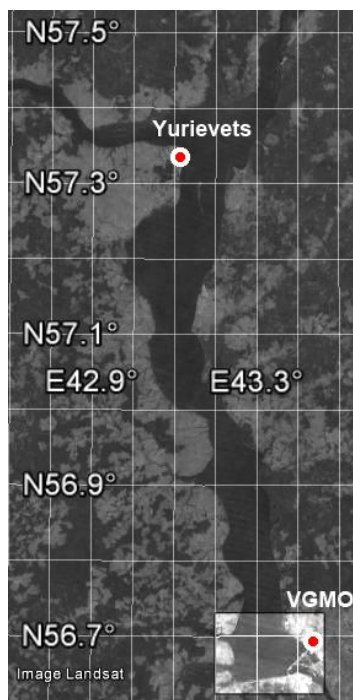
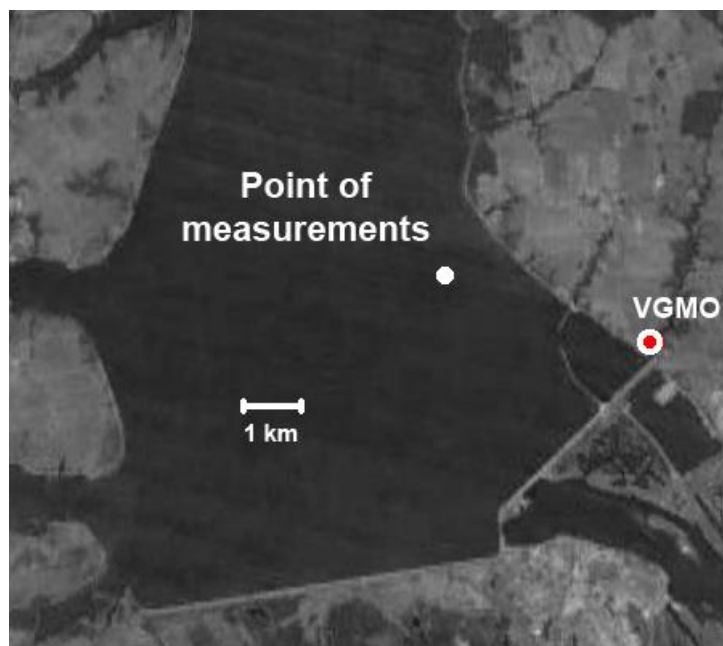


Введение.

Были проведены натурные измерения в широком диапазоне метеоусловий на акватории Горьковского водохранилища. Протяженность водохранилища от Рыбинского шлюза до створа Горьковского гидроузла при нормальном подпорном уровне составляет 430 км, наибольшая ширина 26 км. Площадь водного зеркала (при нормальном подпорном уровне) 1591 км², полный объем 8,8 км³, полезный объем 2,8 км³ и объем навигационной части полезной призмы 0,6 км³. По гидрологическому режиму и судоходным условиям водохранилище делится на три участка – речной, озерно-речной и озерный. Измерения проводились в южной части озерного участка водохранилища (рис. 1.1).



а)



б)

*Рис. 0 Горьковское водохранилище (слева), область измерения (справа).
Белыми кругами с красной серединой показаны метеостанции: Волжская ГМО и Юрьевец.*

На рис. 1.2 показано распределение скорости и направления ветра, измеренных на Волжской гидрометеоро-обсерватории (Волжская ГМО, г. Городец) недалеко от области натурных исследований. Распределение построено по данным 2010-2016 годов за навигационные периоды (10 мая – 31 октября). Видно, что, несмотря на ярко выраженные выделенные направления ветра, диапазон изменения возможных направлений довольно широкий. Учитывая вытянутую форму водохранилища, это позволяет проводить исследования ветра и волнения при различных величинах разгона волн.

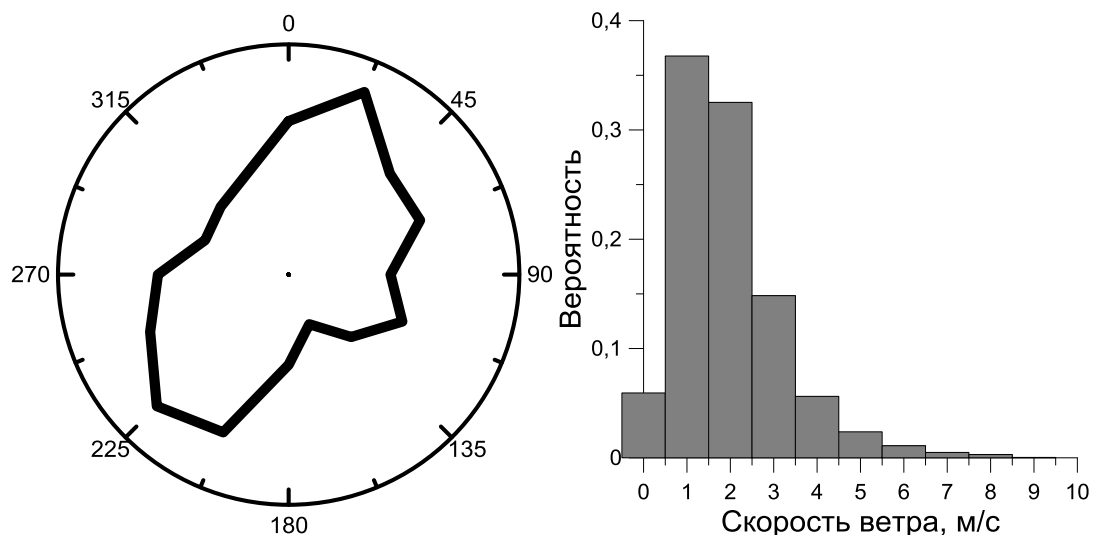


Рис. 2 Статистическое распределение направлений (слева) и скоростей (справа) ветра, усредненное за 2010-2016 года в течение навигационного периода (с 10 мая по 31 октября) по данным Волжской ГМО

Измерительная система

Измерительная аппаратура размещалась на буйковой станции, созданной на базе океанографической вехи Фруда. Веха представляет собой мачту, полупогруженную в воду и удерживаемую в вертикальном положении поплавком вблизи поверхности и грузом на глубине. На мачте вехи располагались 4 ультразвуковых датчика скорости WindSonic производства Gill Instruments на высотах 0.85 м, 1.3 м, 2.27 м, 5,26 м. Пятый датчик был расположен на поплавке, отслеживающем форму волны, для измерения скорости ветра в непосредственной близости от поверхности воды. Горизонтальное расстояние от поплавка до мачты вехи около 1 м, высота зоны измерения скорости ветра от поверхности воды – 10 см. Также веха оборудована датчиками температуры воздуха (на высотах 0.1 м, 0.85 м, 1.3 м), температуры воды и трехканальным струнным волнографом, позволяющим восстанавливать пространственно-временные спектры волнения.

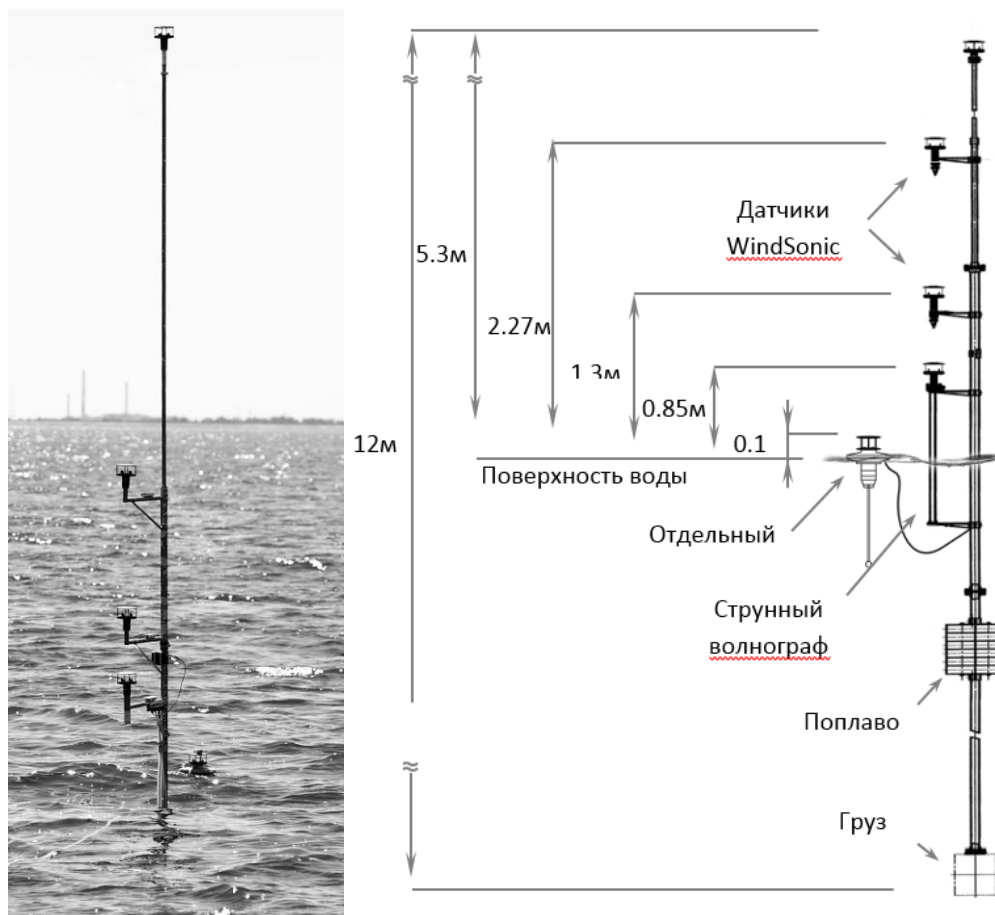


Рис. 1. Буйковая станция на базе вехи Фруда: реальный вид в рабочем состоянии (слева) и схема (справа).

Результаты измерений.

По результатам измерений скорости ветра над Горьковским водохранилищем была построена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности C_D в зависимости от скорости ветра на стандартной высоте 10 м. На рис. 4 приведены результаты измерений. Можно отметить, что измерения с использованием автономной вехи в 2016 году (черные точки) показали в среднем более высокие значения коэффициента C_D в области умеренных и сильных ветров, однако они ложатся в диапазон среднеквадратичного отклонения по результатам более ранних измерений (серые точки). Таким образом, можно сделать вывод о возможном дополнительном влиянии судна на воздушный поток и поверхностное волнение, однако это не сказывается существенно на результатах измерений.

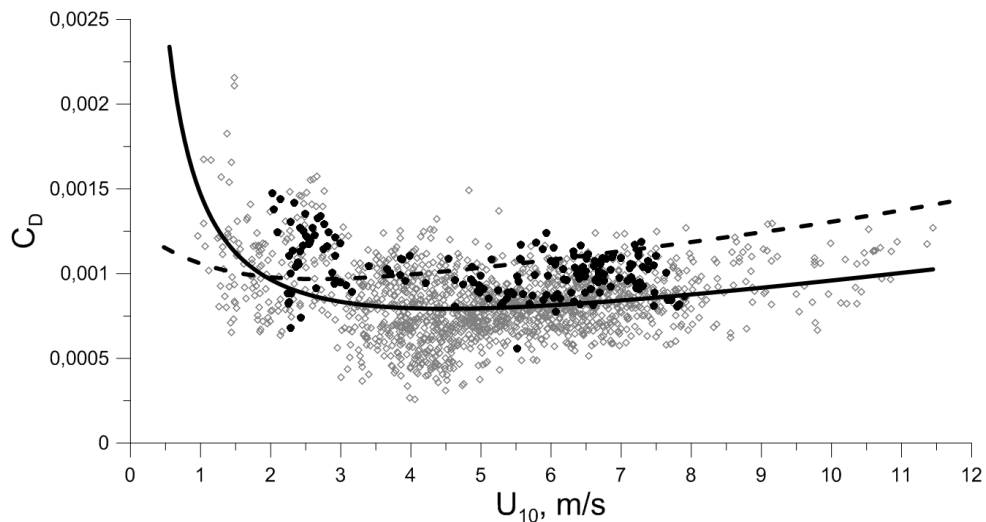


Рис. 4 Полученная зависимость $C_D(U_{10})$: $\diamond$ – данные, полученные с использованием привязанной к судну вежи; $\bullet$ – данные, полученные в 2016 году с использованием автономной заякоренной вежи; пунктирная линия – эмпирическая океаническая параметризация COARE 3.0; сплошная линия – аппроксимация данных функцией (1.6.1)

Таким образом, по результатам экспериментов на основании записей профилей скорости ветра общей длительностью около 120 часов был получен массив данных о характеристиках воздушного потока над внутренним водоемом в условиях малых разгонов. Экспериментальные данные лежат в следующих диапазонах: по скорости ветра U_{10} : от 1 м/с до 12 м/с; по длине разгона волн: от 3 км до 7 км (в отдельном выделенном направлении – 50 км); по величине температурной стратификации приводного слоя атмосферы: от -5°C до 15°C . Полученная зависимость коэффициента C_D от скорости ветра U_{10} аппроксимирована функцией (1)

$$C_D = 0.00124U_{10}^{-1} + 0.00034 + 0.000049U_{10}, \quad (0)$$

предложенной в качестве альтернативной параметризации зависимости $C_D(U_{10})$ в условиях внутренних водоемов при малых величинах разгона волн.

Численное моделирование.

WAVEWATCH III – численная модель, изначально предназначена для расчета параметров ветрового волнения на основе данных о скорости ветра над исследуемой областью. Модель направлена главным образом на описание морских и океанических волн, в том числе в прибрежных зонах, но на сегодняшний день WAVEWATCH III и другие аналогичные модели, такие как WAM и SWAN, применяются не только для крупномасштабного прогноза в условиях океана, но и на крупных внутренних водоемах, например, на Великих озерах в Северной Америке. Комплекс WAVEWATCH III включает в себя несколько моделей ветро-волнового взаимодействия, подключаемых пользователем. В том числе такие, в которых задание параметризации $C_D(U_{10})$ возможно напрямую.

Для численного счета в качестве информации о ветре были использованы данные с Горьковского водохранилища, а рассчитанные характеристики сравнивались с полученными в натурных условиях. При этом были использованы стандартная и предложенная по результатам натурных исследований на Горьковском водохранилище параметризации $C_D(U_{10})$.

Было проведено сравнение высоты значительных волн и средневзвешенного периода волнения (рис. 5), полученных в результате численного моделирования и натурных

измерений. Сравнение показало, что использование новой параметризации уменьшает стандартное отклонение высоты значительных волн для WAM3 с 52% до 39%, незначительно ухудшая соответствие средневзвешенного периода волнения (с 19% до 23%).

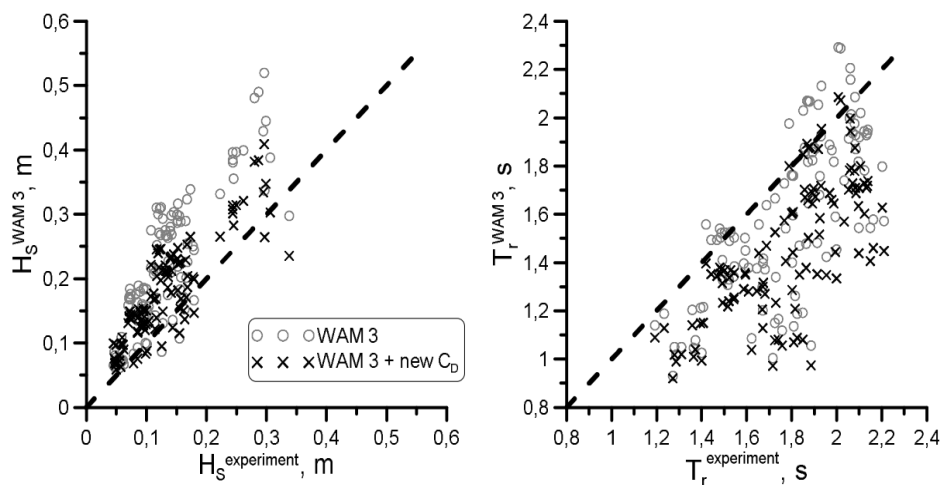


Рис. 5 Сравнение высоты значительных волн (слева) и средневзвешенного периода волнения (справа), полученных путем численного моделирования для двух параметризаций $C_D(U_{10})$ и результатов натурного эксперимента. Серые круги – стандартная параметризация, черные кресты – новая параметризация (1)

Численный счет в рамках адаптированной модели WAVEWATCH III показал, что использование измеренных в натуральных условиях значений коэффициента аэродинамического сопротивления приводит к хорошему согласию результатов численного счета и экспериментальных данных. Таким образом, подтверждена адекватность предложенной параметризации зависимости коэффициента C_D от скорости ветра. Что позволяет использовать для вычислений данные ветро-волнового взаимодействия, полученные в натуральных локальных условиях прибрежной зоны, для прогнозирования ветро-волновой обстановки в зонах перспективной эксплуатации Ветровых энергетических установок (ВЭУ) и Волновых энергетических установок (ВолЭУ).