



Подспутниковые измерения приводного ветра и поверхностного волнения во внутреннем водоеме (на примере Горьковского водохранилища)

*Ю.И.Троицкая¹, В.В.Папко¹, Г.В.Рыбушкина¹,
Г.А.Байдаков¹, М.И.Вдовин¹, А.В.Ермошкин¹,
А.А.Кандауров¹, А.А.Панютин²*

Институт прикладной физики РАН,
Верхневолжское УГМС-Ц
Нижний Новгород

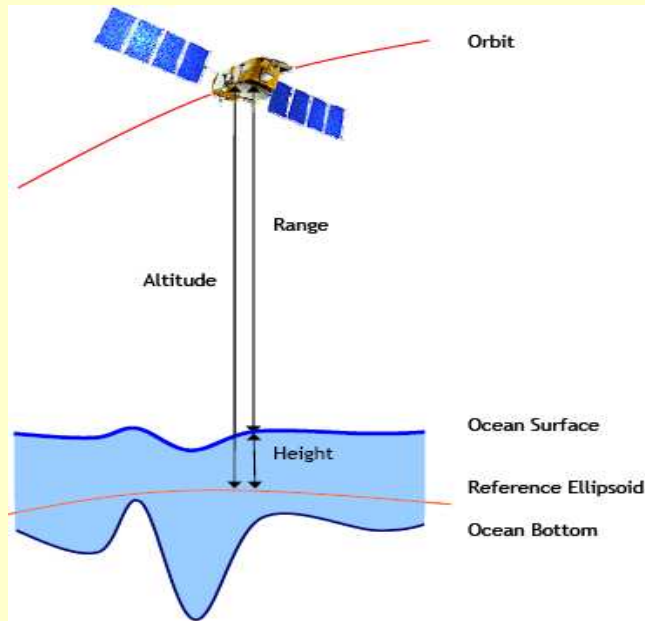


Содержание

1. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов (алгоритм восстановления уровня воды и значительной высоты волнения)
2. Конструкция автономной буйковой станции для исследования пограничных слоев атмосферы и гидросферы
3. Данные измерения ветра и волнения на акватории Горьковского водохранилища в августе-сентябре 2011 г.
4. О сопоставлении экспериментальных данных о ветре и волнении и теоретических предсказаний, а также спутниковых данных
5. Выводы



Спутниковая альтиметрия



Alt

— высота орбиты спутника относительно отсчетного эллипсоида с экваториальным радиусом 6378.1363 км и эксцентриситетом 1.298257 (altitude)

Range

— высота спутника над поверхностью моря

h

— высота морской поверхности с учетом ряда поправок (ΔH_i), связанных с прохождением радиосигнала через атмосферу, инструментальными ошибками и состоянием подстилающей поверхности

$$h = Alt - Range - \sum \Delta H_i$$

Помимо этого спутниковая альтиметрия позволяет анализировать:

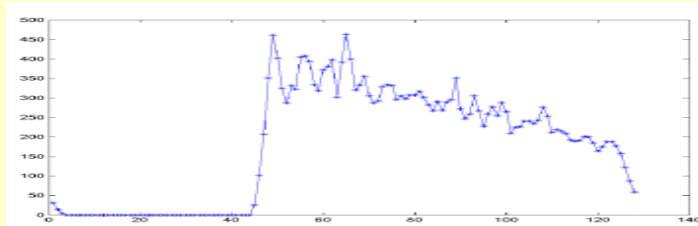
- скорость приводного ветра
- существенную высоту волн

В открытом океане погрешности измерения высоты поверхности воды – 3.4 см, высоты волн 0.4 м или 10% скорости ветра 1.5 м/с

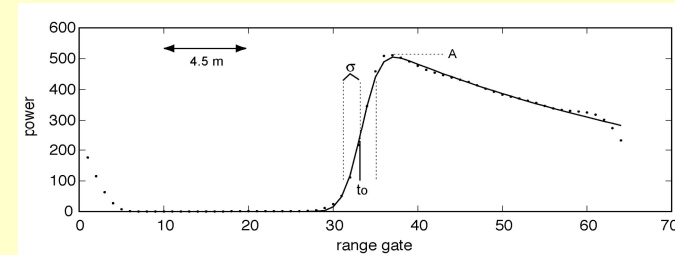


В открытом океане

Форма импульса в открытом океане



Форма импульса по ф. Брауна



$$P\left(t - \frac{2h}{c}\right) = \frac{P_0 \sigma^{(0)}}{2h^4} e^{-\left(\frac{4}{\gamma} + \alpha\right) \frac{(ct-2h)}{h}} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{(ct-2h)}{\sqrt{2} \sqrt{s^2 + c^2 \tau^2}}\right)\right) \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi - \frac{c}{h} \left(t - \frac{2h}{c}\right) \left(\frac{4}{\gamma} \cos 2\xi + \alpha\right)\right] I_0\left(\frac{4}{\gamma} \sin 2\xi \sqrt{\frac{c}{h} \left(t - \frac{2h}{c}\right)}\right)$$

Аппроксимация импульса формулой Брауна (Ocean-1,2 re-tracking)

$t_0 = 2h/c$ - расстояние от орбиты до поверхности воды

$SWH = 2s$ - высота волн

A - магнитуа импульса - параметр шероховатости поверхности, связанный со скоростью ветра



Треки спутников Jason-1,2 на акваториях некоторых внутренних водоемов



Северный Каспий

Красные - Jason-2, Jason-1 (до маневра в июне 2009 г.)

Сиреневые - Jason-1 (после маневра в июне 2009 г.)

Горьковское вдхр.



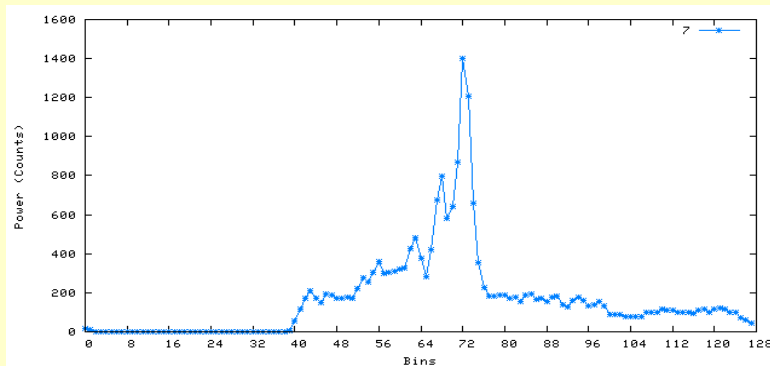
Рыбинское вдхр.



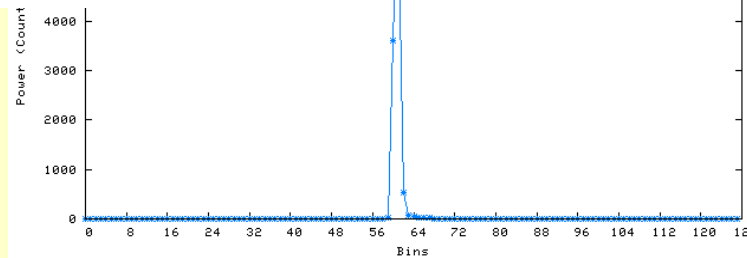


Причины ошибок стандартного алгоритма ретрекинга неправильное определение положения переднего фронта отраженного импульса

Формы импульсов в прибрежной зоне и внутреннем водоеме

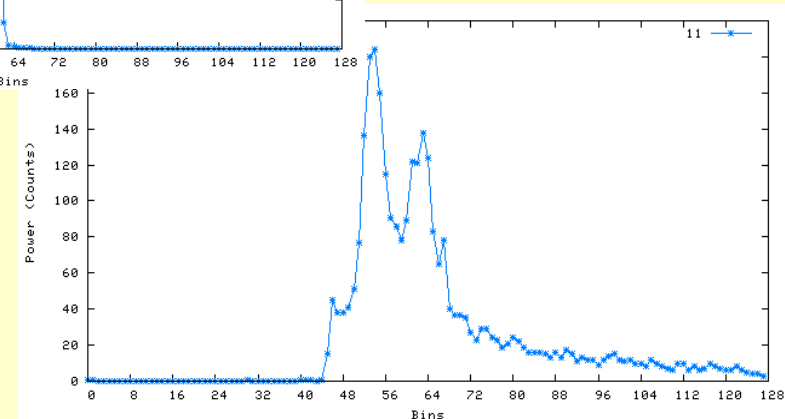


Совместное
отражение
от суши и воды



Квази-
зеркальное,
когерентное
отражение от
глади воды в
устьях и гаванях

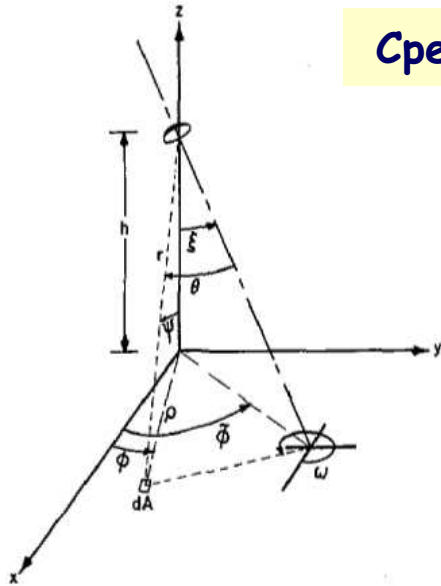
Наличие нескольких
сильно
отражающих объектов





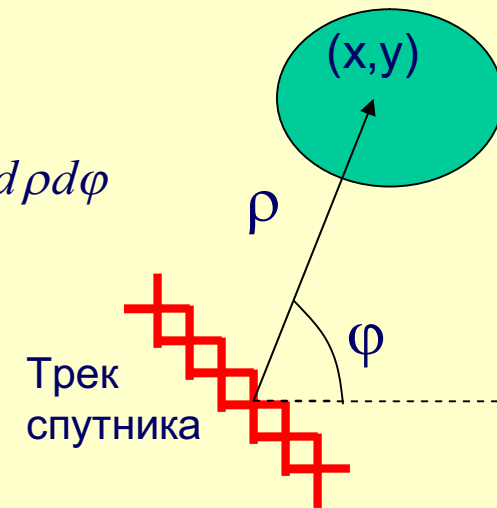
Теоретическая модель формы импульса отраженного сигнала на основе теории некогерентного рассеяния радиоволн (Brown, 1977)

Средний импульс, отраженный шероховатой поверхностью



$$P_i(\tau) = \frac{P_0}{\sqrt{2\pi h^4}} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{\sigma^{(0)}(\rho, \varphi)}{\sqrt{s^2(\rho, \varphi) + c^2 \tau_i^2}} e^{-\left(\frac{4}{\gamma} + \alpha(\rho, \varphi)\right) \frac{\rho^2}{h^2}} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{(c\tau - 2H(\rho, \varphi) - \rho^2/h)^2}{2(s^2(\rho, \varphi) + c^2 \tau_i^2)} \right\} \rho d\rho d\varphi$$



Параметры в формуле - функции координат на поверхности.

Для воды

H - высота уровня воды

S существенная высота

волнения

σ зависит от скорости ветра

Для суши

Высота H определяется топографией

S - шероховатостью поверхности

σ определяется отражающими

свойствами поверхности

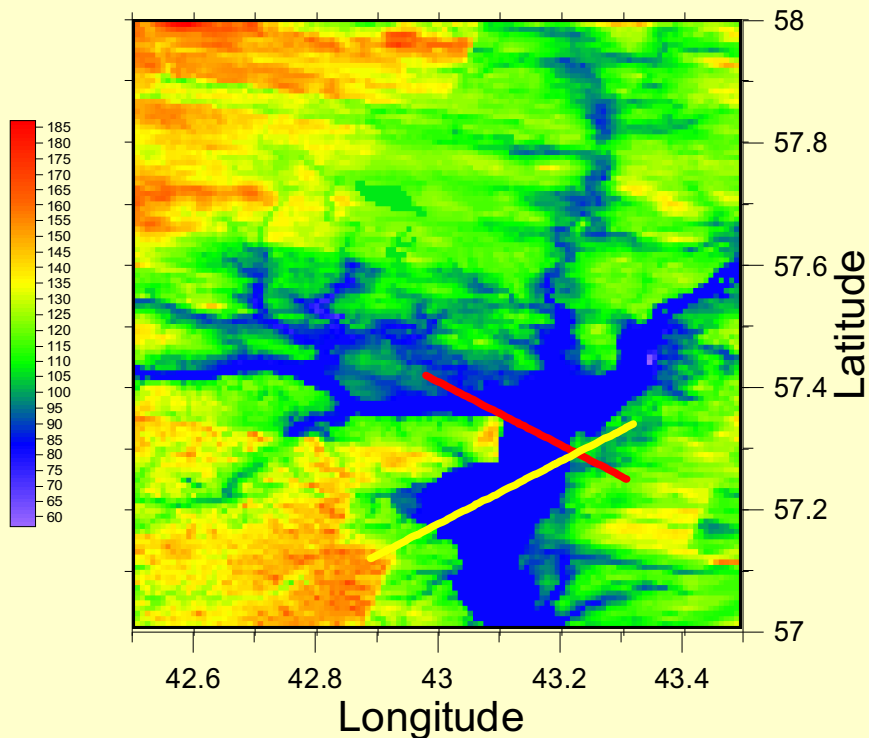
S и σ зависят от ρ и φ

Для расчетов необходимы данные о топографии и отражающих свойствах суши и воды

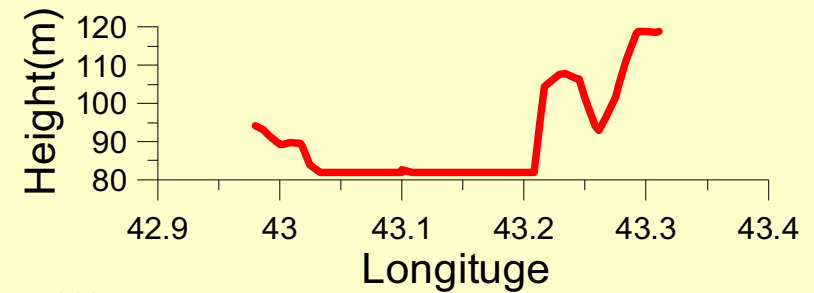


Топография поверхности Земли в окрестности Горьковского вдхр

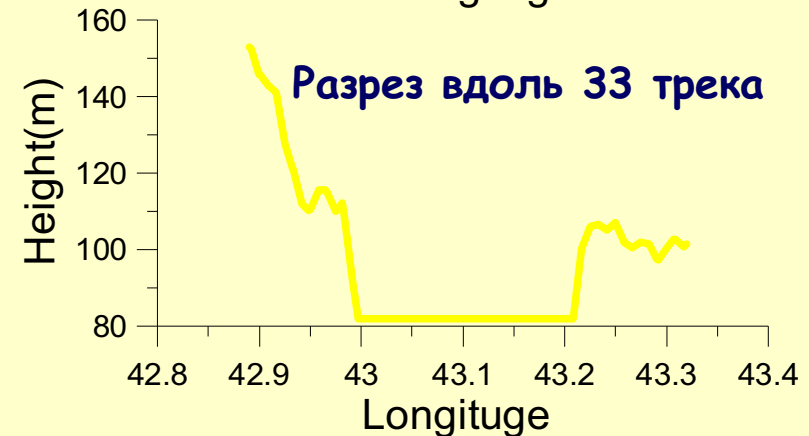
Global Land One-km Base Elevation Project (GLOBE). Digital data base on the World Wide Web (URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>)



Разрез вдоль 142 трека



Разрез вдоль 33 трека



Коэффициент обратного рассеяния на порядок меньше, чем для воды



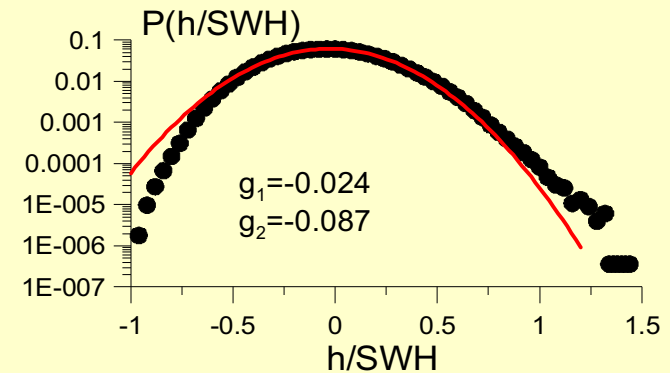
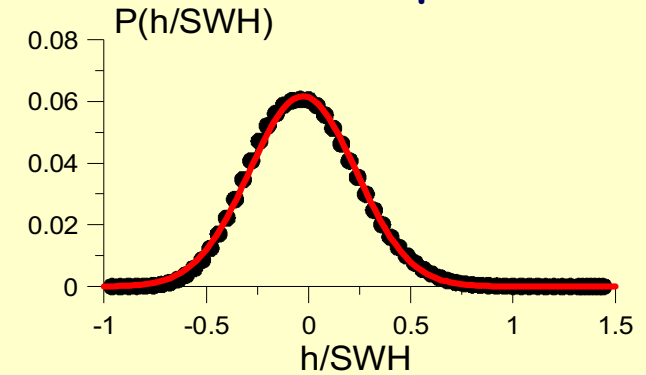
Функция распределения вероятности зеркальных точек и значительная высота волн



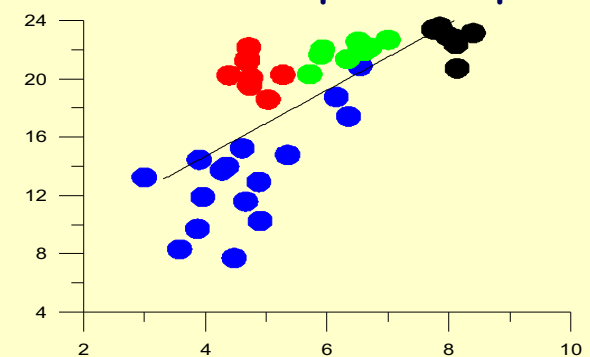
Автономная
буйковая станция
на базе вежи
Фруда



Плотность вероятности возвышения поверхности воды



SWH от скорости ветра



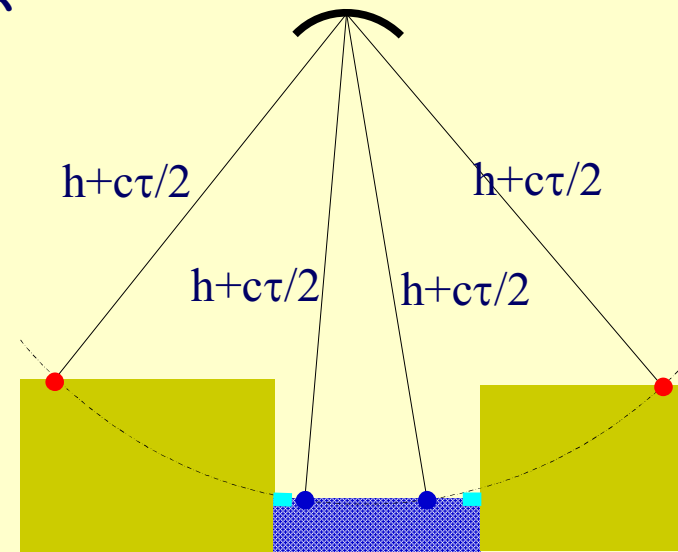
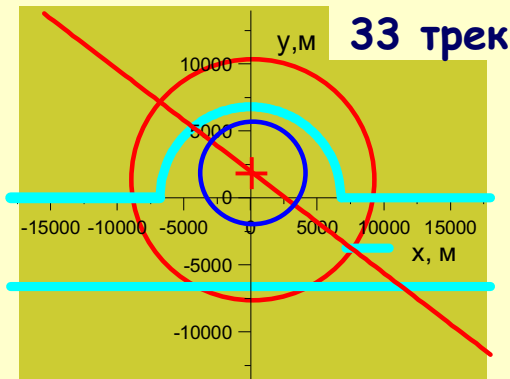
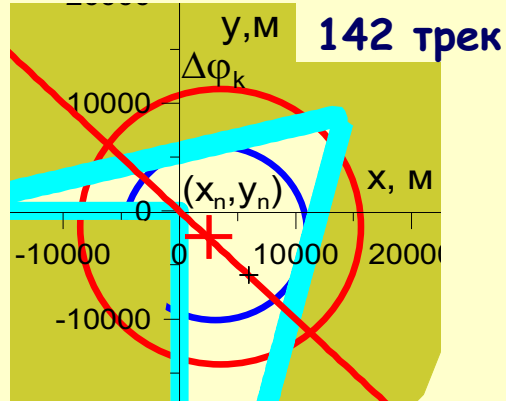


Слики вблизи береговой линии (шириной 10-30 м)





Кусочно-постоянная топографическая модель отражающей поверхности Горьковского водохранилища



Земля - зеленый, $H = 20\text{m}$
 Вода - синий, $H = 0$
 Прибрежные слики - голубой

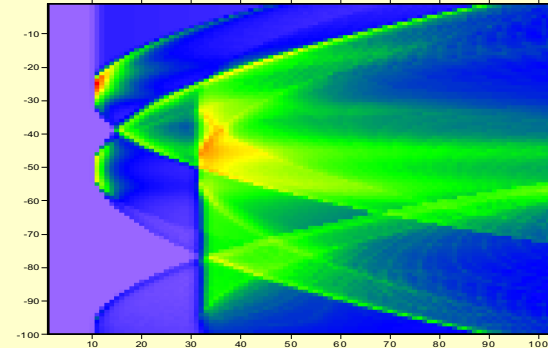
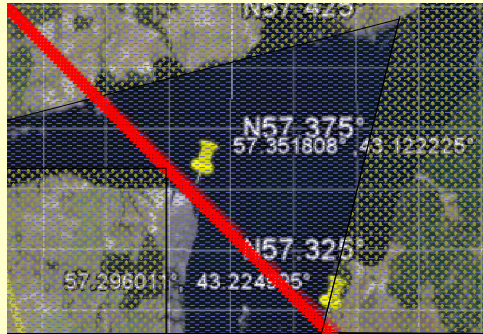
Средний отраженный импульс для кусочно- постоянной модели отражающей поверхности в районе Горьковского вдхр. $P_i(\tau) = P_{water}(\tau) + P_{land}(\tau) + P_{coast}(\tau)$

Вклад воды и суши, (k=вода,суша)

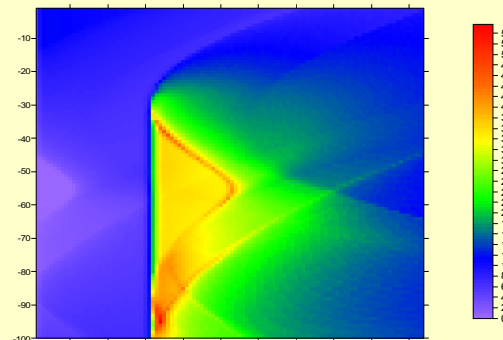
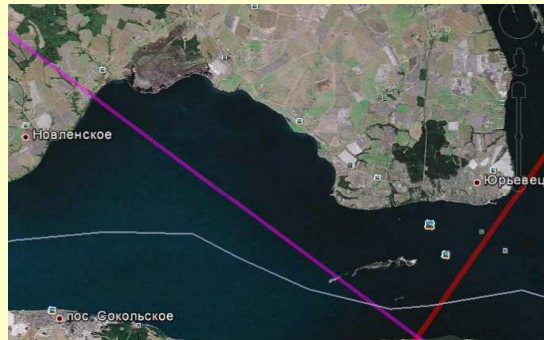
$$P_k(\tau) \propto \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(c\tau - 2H_k)}{\sqrt{2} \sqrt{s_k^2 + c^2 \tau_i^2}} \right) \right)$$



Модельные формы импульсов для кусочно-постоянной модели поверхности в районе Горьковского водохранилища

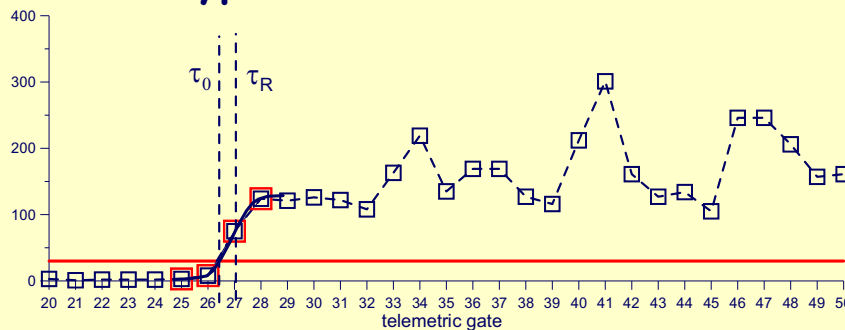


142 трек



33 трек

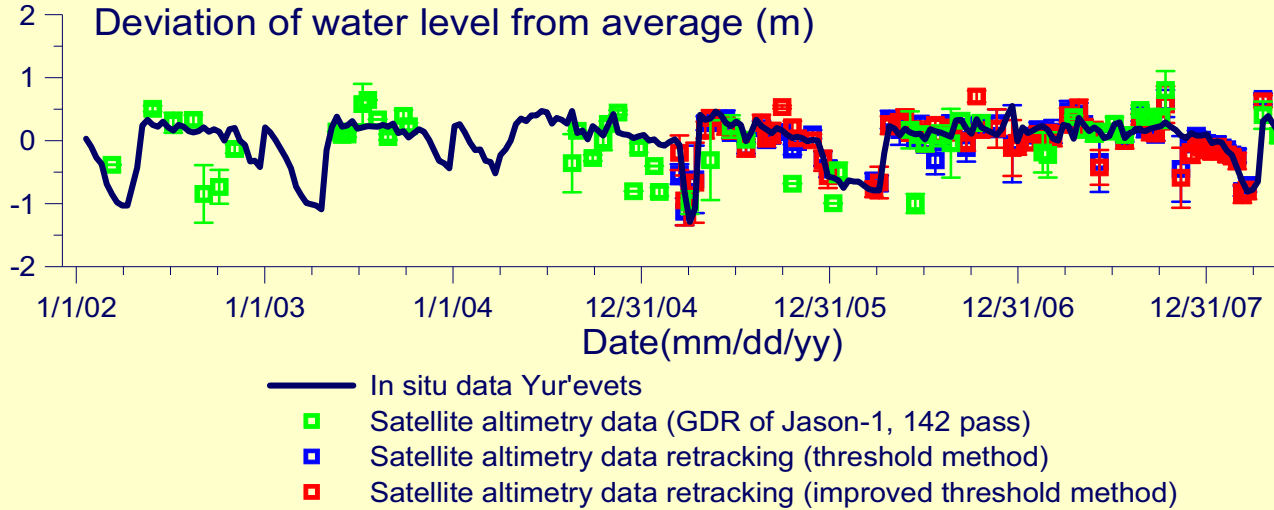
Аппроксимация переднего фронта импульса функцией ошибок позволяет определить уровень воды в водоеме и высоту волн



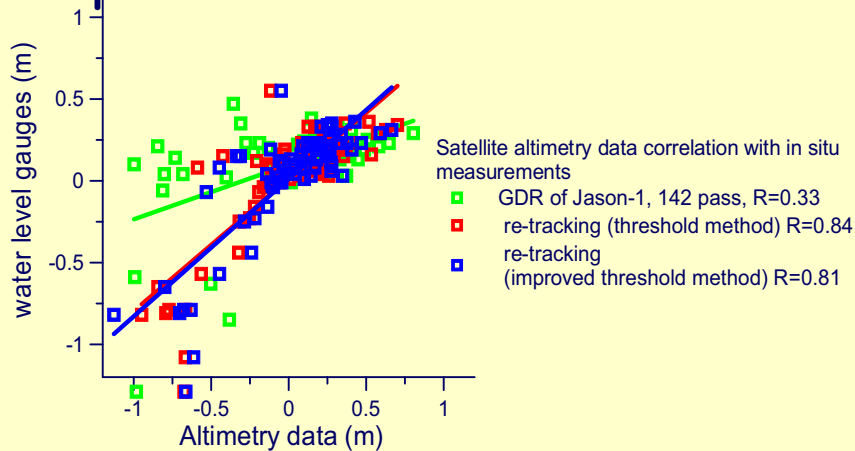
$$P_k(\tau) \approx \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(c\tau - 2H_k)}{\sqrt{2}\sqrt{s_k^2 + c^2\tau_i^2}} \right) \right)$$



Вариации уровня воды (в сравнении с наземными измерениями) GDR данные и результатами ретрекинга SGDR данных, 142 трек



Корреляция альтиметрических данных для 142 трека и наземных измерений

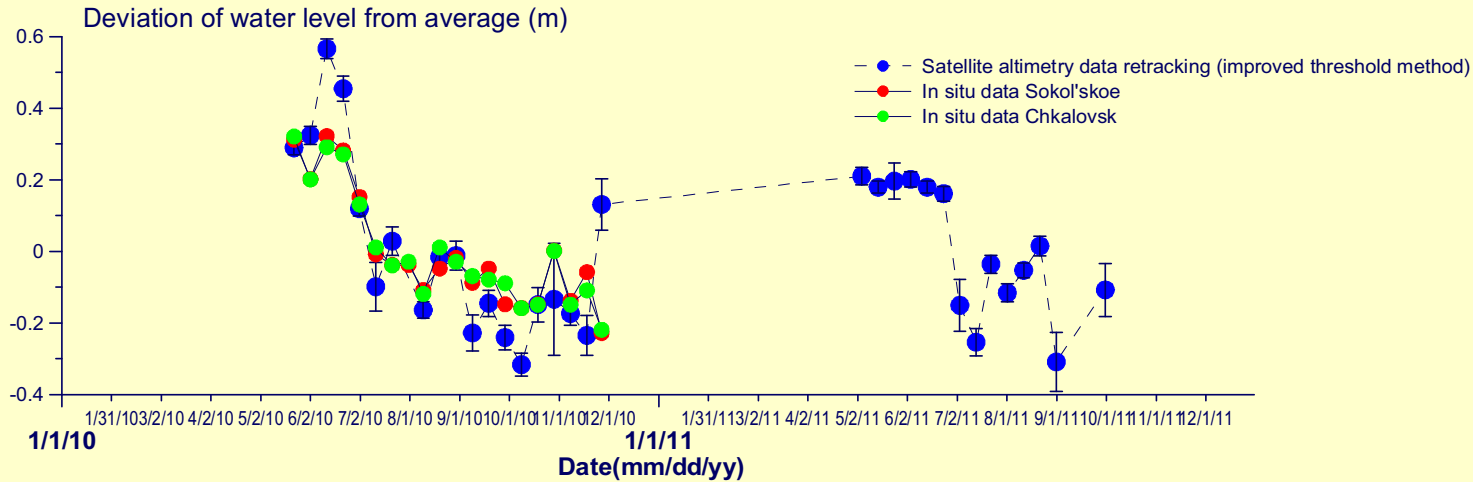


Ошибки определения уровня воды и количество действительных точек для различных алгоритмов ретрекинга

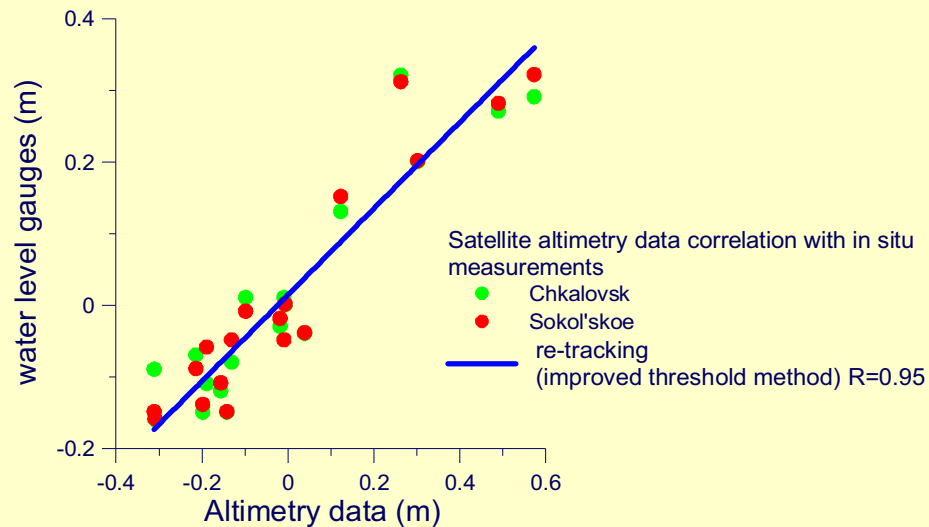
Method of retracking	Std of the water level (m)	Average number of valid points/month
GDR data	0.16	1.2
Retracking by the threshold method	0.13	2.0
Retracking by the improved threshold method	0.12	2.0



Вариации уровня воды (в сравнении с наземными измерениями) GDR данные и результатами ретрекинга SGDR данных, 33 трек



Корреляция альтиметрических данных для 33 трека и наземных измерений



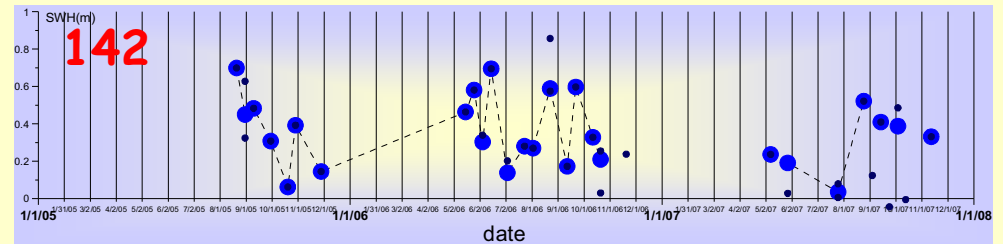
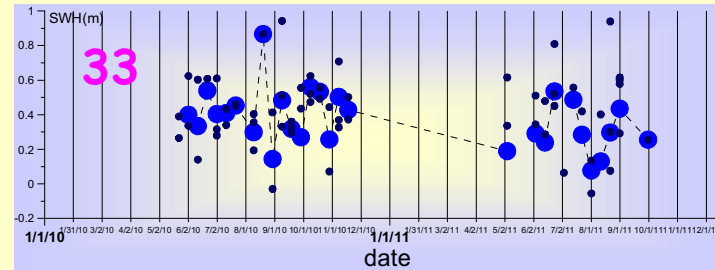
Ошибки определения уровня
воды для различных
алгоритмов ретрекинга

Method of retracking	Std of the water level (m)
GDR data	0.16
Retracking by the improved threshold method	0.12

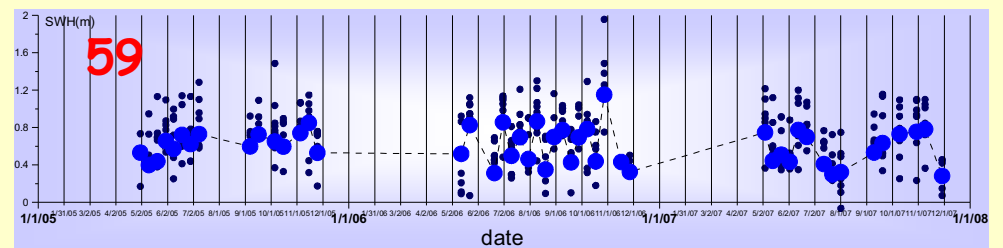


Значительная высота волн. Сравнение наземных измерений и результатов ретрекинга SGDR данных 33 трека альтиметрического спутника Jason-1

Горьковское вдхр



Рыбинское вдхр





Конструкция
автономной буйковой
станции для
исследования
пограничных слоев
атмосферы и
гидросферы



Автономная буйковая станция на базе океанографической вехи Фруда

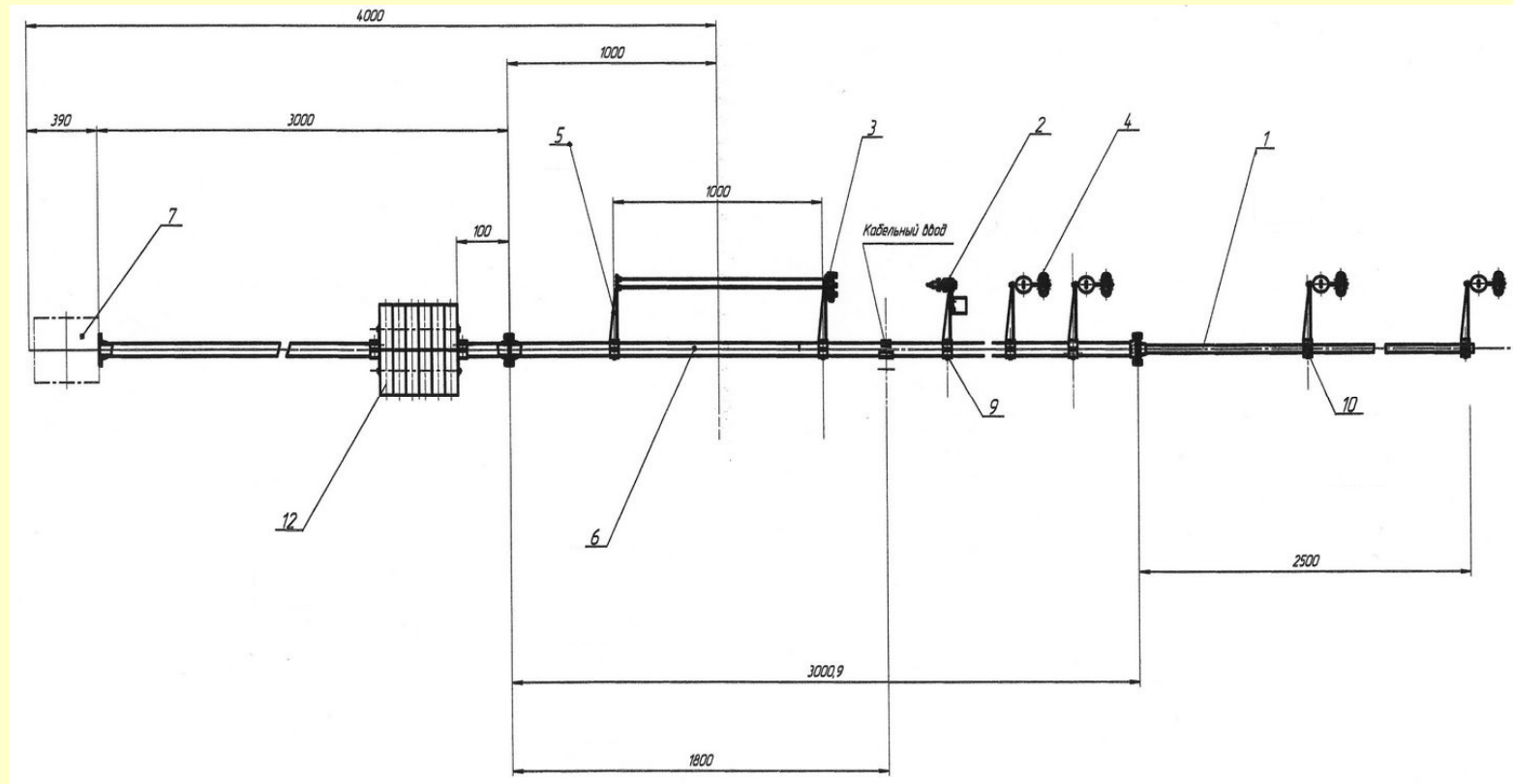
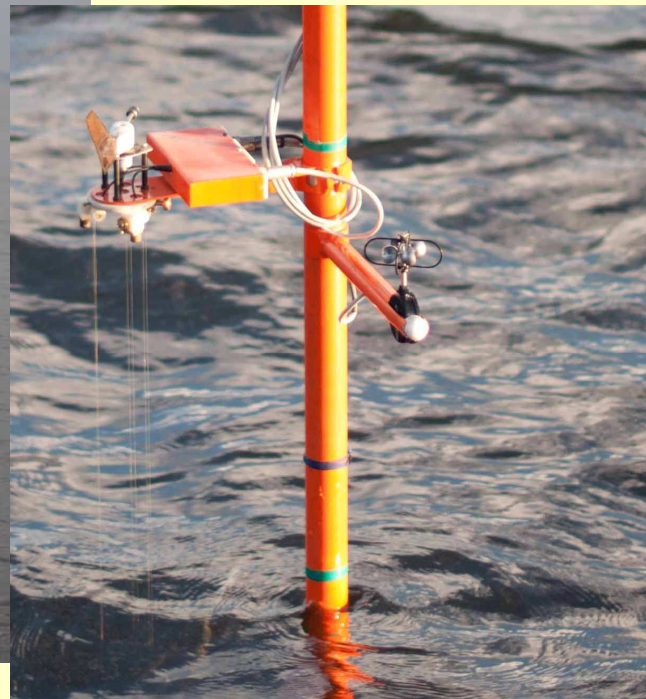
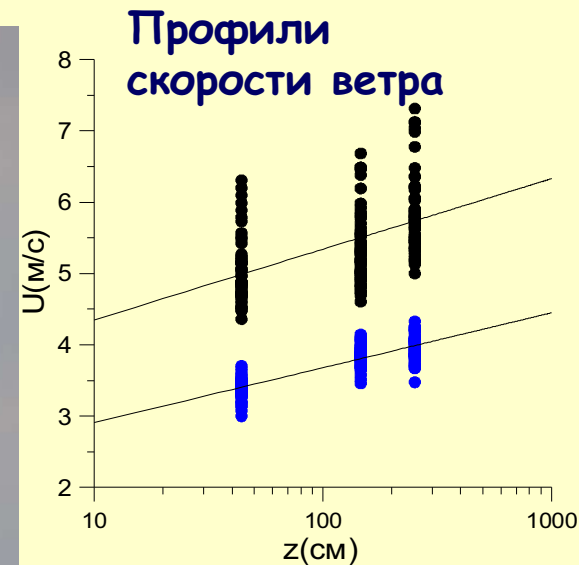


Схема вехи Фруда. Изделие состоит из трех труб АМГ-4, соединенных в единую конструкцию герметичными фланцами. На трубе установлены: измеритель угла ветра (2), волнограф (3), измеритель скорости ветра с датчиками температуры (4) - 4 шт., аппаратный бак с грузом (7) и поплавков (12).



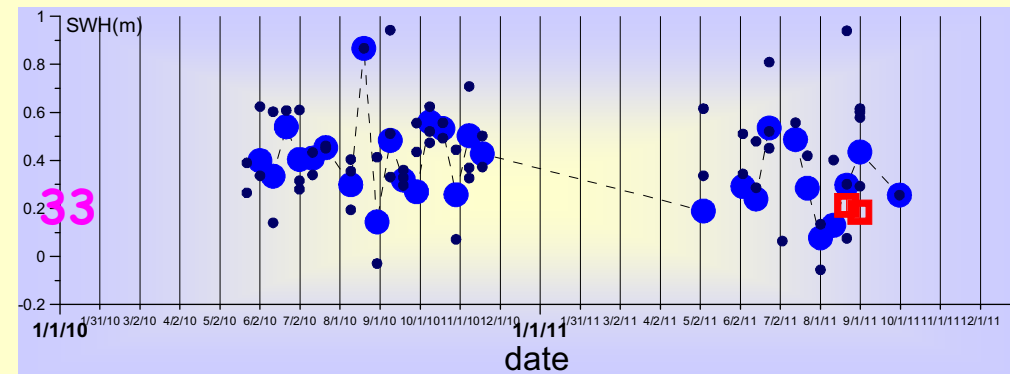
Автономная буйковая станция на базе вехи Фруда

- Модуль скорости ветра. Вертушки измерителей крепятся на штангах на удалении 0,25м от трубы, первая на расстоянии ~ 0,5м от невозмущенной поверхности моря, последняя – на расстоянии 5м.
- Направление скорости ветра в выбранной системе координат измеряется флюгером с датчиком угла поворота заводского изготовления. Угол измеряется с дискретностью 3° .
- Профиль поверхностного волнения измеряется струнными волнографами в трех точках, расположенных в углах равностороннего треугольника со стороной 5.6 см на невозмущенной поверхности воды.
- 3-хмерный спектр поверхностных волн в выбранной системе координат определяется путем обработки данных от трех струнных волнографов по алгоритму БПФ.
- Для измерения температуры воды и воздуха используются датчики резистивного типа.

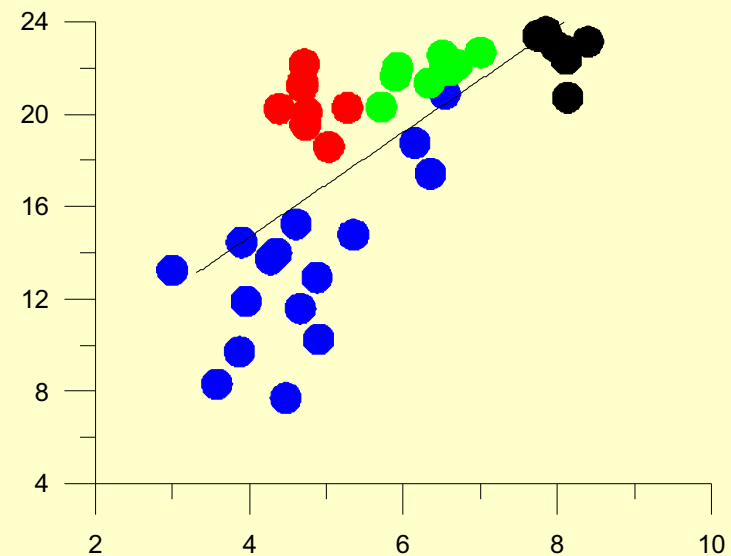


Значительная высота волн. Сравнение наземных измерений и результатов ретрекинга SGDR данных 33 трека альтиметрического спутника Jason-1

Горьковское вдхр



SWH от скорости ветра

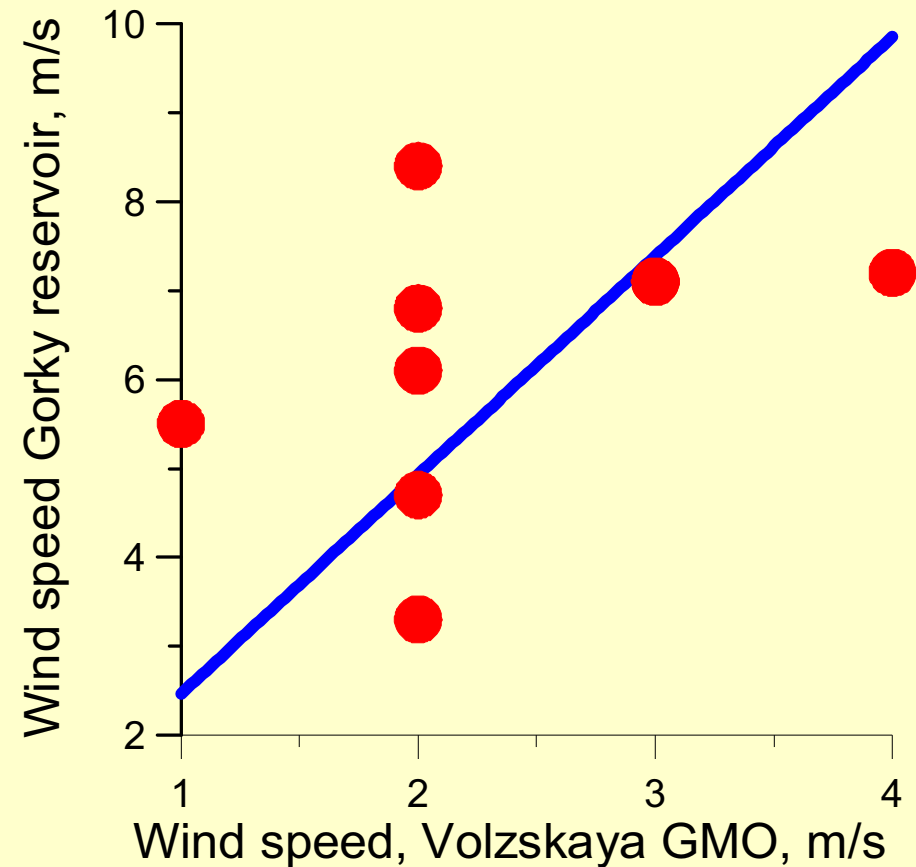




Данные измерения ветра и
волнения на акватории
Горьковского водохранилища в
августе-сентябре 2011 г.



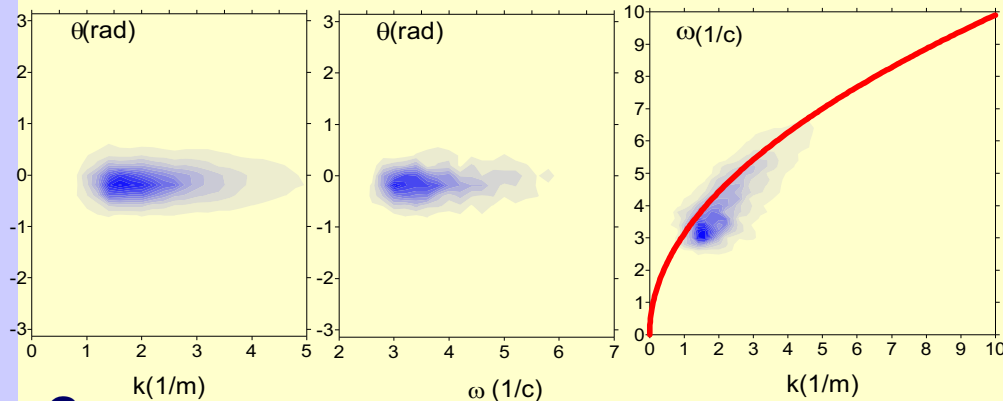
Скорость ветра на Волжской ГМО и на акватории водохранилища



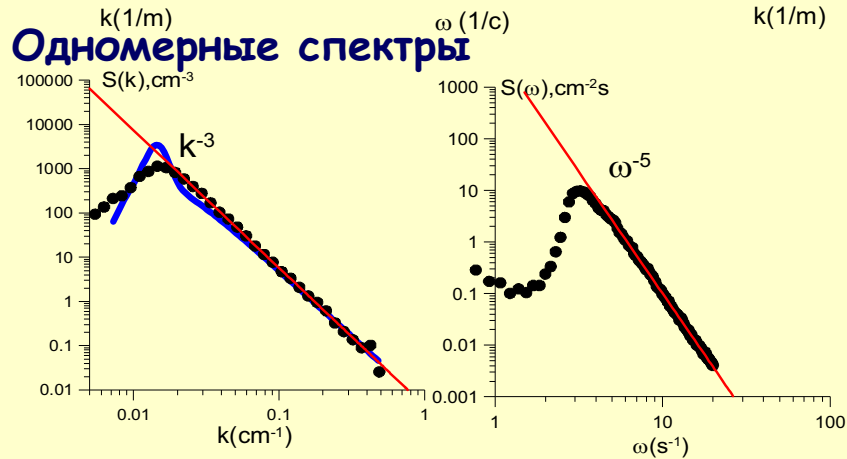
$$\text{Wind_reservoir} = 2.5 * \text{Wind_coast}$$



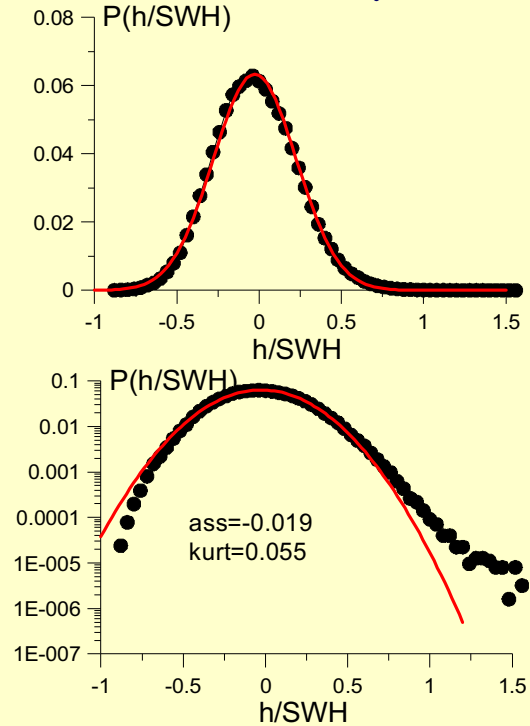
01.09.11 Параметры
поверхностного волнения
 $U_{10}=6.7$ м/с, NW $U_{10}/c_p=2.77$
Двумерные спектры



Одномерные спектры



Плотность вероятности
возвышения поверхности воды

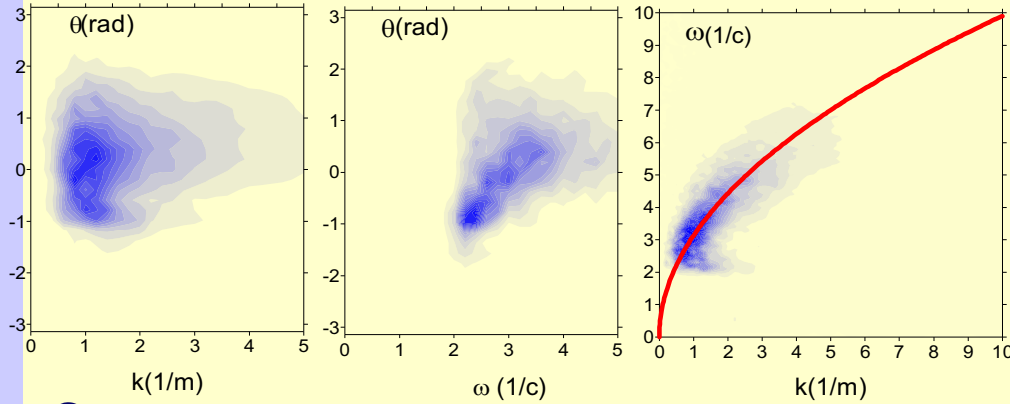


	JONSWAP	Этот спектр
SWH(см)	19.5	17
Уклон	0.14	0.14

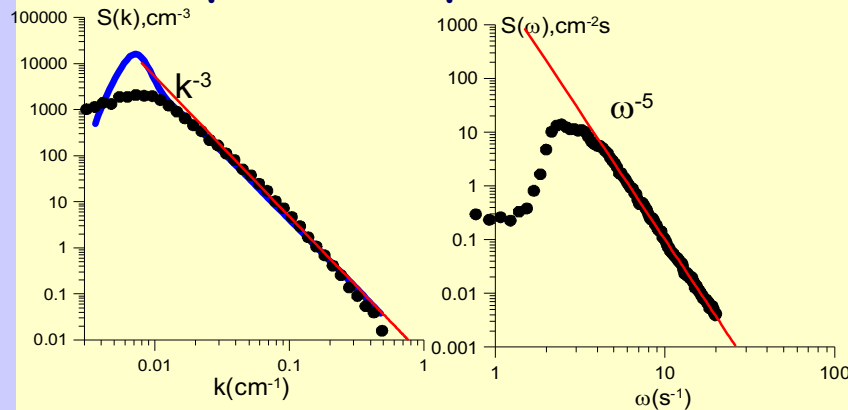


11.09.11 Параметры поверхностного волнения $U_{10}=6.4$ м/с, NNW $U_{10}/c_p=1.74$

Двумерные спектры

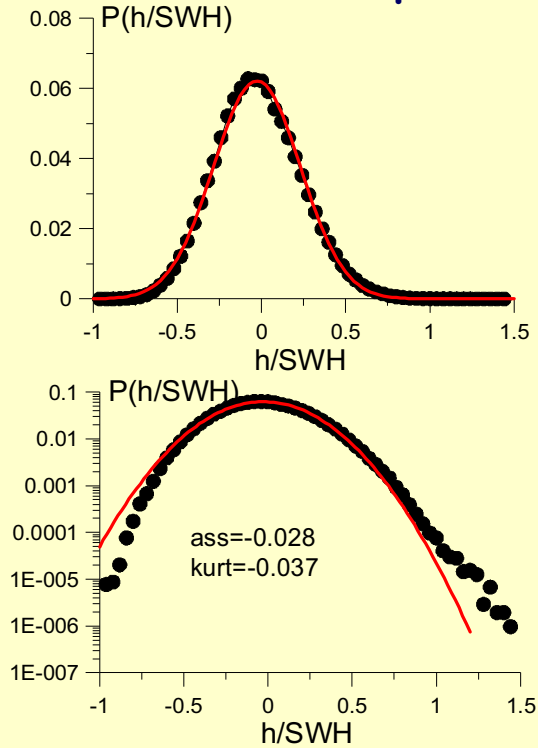


Одномерные спектры



	JONSWAP	Этот спектр
SWH(см)	34	22
Уклон	0.135	0.125

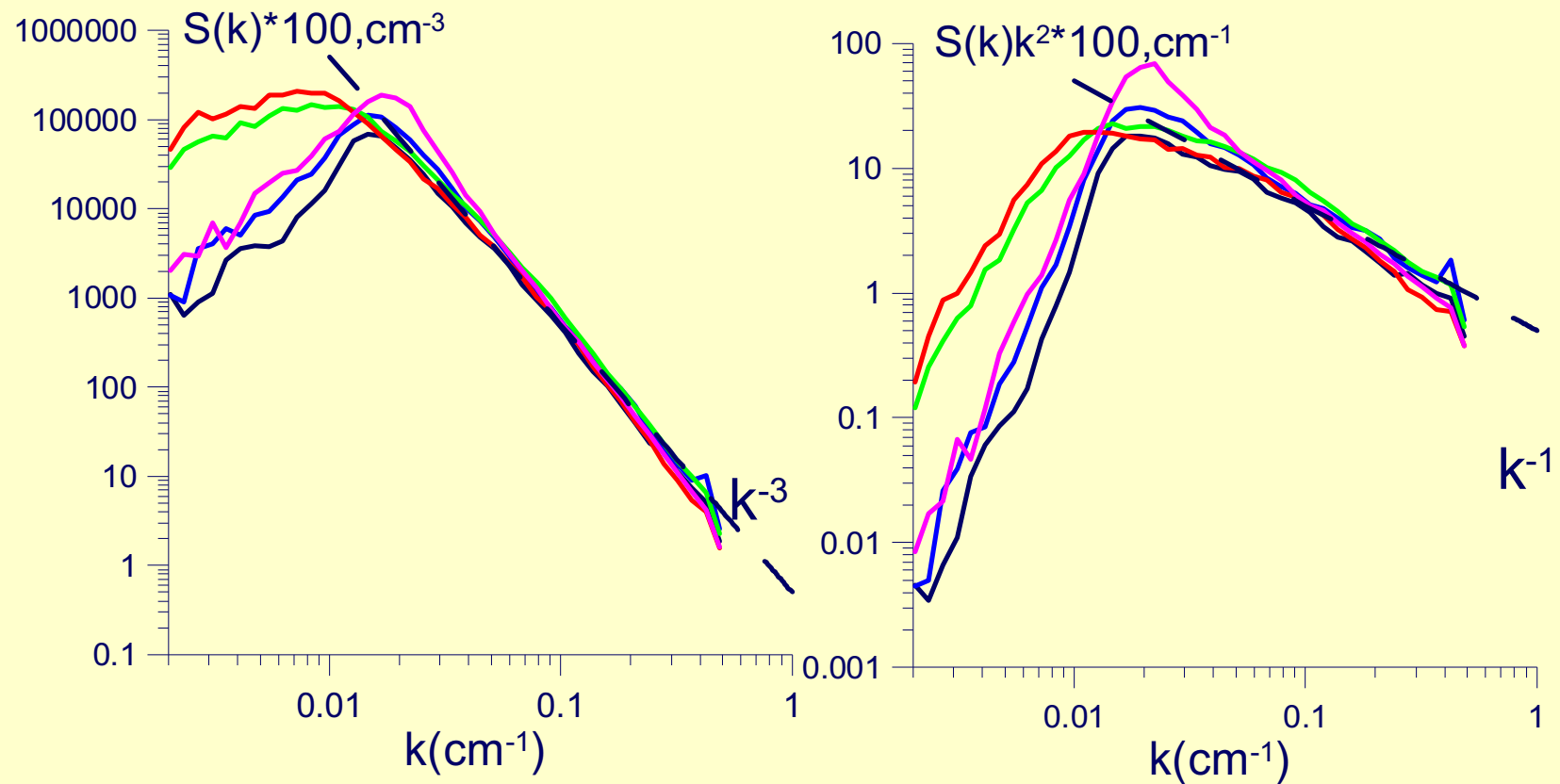
Плотность вероятности возвышения поверхности воды





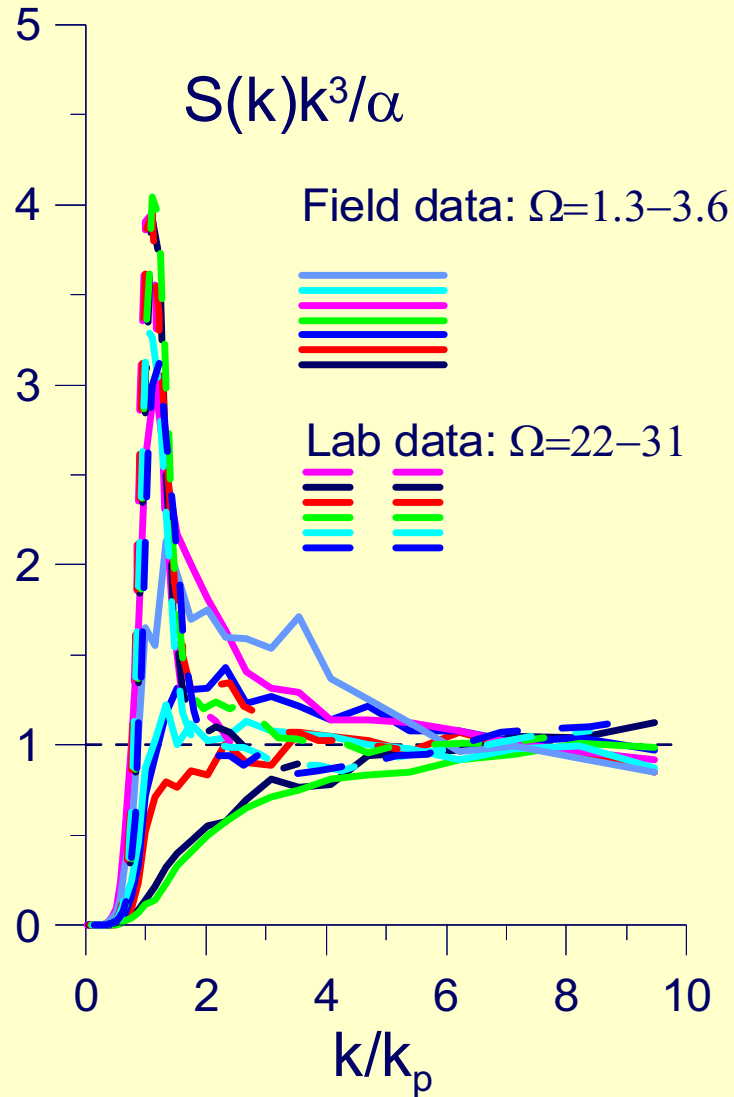
Спектры возвышений и уклонов при разных скоростях ветра и параметрах возраста волнения

$U_{10}=3.3-8.4$ м/с, $\Omega=1.6-3.6$





Спектры насыщения

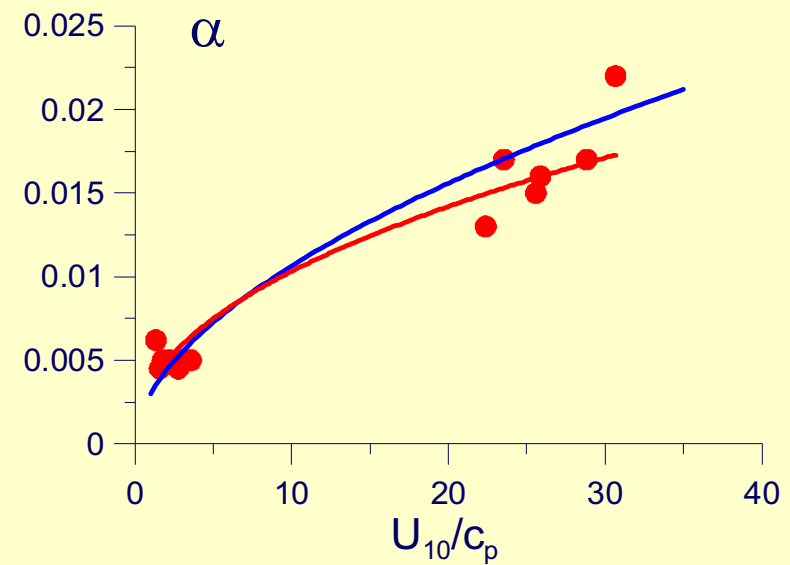


Асимптотика спектра

$$S(k) = \frac{\alpha}{k^3}$$

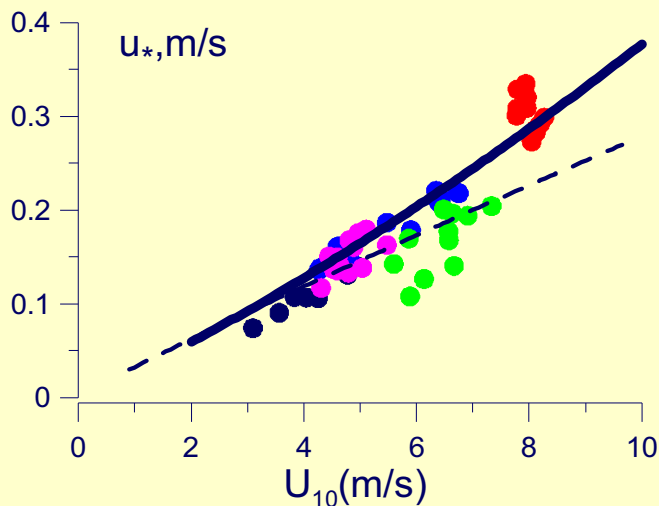
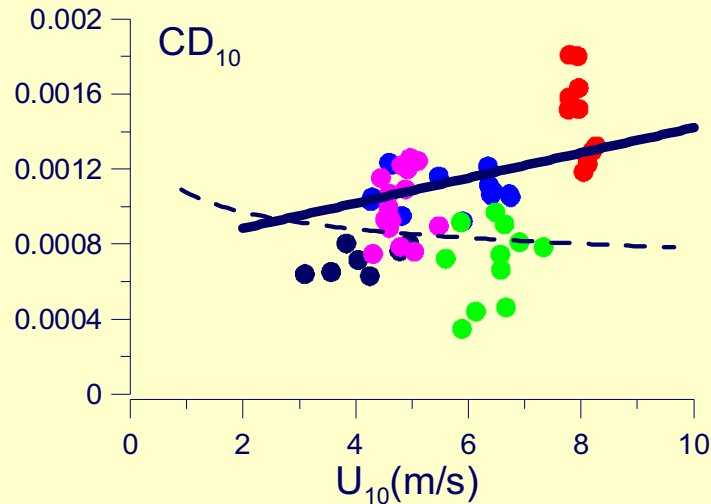
$$\alpha = 0.003 \left(\frac{U_{10}}{c_p} \right)^{0.55} \quad \text{JONSWAP}$$

$$\alpha = 0.0036 \left(\frac{U_{10}}{c_p} \right)^{0.46} \quad \text{Эти данные}$$





Зависимости коэффициента сопротивления и динамической скорости от скорости ветра



Скорость трения ветра

$$u_* = \kappa \frac{U(z_2) - U(z_1)}{\ln(z_2 / z_1)}$$

Скорость ветра на стандартной высоте 10 м

$$U_{10} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{H_{10}}{z_1}\right) + U(z_1)$$

Коэффициент сопротивления

$$C_{D10} = \left(\frac{u_*}{U_{10}}\right)^2$$

формула Garrett, 1977

$$C_{D10} = 0.001(0.75 + 0.067U_{10})$$

аэродинамически гладкая поверхность



О сопоставлении
экспериментальных данных о
ветре и волнении и
теоретических предсказаний, а
также спутниковых данных



Модель ветрового потока

Ветер \equiv турбулентный пограничный слой над водной поверхностью

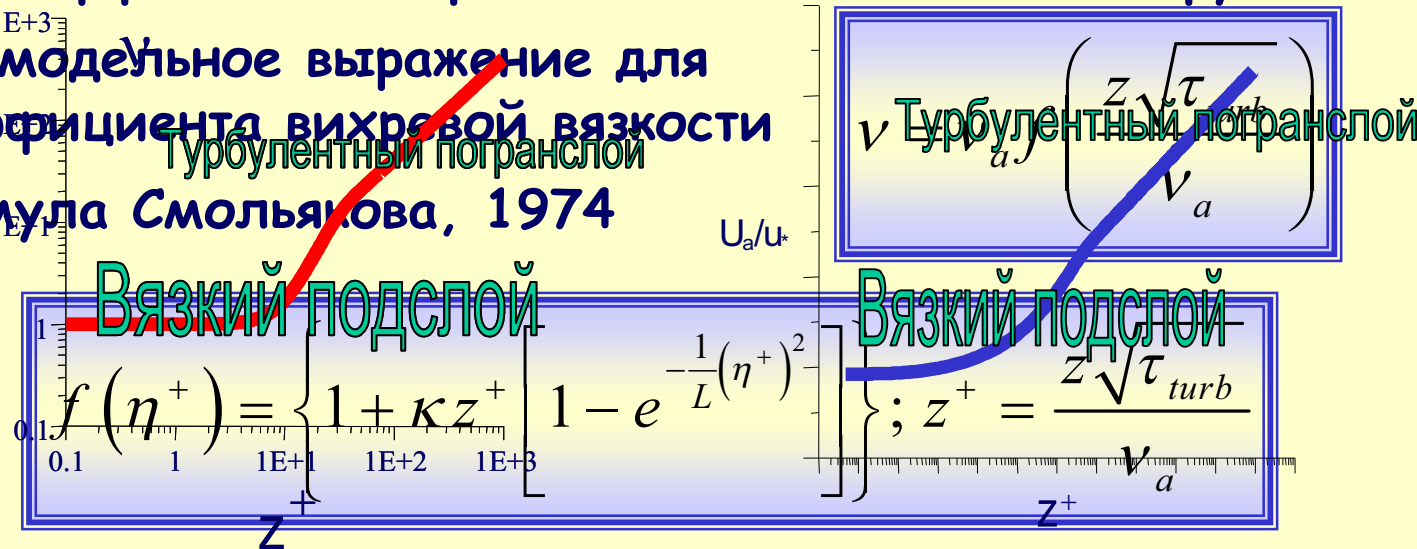
Полуэмпирическая модель турбулентности 1-го порядка

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

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

ν - коэффициент вихревой вязкости - заданная функция z

Автомодельное выражение для
коэффициента вихревой вязкости
Формула Смольякова, 1974



Вязкий подслой

Вязкий подслой

Турбулентный погранслой

$$\nu = \nu_a \left(\frac{z \sqrt{\tau_{turb}}}{\nu_a} \right)$$

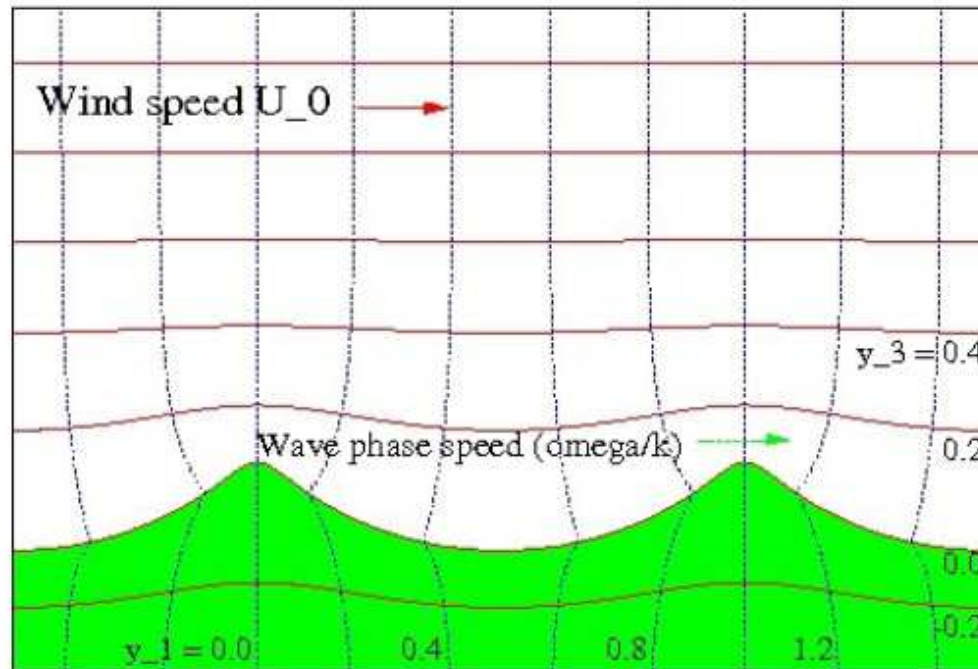


Граничные условия на поверхности раздела вода-воздух $z = \xi(x, y, t)$

$$\left. \frac{\partial \xi}{\partial t} + \langle u \rangle \frac{\partial \xi}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \xi}{\partial y} \right|_{z=\xi(x,y,t)} = \langle w \rangle \Big|_{z=\xi(x,y,t)}$$

$$\left. \langle \vec{u}_\tau^w \rangle \right|_{z=\xi(x,y,t)} = \left. \langle \vec{u}_\tau^a \rangle \right|_{z=\xi(x,y,t)}$$

Ортогональная криволинейная система координат,
сопровождающая поверхностные волны





Самосогласованная система уравнений для описания взаимодействия волн и ветра

Уравнения для возмущений, индуцированных в воздушном потоке волнами на воде

$$(\Phi_{0\eta} X_1 - \Phi_1 \Phi_{0\eta\eta}) ik - \left(\frac{d^2}{d\eta^2} - k^2 \right) (X_1 v) = -2v_{\eta\eta} \Phi_1 k^2 - 2e^{-k\eta} (\Phi_{0\eta} v_{\eta})_{\eta}$$

$$\frac{d^2 \Phi_1}{d\eta^2} - k^2 \Phi_1 = X_1 - 2ke^{-k\eta} \Phi_{0\eta\eta} \cos \varphi$$

$$(\Phi_{0\eta} V_1 - \Phi_1 V_{0\eta}) ik = v \left(\frac{d^2 V_1}{d\eta^2} - k^2 V_1 \right) + v_{\eta} V_{1\eta}$$

Компоненты средней скорости

$$\Phi_{0\eta} = U_0(\eta) \cos \varphi - \omega/k$$

$$V_0 = U_0(\eta) \sin \varphi$$

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

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

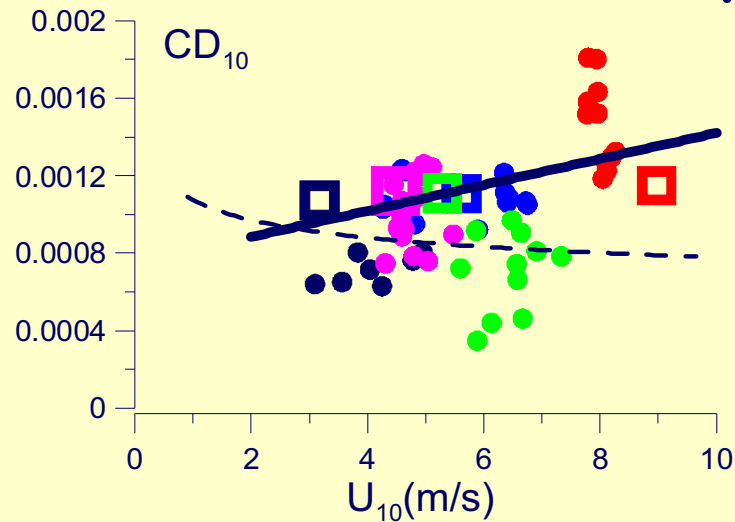
$$\tau_{wave}(\eta) = \int T_{wave}(\eta, k, \varphi, F(k, \varphi, \omega)) \omega d\omega$$



О сопоставлении
выводов квазилинейной
модели с данными
натурных измерений



Зависимости коэффициента сопротивления и динамической скорости от скорости ветра



Скорость трения ветра

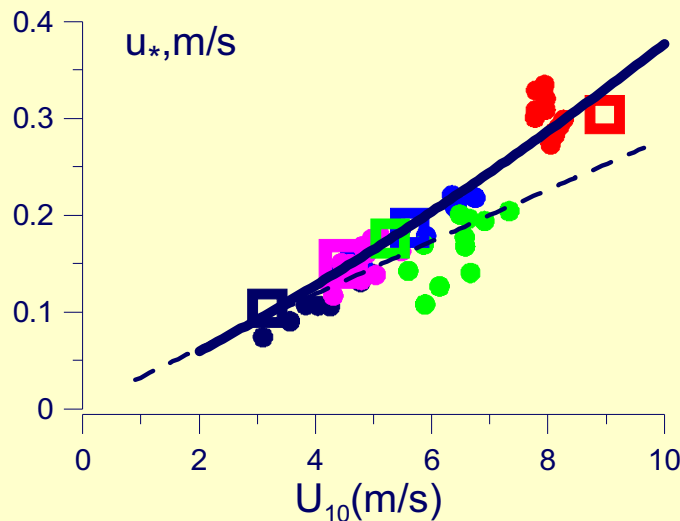
$$u_* = \kappa \frac{U(z_2) - U(z_1)}{\ln(z_2 / z_1)}$$

Скорость ветра на стандартной высоте 10 м

$$U_{10} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{H_{10}}{z_1}\right) + U(z_1)$$

Коэффициент сопротивления

$$C_{D10} = \left(\frac{u_*}{U_{10}}\right)^2$$



формула Garrett, 1977

$$C_{D10} = 0.001(0.75 + 0.067U_{10})$$

аэродинамически гладкая поверхность

□
□
□
□
□
 расчеты по модели АПС



Выводы

- Проведены комплексные натурные эксперименты на акватории внутреннего водоема (Горьковское водохранилище) по исследованию особенностей их гидрометеорологического состояния, синхронных с расписанием пролетов альтиметрического спутника Jason 1
- На примере Горьковского водохранилища исследованы особенности приводного ветра и поверхностного волнения в типичном внутреннем водоеме. В ходе экспериментов на Горьковском водохранилище исследован пограничный слой атмосферы при различных скоростях ветра
- Разработан алгоритм восстановления свойств подстилающей поверхности в прибрежной зоне моря и внутренних водоемах на основе ретрекинга (адаптации) форм принимаемых телеметрических импульсов спутниковых радиоальтиметров. Сопоставление с наземными измерениями показало работоспособность алгоритма