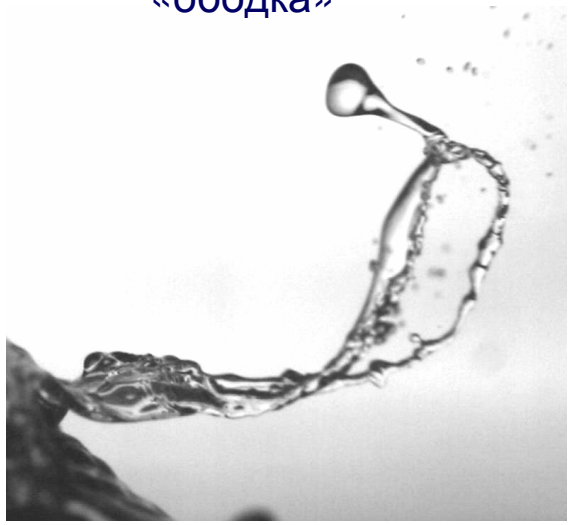
1. Разрыв мембраны (аналогично подводному пузырю)



**“Film droplets”**

**r~100 μm**

2. Фрагментация «ободка»



**“Rim droplets”**

**A “hallmark” of bag-breakup**

**r~1000 μm**

$$F_{drops}(r,R) = F_{film}(r,R) + F_{rim}(r,R)$$

## Разрыв мембраны (аналогично подводному пузырю)

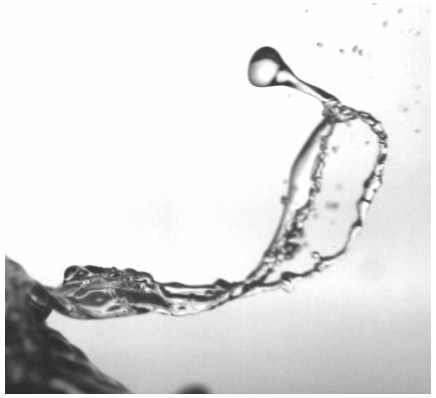
H. Lhuissier and E. Villermaux Bursting bubble aerosols J. Fluid Mech., V. 696, 2012, p. 5-44

$$F_{film}(r,R) = \frac{N_{\substack{film \\ drops}}(R)}{\langle r \rangle (R)} P_{11}\left(\frac{r}{\langle r \rangle (R)}\right)$$

$$\langle r \rangle (R) \sim R^{4/3}$$

$$N_{\substack{film \\ drops}}(R) \sim R^{4/3}$$

## Фрагментация «ободка»



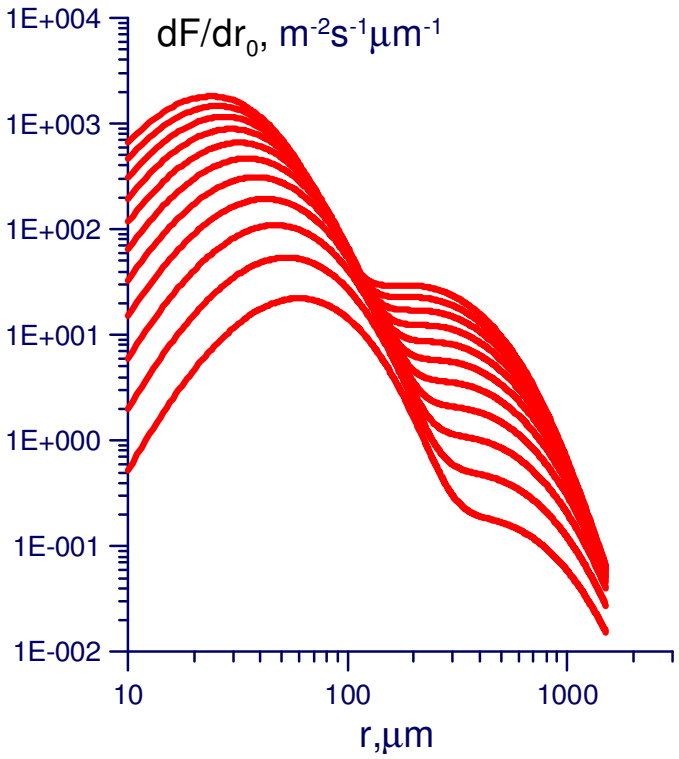
Используются данные о фрагментации «ободка» при распаде капли в газовом потоке.
Chou WH, Faeth GM (1998) Temporal properties of secondary drop breakup in the bag breakup regime. Int J Multiphase Flow, 24:889–912
И распределение капель при распаде жидкой нити
*VILLERMAUX, E., MARMOTTANT, P. & DUPLAT, J. 2004 Ligament-mediated spray formation. Phys. Rev. Lett. 92 (7)*

$$F_{rim}(r,R) = \frac{N_{\substack{rim \\ drops}}}{\varepsilon R} P_4\left(\frac{r}{\varepsilon R}\right) \qquad N_{\substack{rim \\ drops}} = 8.3 \qquad \varepsilon = 0.12$$

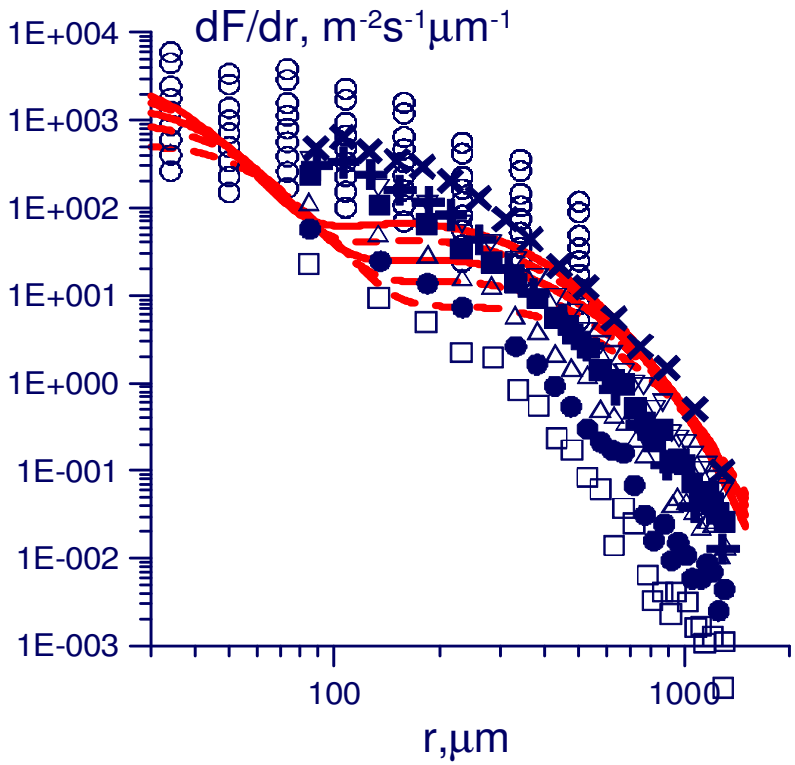
Функции генерации брызг через фрагментацию типа “парашют” при скорости трения ветра u* от 1 м/с до 2 м/с через 0.1 м/с.

$$\frac{dF(r,u_*)}{dr} = N\left( A_1 \left(\frac{r}{\theta}\right)^{7.3} e^{-5.2\sinh\left(\frac{3}{7}\ln\frac{r}{\theta}\right)} + A_2 \left(\frac{r}{\Theta}\right)^{4.5} e^{-3.94\sinh\left(\frac{1}{2}\ln\frac{r}{\Theta}\right)} \right).$$

**SGF, $u_*$=1-2 m/s**




Сравнение модели с лабораторными экспериментами



# Сравнение модели с натурными экспериментами

Zhao et.al. (2006): $R_{WS} = \frac{u_*^2}{\nu \omega_p}$ $\frac{dF(r,u_*)}{dr} \sim Re_{WS}^{1.5}$

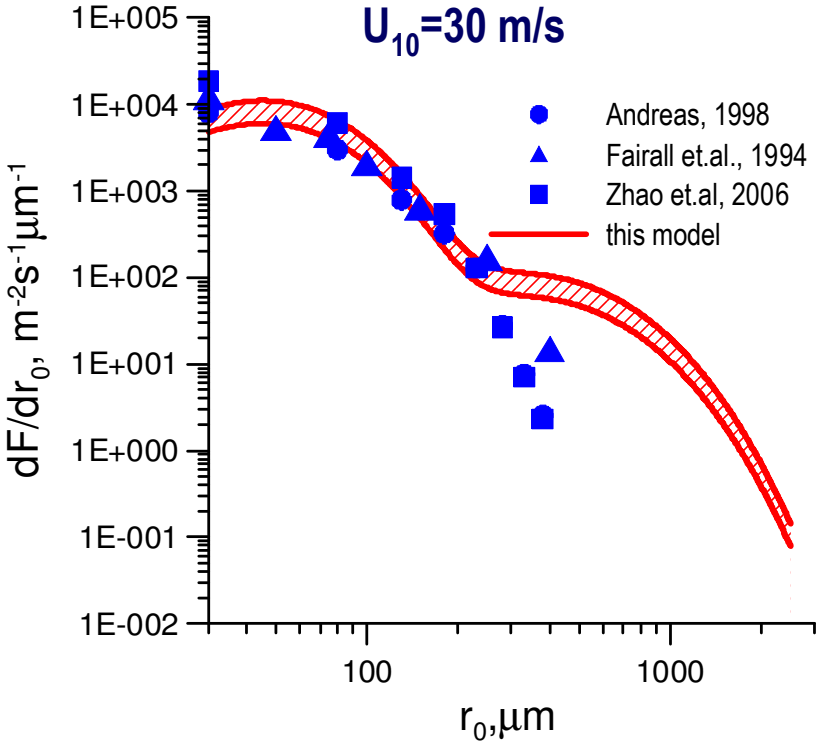
$\omega_{p-lab} = 12.4 u_*^{-0.5}$

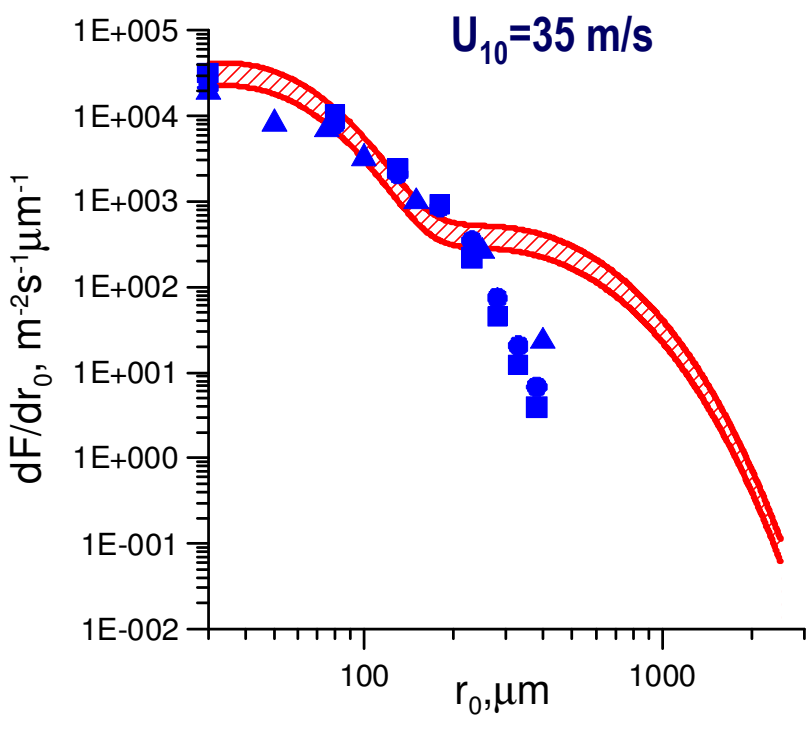
$\omega_{p-field} = g\Omega / U_{10} = g\Omega \sqrt{C_D} / u_*$

$\Omega = U_{10} / c_p$

$$\frac{dF_{Field}(r,u_*)}{dr} = \frac{dF_{Lab}(r,u_*)}{dr} \left( \frac{12.4 u_*^{0.5}}{g\Omega\sqrt{C_D}} \right)^{1.5}$$

$\Omega$=2.5-3.5 (data by Wright, etal., 2001)



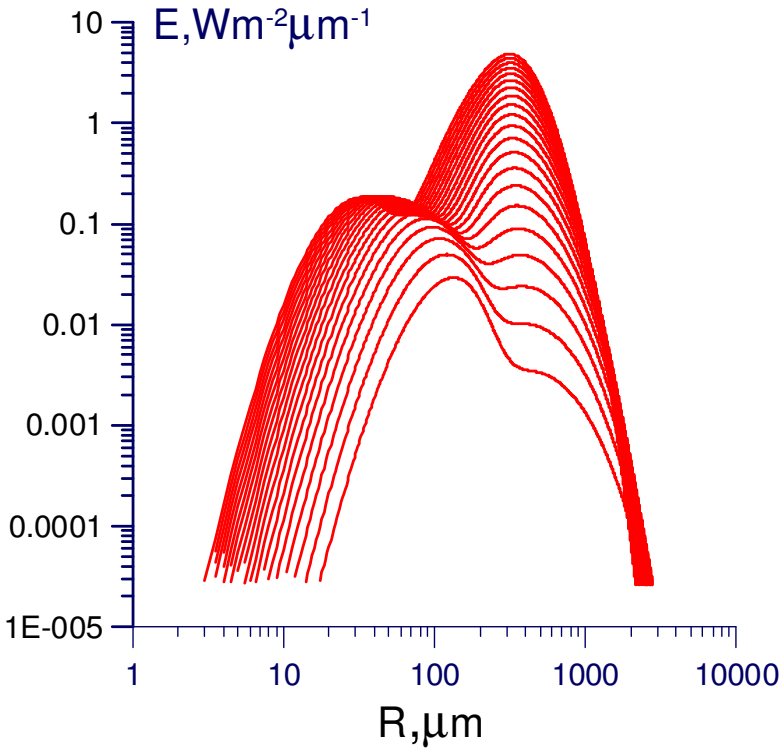
# Влияние фрагментации типа“парашют” на поток энтальпии влажного воздуха

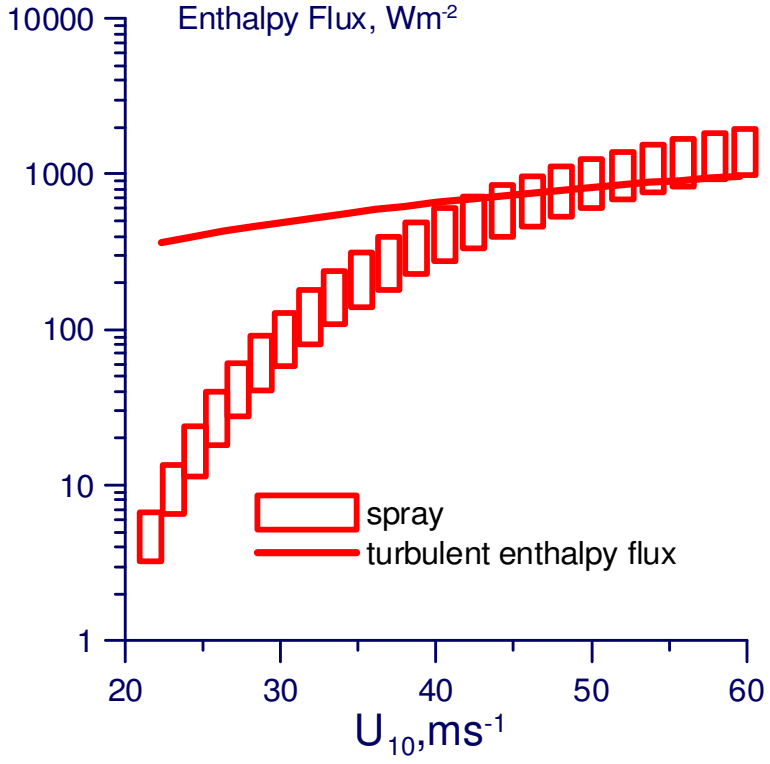
**Поток энтальпии влажного воздуха равен потоку явного тепла за счет разности между температурами поверхности воды и возвращающихся «капель»**

$$F_{QSpray} = \rho_w \int_0^{\infty} \frac{dF(r,u_*)}{dr} \frac{4\pi r^3}{3} Q_K dr \qquad Q_k = C_w m_0 \left(T_w - T(\tau_f)\right)$$

Вклад капель в поток энтальпии влажного воздуха

$\Omega$=2.5-3.5



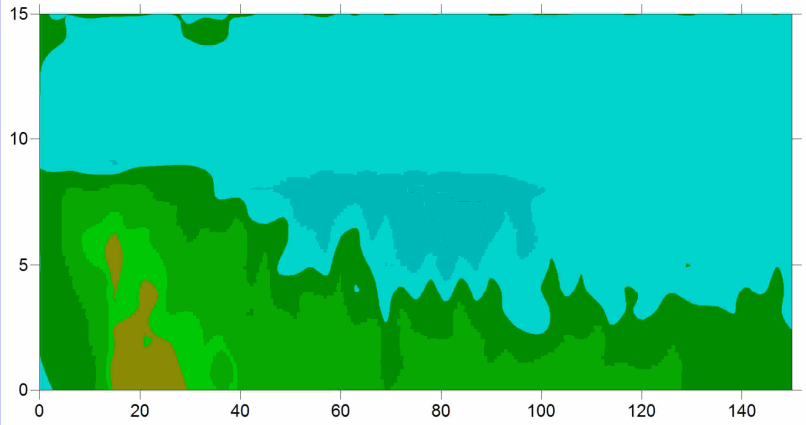
# Осесимметричная негидростатическая численная модель

## Emanuel and Rotunno (1989)

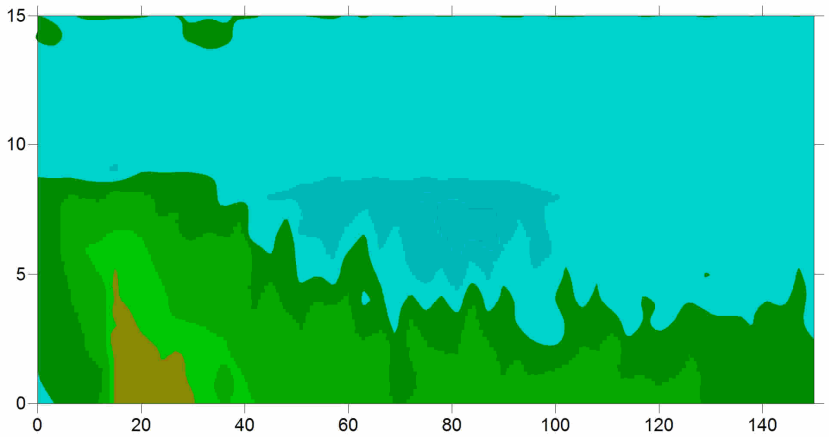
## Азимутальная скорость ветра

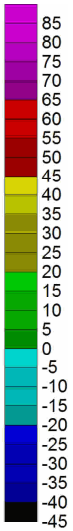
U(m/s)

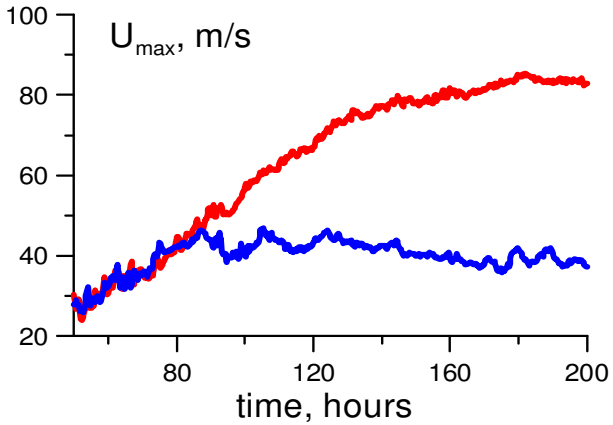
Spray, 50 – 200 hours

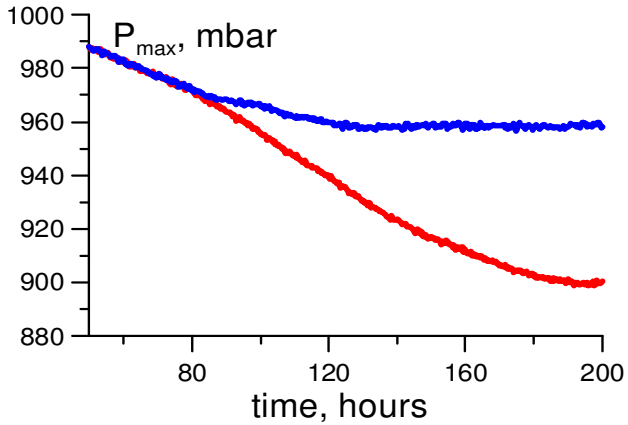



No spray, 50 – 200 hours



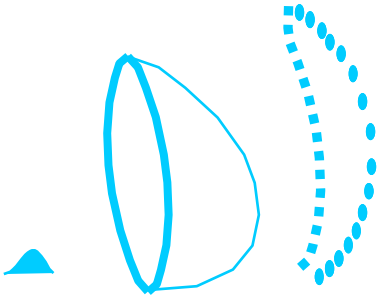



# Влияние фрагментации типа“парашют” на поток импульса (турбулентное напряжение)

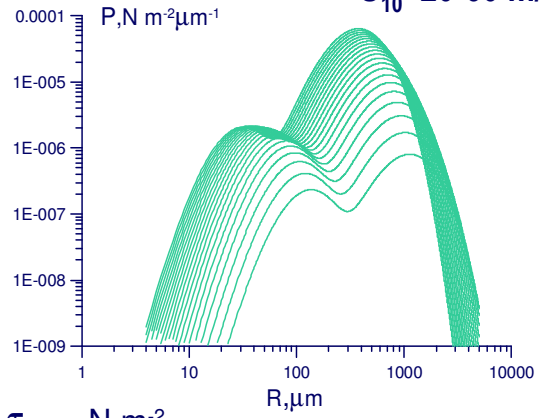
**1. Турбулентное напряжение, определяемое импульсом, который получают капли в процессе генерации**



$$F_{MSpray} = \rho_w \int_0^\infty \frac{dF(r,u_*)}{dr} \frac{4\pi r^3}{3} u_{Spray} dr$$

$$u_{Spray} = \langle u_1 \rangle = 1.21 u_* + 1.96$$

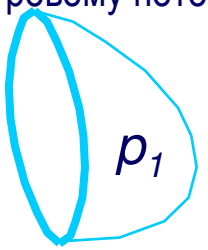
**Contribution of droplets to enthalpy flux, $U_{10}$=20-60 m/s**



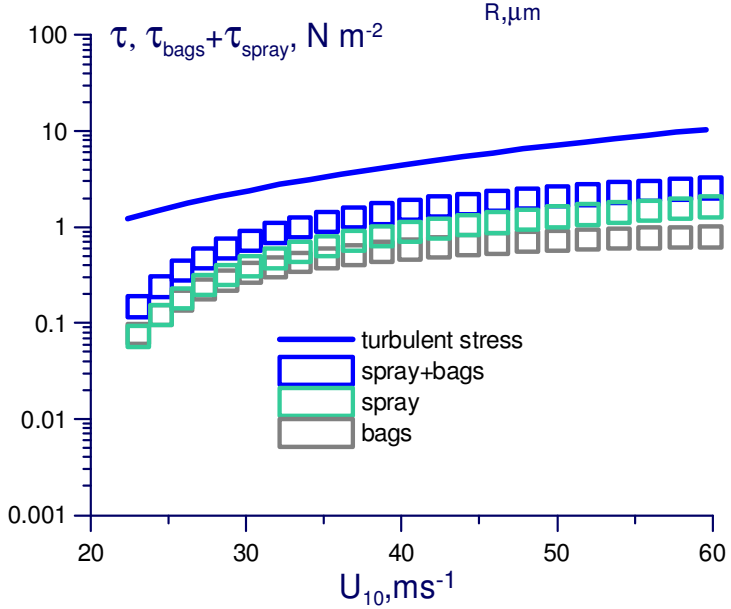

**2. Турбулентное напряжение, определяемое аэродинамическим сопротивлением «парашютов», объектов с размерами прядка 1 см, создающих сопротивление воздушному потоку**

Сила. действующая на «парашют», препятствие ветровому потоку

$$\vec{f}(t) = \iint_S (p_1 - p_2)\vec{n} ds$$




$$(p_1 - p_2)\big|_S = \frac{4\sigma}{R(t)}$$

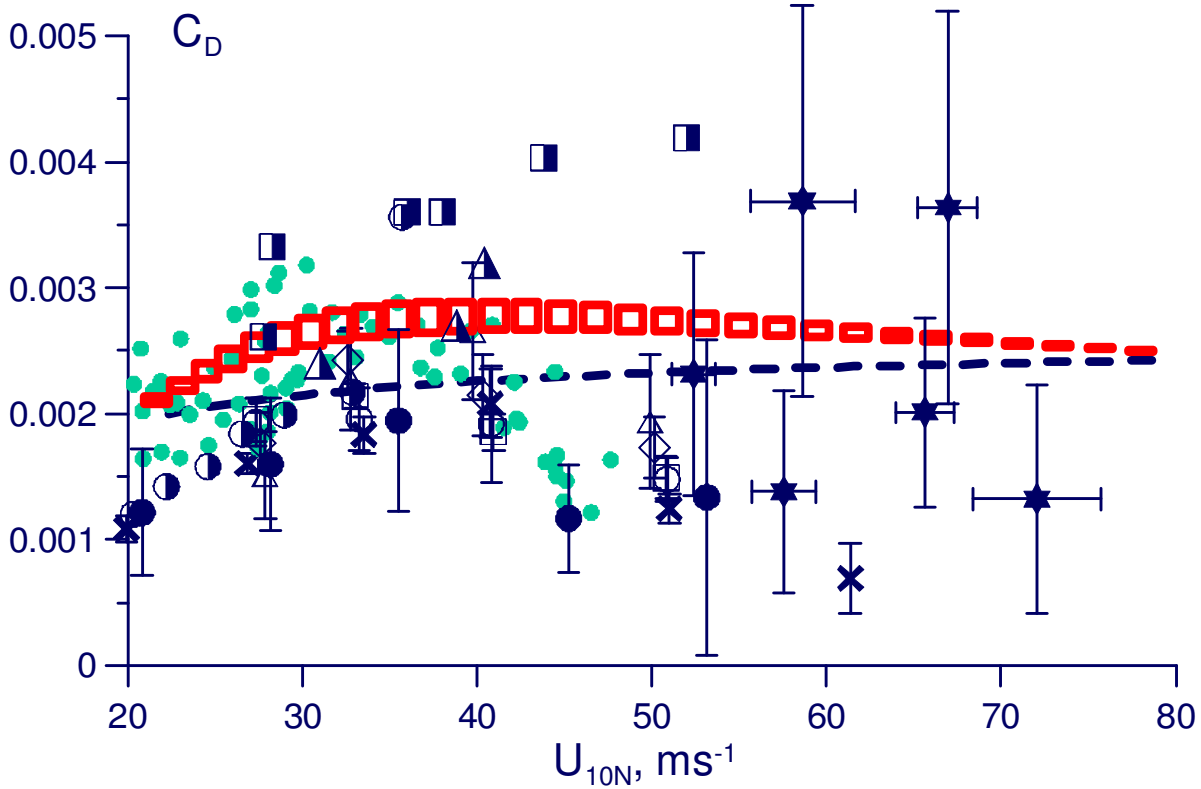



**3. Устойчивая стратификация приводного слоя атмосферы за счет присутствия капель**

## Влияние фрагментации типа“парашют” на поток импульса (турбулентное напряжение)

Зависимость аэродинамического сопротивления поверхности от скорости ветра

$$F_M = F_{Mwaves} + F_{Mbags} + F_{Mspray}; C_{D10} = F_M / \rho_a U_{10}^2$$



# Влияние фрагментации типа“парашют” на поток влаги в атмосферу

$$Q_l(r_0) = \rho_w L_w \left(1 - \left(r(\tau_f)/r_0\right)^3\right)$$ - количество скрытого тепла от одной капли

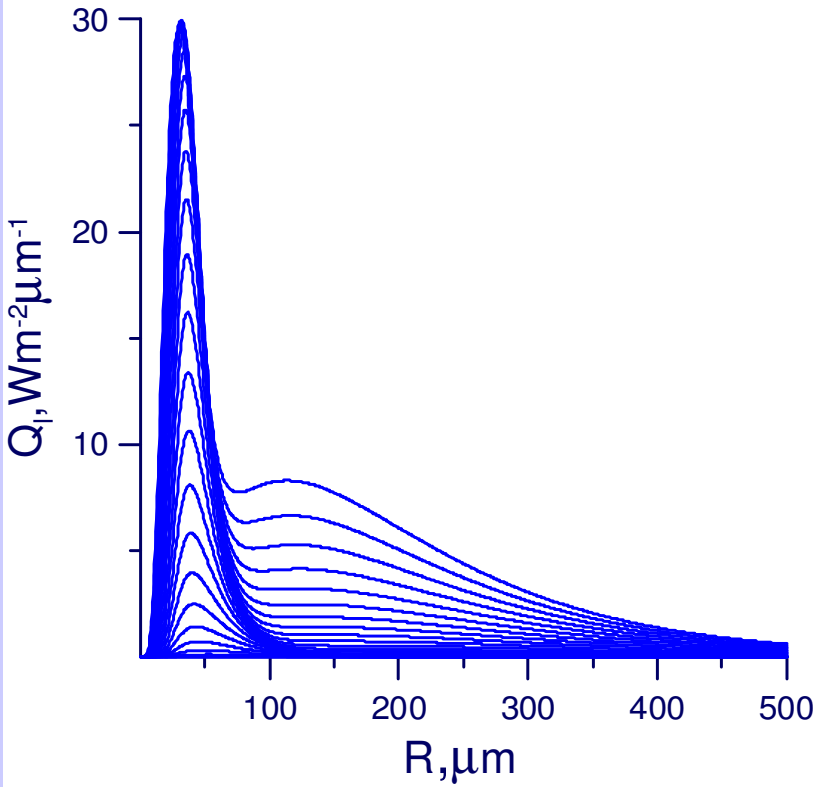
$$r(\tau_f) = r_{eq} + (r_0 - r_{eq})\exp(-\tau_f/\tau_r)$$ - радиус капли, падающей в воду

$$\tau_f = \frac{Z_s}{u_f(r_0)}$$ - Время нахождения капли в воздухе до падения в воду

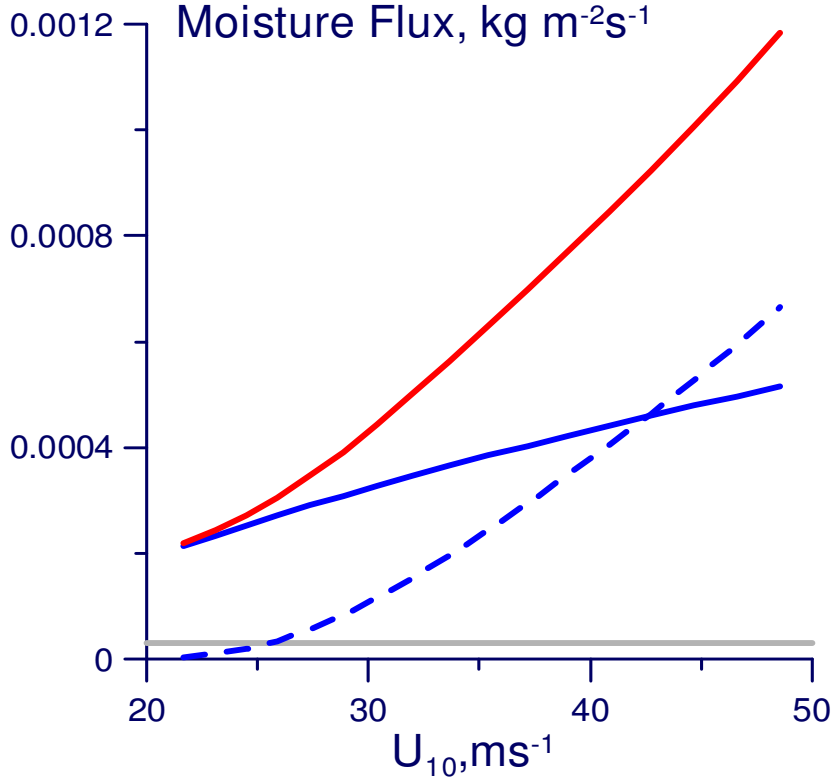
$Z_s = 0.635 H_s$; $H_s = 0.018 U_{10}^2 \Omega^{-1.5}$

**Zhao et al, 2006**

Вклад капель в скрытое тепло




$\Omega$=2.5, RH=80%

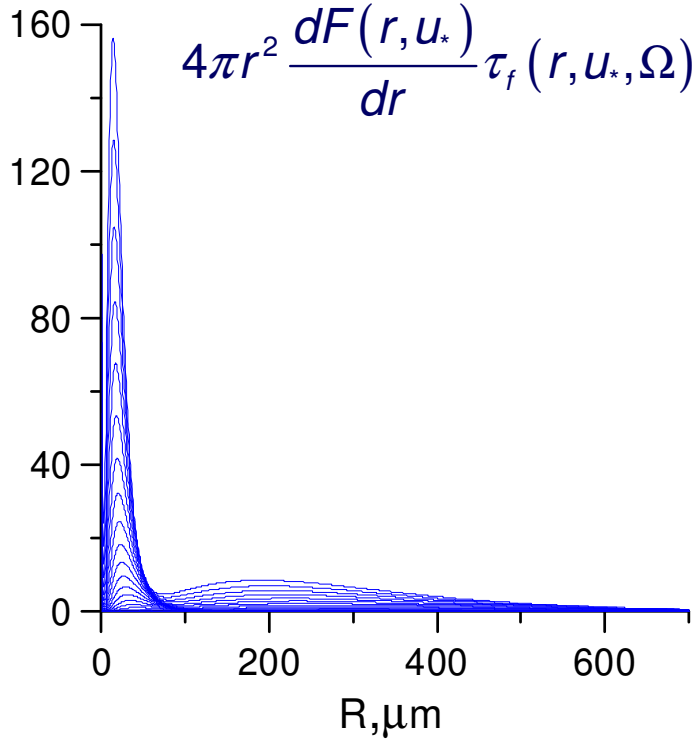


## Влияние брызг, возникающих за счет фрагментации типа“парашют” на газообмен между океаном и атмосферой (увеличение эффективной площади)

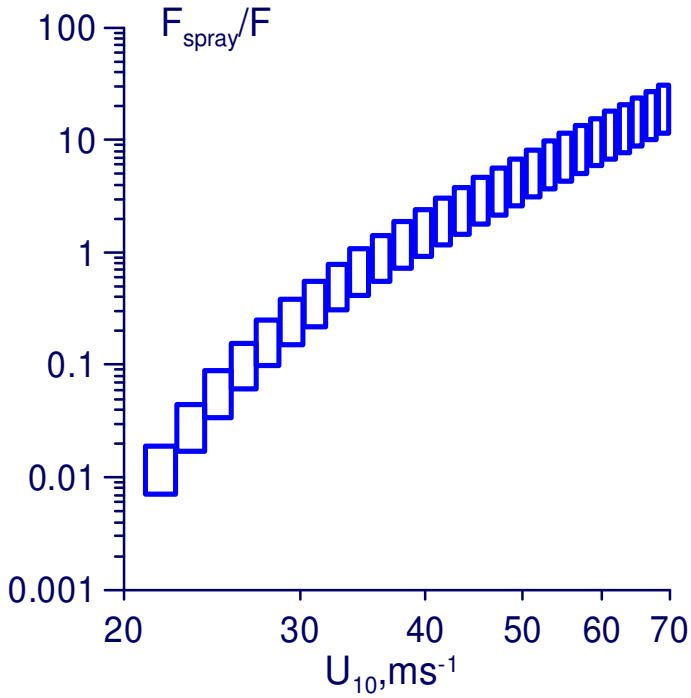
$$F_{spray} = F\int 4\pi r^2 \frac{dF(r,u_*)}{dr}\tau_f(r,u_*,\Omega)\,dr$$

***F*** **прямой поток газа от нефрагментированной поверхности воды, $\tau_f$ время нахождения капли в пограничном слое атмосферы (Andreas, 2005).**

**Вклад капель в увеличение площади поверхности**




**Отношение потоков газа от капель и от поверхности воды**



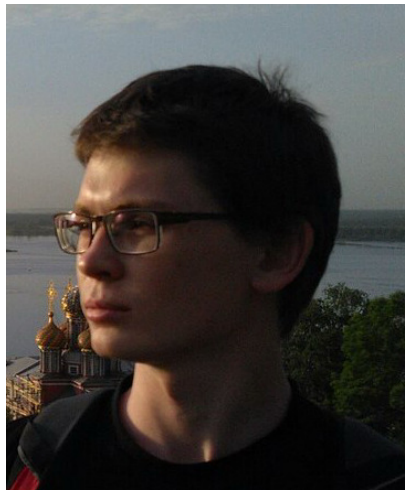
## Выводы

- Статистический анализ последовательности кадров высокоскоростного видео показал, что основным механизмом генерации капель в приводном слое атмосферы при штормовом ветре является фрагментация типа «парашют». Механизм активизируется при скорости ветра 8 баллов по шкале Бофорта и проявляется как “spindrift”.
- Из общих принципов статистической физики построена статистика возникновения «парашютов» и выведена функция генерации брызг, которая оказалась в хорошем согласии с данными экспериментов.
- Крупные капли, порождаемые фрагментацией парашютов, вносят большой вклад в потоки импульса, тепла, влаги, а также в газообмен.
  - Они значительно увеличивают поток тепла и влаги, а также многократно усиливают газообмен при ураганном ветре
  - Их вклад позволяет объяснить немонотонную зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды с максимумом при скорости ветра 35-40 м/с.

# Contributors

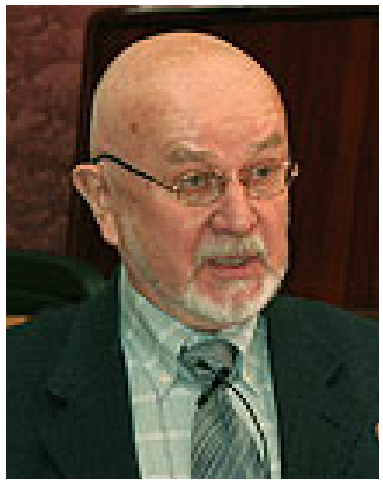
Alexander Kandaurov, IAP

Olga Ermakova, IAP



Dmitry Kozlov, IAP

Daniil Sergeev, IAP



Sergej Zilitinkevich, Uni Helsinki