

Проверка работоспособности геофизических модельных функций С-диапазона для восстановления скорости ветра по данным дистанционного зондирования в условиях открытого океана и внутреннего водоема на примере Горьковского водохранилища

Ермакова О.С., Русаков Н.С., Поплавский Е.И., Сергеев Д.А.

Институт прикладной физики РАН
ermakova@ipfran.ru



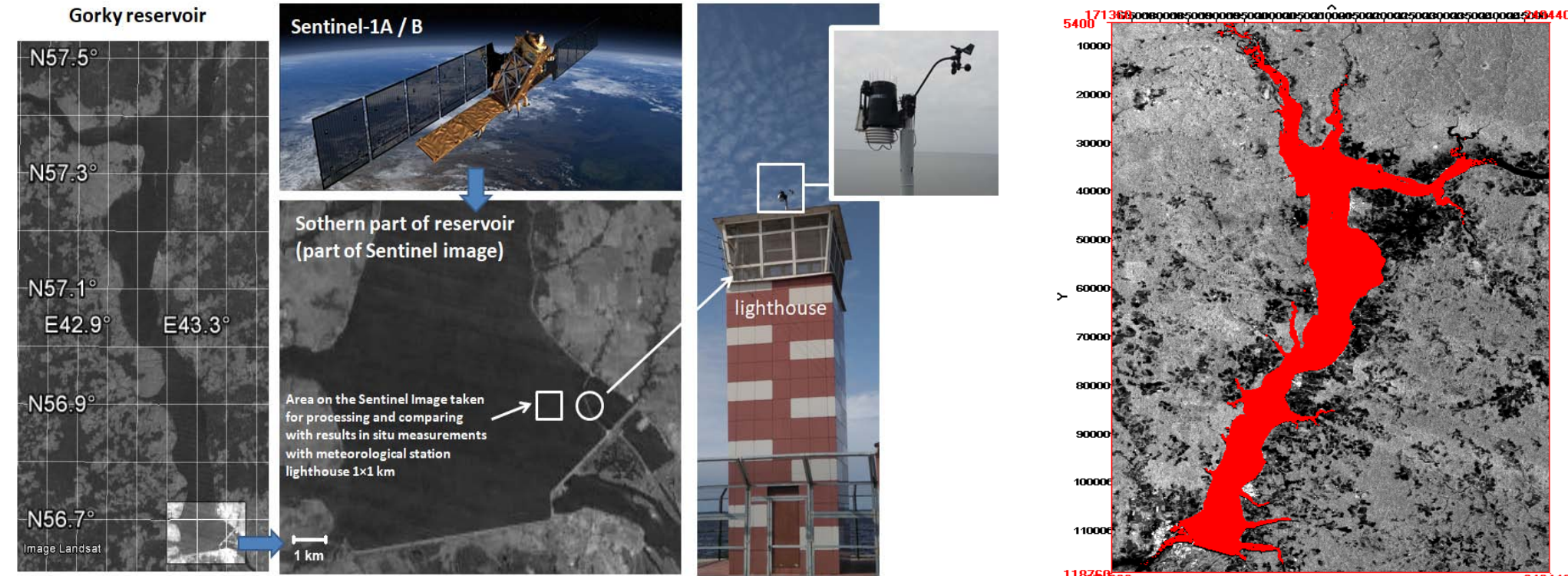
Одной из важнейших характеристик метеорологического состояния является скорость приземного ветра (обычно на высоте 10 м). Многочисленные попытки определить скорость ветра над морской поверхностью в широком диапазоне геофизических и географических условий предпринимались в течение последних 30 лет и до сих пор остаются актуальной проблемой. Одним из основных инструментов, используемых для решения этой задачи, является активное дистанционное зондирование с использованием микроволновых скаттерометров и радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленных на спутниках. Поскольку эти инструменты измеряют обратное рассеяние на морской поверхности, покрытой ветровыми волнами, а не скорость ветра напрямую, были предложены так называемые геофизические модельные функции, связывающие характеристики микроволнового обратного рассеяния со скоростью ветра. Построение этих функций становится возможным благодаря тому, что величина обратного рассеяния зависит от шероховатости водной поверхности и, как следствие, от направления ветра на поверхности (или скорости трения ветра), которая связана со скоростью ветра на высоте 10 м. В настоящее время для слабых и умеренных скоростей ветра широко используются геофизические модельные функции, разработанные для С-диапазона: CMOD4, CMOD5, CMOD5.N, CMOD_IFR2, CMOD7.

В настоящем исследовании мы провели валидацию и верификацию моделей С-диапазона (CMOD5.N, CMOD7, CSARMOD2 и ГМФ из (Radkani, Zakeri, 2020)) как для условий прибрежных океанических зон (и открытого океана), включая широкий спектр географических локаций, так и для условий внутреннего водоема на примере Горьковского водохранилища. Также предложена новая ГМФ С-диапазона, применимая к внутренним водам (в частности, к Горьковскому водохранилищу). Модель основана на расчетах с использованием двухмасштабной модели рассеяния электромагнитного излучения на шероховатой морской поверхности со спектром (Elfouhaily et al., 1997) и (Hwang et al., 2005).

Инструменты и данные

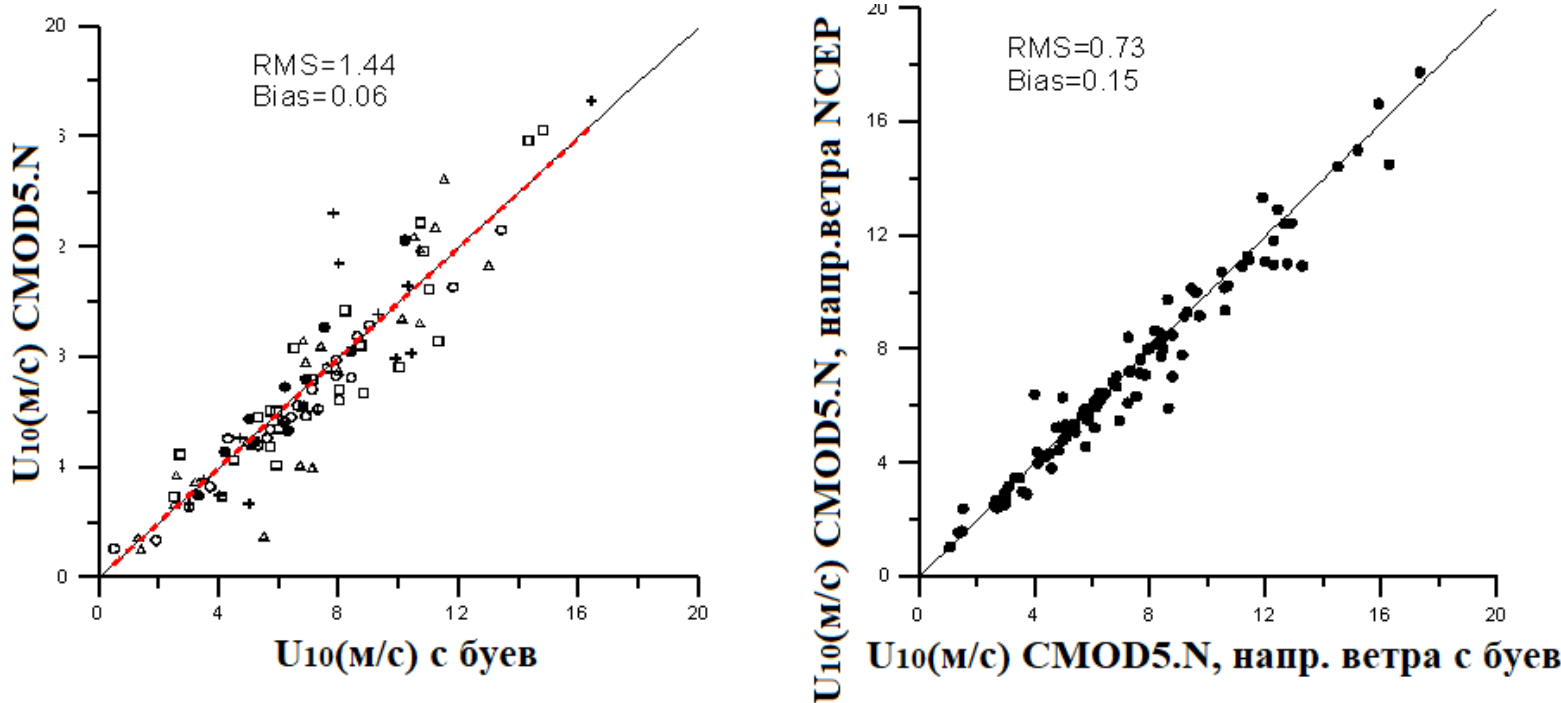
Проанализированы изображения С-диапазона, с РСА на борту спутников Sentinel-1 (S1). Режим Interferometric Wide Swath (IW). Для получения скорости ветра над океаном использованы продукты S1 IW GRDH (Ground Range Detected High-resolution) уровня 1 с поляризацией HH или VV, которые были откалиброваны и очищены от теплового шума. Верификация данных в условиях океана производилась с использованием данных с океанографических буев NOAA NDBC.

Для определения скорости ветра над внутренними водоемами: использованы 52 радиолокационных снимка (за исключением периода ледостава) со спутников Sentinel-1 за период с сентября 2017 года по июнь 2020 год. УЭПР усреднялась в пределах квадратного участка размером 1×1 км с центром на расстоянии 1.5 км от береговой линии и примерно в 1 км от маяка. Азимутальный угол 256 градусов. Угол падения 34.27 градуса, или 41.75 градуса. Данные о направлении ветра, необходимые для обработки, были получены с метеорологической станции.



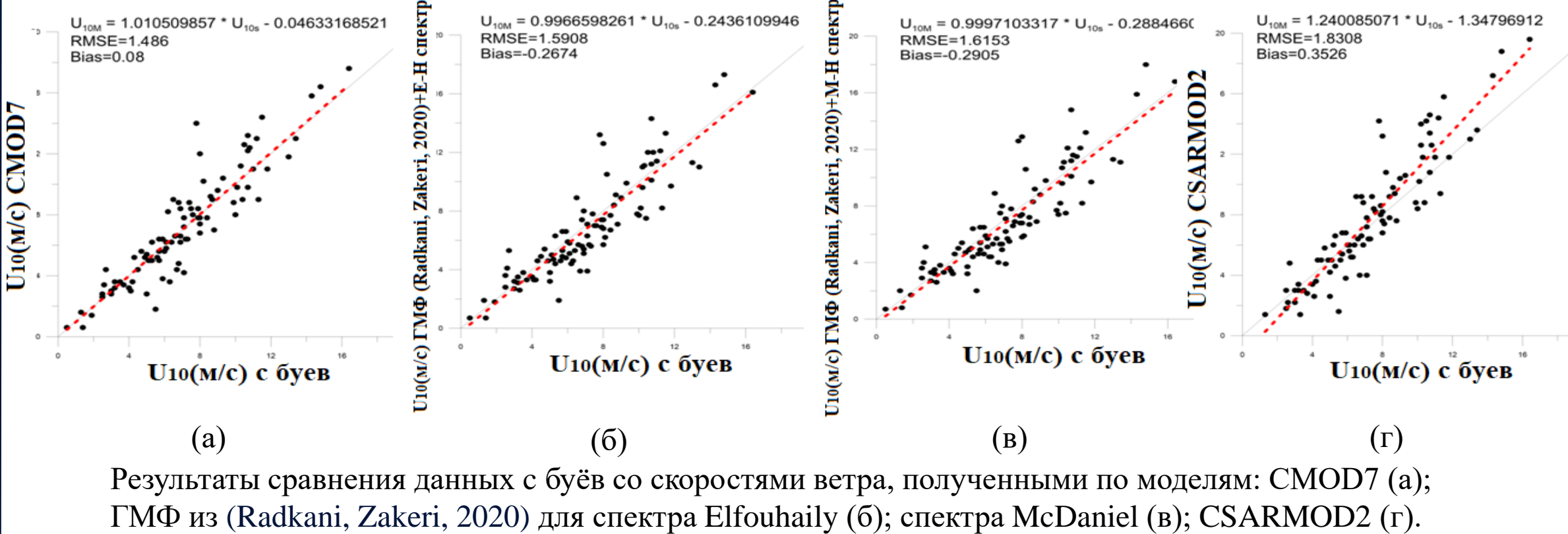
Проанализированные географические районы и соответствующие океанографические буй

Регион	1	2	3	4	5
Общие характеристики	Тихий океан, Северный тропик, Западные Гавайи	Атлантический океан, умеренный пояс, западное побережье Канады	Атлантический океан, Северный тропик, Пуэрто-Рико	Тихий океан, северная субполярная зона, Алеутские острова	Тихий океан, северная умеренная зона, восточное побережье Канады
Тип станции и идентификационный номер NDBC, координаты, высота установки анемометра z _a	Станция 51003 - к западу от Гавайев (19.196° с.ш., 160.639° з.д.) z _a =3.8 m	Станция 44137 - Восточный склон Скотия (42.260° с.ш., 62.030° з.д.) z _a =5 m	Станция 41043 - к северо-востоку от Пуэрто-Рико (21.030° с.ш., 64.790° з.д.) z _a =4.1 m	Станция 46072 - Центральные Алеутские острова (51.672° с.ш., 172.088° з.д.) z _a =4.1 m	Станция 46184 - Номад, Северный (53.920° с.ш., 138.850° з.д.) z _a =5 m
Количество изображений со спутников Sentinel-1 A/B в выбранном регионе за определенный период времени	24 (2020)	24 (2020)	24 (2020)	39 (2019-2020)	22 (2020)
Угол падения	43.38	37.26	38.32	31.14	35.72
Азимутальный угол	282	77	282	285	286



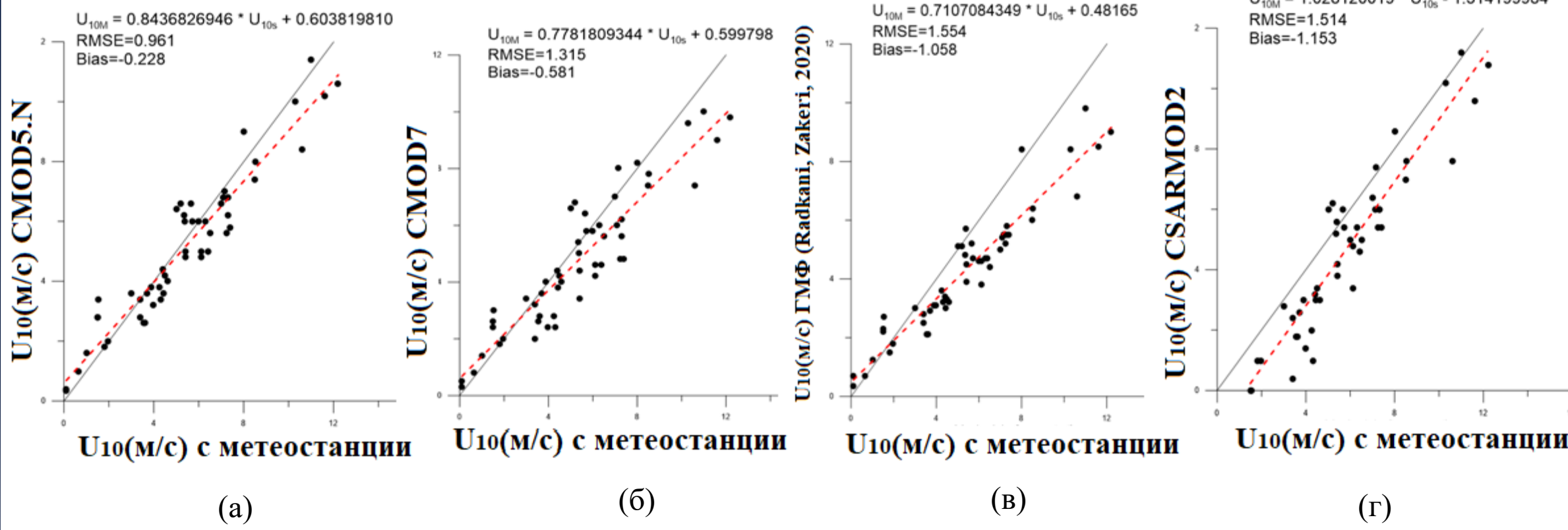
Сравнение результатов измерений анемометров с буев и результатов расчетов по модели CMOD5.N. Обозначения соответствуют районам: чёрные кружки — №1, треугольники — №2, незакрашенные кружки — №3, квадраты — №4, знаки «плюс» — №5. Чёрная линия y = x, красная пунктирная линия соответствует линейной аппроксимации y = 1,0099x (применена ко всему набору данных).

Сравнение расчетов скорости ветра, полученных по алгоритму CMOD5.N с использованием данных о направлении ветра из измерений буев, с данными реанализа NCEP, показало хорошее соответствие (RMSE=0.73 и bias=0.15). Этот результат говорит о том, что независимо от географического местоположения алгоритм работает достаточно хорошо, а результат существенно не зависит от выбора источника данных о направлении ветра.



Результаты сравнения данных с буев со скоростями ветра, полученными по моделям: CMOD7 (а); ГМФ из (Radkani, Zakeri, 2020) для спектра Elfouhaily (б); спектра McDaniel (в); CSARMOD2 (г).

Верификация модели CMOD5.N для условий внутренних водоёмов на примере Горьковского водохранилища и сравнение с расчётами по другим моделям С-диапазона



Результаты сравнения измерений анемометра U₁₀ с метеорологической станции на Горьковском водохранилище и результатов расчётов с использованием моделей CMOD5.N (а); CMOD7 (б); ГМФ со спектром Elfouhaily (в); CSARMOD2 (г). Чёрная линия соответствует линии y=x, красная пунктирная линия представляет линейную аппроксимацию.

Новая геофизическая модельная функция для условий Горьковского водохранилища

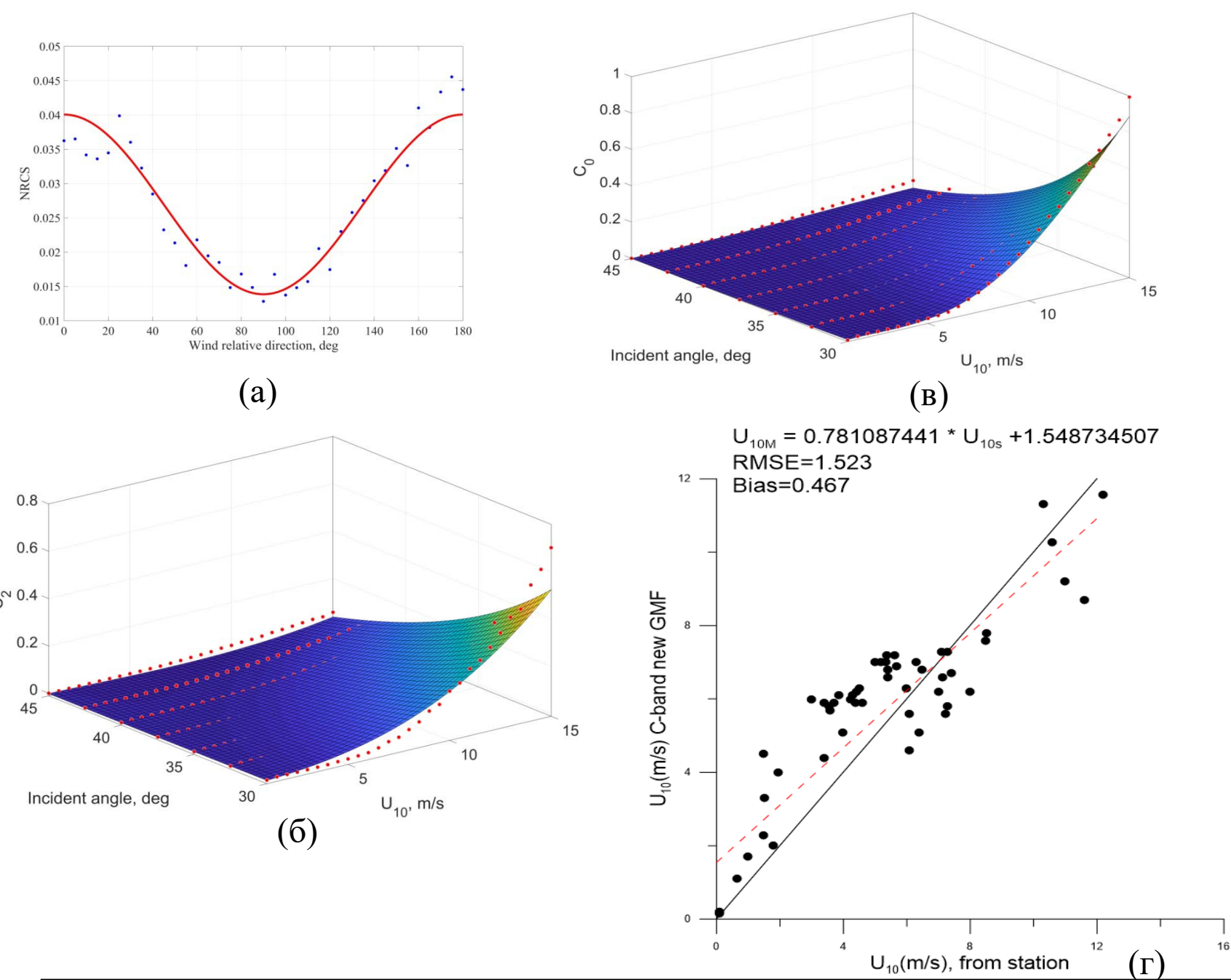
При построении ГМФ использовалась двухмасштабная модель рассеяния электромагнитного сигнала на взволнованной водной поверхности. Рассматриваемый диапазон скоростей ветра 0-15 м/с. Диапазоны углов падения (30°–45°) и относительных направлений ветра (0°–180°). В работе применялся спектр Elfouhaily, поскольку для волн метрового диапазона он имеет асимптотику k⁻³, которая наблюдалась для натурных данных для Горьковского водохранилища.

$$\sigma = C_0(U_{10}, \theta_i) + C_1(U_{10}, \theta_i) \cos(\varphi) + C_2(U_{10}, \theta_i) \cos(2\varphi) \quad (1)$$

Коэффициент C₁ полагаем равным нулю. Для определения значений коэффициентов C₀ и C₂ получаем зависимости C₀ и C₂ от относительного направления ветра для каждой скорости ветра и угла падения.

$$C_0(U_{10}, \theta_i) = (c_{11}\theta_i^\alpha + c_{12})U_{10} + (c_{21}\theta_i^\alpha + c_{22})U_{10}^2 + (c_{31}\theta_i^\alpha + c_{32})U_{10}^3 + (c_{41}\theta_i^\alpha + c_{42})U_{10}^4 \quad (2)$$

$$C_2(U_{10}, \theta_i) = (c'_{11}\theta_i^\beta + c'_{12})U_{10} + (c'_{21}\theta_i^\beta + c'_{22})U_{10}^2 + (c'_{31}\theta_i^\beta + c'_{32})U_{10}^3 \quad (3)$$



Зависимость модельной УЭПР от относительного направления ветра для скорости ветра 5 м/с (а) угол падения θ_i = 30° (точки представляют смоделированные значения, красная кривая соответствует аппроксимации (1)). Трёхмерная иллюстрация зависимости коэффициентов C₀ (б) и C₂ (в) от угла падения и скорости ветра. Красные точки соответствуют смоделированным значениям, а поверхности - аппроксимации выражений (2), (3).

Коэффициенты из (2)	Величина	Коэффициенты из (3)	Величина
C ₁₁	9.006e+04	C ₁₁	11
C ₁₂	-0.004009	C ₁₂	-0.004368
C ₂₁	-4.102e+04	C ₂₁	2.892
C ₂₂	0.001642	C ₂₂	-0.001052
C ₃₁	6432	C ₃₁	0.1384
C ₃₂	-0.0002178	C ₃₂	8.037e-07
C ₄₁	-192.3	β	-2.163
C ₄₂	5.855e-06		
α	-4.47		

Выводы

Расхождения между результатами, рассчитанными с помощью CMOD5.N и CMOD7, незначительны. ГМФ из (Radkani, Zakeri, 2020) довольно хорошо описывает условия океана, причем несколько лучше в случае расчетов для спектра (Elfouhaily et al., 1997). CSARMOD2 показала себя хуже других ГМФ, продемонстрировав более высокие значения смещения (bias) и среднеквадратичной ошибки (RMSE). Для Горьковского водохранилища было показано, что ГМФ из (Radkani, Zakeri, 2020) и CSARMOD2 наблюдались наибольшие RMSE и смещения. В то же время, среди четырех рассмотренных моделей лучше всех проявила себя CMOD5.N, продемонстрировав наименьшие RMSE и смещение (RMSE=0.961, смещение=−0.228).

Была разработана новая геофизическая модельная функция для С-диапазона, основанная на двухмасштабной модели, описывающей рассеяние электромагнитного излучения на шероховатой морской поверхности. Предложенная модель согласуется с натурными данными значительно лучше, чем CSARMOD2 и модель из (Radkani, Zakeri, 2020), но хуже, чем модели семейства CMOD. Причина может состоять в необходимости уточнения спектра для области модулирующих волн.