

**Физические процессы в пограничных
слоях атмосферы и гидросферы
внутренних водоемов и прибрежной
зоны океана и методы их
дистанционной диагностики**

Троицкая Ю.И.

Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород

Содержание

1. Применение спутниковая альтиметрия для изучения гидрологии внутренних водоемов (алгоритм восстановления уровня воды и определения характеристик ледового покрова, верификация на основе контактных наблюдений, пример применения для анализа)
2. Натурное исследование и численное моделирование поверхностного волнения во внутренних водоемах и его влияния на процессы обмена в приводном слое атмосферы (Теоретическая модель приводного ветра, ее верификация на основе лабораторных и натурных экспериментов, параметризация характеристик приводного слоя атмосферы);
3. Исследование особенностей взаимодействия атмосферы и гидросферы при штормовых условиях (новый механизм генерации брызг при штормовом ветре и их влияние на динамику и термодинамику штормового АПС, а также на испарение – важнейший процесс определяющий гидрологический цикл)
4. Заключение (основные результаты и публикации)

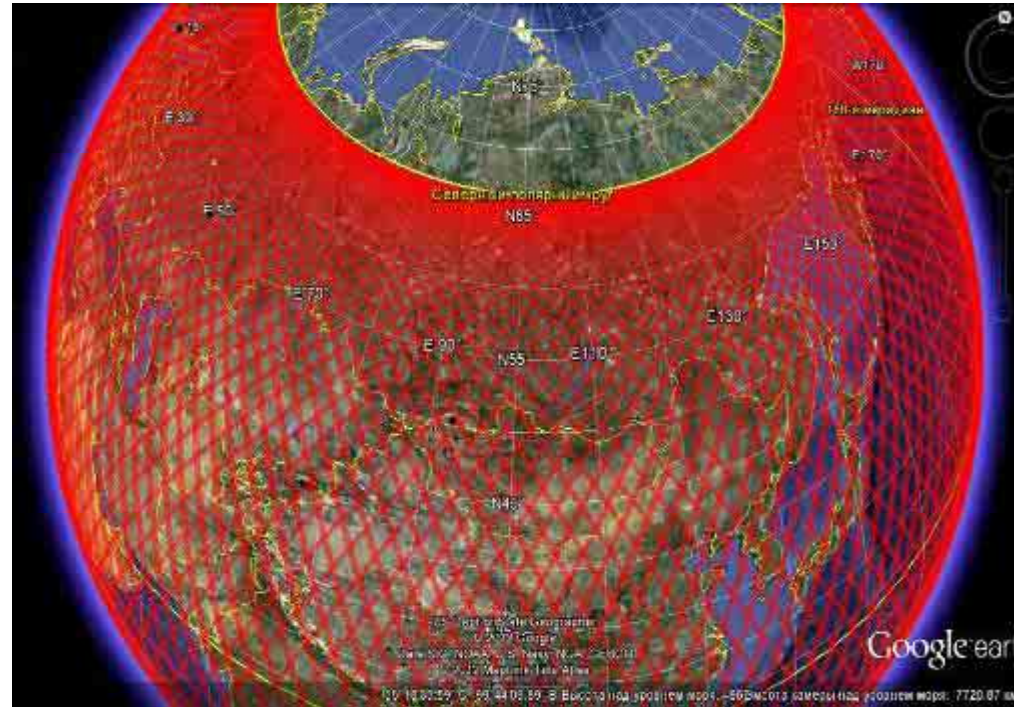
Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов

Применение для внутренних водоемов:

- оценка запасов пресной воды;
- локализация региональных засух и оценка продуктивности с/х культур на орошаемых землях;
- анализ произошедших климатических и антропогенных изменений и т.д.
- изучение водного баланса внутренних морей;

Преимущества:

- всепогодность, независимость от времени суток;
- изомаршрутная орбита, допускающая систематический мониторинг рек, озер, болот, внутренних морей и поймы;
- возможность проводить систематические измерения в труднодоступных местах, где измерения уровня воды отсутствуют;
- непрерывные ряды измерений с 1992 года и новые миссии, запланированные в течение следующего десятилетия.

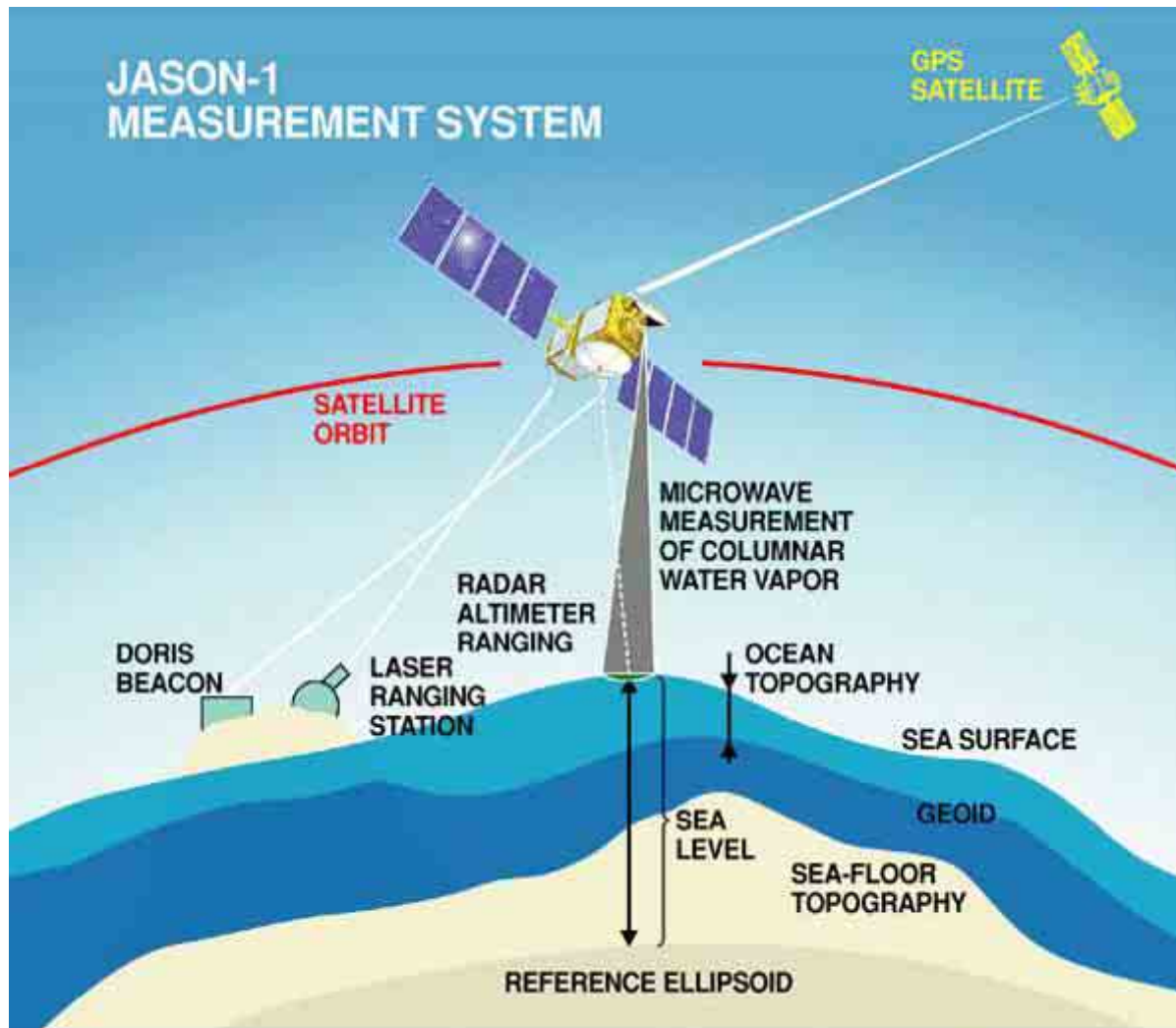


Основные мониторинговые программы спутниковой альтиметрии

Программа		Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
				Высота, км		Наклонение, градусы	Период повторяемости сутки
				перигей	апогей		
TOPEX/ Poseidon	фаза А	08/1992 – 08/2002	2402	1331	1344	66,04	9,9156
	фаза В	09/2002 – 01/2006					
GFO-1		02/1998 – 09/2008	410	786	788	108,1	17
Jason-1	фаза А	12/2001 – 01/2009	500	1337	1343	66,04 2	9,9156
	фаза В	02/2009 – 02/2012					9,9156
	геодезическая программа	05/2012 – 07/2013					~406
ENVISAT		03/2002 – 04/2012	7991	783	785	98,6	35
ICESat-1 ²		01/2003 – 06/2010	1000	593	610	94,0	~183,8
Jason-2 (OSTM)		06/2008 – настоящее время	525	1324	1335	66,04	9,9156
CryoSat-2 ²		04/2010 – настоящее время	650	720		92,0	~369
HY-2A	изомаршрутная программа	08/2011 – настоящее время	513	963,6	965	99,3	14
	геодезическая программа	планируется на 08/2013		973			~168
SARAL/AltiKa		02/2013 – настоящее время	450	786		98,55	35

Спутниковая альтиметрия

создавалась как метод определения динамической топографии океана



(Photo courtesy of CNES-website, <http://www-aviso.cnes.fr>)

По параметрам телеметрических импульсов РА можно определить

- высоту спутника над поверхностью моря;
- скорость приводного ветра;
- значительную высоту волн.

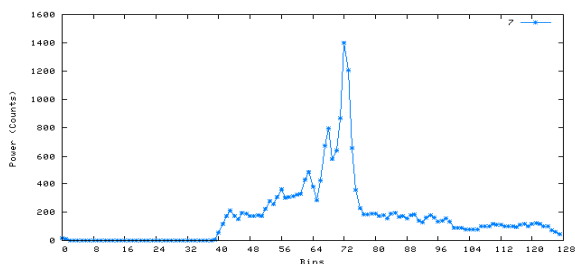
В открытом океане погрешности измерения с разрешением 5км

- высоты поверхности воды – 3.4 см
- высоты волн 0.4 м или 10%
- скорости ветра 1.5 м/с

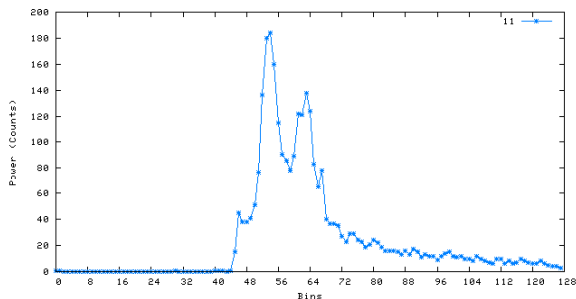
Причины ошибок стандартного алгоритма ретрекинга неправильное определение положения переднего фронта отраженного импульса

Формы телеметрических импульсов во внутреннем водоеме на примере Горьковского водохранилища

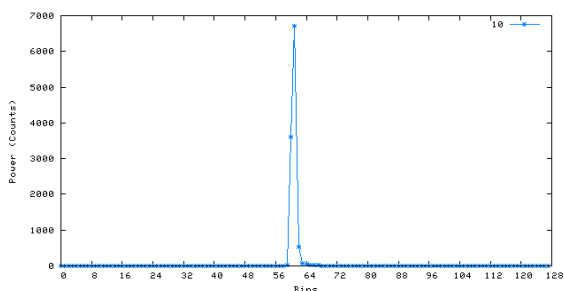
Совместное отражение от суши и воды



Наличие нескольких сильно отражающих объектов

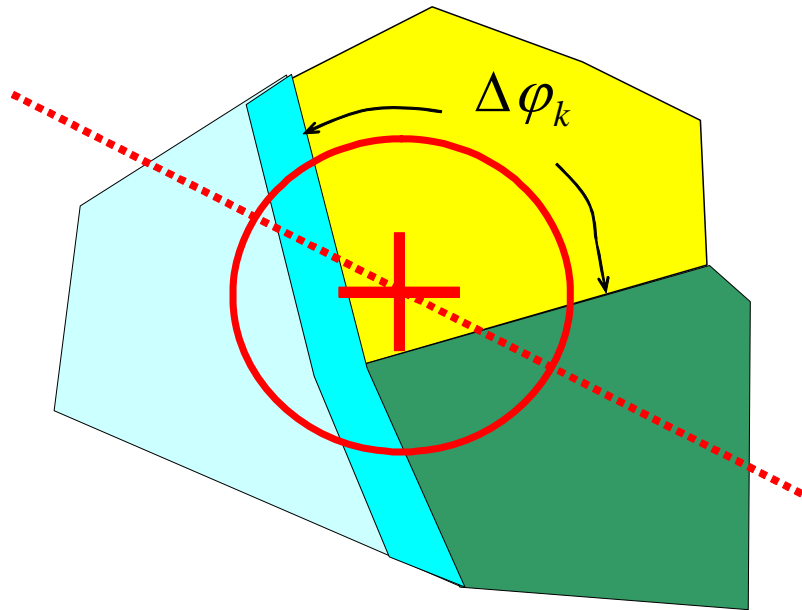


Квази-зеркальное, когерентное отражение от глади воды



Алгоритм регионального адаптивного ретрекинга для определения уровня воды во внутреннем водоеме и прибрежной зоне

(на основе теоретической модели формы импульса отраженного сигнала в рамках теории некогерентного рассеяния радиоволн (обобщение Brown, 1977))



Кусочно-постоянная модель подстилающей поверхности
 + – положение точки надира,
 пунктирная прямая – линия движения спутника, окружность – граница засвеченной области

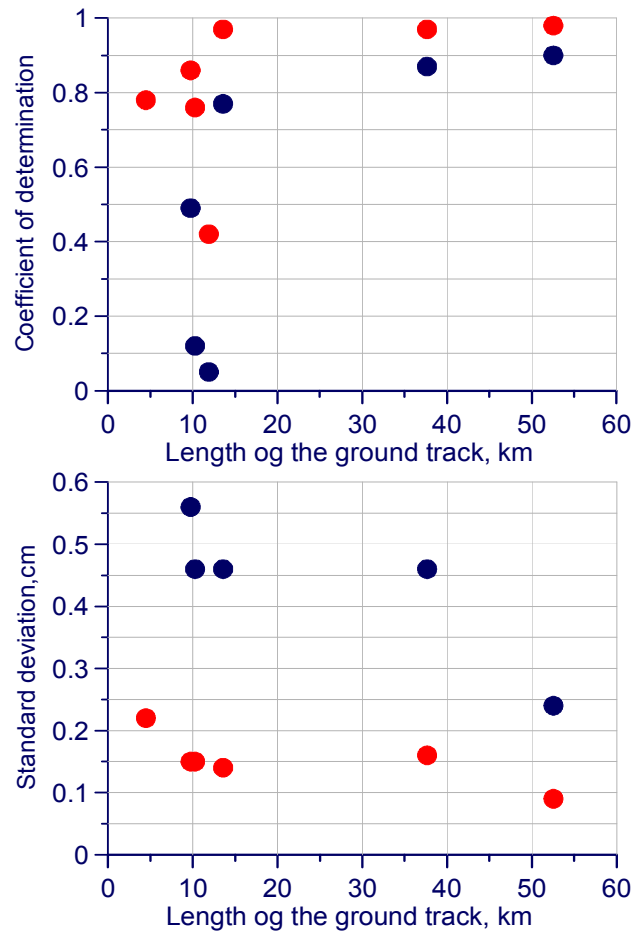
$$P(\tau) = P_0 \sum_{k=1}^N \sigma_k^{(0)} e^{-\left(\frac{4}{\gamma} + \alpha_k\right) \frac{(c\tau - 2H_k)}{h}} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(c\tau - 2H_k)}{2\sqrt{2}\sqrt{s_k^2 + c^2\tau_i^2}} \right) \right) \Delta\varphi_k \left(x_N, y_N, \sqrt{h(c\tau - 2H_k)} \right)$$

H_k , - отклонение высоты от среднего уровня, s_k, α_k , - параметры рассеяния и шероховатости для данной (k -й) части подстилающей поверхности.

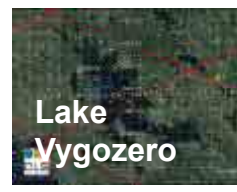
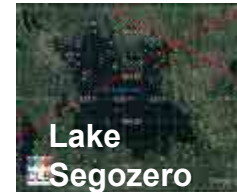
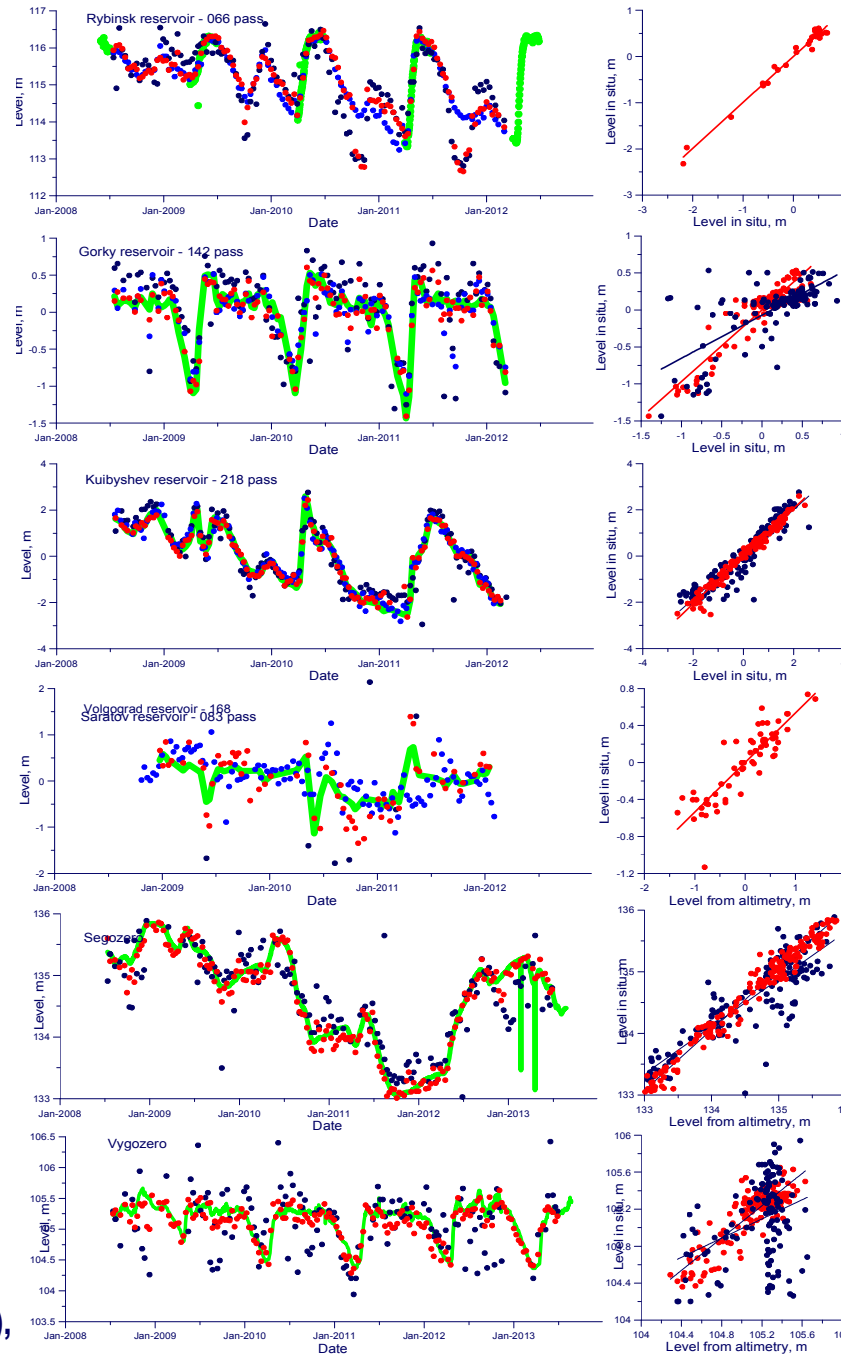
2. решение обратной задачи для определения параметров (H_k, s_k, α_k)

Колебания уровня воды в водохранилищах по данным радиовысотомера Jason-2

Сравнение данных альтиметрии с данными постов Государственной сети гидрологических наблюдений



- GDR Jason-2 (черные),
- результат ретрекинга SGDR Jason-2 (красные),
- наземные данные (зеленая)



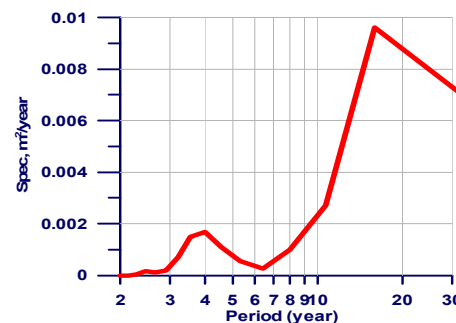
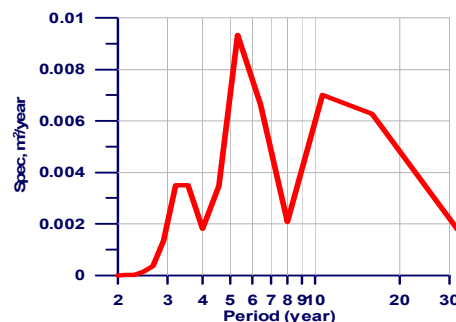
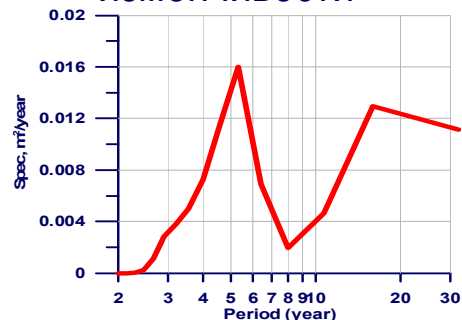
Межгодовая изменчивость уровней воды в озерах Северо-Запада РФ на основе спутниковой альтиметрии

Колебания уровня воды



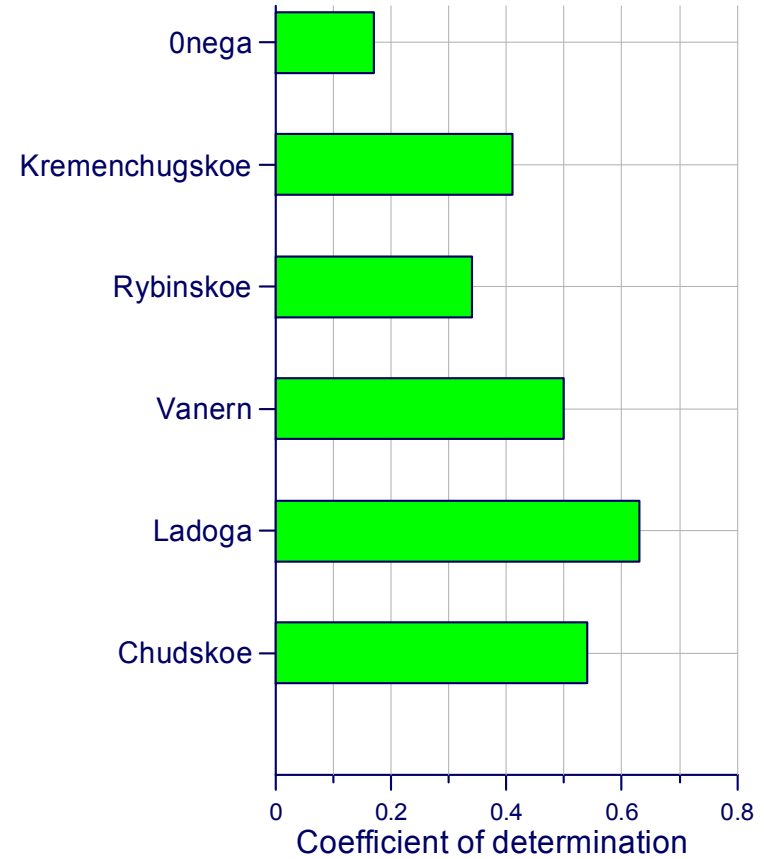
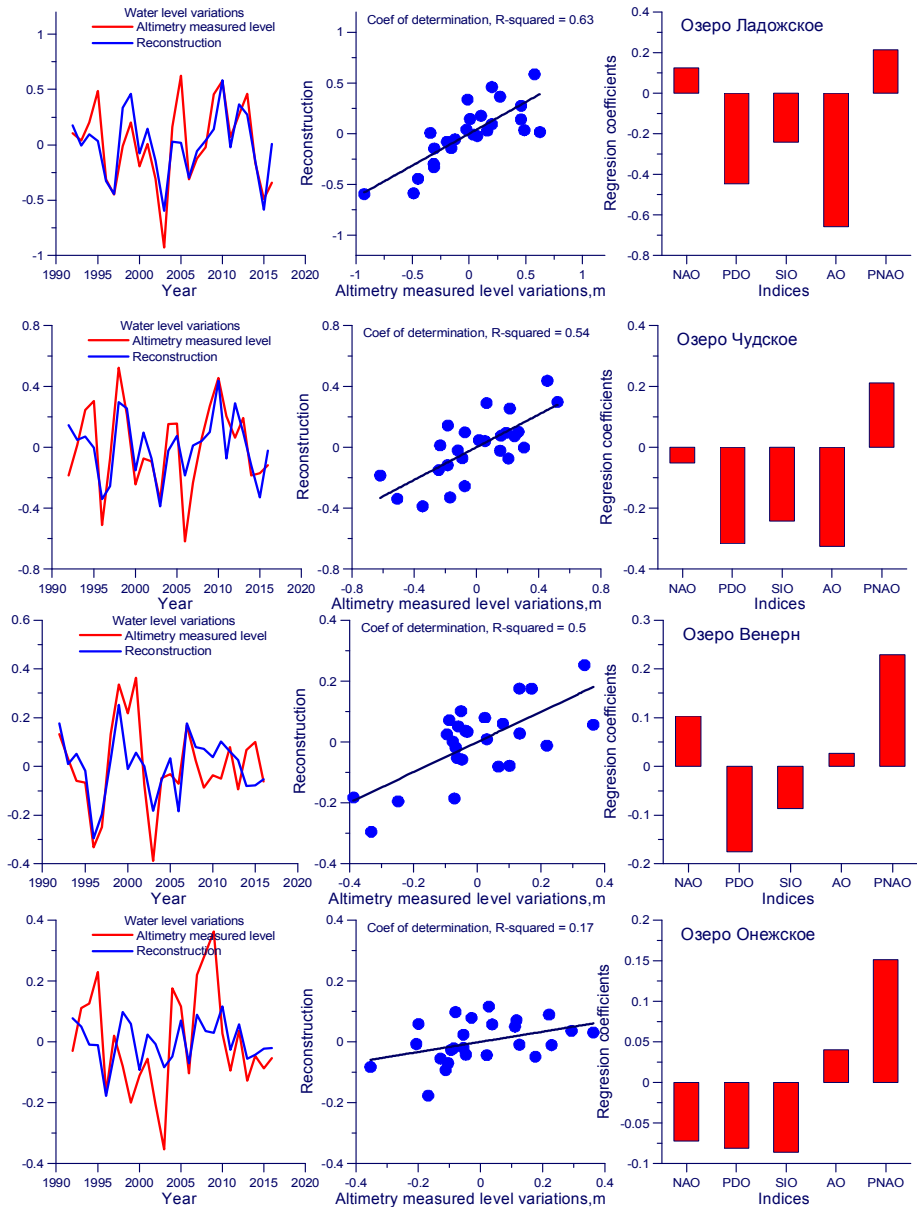
Синие линии – среднемесячный уровень, красная линия – среднегодовой уровень

Периодограммы межгодовой изменчивости



**S.A. Lebedev, Yu.I.Troitskaya,
G.V.Rybushkina,
M.N.Dobrovolsky *Complex
Interfaces Under Change: Sea
– River – Groundwater – Lake*
Proceedings of HP2/HP3, IAHS-
IAPSO-IASPEI Assembly,
Gothenburg, Sweden, July
2013 (IAHS Publ. 365, 2014)**

Корреляции уровней воды в озерах и водохранилищах с индексами атмосферной циркуляции



Коэффициенты детерминации для множественной линейной регрессии колебаний уровня в водоемах, восстановленных по данным альтиметрии, и индексов атмосферной циркуляции

Спутниковые методы исследования ледового покрова внутренних водоемов



Микроволновый 3-х каналный радиометр AMR предназначен для атмосферной коррекции времен прихода импульсов (учет задержки прихода импульса из-за присутствия водяного пара). Работает на частотах 18,7, 23,8 и 34.0ГГц.

Зачем следует изучать время установления и таяния ледового покрова

- Лед оказывает влияние
 - на процессы обмена между водой и атмосферой,
 - на гидрофизические и гидробиологические процессы в водоемах.
 - на перевозки и навигацию
- Такие параметры, как время установления и таяния ледового покрова, его толщина и протяженность – индикаторы региональных и крупномасштабных климатических изменений.

Излучательная способность различных поверхностей и материалов

	Диэлектрическая проницаемость на частоте 10 ГГц	Излучательная способность в надир
Вода	$60+35i$	0.37
Лед, 0°	$3.1+0.001i$	0.92
Влажный снег, 5% воды	$1.7+0.3i$	0.98
Влажная почва, 30% воды	$17.7+3.7i$	0.65
Растительность, содержание воды 30%	$5.6+2i$	0.82

Метод основан на анализе вариации вдоль трека яркостной температуры поверхности.



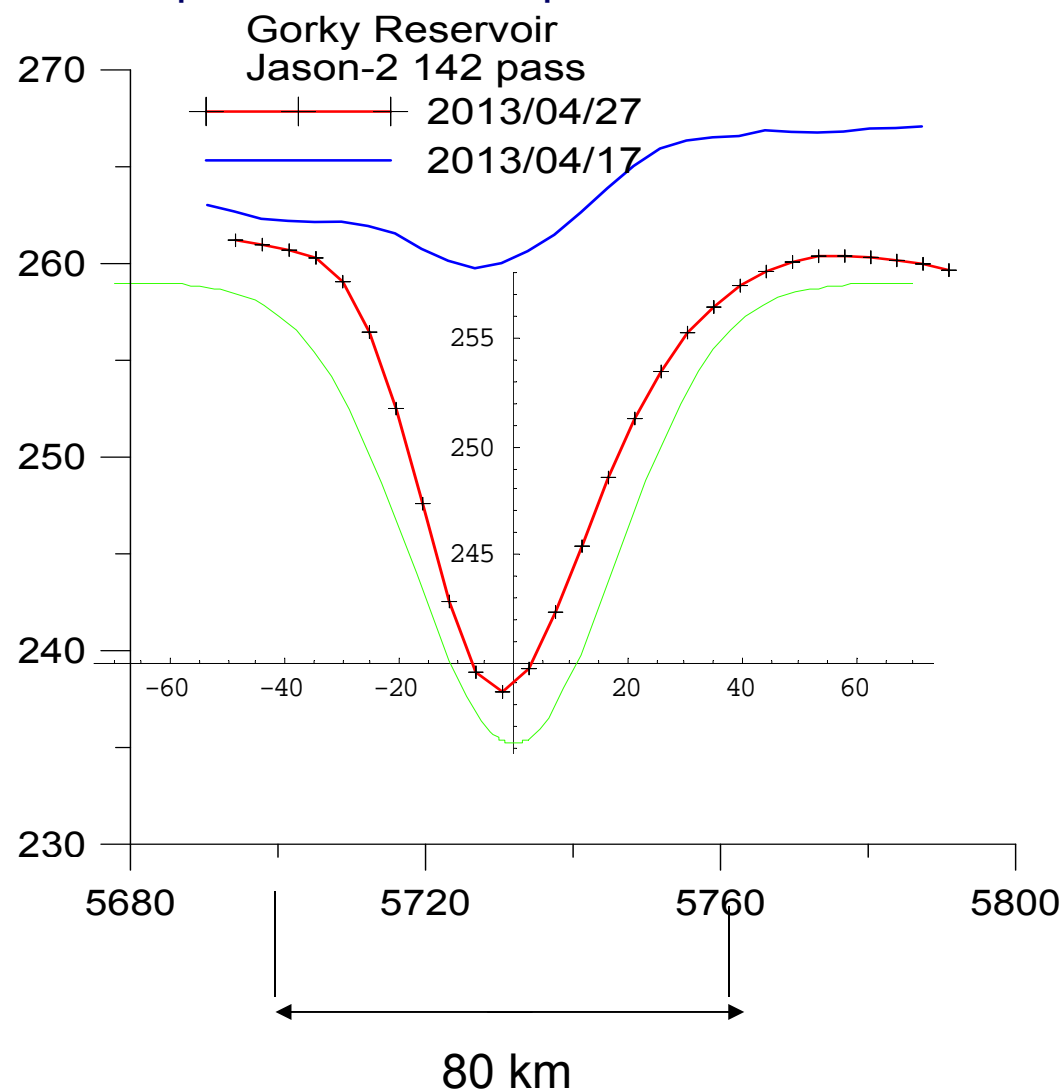
April 22, 2013

a



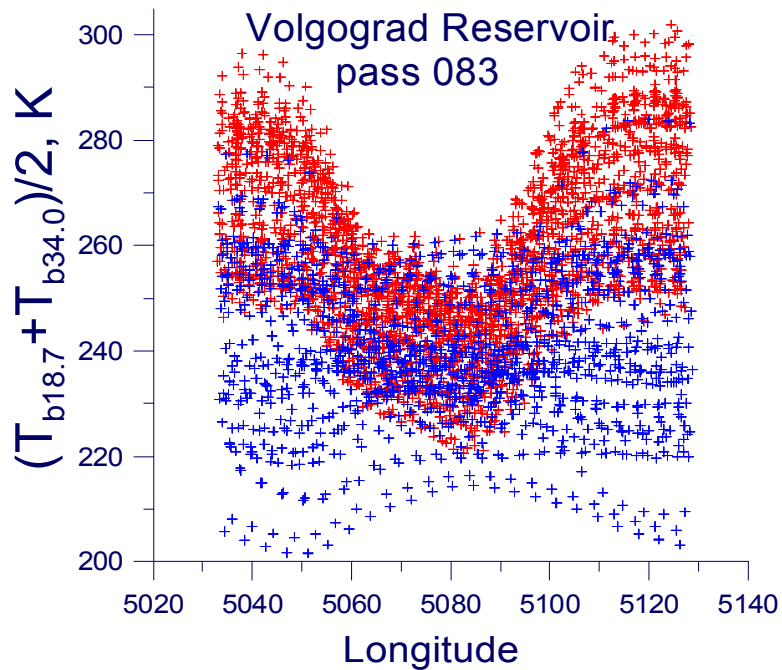
May 1, 2013

Изменение яркостной температуры на 18.7 and 34 ГГц вдоль трека, пересекающего Горьковское водохранилище

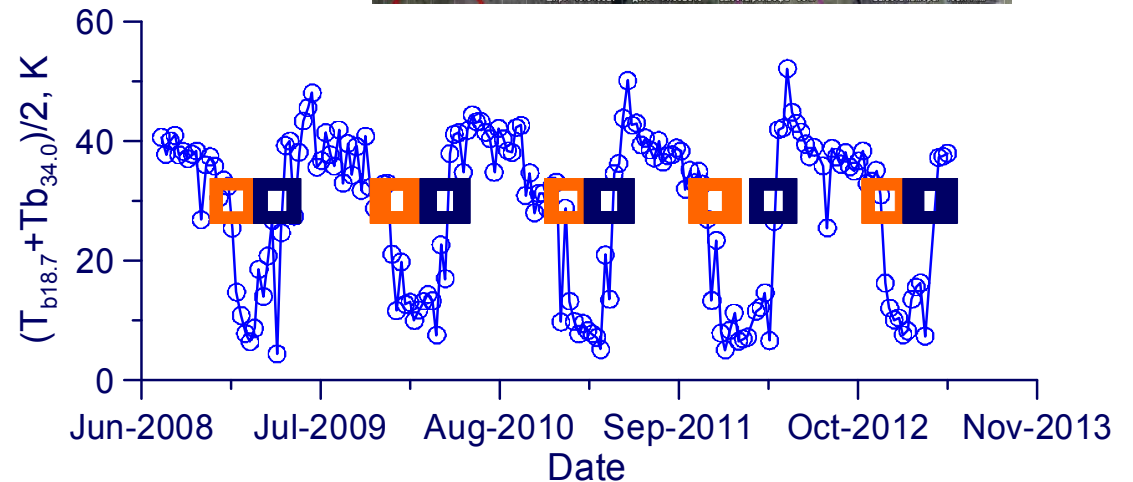
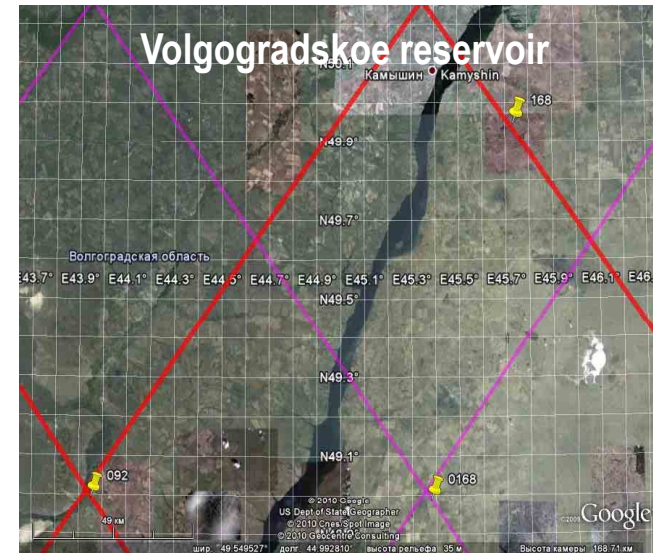


Landsat images of the Gorky Reservoir: a) April 22, 2013, b) May 1, 2013

Отличия «зимних» и «летних» профилей яркостной температуры вдоль трека



Изменение вдоль трека средней яркостной температуры на 18.7 and 34 ГГц, $T_{b/2} = (T_{b18.7} + T_{b34})/2$, летом (красные символы) и зимой (синие символы)



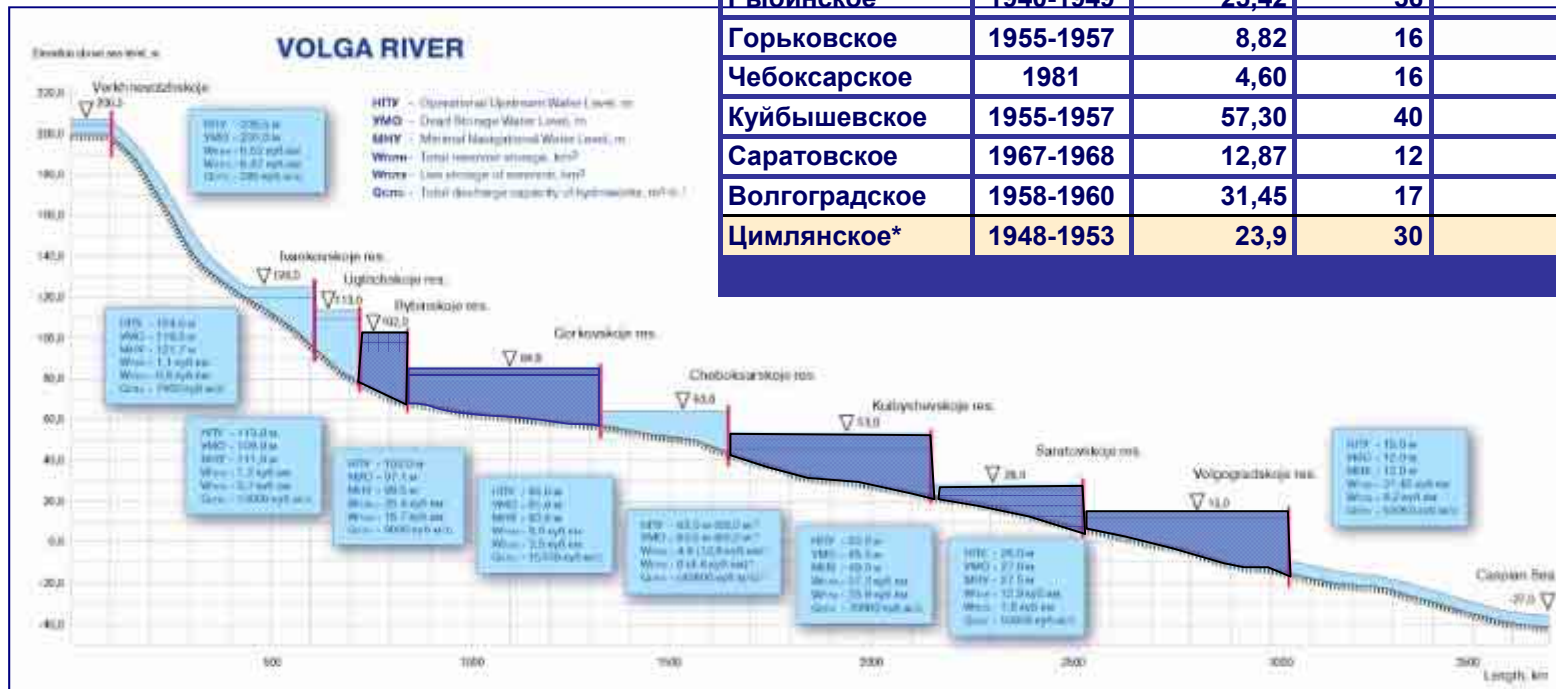
Вариации разности яркостных температур воды и суши по данным спутника Jason-2. Малые значения D_{tb} соответствуют акваториям, покрытых льдом, а большие - воде, свободной ото льда.

Водохранилища Волжского каскада

Difference of heights between the Volga River source and the river outlet makes 256 m.

Таблица: Общие параметры водохранилищ Волжского каскада И Цимлянское водохранилища на р.Дон

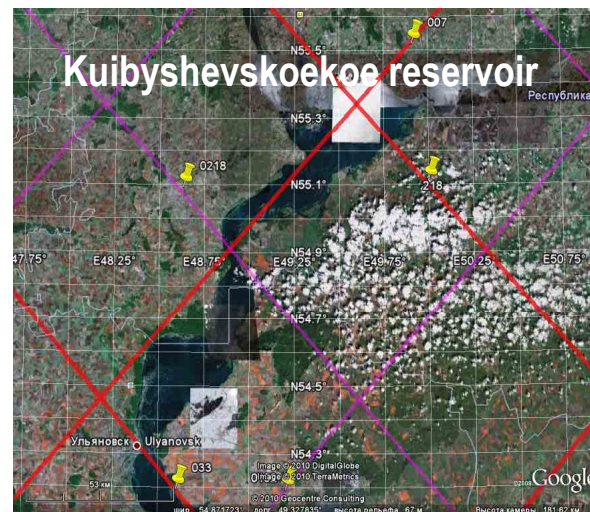
Водохранилище	Год	Объем, км ³	Ширина, км	Длина озерной части, км	Площадь зеркала, км ²
Верхневолжское	1843,1944	0,52	6	85	183
Иваньковское	1937	1,12	2-5	50	327
Угличское	1939-1943	1,25	5	50	249
Рыбинское	1940-1949	25,42	56	80	4 550
Горьковское	1955-1957	8,82	16	82	1 591
Чебоксарское	1981	4,60	16	50	1 080
Куйбышевское	1955-1957	57,30	40	500	6 150
Саратовское	1967-1968	12,87	12	357	1 831
Волгоградское	1958-1960	31,45	17	540	3 117
Цимлянское*	1948-1953	23,9	30	180	2700



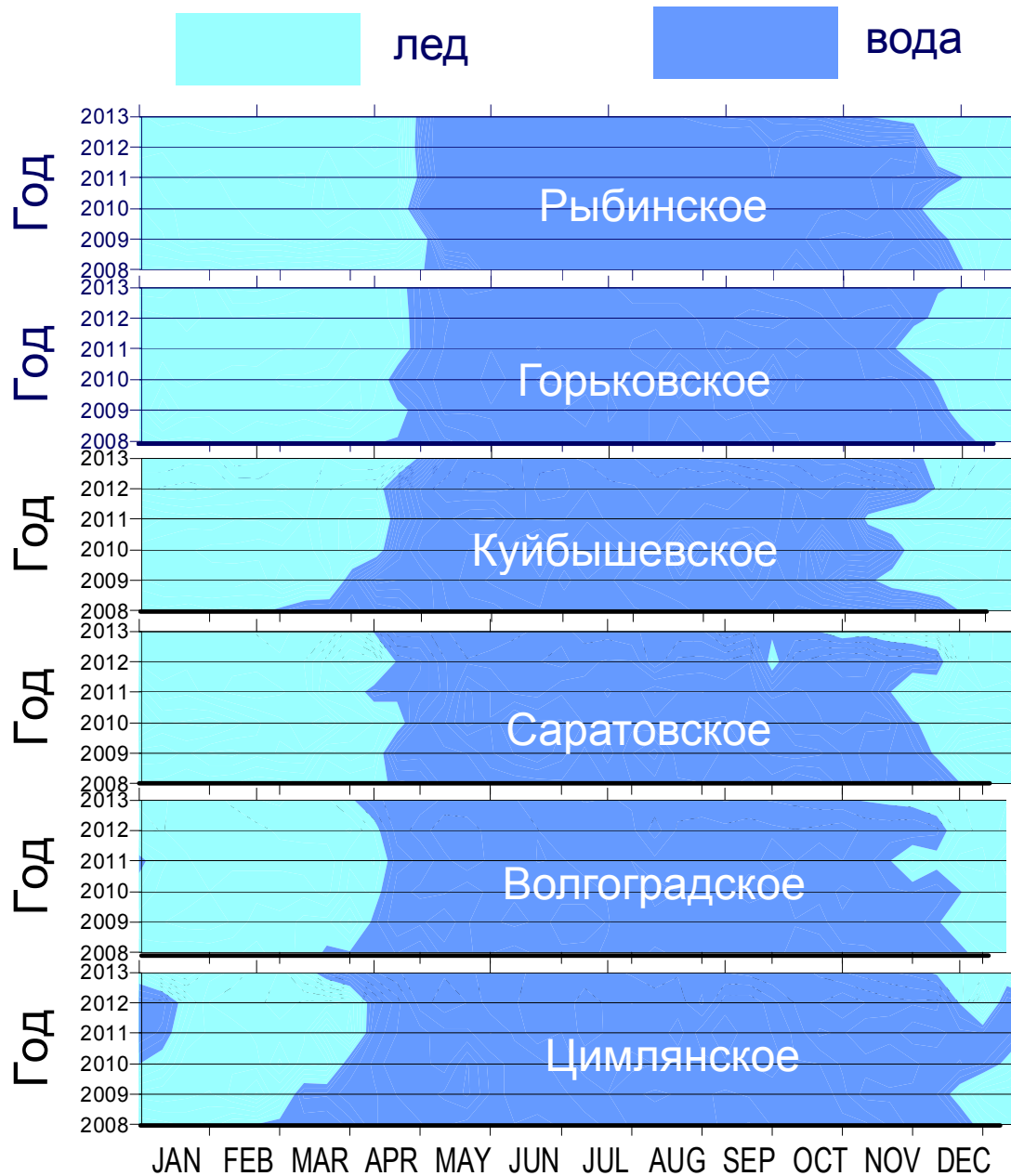
*На р.Дон

The Volga River length is 3 530 km and only 940 km (320 km in the Upper part and 620 km in the Lower Volga) have unregulated or natural hydrological regime.

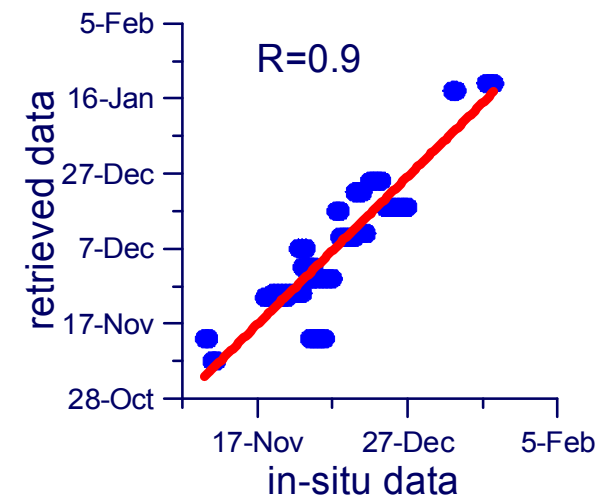
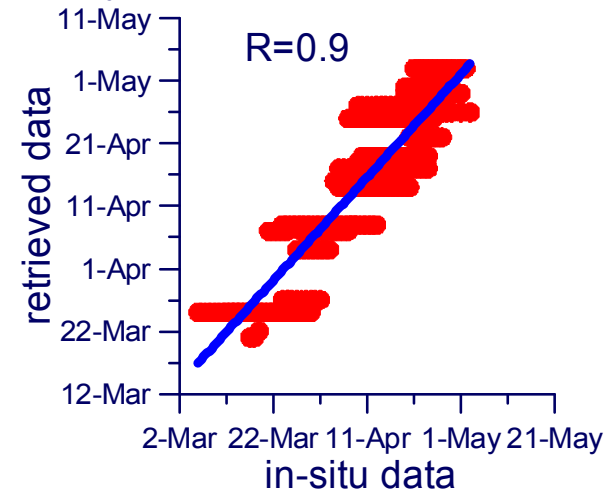
Треки спутников Jason-1 и Jason-2, пересекающие водохранилища на реках Волга и Дон



Время установления и таяния ледового покрова водохранилищ по спутниковым данным из анализа яркостных температур в 2008-2013 гг.



Корреляция спутниковых и натуральных данных Российского Регистра Гидротехнических Сооружений



Основные результаты по спутниковой альтиметрии внутренних водоемов

- Региональный алгоритм определения уровня воды во внутреннем водоеме по исходным данным спутниковой альтиметрии, верифицированный на основе данных наземных измерений на водохранилищах Волжского каскада и крупных озерах Северо-Запада РФ.
- Простой метод определения времени замерзания и вскрытия внутренних водоемов, основанный на анализе изменения яркостных температур на 18.7 and 34 GHz регистрируемых радиометром спутника Jason-2 при его движении.

Основные публикации по спутниковой альтиметрии внутренних водоемов

- Троицкая Ю,И., Г. Н. Баландина, Г.В. Рыбушкина, И. А. Соустова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев, А. А. Панютин, Л. В. Филина. Исследования изменчивости уровня воды в Горьковском водохранилище на основе данных спутниковой альтиметрии. Исследование Земли из космоса. 2011. Вып.1. С. 48-56
- Троицкая Ю,И., Г. Н. Баландина, Г.В. Рыбушкина, И. А. Соустова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев, А. А. Панютин, Л. В. Филина. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов, Водные ресурсы, Т. 39, N2, 2012. №2. С.169–185
- Yu. Troitskaya, G. Rybushkina, I. Soustova, G. Balandina, S. Lebedev, and A. Kostianoy Jason-1,2 data retracking for water level variations in Gorky Reservoir of the Volga River International Journal Remote Sensing, 2012 v.33, N 23, p. 7559-7578,2012
- Yu. Troitskaya, G. Rybushkina, I. Soustova, S. Lebedev Adaptive Retracking of Jason-1, 2 Satellite Altimetry Data for the Volga River Reservoirs, Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal, issue 99, 2013, doi: 10.1109/JSTARS.2013.2267092
- Rybushkina, G. ; Troitskaya, Yu. ; Soustova, I. Ice cover determination of the Volga and the Don River reservoirs on the base of Jason-2 satellite observations, IGARSS-2014 IEEE International , p.149 – 152., 2014.

Натурное исследование и численное моделирование поверхностного волнения во внутренних водоемах и его влияния на процессы обмена в приводном слое атмосферы

Поверхностное волнение на внутренних водоемах

- основной источник эрозии берегов и уменьшения объема за счет заиливания водоемов;
- основной фактор опасности речного судоходства, особенно маломерного;
- основной фактор перемешивания и аэрации водоема, переноса водорослей и поверхностных загрязнений в толщу водоема;
- влияет на параметры ветра и процессы обмена в приводном слое атмосферы, в т.ч. испарение и температурный режим, на формирование микроклимата прилежащих территорий



Горьковское водохранилище

2012-2016

Водохранилище:

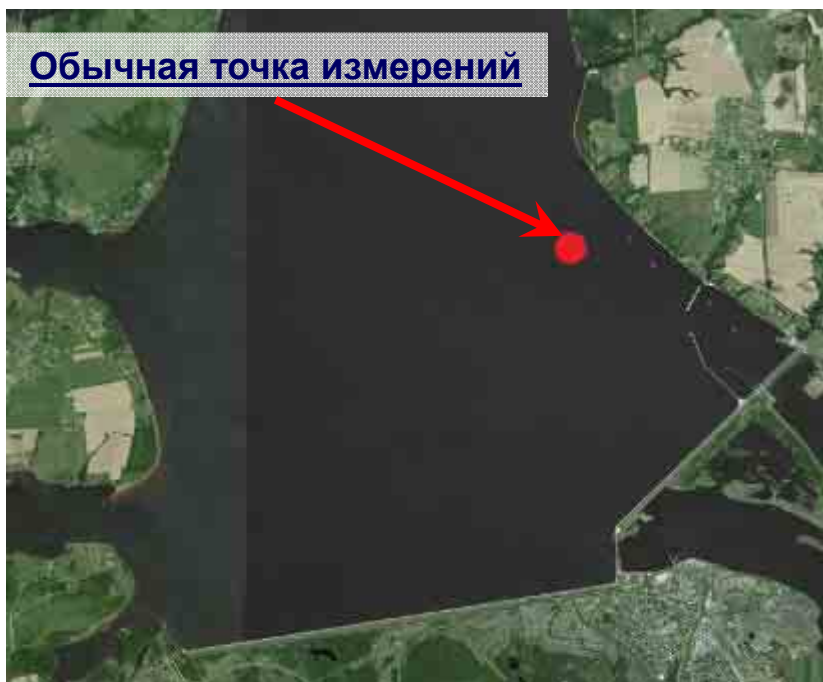
длина озерной части: **97 км**

ширина озерной части: **5-14 км**

глубина: **4.5-20 м**

глубина в точке измерения: **9-12 м**

диапазон измеренных ветров: **0-10 м/с**



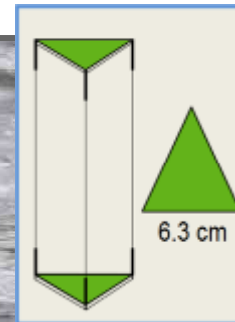
Вежа Фруда

Двухкомпонентный u/z датчик скорости



WindSonic Gill Instruments
диапазон измерений **0-60 м/с**, точность **4%**,
разрешение **0,01 м/с**
Высоты расположения:
0.1м (поплавок), 0.85м, 1.3м, 2.27м, 5.26м

Антенна струнных волнографов



Общая длина: **12 м**

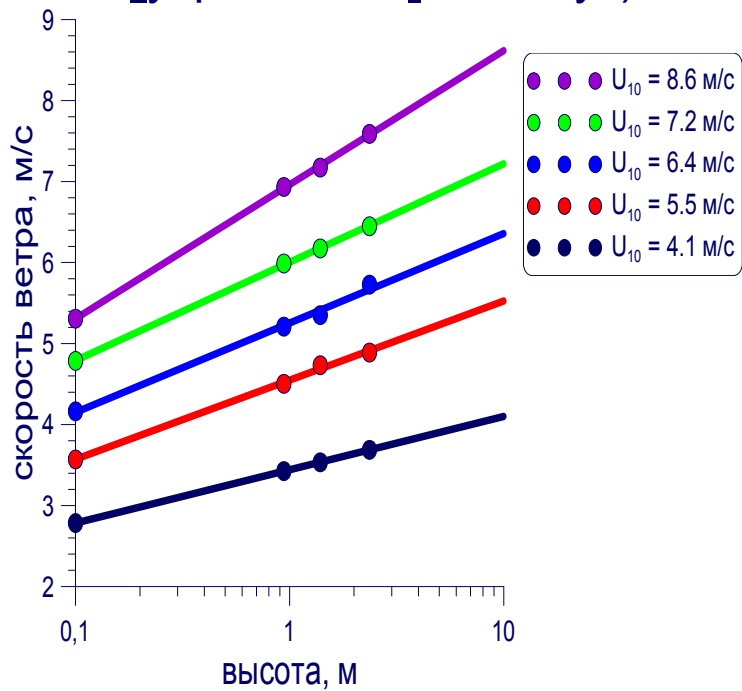
Длина надводной части: **5.3 м**

Резонансная частота вертикальных колебаний: **0,16 Гц**

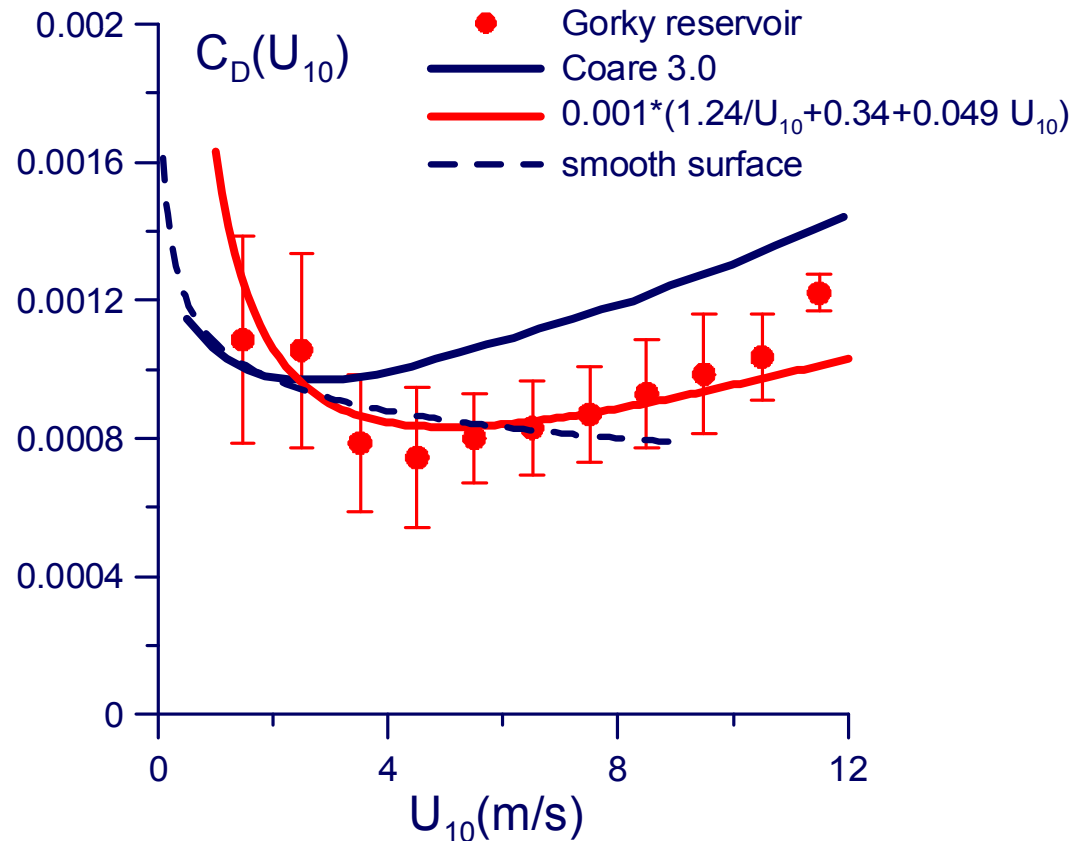


Закон сопротивления поверхности воды во внутреннем водоеме

Логарифмический профиль скорости ветра (усреднение_20 минут)



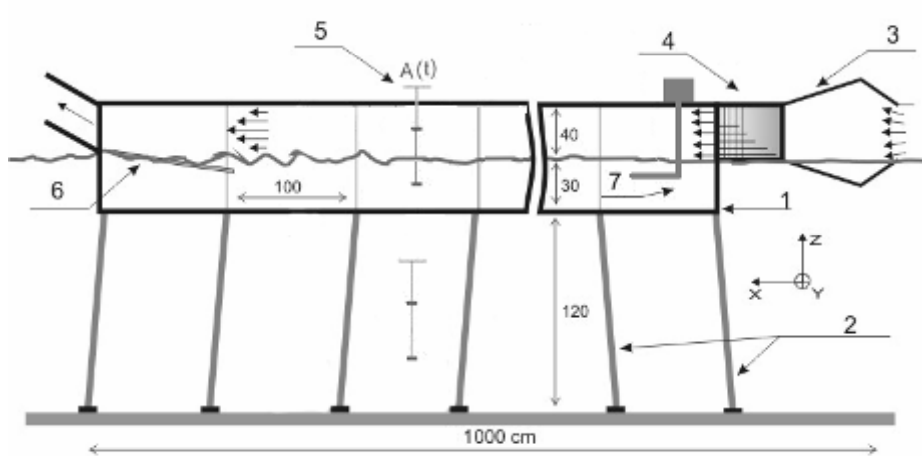
Коэффициент сопротивления



Параметризация зависимости $C_D(U_{10})$

$$C_D = 0.00124U_{10}^{-1} + 0.00034 + 0.000049U_{10}$$

Сравнение с лабораторным моделированием



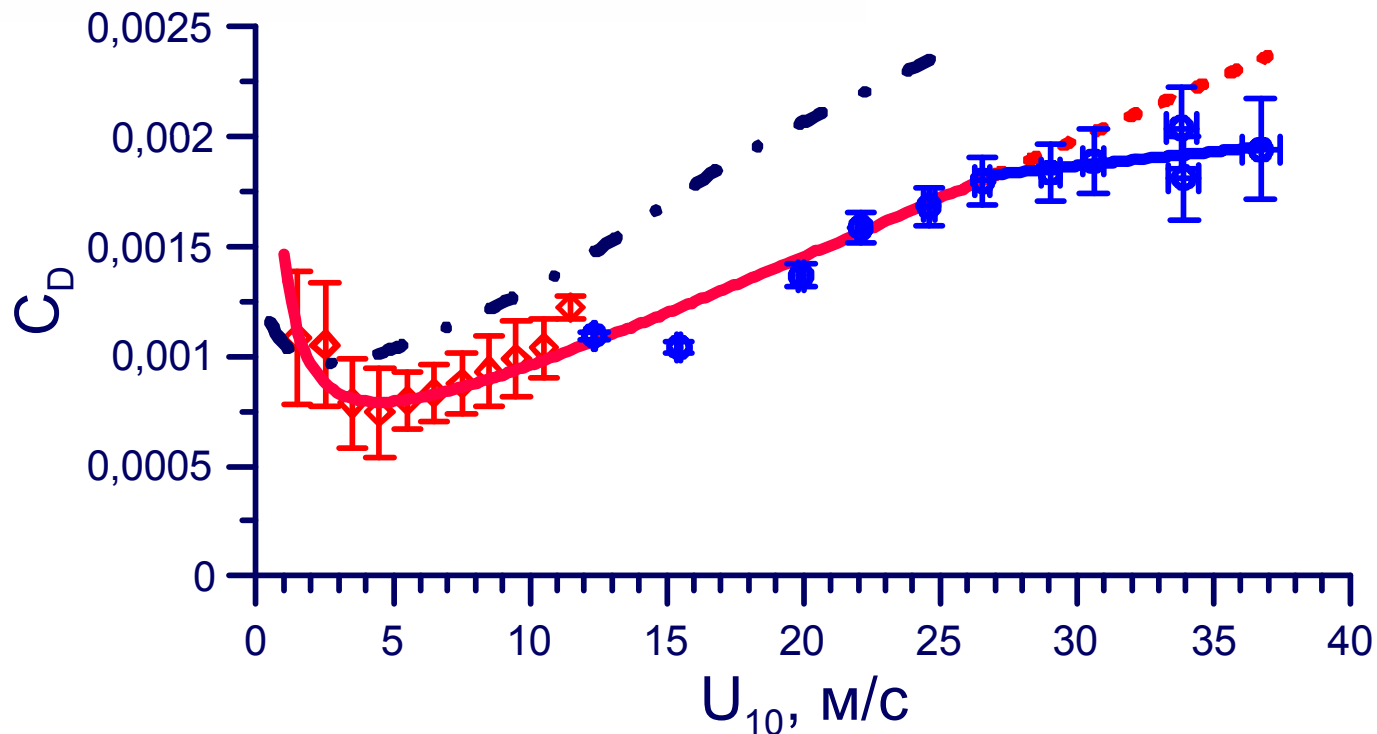
Ветроволновой канал:

Высота 40 см

Ширина 40 см

Разгон до точки измерения 7 м

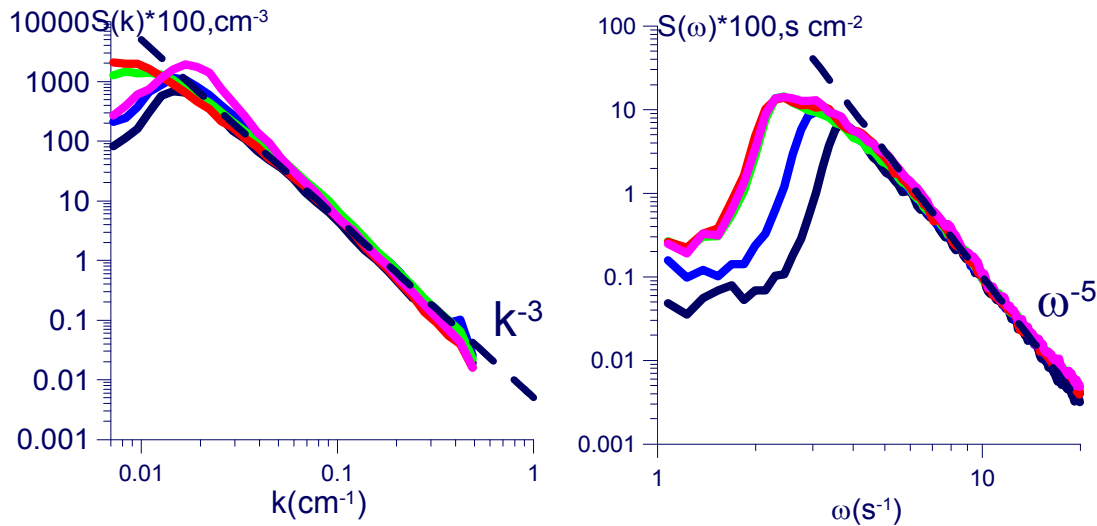
Скорость ветра на оси до 18 м/с
(эквивалентная скорость $U_{10} = 45$ м/с)



$$C_D = 0.00124U_{10}^{-1} + 0.00034 + 0.000049U_{10}$$

Параметры поверхностного волнения

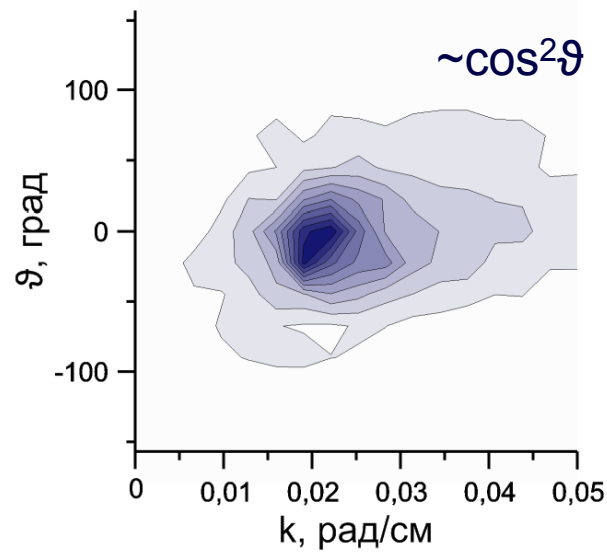
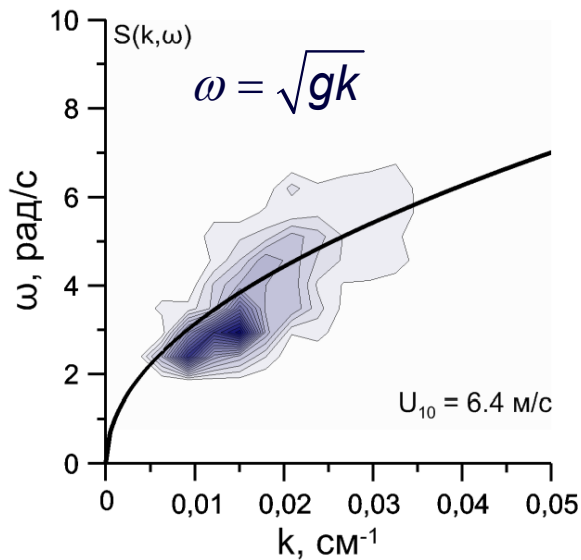
Спектры возвышений поверхности воды при разных скоростях ветра и параметрах возраста волнения $U_{10}=3.3-8.4$ м/с, $\Omega=1.6-3.6$



Пространственно-временные и угловые спектры

Изолинии $S(k, \omega)$

Пространственно-угловой спектр



Модель приводного поля ветра над взволнованной водной поверхностью

Ветер \equiv турбулентный пограничный слой над водной поверхностью

Полуэмпирическая модель турбулентности 1-го порядка

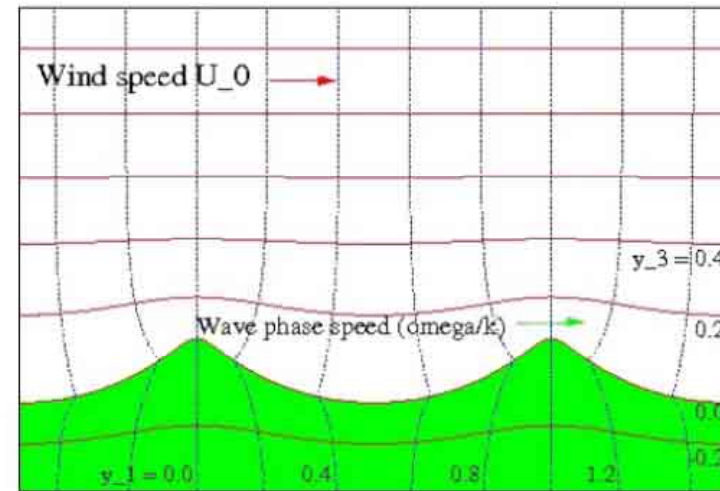
$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\sigma_{ij} = \langle u_i u_j \rangle = \nu \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$$

ν - коэффициент вихревой вязкости – заданная функция z



Ортогональная криволинейная система координат, сопровождающая поверхностные волны



Самосогласованная система уравнений для описания взаимодействия волн и ветра

Линейные уравнения для возмущений, индуцированных в воздушном потоке волнами на воде

+

Уравнение для средней скорости ветра. Нелинейный эффект передачи среднего импульса от ветра к волнам

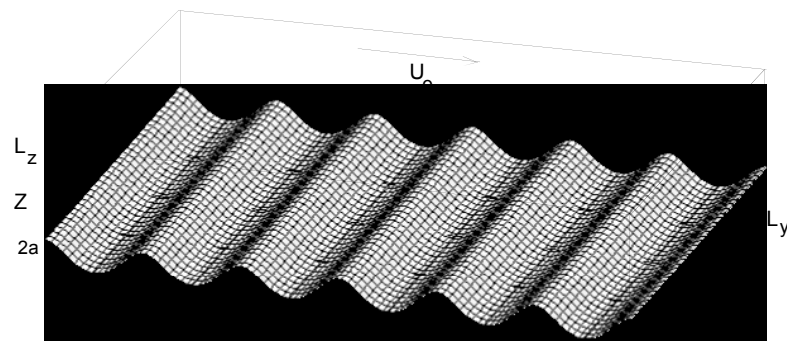
$$\nu(\eta) \frac{dU}{d\eta} = u_*^2 - \tau_{wave}(\eta)$$

$$\tau_{wave}(\eta) = \int T_{wave}(\eta, k, \varphi, \omega) F(k, \varphi, \omega) \rho d\omega$$

Прямое численное моделирование ветра над волнами

Параметры DNS $Re=15000$, $ka=0-0.2$, $c/u^*=0-10$

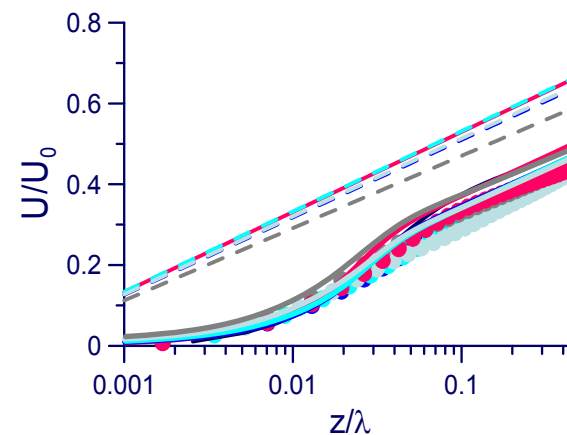
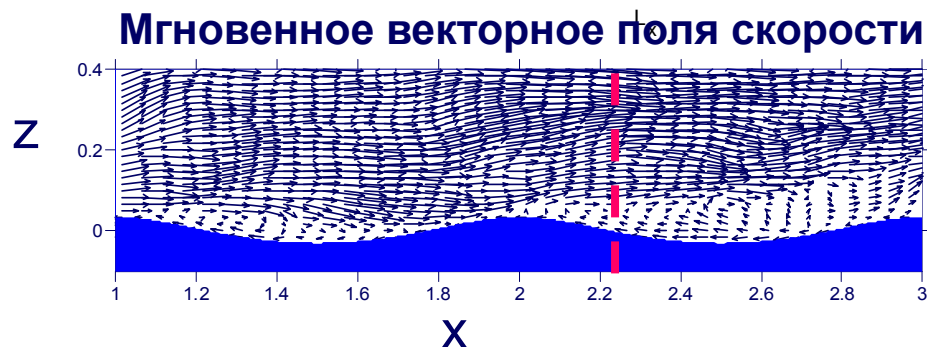
Схема численного эксперимента



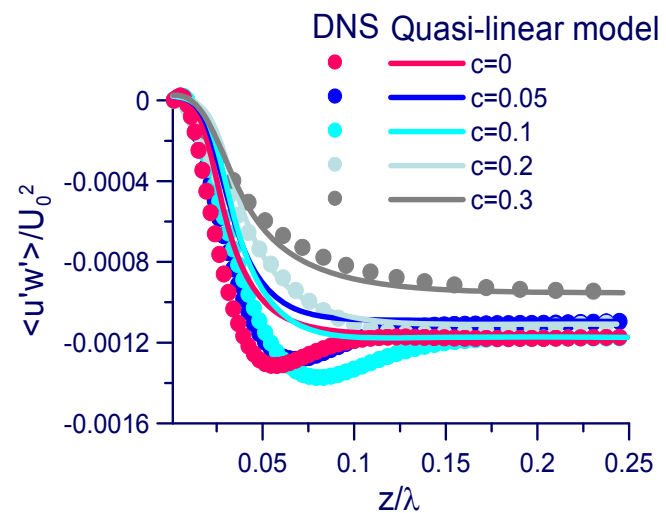
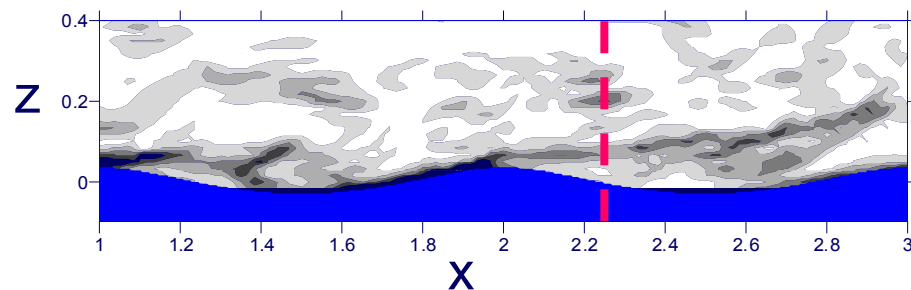
Верхняя граница движется со скоростью U_0

«Шахматная» сетка из $360 \times 240 \times 180$ узлов по x, y, z

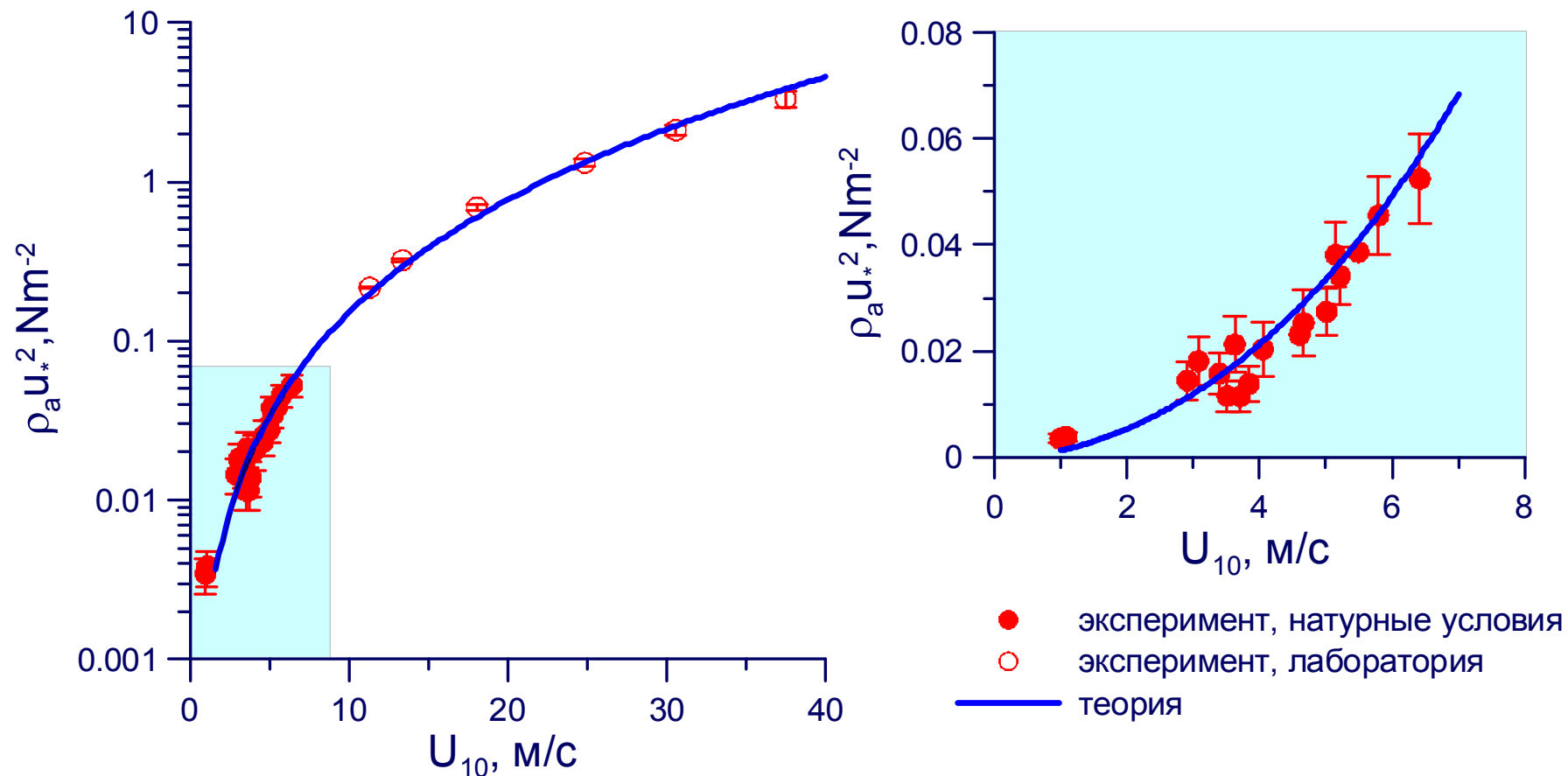
Средние профили скорости и турбулентных напряжений $ka=0.2$, $c/u^*=3.3$



Разрез поля энстрофии (плоскость x, z)



Проверка «квазилинейной» модели приводного пограничного слоя на основе сравнения с натурным и лабораторным экспериментом

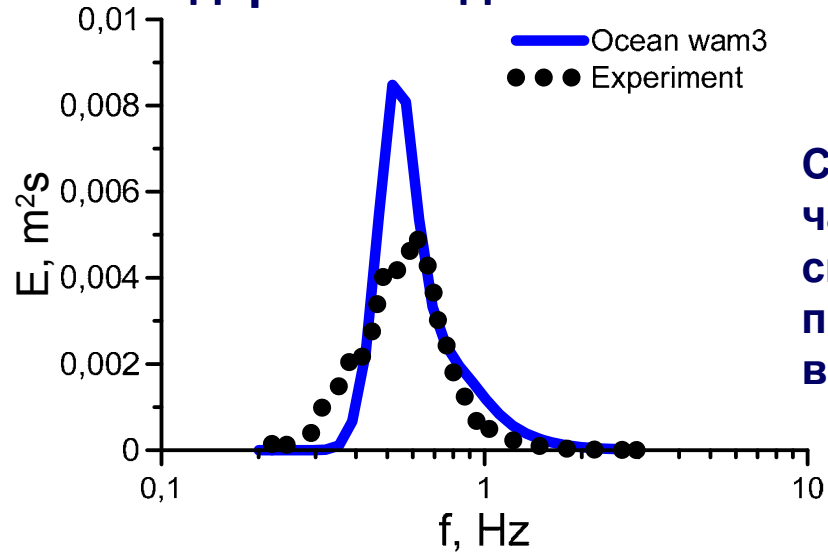


Адаптация модели WAVEWATCH III к условиям Горьковского водохранилища

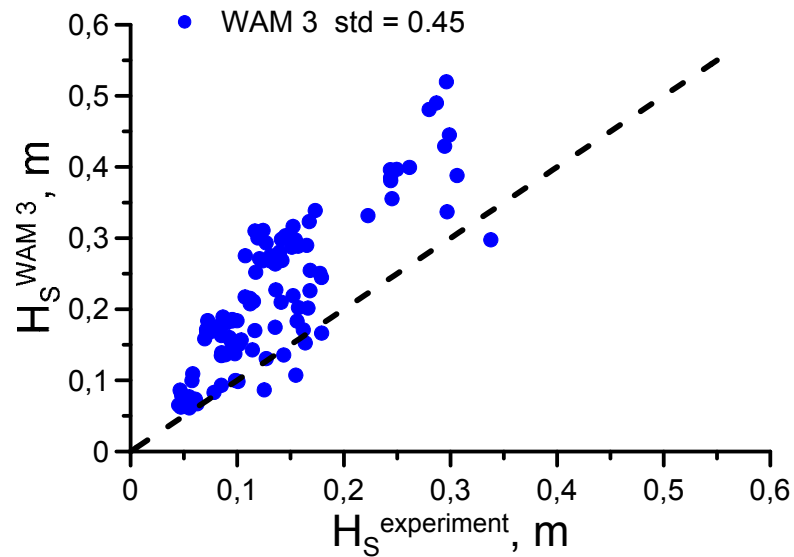
- Расчетная сетка 72 x 108 с разрешением 0,00833°
- 31 частот в интервале 0,2 - 4 Гц, угловое разрешение 6 град.

Значимые высоты волн,
ветер 6.6 м/с, NNE

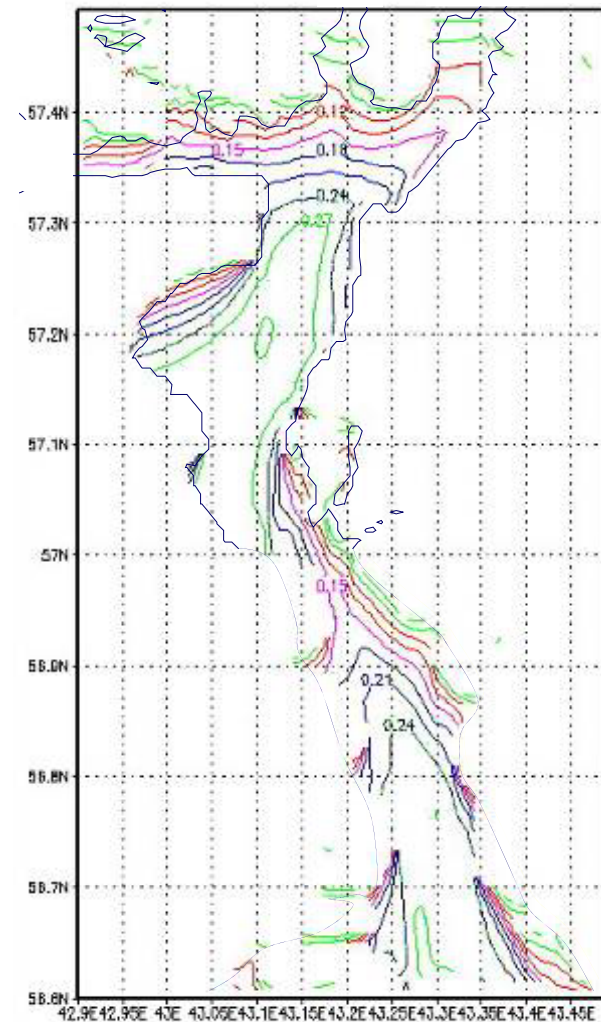
Стандартная модель WWATCH и эксперимент



Сравнение частотных спектров поверхностных волн в точке

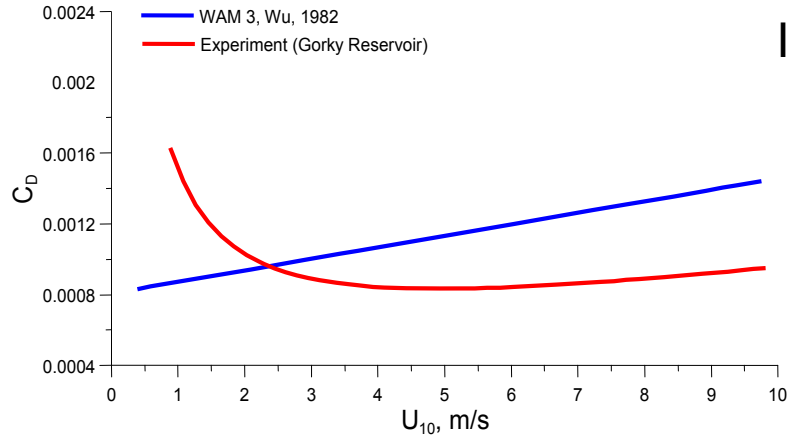


Статистика предсказаний значимых высот волн



Адаптированная модель WWATCH и эксперимент

Закон сопротивления



Ветровой инкремент

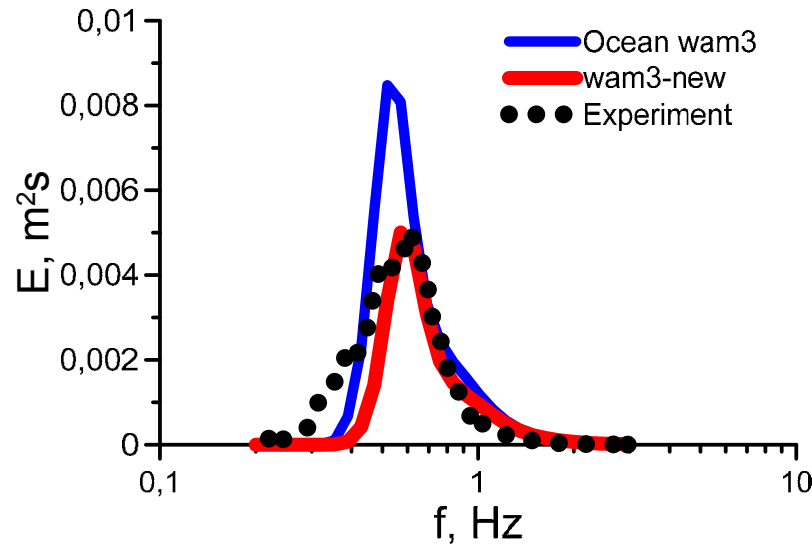
$$\text{Im } \sigma = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[0, \left(\frac{28u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \sigma$$

$C_{in} = 0.25$ – постоянная,

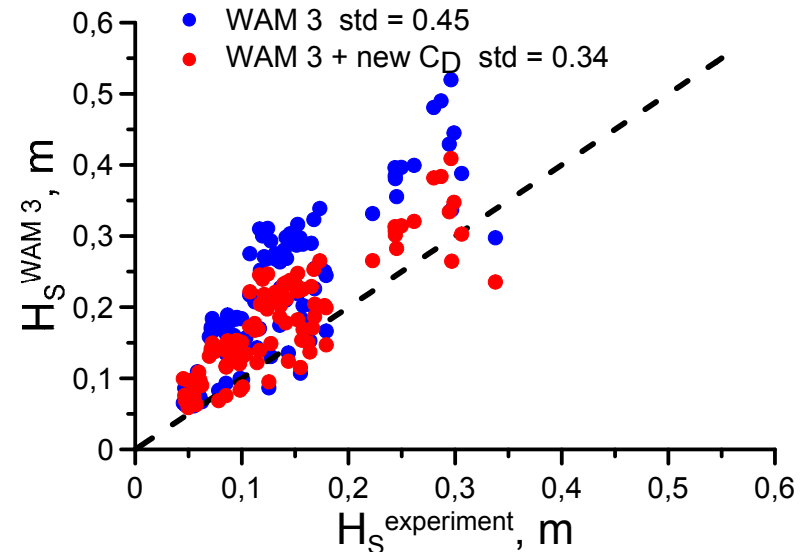
ρ_a / ρ_w – отношение плотностей воздуха и воды

θ_w – основное направление ветра

Сравнение частотных спектров поверхностных волн в точке

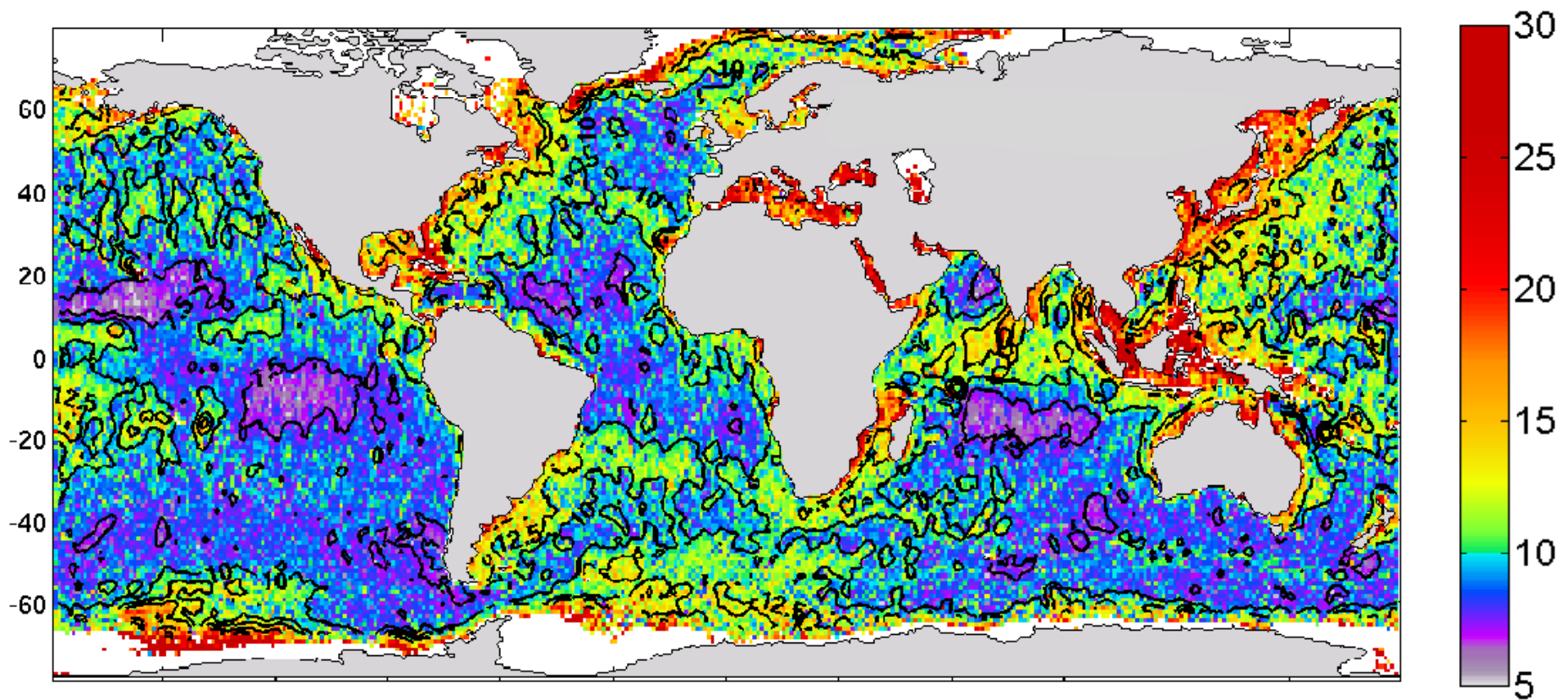


Статистика предсказаний значимых высот волн



Normalized RMS error for the modelled significant wave heights for the year 2005, against data from Jason-1, Jason-2 and Envisat altimeters.

(Ardhuin et.al., Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. JPO, v. 40, pp.1917-1941, 2010)



Основные результаты по исследованию волнения и ветра на внутренних водоемах

создана и верифицирована на основе натуральных экспериментов, физического и прямого численного моделирования теоретическая модель и параметризация приводного пограничного слоя атмосферы, применимая при скоростях ветра от умеренных до ураганных. Показано, что ее использование в численной модели волнения позволяет заметно улучшить прогноз высоты волн во внутреннем водоеме среднего размера

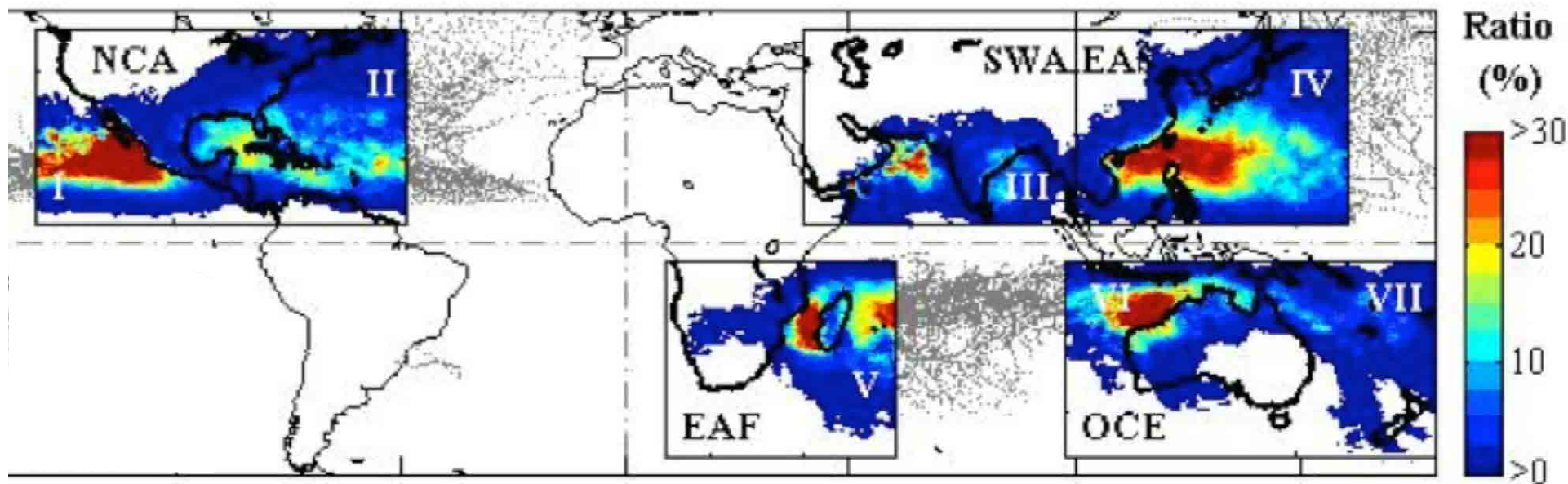
Последние публикации по исследованию волнения и ветра

- Troitskaya Yu., Sergeev D., Ermakova O., Balandina G. Statistical parameters of the air turbulent boundary layer over steep water waves measured by the DPIV technique *Journal of Physical Oceanography*, v 41, N8, p.1421-1453
- Yu.I. Troitskaya, D.A. Sergeev, A.A. Kandaurov, G.A. Baidakov, M.A. Vdovin, V.I. Kazakov: Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117, C00J21, 13pp.
- Druzhinin O.A., Troitskaya Yu.I., Zilitinkevich S.S. 2012: Direct numerical simulation of a turbulent wind over a wavy water surface. *J. Geophys. Res.* V. 117. C00J05.
- Troitskaya Yu.I., Sergeev, D.A., Druzhinin O.A., Kandaurov A.A., Ermakova O.S., Ezhova E.V., Esau I., Zilitinkevich S. 2014: Atmospheric boundary layer over steep surface waves. *Ocean Dynamics*. V. 64. P. 1153–1161.
- Druzhinin O. A., Yu. I. Troitskaya, S.S. Zilitinkevich “Stably stratified airflow over a wavy water surface. Part 1: Stationary turbulence regime” *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2015) DOI:10.1002/qj.2677
- Druzhinin O. A., Yu. I. Troitskaya, S.S. Zilitinkevich “Stably stratified airflow over a wavy water surface. Part 2: Wave-induced pre-turbulent motions” *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2015) DOI:10.1002/qj.2678
- Kuznetsova A.M., Baydakov G.A., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I. Adjusting of wind input source term in WAVEWATCH III model for the middle-sized water body on the basis of the field experiment, *Advances in Meteorology*, 2016, vol. 1, article ID 574602, pp. 1-13.
- Kuznetsova A.M., Baydakov G.A., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I., Field and numerical study of the wind-wave regime on the Gorky Reservoir. // *Geography, environment, sustainability*, 2016, N2, p.

Исследование особенностей тепло-массо-энергообмена при штормовых условиях

Вклад ураганов суммарное количество осадков на суше

Prat, O. P., and B. R. Nelson (2013), Mapping the world's tropical cyclone rainfall contribution over land using the TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis, *Water Resour. Res.*, 49, 7236–7254



Экстремумы

La Paz (Mexico) NCA 38.4 68.0

Karachi (Pakistan) SWA 5.8 61.6

Taipei (Taiwan) EAS 29.9 53.0

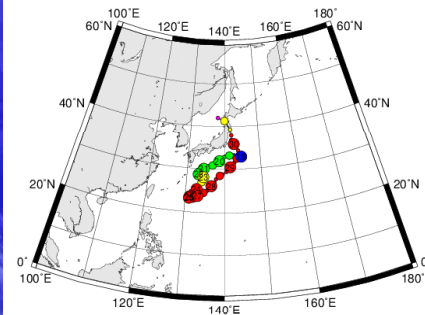
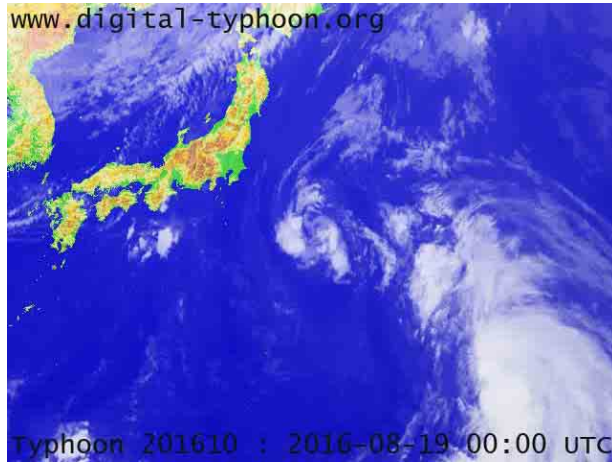
St Denis (La Reunion-France) EAF 21.7 47.1

Port Hedland (Australia) OCE 30.4 71.8

Условия, когда реализуется штормовой или ураганный ветер

Тропические циклоны

Typhoon 201610 (LIONROCK)



Внетропическое проникновение ТЦ

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. В 2015 г. - 7 экс-ТЦ

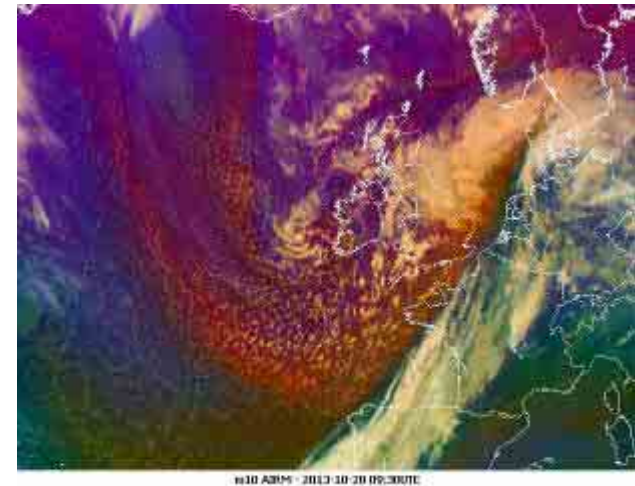
Quasi-tropical cyclone of mid latitudes

Black sea 27 September 2005 15 Dec 2005, 11:25 UTC, Terra MODIS



Storm St. Jude, 2013

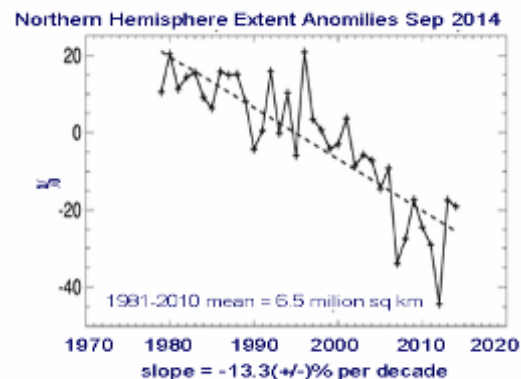
27 October 18:00 UTC–28 October 09:30 UTC



Условия, когда реализуется штормовой или ураганный ветер



Polar lows



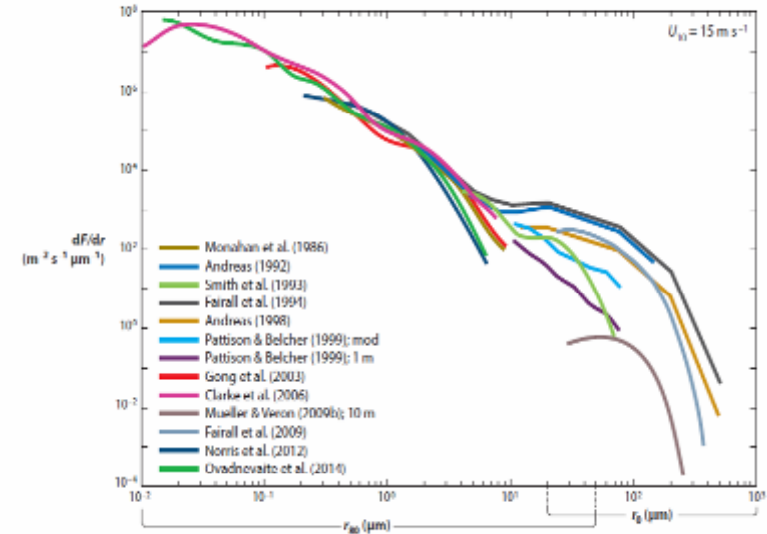
Animation 13-16 October 1993.

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

Типы мезомасштабных циклонов над восточной Арктикой
 Кромка льда, центральная часть окклюзированных циклонов, орография. Размеры ≤ 200 км, спирали $\approx 90\%$, облачные запытые $\approx 10\%$ (период август-октябрь 2012-2013 гг.)

<p>Западная граница моря Бофорта</p> <p>Aqua MODIS 16.09.2013 19:55 UTC</p>	<p>Чукотское море</p> <p>Aqua MODIS 30.08.2012 23:00 UTC</p>	<p>Восточно-Сибирское море</p> <p>Terra MODIS 04.10.2012 11:01 UTC</p>
<p>Карское море</p> <p>Aqua MODIS 24.08.2013 06:35 UTC</p>	<p>Север Восточно-Сибирского моря</p> <p>Aqua MODIS 05.09.2007 00:05 UTC</p>	<p>Карское море</p> <p>Terra MODIS 29.09.2012 08:00 UTC</p>

Брызги – наименее изученный фактор, действующий в пограничном слое атмосферы



Неопределенность числа брызг достигает 3 порядков

Причинами этой неопределенности являются

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

Поверхность воды под действием штормового ветра при разной скорости съемки



- Dimensions of the channel
- 10m x 0.4m x 0.4 m
- centerline airflow 3 - 25 m/s
- equivalent 10-m neutral wind speed U_{10} 4 - 40 m/s,

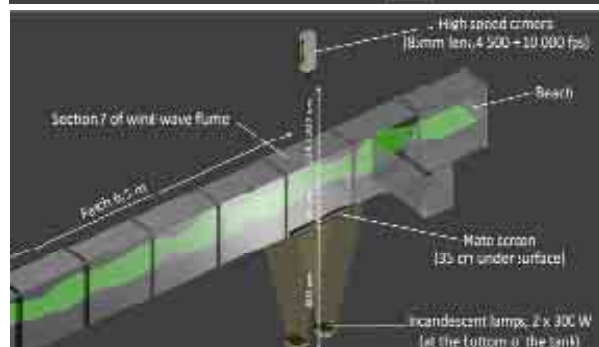
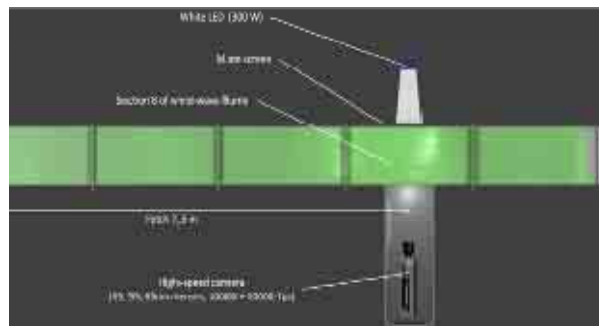
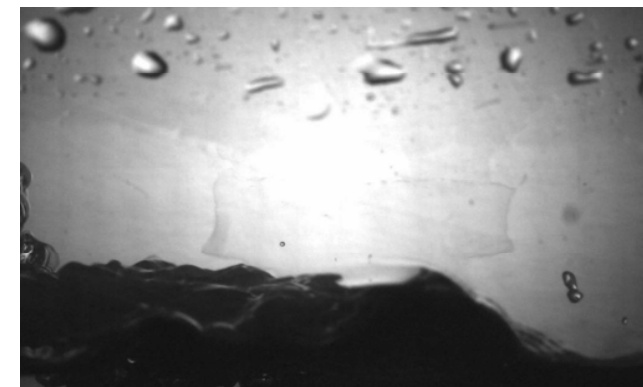
25 кадров в секунду



2000 кадров в секунду



10000 кадров в секунду

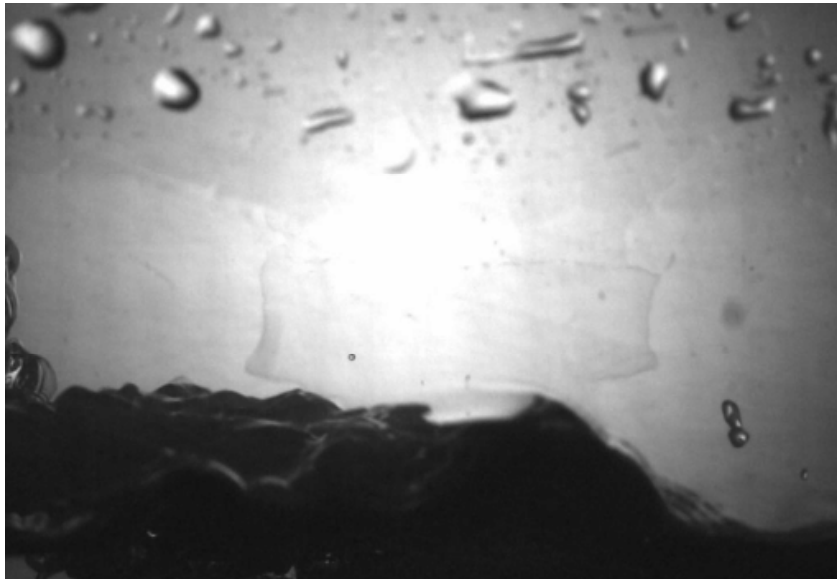


MEMRECAM HX-3
High Speed Camera System



Imaging Formats	Max fps @ Format
High Def: 16 X 9	
1920 X 1080	4,670
1280 X 720	10,230

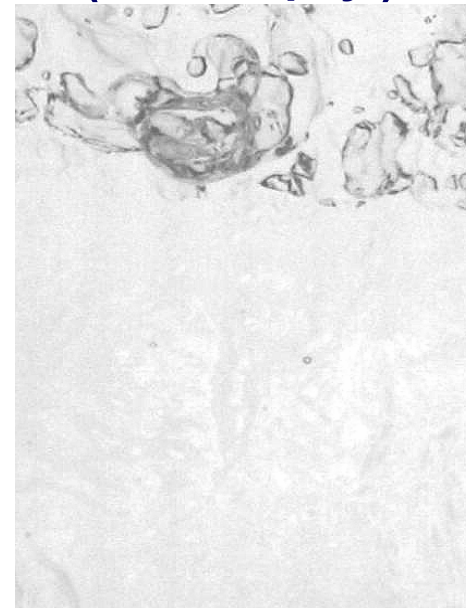
Генерация брызг на гребнях волн (“bag breakup”) (вид сбоку)



Скорость ветра $U_{10}=27.7$ m/s
Ширина 74 mm

$f = 85$ mm (Samyang 85 mm f/1.4)
Distance = 65 cm
Scale = 73 $\mu\text{m}/\text{px}$
10000 fps

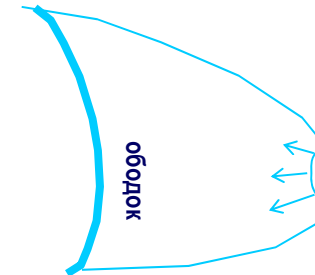
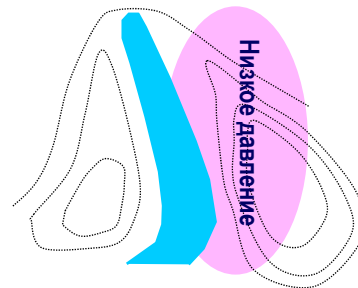
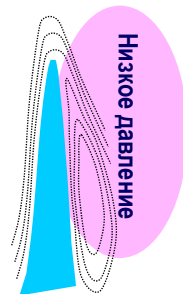
Генерация брызг на гребнях волн (“bag breakup”) (вид сверху)



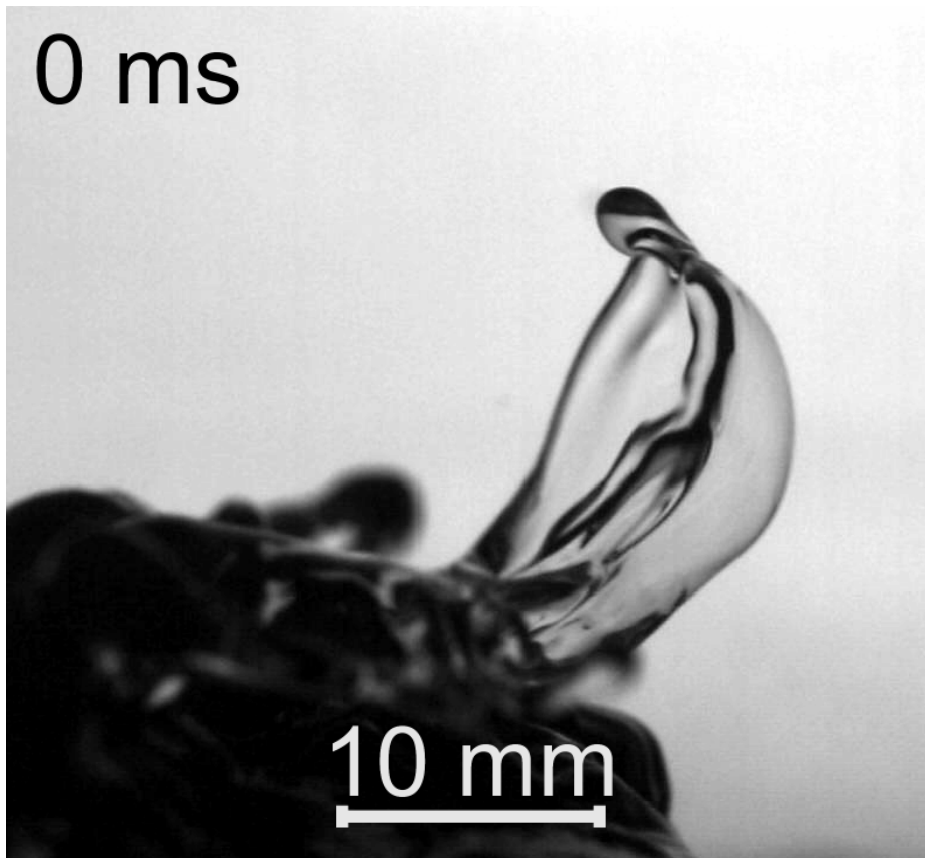
Скорость ветра $U_{10}=26.7$ m/s
Ширина 70 mm

$f = 85$ mm (Samyang 85 mm f/1.4)
Distance = 207 cm
Scale = 256 $\mu\text{m}/\text{px}$
4500 fps

Низкое давление



Тонкий ободок



10 mm

«Bag breakup»

(вид сбоку)

Скорость ветра

$$U_{10} = 27.8 \text{ m/s}$$

• $f = 55 \text{ mm}$

Samyang 85 mm f/1.4

• Distance = 65 cm

• Scale = $73 \mu\text{m}/\text{px}$

• 2000 fps

Линейный размер ~ 1 см

Время жизни ~ 1-10 мс

Влияние “bag-breakup” на поток энтальпии влажного воздуха

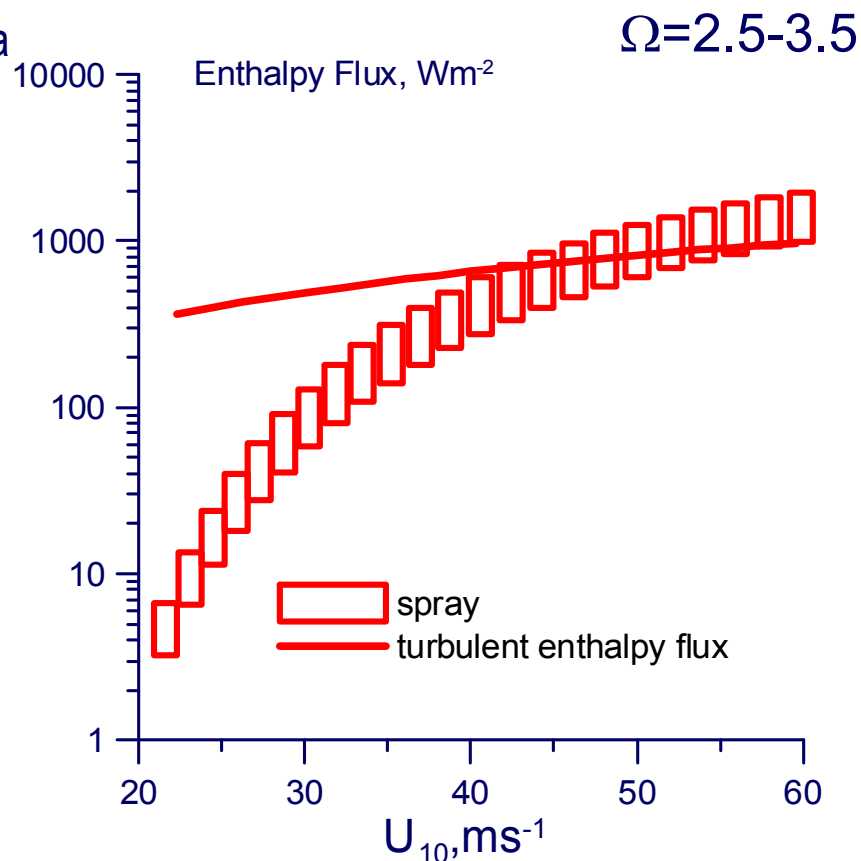
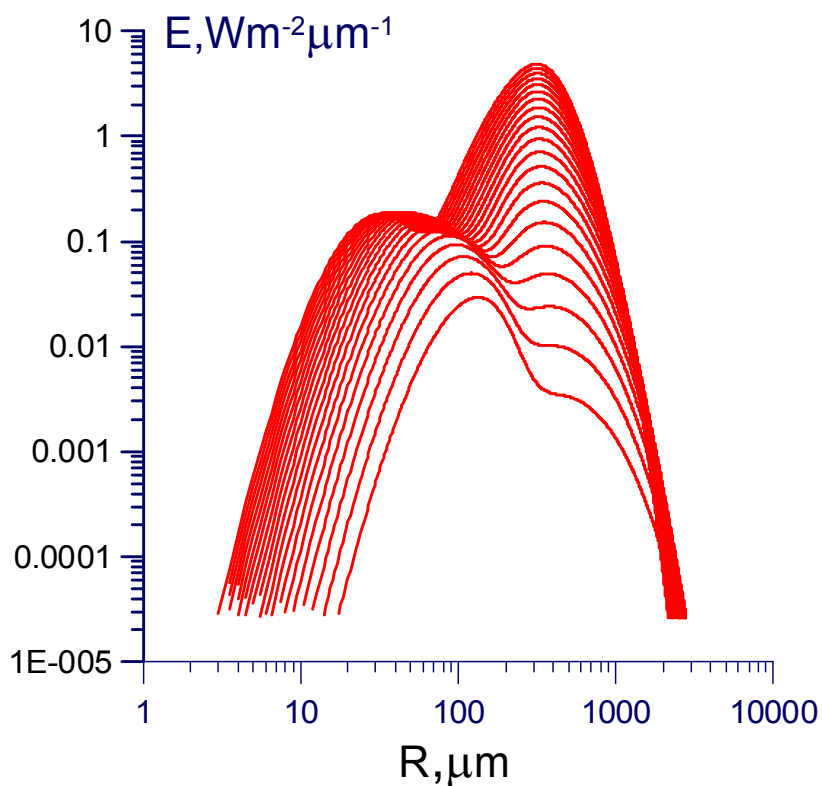
Поток энтальпии влажного воздуха равен потоку явного тепла за счет разности между температурами поверхности воды и возвращающихся «капель»

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

Явное тепло от одной капли

$$Q_S(r_0) = \rho_w C_{pw} (T_w - T_{eq}) (1 - \exp(-\tau_f / \tau_T))$$

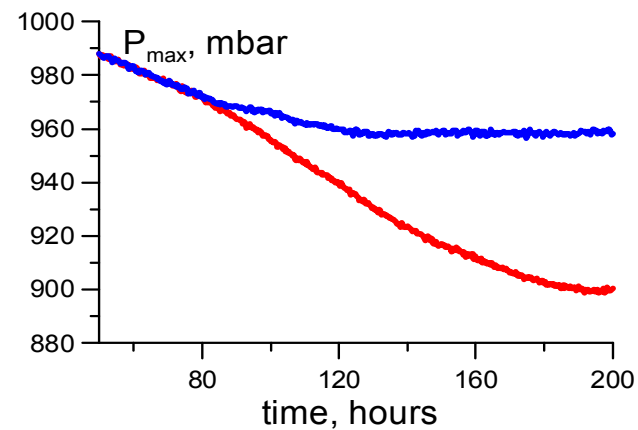
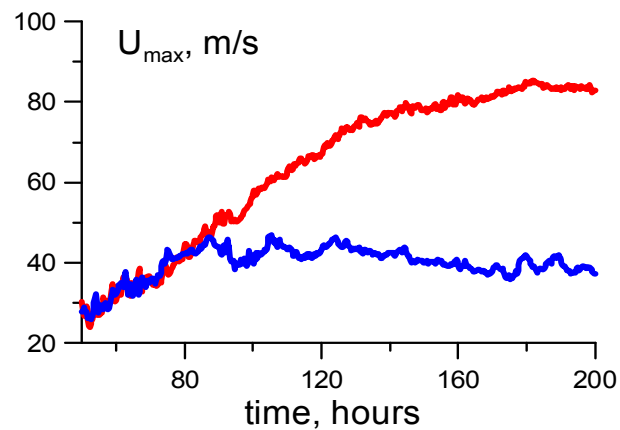
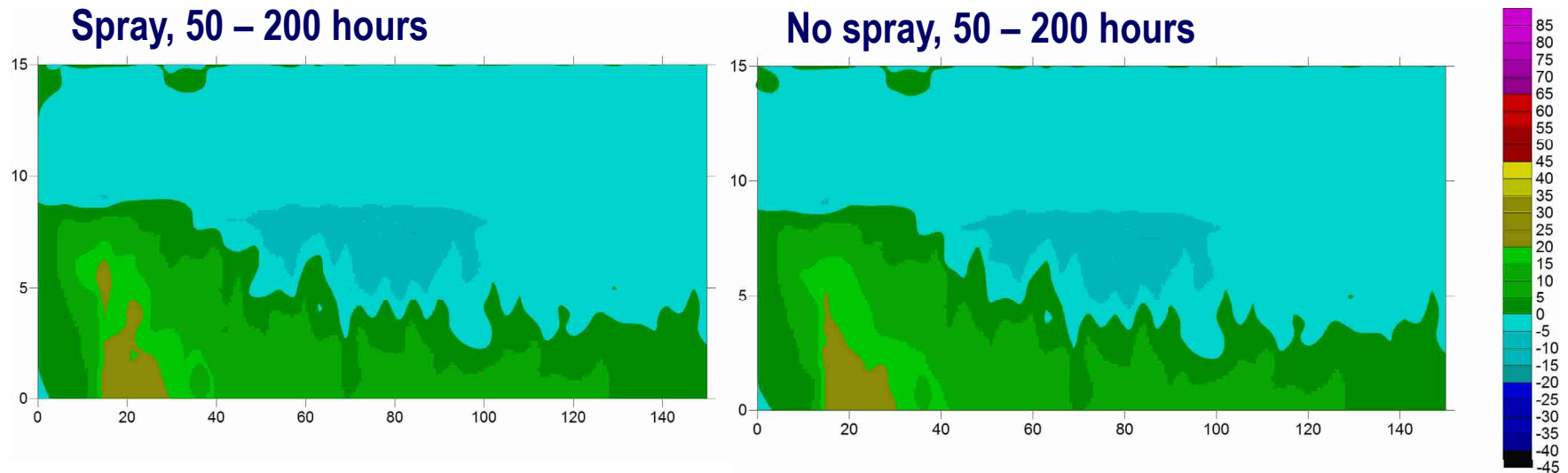
Вклад капель в поток энтальпии влажного воздуха



Осесимметричная негидростатическая численная модель Emanuel and Rotunno (1989)

Азимутальная скорость ветра

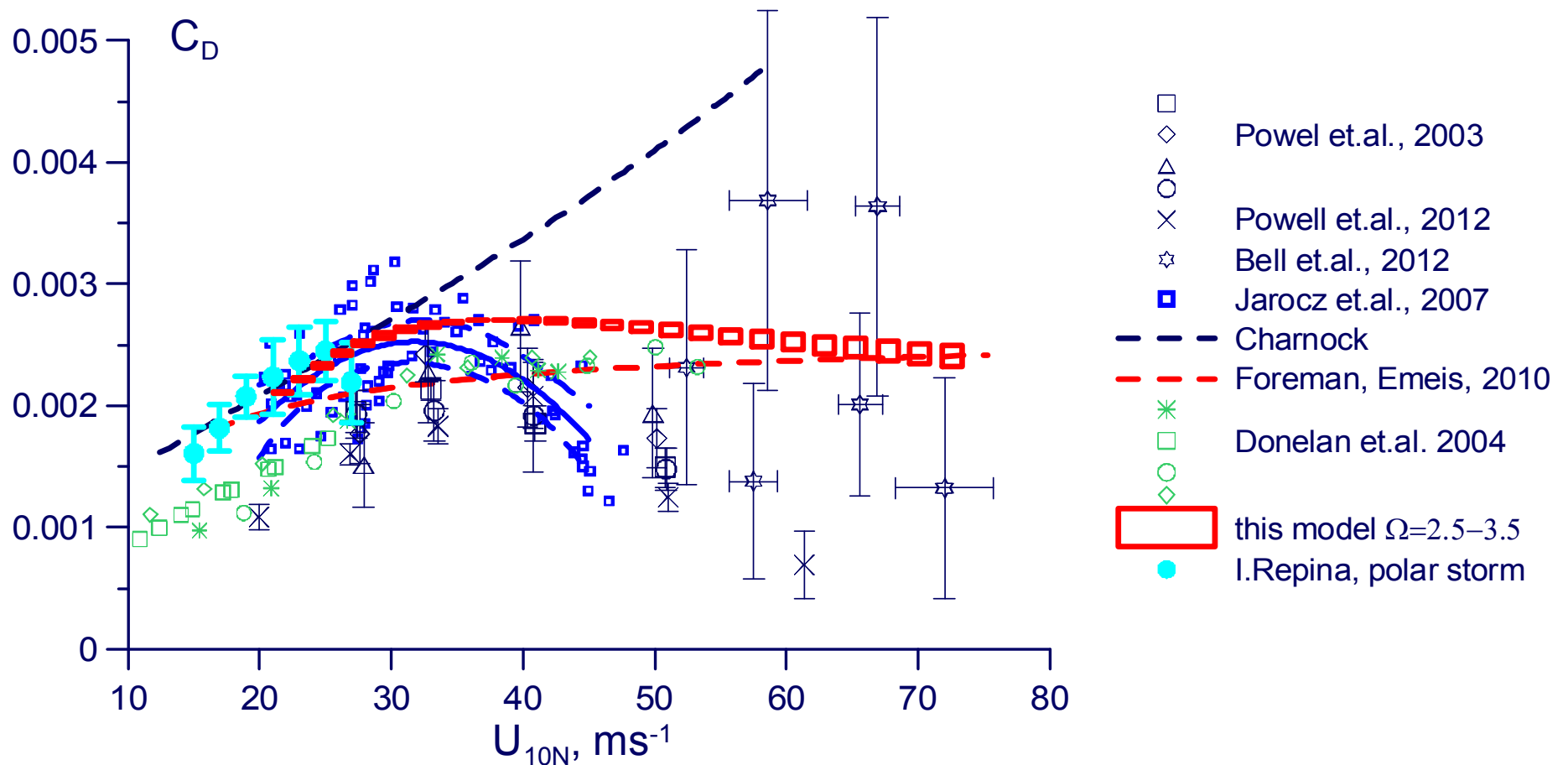
U(m/s)



Влияние “bag-breakup” на перенос импульса

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 “bag-breakup” 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

$$r(\tau_f) = r_{eq} + (r_0 - r_{eq}) \exp(-\tau_f / \tau_r)$$

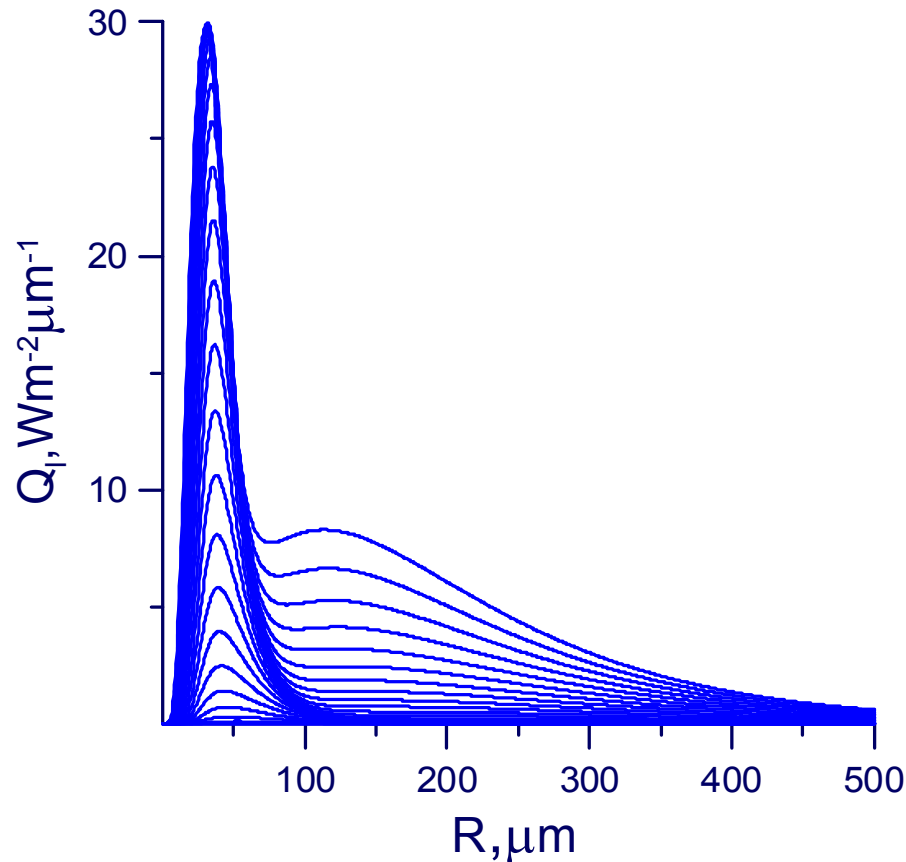
- радиус капли, падающей в воду

$$\tau_f = \frac{Z_s}{u_f(r_0)}$$

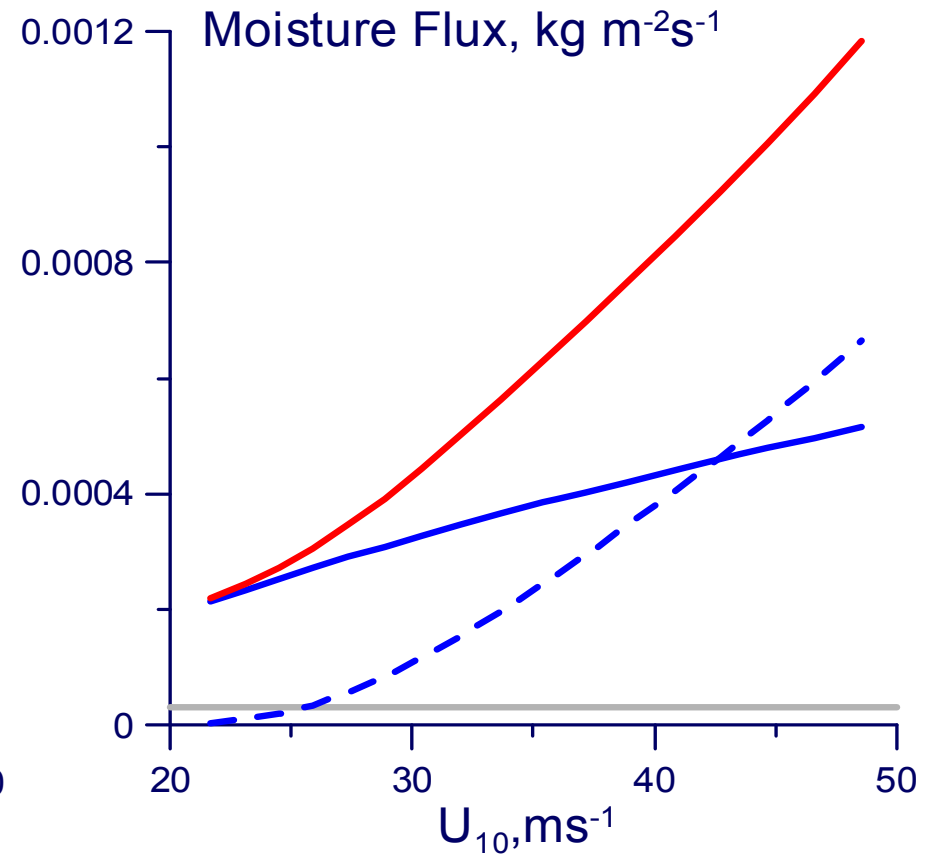
- Время нахождения капли в воздухе до падения в воду $Z_s = 0.635 H_s$; $H_s = 0.018 U_{10}^2 \Omega^{-1.5}$

Zhao et al, 2006

Вклад капель в скрытое тепло



$\Omega = 2.5$, $RH = 80\%$



Основные результаты по исследованию процессов обмена и генерации брызг при штормовом ветре

показано, что основным механизмом генерации брызг при штормовом ветре является "bag-breakup"-режим фрагментации жидкости в потоке газа, предложено его теоретическое описание, показано что усиление энергообмена между атмосферой и водным слоем за счет брызг позволяет объяснить быстрое развитие интенсивных штормов; показано, что при сильном ветре брызги значительно увеличивают поток влаги в атмосферу.

Публикации

- Troitskaya, Y., Ezhova, E., Soustova, I. et al. On the effect of sea spray on the aerodynamic surface drag under severe winds. *Ocean Dynamics* (2016) 66: 659.
- Yu. Troitskaya, D. Sergeev, A. Kandaurov, E. Ezhova, O.Druzhinin, I.Soustova, O.Ermakova, M.Vdovin Small-scale atmosphere-ocean coupling in gale force winds: models, experiments,remote sensing Report Series in Aerosol Science (2015 г.)
- Yu. Troitskaya, A. Kandaurov, O.Ermakova, D. Sergeev, D. Kozlov, S.Zilitinkevich Fuel for hurricanes: bag-breakup fragmentation and sea spray giant droplets”. *Nature. Sci.reports*, submitted

Результаты

Динамика турбулентных затопленных струй и следов в стратифицированной жидкости

Подтвержденный в условиях масштабного физического моделирования, а также в результате прямого и вихреразрешающего численного моделирования механизм поверхностных проявлений подводных стоков пресных вод естественного и антропогенного происхождения, обусловленный генерацией внутренних волн плавучими струями

Теоретическая модель турбулентного следа за телом в стратифицированной жидкости и ее экспериментальная проверка

Публикации

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И.

Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1.

Механизм генерации внутренних волн., Известия РАН. ФАО, т.45, №6, 2009. Т. 45. № 6.С. 833–845.

Часть 2. Структура внутренних волн // Известия РАН. ФАО. 2010. Т. 46. № 3. С. 376-389 Часть 3.

Поверхностные проявления внутренних волн // Известия РАН. ФАО. 2010. Т. 46. № 4. С. 519-529

Дружинин О.А., Троицкая Ю.И. Автогенерация внутренних волн фонтаном в стратифицированной жидкости // Изв. РАН МЖГ. 2010. № 3. С. 147-158

O.A.Druzhinin, Troitskaya Yu. I. Regular and chaotic dynamics of a fountain in a stratified fluid // CHAOS. 2012. V. 22, 023116; doi:10.1063/1.4704814. 14PP.

Druzhinin O.A., Troitskaya Yu.I. Excitation of internal waves by a turbulent fountain in stratified fluid. Fluid Dynamics, №6, 2013, pp.122-132.

G.V. Balandina, V.V. Papko, D.A. Sergeev, Yu.I. Troitskaya,. Evolution of the far turbulent wake behind a body towed in stratified fluid with large Reynolds and Froude numbers. Izv. Atmospheric and Oceanic Phys., 2004, v.40, №1, p. 99-113.

Yu. I.Troitskaya, D.A.Sergeev, O.A.Druzhinin, V.V.Papko, G.N.Balandina A theoretical model of a wake of a body towed in a stratified fluid at large Reynolds and Froude numbers Nonlinear Processes in Geophysics, v.13, p.247-253, 2006.

Дружинин О.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Лабораторное и численное моделирование течения в дальнем следе в стратифицированной жидкости // Изв. РАН. ФАО.2006, Т. 42. №5. С. 1–18.

Результаты

Модель формирования аномалий в поле поверхностных волн в присутствии неоднородных течений и ветра

механизм модуляция скорости роста поверхностных волн в присутствии неоднородных течений
проявление зыби и цунами в радиолокационном сигнале, рассеянном поверхностью моря

Публикации

- Troitskaya, Yu.I. Modulation of the growth rate of short capillary-gravity wind waves by a long wave. *J. Fluid Mech.* V.273. P. 169-187. 1994.
- Yu.I.Troitskaya Mechanism of modulation of the growth rate of short surface waves excited by turbulent wind *Izvestiya RAN Atmospheric and Ocean Physics*, 1997. v.33. N4. p.525-535.
- I.S. Dolina , Yu. I. Troitskaya On a possible mechanism of signature of the bottom topography at the water surface. *Izv. Atmospheric and Oceanic Phys.*, 2002, v.38, №3, p.344-353.
- K.A. Gorshkov, I.S. Dolina and I.A. Soustova, Yu.I.Troitskaya Modulation of short surface waves in the presence of intensive internal waves. Effect of stress modulation. *Izv. Atmospheric and Oceanic Phys.*, 2003, v.39, №15, p.661-672.
- Yu. I. Troitskaya, I. S. Dolina, A. V. Ermoshkin, V. V. Bakhanov, E. M. Zuikova, I. A. Repina, and V. I. Titov Negative Correlations of Variations in Near-Water Wind and Surface Wind Waves , numbers. *Izv. Atmospheric and Oceanic Phys.*, 2008, v. 44, №4, p. .491-506.
- Yu.I.Troitskaya, S.A. Ermakov, Manifestations of the Indian Ocean tsunami of 2004 in satellite nadir-viewing radar backscatter variations *Geophys.Res.Letters* (2006), V. 33, LXXXXX, doi:10.1029/2005GL024445, 2006

Сотрудники отдела нелинейных геофизических процессов, ИПФ РАН, Нижний Новгород



**В.В.Папко, к.ф.-
м.н., СИС**



**Г.А.Байдаков
к.ф.-м.н., МНС**



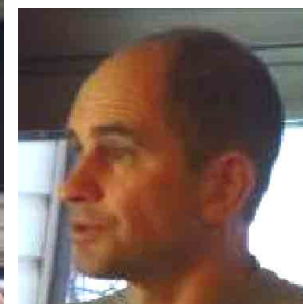
**А.М.Кузнецова
аспирант**



**Г.В.Рыбушкина,
к.ф.-м.н., СИС**



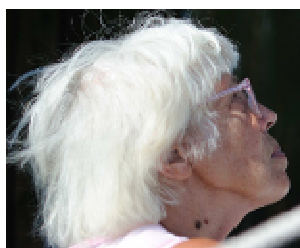
**И.А.Соустова, д.ф.-
м.н., ВИС**



**О.А.Дружинин, д.ф.-
м.н., ВИС**



**Е.В.Ежова, к.ф.-
м.н., ИС**



**Э.М.Зуйкова,
вед.спец.**



**М.И.Вдовин
аспирант**



Е.В.Ермошкин, ИС



**О.Н.Лисина
инженер**



**Н.А.Богатов
программист**



**А.А.Кандауров,
к.ф.-м.н., ИС**



**Д.А.Сергеев, к.ф.-
м.н., зав.лаб**



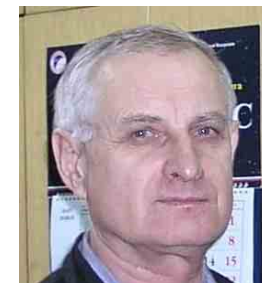
**О.С.Ермакова, к.ф.-
м.н., ИС**



**Д.В.Козлов
студент**



**В.И.Казаков нач.
стенда**



**Д.П.Коротков,
вед.спец.**