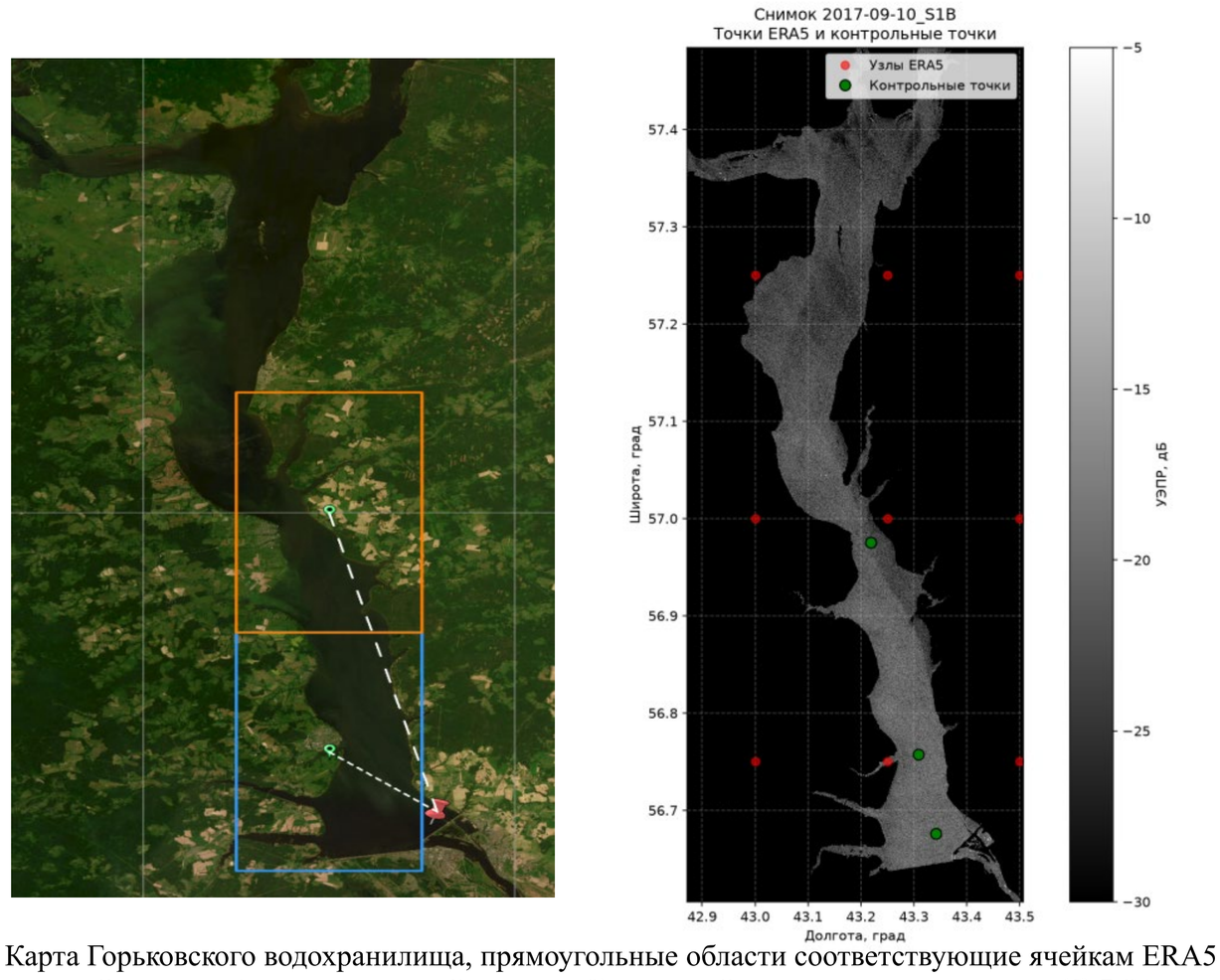
Разработка геофизической модельной функции для восстановления скорости ветра над внутренними водоёмами на примере Горьковского водохранилища

Русаков Н.С., Ермакова О.С., Поплавский Е.И., Байдаков Г.А.

Институт прикладной физики РАН

nikitarusakov@ipfran.ru

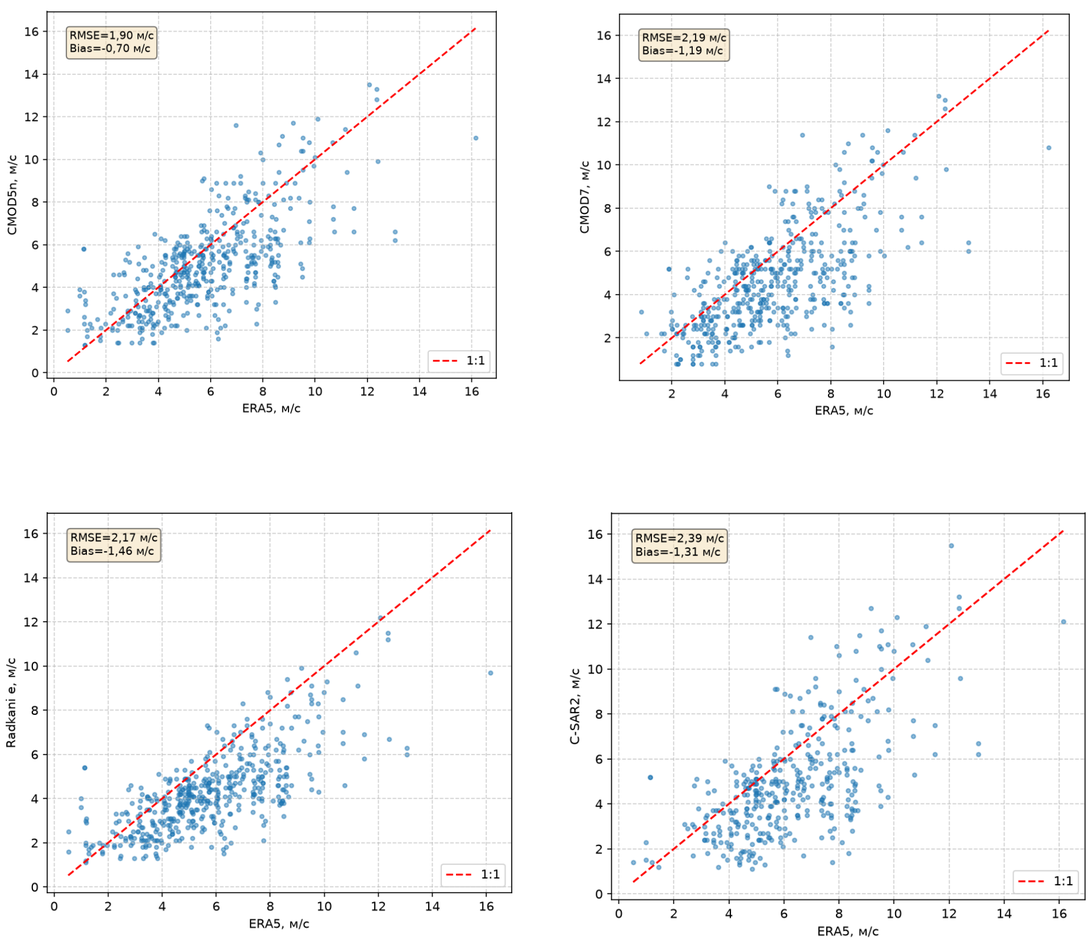
Данные, используемые для верификации ГМФ



(а) Карта Горьковского водохранилища, прямоугольные области соответствующие ячейкам ERA5 (синяя ячейка – узел 1, оранжевая ячейка – узел 2), красный символ – метеостанция; (б) РСА-изображение Горьковского водохранилища от 26.03.2017, красные точки – узлы ERA5, зеленые точки – центры области осреднения УЭПР.

Для извлечения значений удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) были использованы 314 РСА-изображений С-диапазона со спутников Sentinel-1A/B в режиме Interferometric Wide за период 2017-2025 в южной и центральной части Горьковского водохранилища со спутника Sentinel-1. В качестве источника данных о скорости ветра были использованы данные реанализа ERA5 в двух ячейках (0.25°×0.25°), ближайших к метеостанции и попадающих на акваторию водохранилища. Предварительно скорость ветра по данным реанализа была откалибрована на измерения с метеостанции. Значения УЭПР рассчитывалось как среднее по области 1 на 1 км, центр области располагался максимально близко к ячейке ERA5.

Оценка работоспособности ГМФ из других работ



Сравнение восстановленных скоростей приводного ветра по данным Sentinel-1A, B (поляризация VV) с референсными значениями (ERA5) для моделей CMOD5n (а) и CMOD7 (б); ГМФ, предложенной в работе Radkani et al. (2020) со спектром волнения из работы (Elfouhaily et al.,1997) (в); C-SARMOD2 (г). Пунктирная линия соответствует совпадению 1:1. Для каждой модели указаны среднеквадратичная ошибка (RMSE) и систематическое смещение (bias).

Моделирование УЭПР водной поверхности на основе двухмасштабной модели

Для построения ГМФ была использована теоретическая модель рассеяния, предложенная в работе [1], учитывающая асимметрию по и против ветра. Основное выражение для УЭПР в виде разложения по гармоникам азимутального угла :

$$\sigma_0(\varphi,\chi,U_{10},x)=\frac{\pi A G_p(\varphi)}{sin^4\varphi}(A_0+A_1 cos\chi+A_2 cos2\chi+A_{2p} sin2\chi+A_3 cos3\chi+A_4 cos4\chi)$$

φ, χ, U_{10}, x – угол падения, азимутальный угол, скорость ветра на высоте 10 метров, размерный разгон

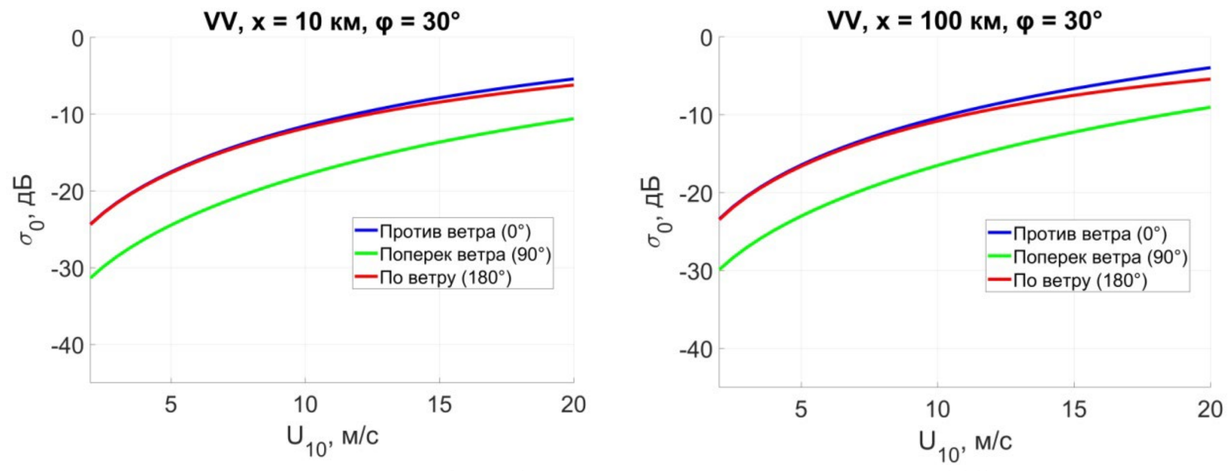
Для описания зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления была использована параметризация, полученная из данных натурных измерений на Горьковском водохранилище из работы [2].

$$C_D=\frac{0,00124}{U_{10}}+0,00034+0,000049U_{10}$$

1) *Plant W.J.* A two-scale model of short wind-generated waves and scatterometry // Journal of Geophysical Research. 1986. V. 91. No. C9. P. 10735–10749.

2) *Байдаков Г.А., Кандауров А.А., Кузнецова А.М., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.* Натурные исследования особенностей ветрового волнения при малых значениях разгона // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 11. С. 1569–1572. DOI: 10.1134/S0367676518110066.

Результаты моделирования



Азимутальная зависимость УЭПР (VV-поляризация, угол падения 30°) от скорости ветра U_{10}, рассчитанная по модели Планта. Приведены значения для направлений: против ветра ($\chi = 0°$), поперек ветра ($\chi = 90°$) и по ветру ($\chi = 180°$) для разгона 10 км; для разгона 100 км.

Для построения ГМФ была использована аппроксимация вычисленных величин УЭПР, полученных для следующего диапазона условий (общий объем выборки около 276000 точек):

φ= 30°, 32.5°, 35°, 37.5°, 40°, 42.5°, 45°
$U10$ = 2, 2.5, 3, …, 15 м/с
x = 5, 10, 15, …, 100 км
χ = 0°, 5°, 10°, …, 360°

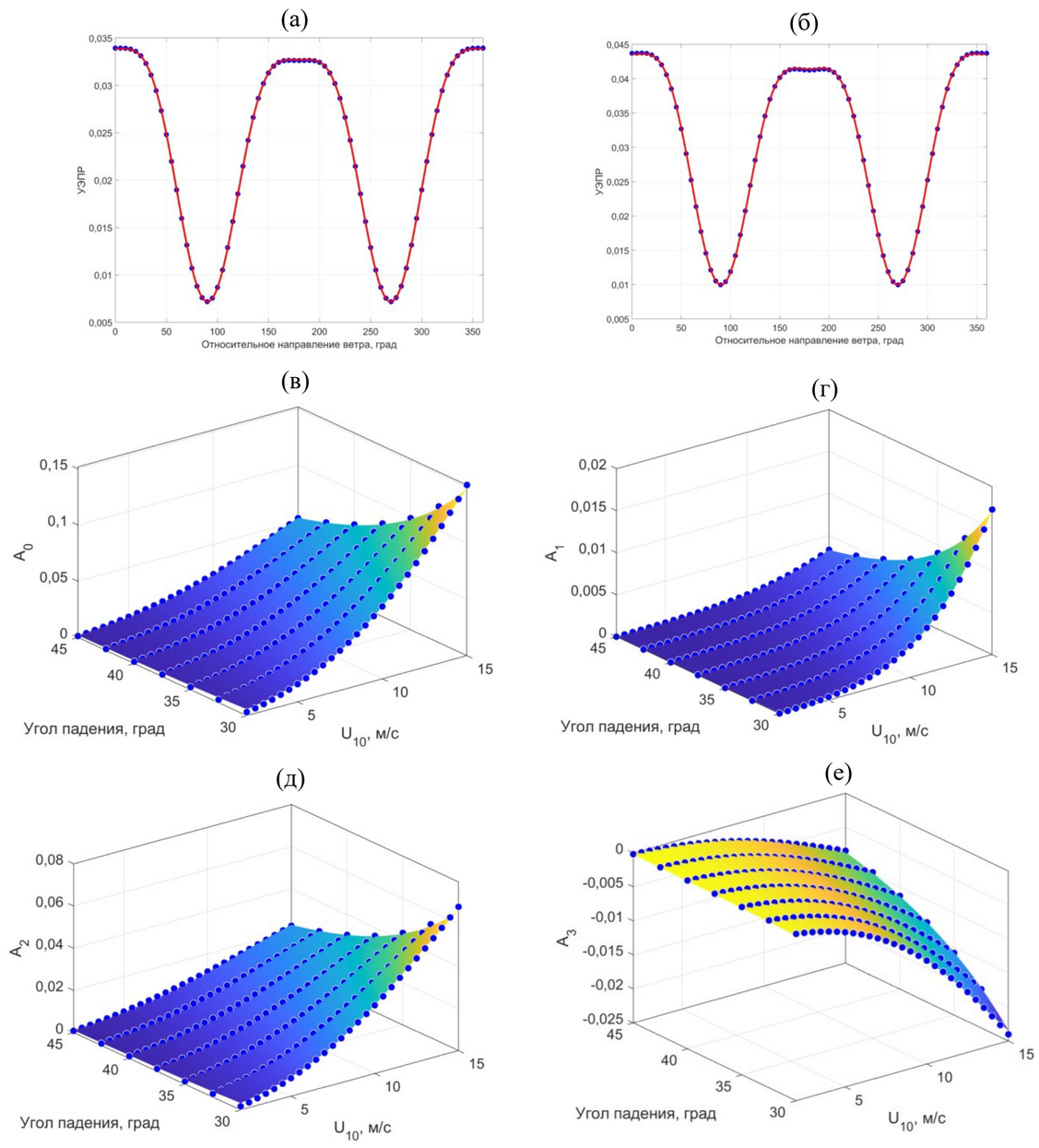
Вид аппроксимации:

$$\sigma_0(\varphi,\chi,U_{10},x)=A_0(\varphi,U_{10},x)+A_1(\varphi,U_{10},x)cos\chi+A_2(\varphi,U_{10},x)cos2\chi+A_3(\varphi,U_{10},x)cos4\chi$$

Далее каждый из коэффициентов разложения аппроксимировался двумерной поверхностью вида:

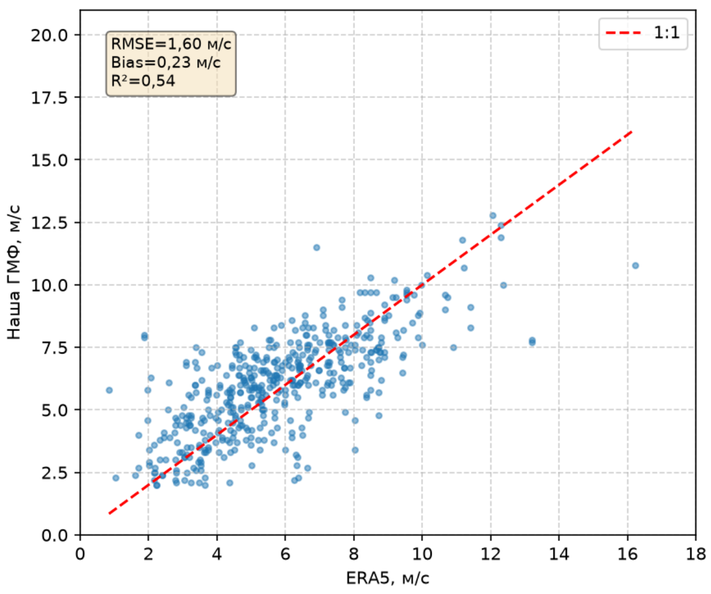
$$A_k(\varphi,U_{10},x)=a_k(x)\cdot exp\left(b_k(x)U_{10}+c_k(x)\varphi+d_k(x)U_{10}^2+e_k(x)\varphi^2\right)+f_k(x)$$, где k=0, 1, 2, 3

Зависимости a_k, b_k, c_k, d_k, e_k, f_k от x подобраны перебором моделей (экспоненциальная, степенная, логарифмическая, полиномиальная), при этом большинство параметров (b_k, c_k, d_k, e_k) слабо зависят от разгона и аппроксимированы константами.



Азимутальная зависимость удельной эффективной площади рассеяния σ_0 (VV-поляризация, угол падения 30°) для скорости ветра U_{10}=7 м/с при разгонах 10 км (а) и 100 км и ее аппроксимация формулой (6) (б). Зависимости коэффициентов разложения A_0 (в), A_1(г), A_2 (д) и A_3 (е) от скорости ветра U_{10} и угла падения φ и их аппроксимация формулой (7) для фиксированного разгона x=10 км.

Результаты



Проведена верификация разработанной ГМФ на 481 коллокациях с данными ERA5. Разработанная ГМФ демонстрирует существенное улучшение по сравнению с океанскими ГМФ. Это свидетельствует о том, что использование модели Планта, учитывающей гидродинамическую модуляцию коротких брэгговских волн длинными, в совокупности с параметризациями среднеквадратичного уклона от разгона и C_D, специфичного для Горьковского водохранилища позволило существенно улучшить физическую адекватность модели, снизив систематическую ошибку и повысив корреляцию с данными реанализа