

Исследование применимости геофизических модельных функций С-диапазона для радиолокационных данных в условиях Горьковского водохранилища

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: nikitarusakov@ipfran.ru

Работа посвящена исследованию применимости геофизических модельных функций (ГМФ) CMOD5, CMOD5.N, CMOD7 для С-диапазона электромагнитных волн в условиях внутреннего водоёма (на примере Горьковского вдхр.). Предложенные ГМФ были использованы для расчёта скорости ветра по данным РСА-изображений со спутника Sentinel-1 для IW-моды и соосной поляризации. Значения направления скорости ветра, необходимые для расчётов в рамках выбранных ГМФ, были получены по измерениям с метеостанции, установленной в южной части акватории Горьковского вдхр. При этом данные метеостанции были совмещены с отобранными РСА-изображениями по времени и пространству. Было установлено, что наилучший результат обеспечивает модель CMOD5.N. Дополнительно были проведены расчёты скорости ветра в рамках геофизической модельной функции для внутренних водоёмов, разработанной на основе приближения малых уклонов SSA2 и комбинированных модельных спектров. Было установлено, что данная ГМФ воспроизводит скорость ветра с меньшей по сравнению с моделями CMOD точностью. Также было продемонстрировано, что для условий Горьковского вдхр. результаты расчётов CMOD удовлетворительно согласуются с прогнозами пространственного распределения поля скорости ветра, рассчитанного с помощью модели WRF (*англ.* Weather Research and Forecasting).

Ключевые слова: спутник Sentinel-1, внутренний водоём, РСА-изображение, С-диапазон, геофизическая модельная функция, океанографический буй

Одобрена к печати: 23.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-51-65

Введение

Одна из важнейших характеристик метеорологической обстановки приземного слоя атмосферы — скорость приземного ветра (обычно на высоте 10 м). В течение последних тридцати лет были предприняты многочисленные попытки сконструировать методы восстановления скорости ветра над морской поверхностью в широком диапазоне геофизических и географических условий (Lin et al., 2008; Vachon, Dobson, 1996; Verhoef et al., 2012; Wackerman et al., 1996). Одним из основных инструментов, используемых для восстановления скорости ветра, выступает активное дистанционное зондирование с использованием спутниковых микроволновых скаттерометров и РСА (радары с синтезированной апертурой). Данные устройства не измеряют непосредственно скорость ветра, а принимают сигнал обратного рассеяния от взволнованной водной поверхности, в связи с этим для восстановления скорости ветра по их измерениям необходимо разрабатывать так называемые геофизические модельные функции, связывающие характеристики обратного микроволнового рассеяния со скоростью ветра. Построение этих функций становится возможным, поскольку величина обратного рассеяния зависит от шероховатости водной поверхности и, как следствие, от ветрового поверхностного напряжения (или скорости трения ветра), которое связано со скоростью ветра на высоте 10 м (Монин, Обухов, 1954). В настоящее время для диапазона слабых и умеренных ветров активно применяется семейство геофизических модельных функций С-диапазона CMOD: CMOD4 (Donnelly et al., 1999; Stoffelen, Anderson, 1997), CMOD_IFR2 (Quilfen et al., 1998), CMOD5 (Hersbach et al., 2007), CMOD5.N (Hersbach, 2008), CMOD7 (Stoffelen et al., 2017). CMOD4 разработан на основе данных ERS-1 (*англ.* European Remote Sensing) (Stoffelen,

Anderson, 1997) и связывает удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) морской поверхности со скоростью ветра, углом падения и углом между азимутальным направлением и направлением ветра. При этом модель CMOD4 показала наличие значительных погрешностей в диапазоне слабых и умеренных ветров (Stoffelen, 1998) и существенное занижение скорости из-за насыщения обратного рассеяния в условиях штормовых и ураганных ветров (Donnelly et al., 1999). Вышеуказанные проблемы послужили толчком для усовершенствования этой модели, в результате чего на основе более 22 000 000 примеров пространственного и временного совмещения данных для обратного рассеяния со скаттерометра ERS-2 и скорости ветра по данным реанализа ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Европейский центр среднесрочного прогноза погоды (ЕЦСПП)) за период с 01.08.1998 по 31.12.1998 была разработана геофизическая модельная функция CMOD5. Данная модель тем не менее также демонстрировала заметные погрешности при определении скорости ветра. Следующим шагом стала разработка модели CMOD5.N на базе CMOD5 и доработка их коэффициентов для условий нейтральной атмосферы (Hersbach, 2008). В результате верификации на основе данных ERS-2 и ASCAT (*англ.* Advanced Scatterometer) рассчитанные с помощью CMOD5.N значения оказались в среднем на 0,7 м/с выше полученных по CMOD5. Позже на основе данных скаттерометров ERS и ASCAT была разработана новая геофизическая модельная функция CMOD7, её создание было мотивировано необходимостью снижения ошибок, возникающих при восстановлении скорости с помощью CMOD5.N в диапазоне слабых ветров (Stoffelen et al., 2017).

Все вышеперечисленные модели разрабатывались на основе данных, полученных со скаттерометров, тем не менее были предприняты также и попытки использовать эти ГМФ для восстановления скорости ветра по данным PCA (Dobson, 2000; Horstmann, Koch, 2005; Horstmann et al., 2002, 2003; Lehner et al., 1998, 2000; Monaldo et al., 2016; Takeyama et al., 2013; Vachon, Dobson, 2000; Wang et al., 2017; Wei et al., 2020; Yang et al., 2011; Zhang et al., 2011), некоторые из которых были сделаны для спутников Radarsat-1, -2 (Horstmann et al., 2002; Takeyama et al., 2013; Yang et al., 2011; Zhang et al., 2011). На следующем этапе исследований были разработаны геофизические модельные функции C-SARMOD и C-SARMOD2, основанные на использовании PCA-изображений со спутников Radarsat-2 и Sentinel-1, совмещённых с данными с буёв (Lu et al., 2018; Mouche, Chapron, 2015). Сопоставление результатов расчётов на основе C-SARMOD с расчётами в рамках CMOD5.N продемонстрировало неоднозначные результаты. С одной стороны, оказалось, что в диапазоне слабых ветров ошибки, возникающие при использовании C-SARMOD, меньше; с другой стороны, для всего диапазона углов падения для умеренных ветров они имели значения, большие, чем возникающие для CMOD5.N.

Необходимо отметить также, что все существующие модели восстановления скорости ветра по данным дистанционного зондирования разработаны для условий открытого океана, а вопрос их применимости для внутренних водоёмов остаётся не исследованным. В то же время использование этих методов для восстановления скорости ветра по данным PCA для внутренних морей, озёр или водохранилищ может оказаться очень полезным за счёт более высокого пространственного разрешения, нехарактерного для скаттерометров. Эти данные о скорости ветра для внутренних водоёмов очень важны для мониторинга и прогнозирования погодных условий с высоким разрешением, что в последнее время становится всё более актуальной задачей (Kuznetsova et al., 2016; Mallard et al., 2015). Также следует отметить, что дистанционное зондирование со спутников Sentinel-1A/B проводится чаще для поверхности суши, чем для условий открытого океана, что обуславливает достаточное количество данных для внутренних водоёмов. Однако до сих пор существует очень мало исследований, в которых описаны попытки восстановления скорости ветра над озёрами, внутренними морями и водохранилищами по данным PCA. В частности, в работе (Katona, Bartsch, 2018) было проведено восстановление скорости ветра на основе использования PCA-изображений, полученных для ряда озёр Венгрии и Австрии (озёра Зальцкаммергут, Нойзидль и Балатон) со спутника Sentinel-1. Авторы предложили эмпирические зависимости между УЭПР и скоростью ветра для соосной и перекрёстной поляризаций (VV и VH соответственно (V — вертикальная,

от *англ.* vertical; Н — горизонтальная, от *англ.* horizontal)), представленные экспоненциальными функциями. Данные РСА были откалиброваны с использованием измерений метеорологической станции. При этом было показано, что между результатами для восходящей и нисходящей орбиты есть заметные различия.

Исследование, представленное в публикации (Radkani, Zakeri, 2020), включало в себя применение разработанных для скаттерометров и РСА ГМФ для южной части Каспийского моря к РСА-изображениям на соосной поляризации со спутников Sentinel-1A/B на основе сравнения с данными реанализа стандартного разрешения 25 км. Было продемонстрировано, что модель CMOD7 показала наименьшее среднеквадратичное отклонение.

Однако следует отметить, что подавляющее большинство внутренних водоёмов, в том числе и крупных, имеют масштабы, значительно меньшие, чем разрешающая способность данных реанализа, используемая в работе (Radkani, Zakeri, 2020) для верификации.

Несмотря на немногочисленные попытки применить ГМФ, разработанные преимущественно для океанических условий, к условиям внутренних водоёмов, вопрос о том, какая модель более адекватна в этом случае, остаётся открытым. Поэтому верификация алгоритмов CMOD для РСА-изображений со спутников Sentinel-1A/B для внутренних водоёмов до сих пор считается актуальной задачей.

В настоящей работе мы провели исследование применимости моделей CMOD5, CMOD5.N и CMOD7 для условий внутреннего водоёма на примере Горьковского вдхр. Наряду с моделями семейства CMOD были проанализированы результаты расчётов в рамках модели для внутренних водоёмов, представленной в публикации (Radkani, Zakeri, 2020). В заключительной части исследования скорость ветра, рассчитанная по предложенным геофизическим модельным функциям из семейства CMOD, сравнивалась с расчётными данными в рамках модели WRF (*англ.* Weather Research and Forecasting) (Skamarock et al., 2008).

Исследование применимости моделей CMOD5, CMOD5.N и CMOD7 для условий Горьковского водохранилища

Для восстановления скорости ветра в условиях Горьковского вдхр. использовались данные со спутников Sentinel-1A/B, осуществляющих съёмку в С-диапазоне (загружены с ресурса <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), для соосной VV и перекрёстной VH поляризации. Были отобраны снимки, полученные для моды IW (*англ.* Interferometric Wide swath), так как она обеспечивает хорошее разрешение в сочетании с большой площадью покрытия (250 км по дальности и 200 км по азимуту), и именно для этой моды осуществляется регулярная съёмка водной поверхности. Для анализа были использованы первичные данные GRDH level-1 (*англ.* Ground Range Detected High-resolution), полученные за период с сентября 2017 г. по конец 2022 г., которые были откалиброваны и подвержены процедуре удаления термического шума. За это время было отобрано 80 снимков (исключая период ледостава) территории, к которой относилась южная часть водохранилища, где располагался маяк с метеорологической станцией. Для оценки эффективности работы геофизических модельных функций в условиях внутреннего водоёма РСА-изображения отбирались таким образом, чтобы они были максимально близко совмещены по времени и пространству с данными наблюдений метеорологической обстановки с помощью станции, установленной на крыше маяка (высота 9,5 м от водной поверхности) в южной части Горьковского вдхр. Сам маяк располагается в конце длинного узкого мола (*рис. 1*, см. с. 54), ограничивающего аванпорт перед шлюзами, что уменьшало влияние эффектов экранирования воздушного потока за счёт топографии береговой линии.

В процессе работы с отобранными РСА-изображениями было вычислено среднее значение УЭПР для соосной VV-поляризации внутри квадратной области размером 1×1 км, центр которой находился в 1,5 км от маяка. При зондировании азимутальный угол был постоянным и составлял 256° , угол падения для одной группы изображений был равен $34,27^\circ$, а для другой — $41,75^\circ$. Данные о направлении ветра брались по измерениям с метеостанции.



Рис. 1. Карта Горьковского вдхр. (слева); южная часть водохранилища с указанием расположения маяка, где установлена станция, и области, где вычисляется УЭПР (в центре); маяк с установленной на крыше станцией (справа)

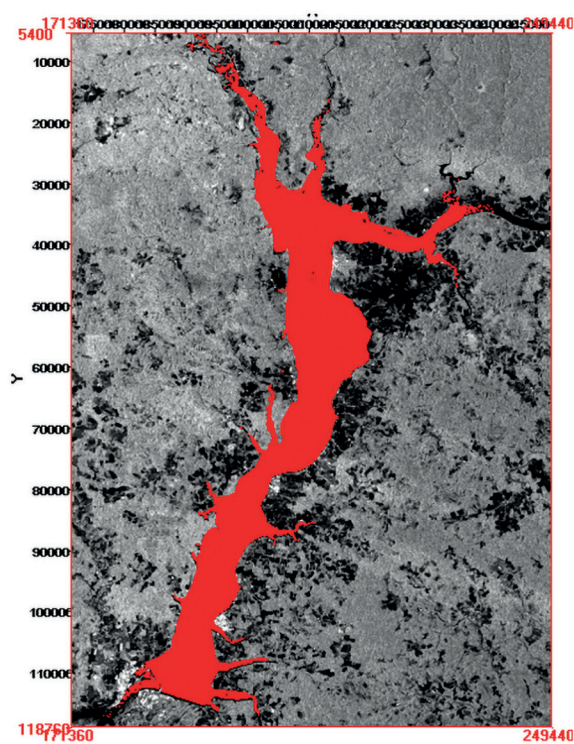


Рис. 2. Обработанное РСА-изображение на перекрёстной VH-поляризации для установления границ береговой линии

Восстановление скорости проводилось на основе РСА-изображений для соосной поляризации, в то время как изображения для перекрёстной поляризации были использованы во вспомогательной задаче — при определении береговой линии водохранилища (рис. 2), так как для этой поляризации зависимость УЭПР от ветровых (волновых) условий намного более слабая, чем для VV-поляризации.

Для восстановления поля скорости были выбраны три геофизические модельные функции: CMOD5, CMOD5.N и CMOD7, наиболее широко применяемые в настоящее время в задачах восстановления скорости ветра в условиях открытого океана. В соответствии с этими алгоритмами значение УЭПР морской поверхности σ_0 представляется как функция скорости ветра v , направления ветра χ и угла падения θ (Hersbach, 2008):

$$\sigma_0 = B_0(c_0, v, \theta) \left(1 + B_1(c_1, v, \theta) \cos \varphi + B_2(c_2, v, \theta) \cos(2\varphi) \right)^{1,6},$$

где $\varphi = \chi - \alpha$ — относительное направление между направлением ветра χ и азимутальным углом α (Hersbach, 2008). Остальные параметры B_i ($i = 0, 1, 2$) зависят от угла падения сигнала радара, скорости ветра и коэффициентов c_i . Параметр B_0 определяет порядок величины скорости ветра, в то время как параметр B_2 отражает асимметрию по ветру и боковому ветру, а B_1 позволяет уточнить значение скорости ветра для направления ветра в диапазоне 180° . Для модели CMOD5.N 28 коэффициентов c_i были пересчитаны по отношению к CMOD5, исходя из условия, что CMOD5.N должна обеспечивать величину скорости ветра на 0,7 м/с больше,

чем при расчётах в рамках CMOD5 для всех значений скорости ветра и углов падения. Позже для адаптации алгоритма по данным ASCAT была разработана модель CMOD7 (Stoffelen et al., 2017). В настоящей работе мы сделали попытку применить три обозначенные модели для восстановления скорости ветра по данным РСА-изображений Горьковского вдхр., полученных со спутника Sentinel-1. Чтобы определить значение УЭПР на основе РСА-изображений с использованием семейства моделей CMOD, необходимы данные о направлении ветра из независимого внешнего источника. В качестве подобных источников использованы результаты натуральных наблюдений, полученных с метеостанции.

Анализ проведённых расчётов показывает, что все три модели дают заметные величины средней разности расчётной и измеренной скорости (ниже будем называть это смещение B) и среднеквадратичного отклонения (СКО). Все смещения оказываются отрицательными: $B = -1,29$ (CMOD5); $B = -0,51$ (CMOD5.N); $B = -0,89$ (CMOD7), что говорит о недооценке скорости ветра при расчётах в рамках всех трёх моделей. Самые плохие статистические показатели демонстрирует модель CMOD5, рассчитанные значения скорости при этом оказываются сильно заниженными и демонстрируют значительное среднеквадратичное отклонение, имеющее величину 2,26.

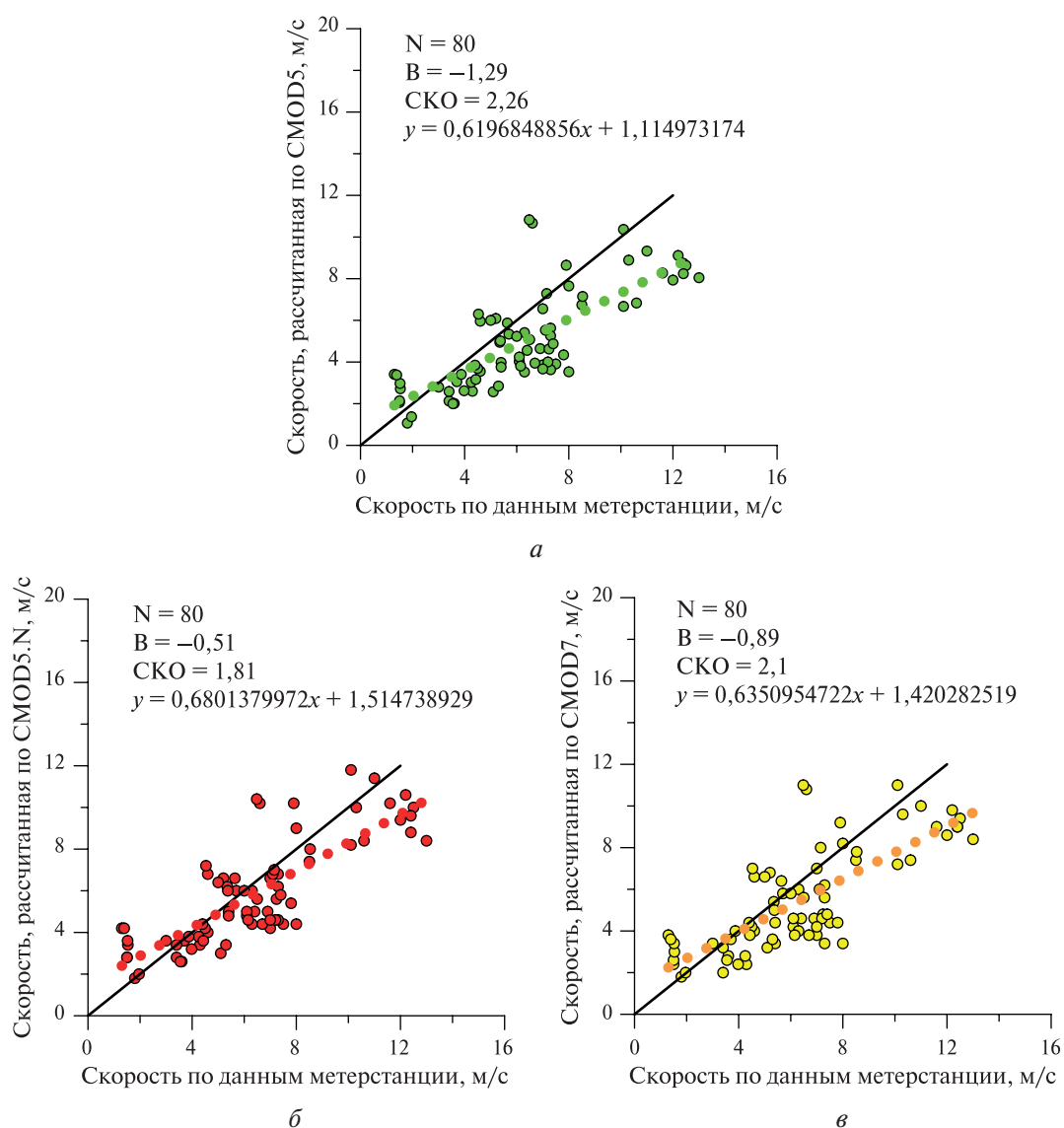


Рис. 3. Результаты сопоставления измерений скорости ветра на высоте 10 м (U_{10}) анемометром со станции на Горьковском вдхр. и рассчитанных значений по моделям CMOD5 (а), CMOD5.N (б) и CMOD7 (в). Сплошные чёрные прямые — $y = x$, штриховые линии — линейные аппроксимации

Статистические показатели для моделей CMOD5.N и CMOD7 оказываются близкими: СКО = 1,81 (CMOD5.N); СКО = 2,1 (CMOD7). Тем не менее сопоставление результатов (рис. 3, см. с. 55) указывает на то, что несколько большую точность для условий Горьковского вдхр. обеспечивает именно модель CMOD5.N, в то время как модели CMOD5 и CMOD7 дают погрешность более 25–30 % при восстановлении скорости с величинами более 8 м/с. CMOD5.N с меньшей погрешностью (менее 25 %) позволяет восстановить скорость до 12 м/с. Поскольку в Горьковском вдхр. скорость ветра редко превышает 10–12 м/с (в период май – август средняя скорость ветра находится в диапазоне 3,4–5,2 м/с, а в осенний период – 3,9–7,4 м/с) (Гири́н, 2022), модель CMOD5.N может быть использована для восстановления скорости ветра в интервале от 4 м/с, в то же время для скорости менее 4 м/с лучший результат даёт модель CMOD7. Данный результат может быть связан с различием параметров ветровых волн, обусловленным тем, что возраст волнения в условиях внутреннего водоёма существенно меньше, нежели в условиях открытого океана.

Исследование применимости геофизической модельной функции, основанной на приближении малых уклонов, для условий Горьковского водохранилища

В качестве альтернативы семейству моделей CMOD рассмотрим также возможность применения к условиям Горьковского вдхр. геофизической модельной функции, предложенной в работе (Radkani, Zakeri, 2020).

В основе данной модели лежит использование приближения малых уклонов (*англ.* Small-Slope Approximation — SSA2) для моделирования рассеяния электромагнитного излучения на морской поверхности (Voronovich, Zavorotny, 2001) и модельных спектров (Hwang, 2005) для изотропной части спектра и спектров (Elfouhaily et al., 1997) и (McDaniel, 2001) для части спектра, зависящей от направления. Такие комбинированные спектры ниже будем обозначать Н-Е и Н-М соответственно. При создании данной модели расчёты выполнялись для С-диапазона (частота 5,405 ГГц, используемая для PCA Sentinel-1) и соосной поляризации VV. Расчётный диапазон углов падения включал в том числе и наблюдаемые в настоящей работе величины и был равен 30–45° с интервалом 2,5°. Рассматриваемый диапазон скорости ветра составлял 0–16 м/с, что вполне типично для Горьковского вдхр. и покрывал все возможные значения скорости, наблюдаемые на его акватории в разные сезоны. Интервал скорости ветра при расчётах составлял 0,5 м/с, а диапазон направления ветра был равен 0–180° с шагом 5°. В настоящей работе было использовано следующее выражение для геофизической модельной функции (Radkani, Zakeri, 2020):

$$\sigma_0 = A_0(U_{10}, \theta_i) + A_2(U_{10}, \theta_i) \cos(2\varphi), \quad (1)$$

где σ_0 — УЭПР морской поверхности; U_{10} — скорость ветра на высоте 10 м; θ — угол падения; φ — угол между направлением зондирования и направлением ветра. Для того чтобы определить коэффициенты A_0 и A_2 , в работе (Radkani, Zakeri, 2020) для каждого интервала углов падения и интервала скорости анализируется облако расчётных данных для УЭПР, которые аппроксимируются зависимостью (1). В результате данной аппроксимации устанавливаются величины искомых коэффициентов. Но поскольку величины коэффициентов оказываются разными для различных углов падения и различных скоростей, авторы проводят дополнительную аппроксимацию коэффициентов A_0 и A_2 полиномиальными функциями по углу и степенными по скорости:

$$A_0(U_{10}, \theta_i) = \sum_{m=1}^4 (a_{m1} \theta_i^b + a_{m2}) U_{10}^m, \quad A_2(U_{10}, \theta_i) = \sum_{m=1}^3 (c_{m1} \theta_i^d + c_{m2}) U_{10}^m.$$

Далее зависимости для данных величин определяются авторами на основе аппроксимации зависимостей УЭПР от скорости ветра при фиксированных углах падения и, соответственно, наоборот, при фиксированной скорости ветра от углов падения.

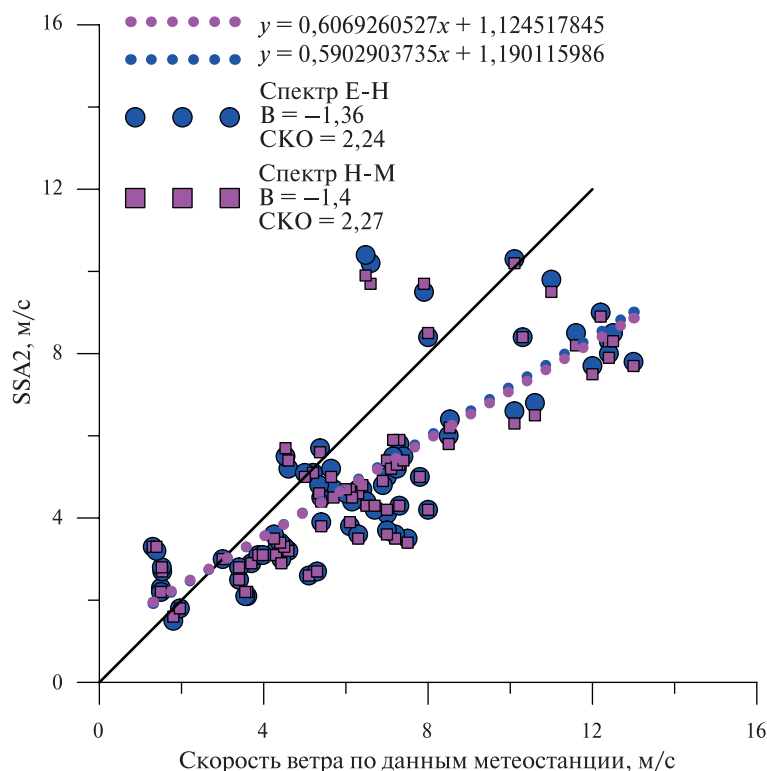


Рис. 4. Результаты сопоставления расчётов U_{10} согласно модели (Radkani, Zakeri, 2020) для спектров Е-Н (синие символы) и Н-М (розовые символы) с измерениями с анемометра со станции на Горьковском вдхр.

В нашей работе мы используем данную ГМФ со значениями коэффициентов, предложенными в работе (Radkani, Zakeri, 2020), для двух вариантов модельных спектров: (Elfouhaily et al., 1997) и (McDaniel, 2001). Зависимости для углов падения микроволнового излучения $34,27$ и $41,75^\circ$ скорости ветра, рассчитанной в рамках описанной выше модельной ГМФ, от показаний с метеостанции изображены на рис. 4.

Необходимо отметить, что расчёты по модели с двумя различными спектрами дают близкие результаты. В обоих случаях наблюдается заметная недооценка величины скорости по сравнению с измеренными значениями, которая, однако, превышает аналогичные величины для всех рассмотренных моделей СМОД. Что же касается среднеквадратичного отклонения, то для обоих спектров оно оказывается близким к величине, полученной для модели СМОД5, которая, как это было видно выше, зарекомендовала себя хуже остальных. В то же время, если сравнивать результаты модельных расчётов между собой, то можно утверждать, что несколько лучший результат обеспечивает расчёт, включающий спектр Е-Н (величины $B = -1,36$ и $SKO = 2,24$).

Полученный результат подтверждается тем фактом, что наилучшая корреляция смоделированных в рамках модели (Radkani, Zakeri, 2020) данных наблюдается с результатами оценок по модели СМОД5, что хорошо видно из рис. 5 (см. с. 58). В то же время для зависимости результатов расчётов по модели (Radkani, Zakeri, 2020) от значений скорости, полученных по модели СМОД7, наблюдается некоторое завышение рассчитанных значений и больший разброс. Оба эти параметра ещё более увеличиваются при сравнении с результатами расчётов по модели СМОД5.N.

Данные результаты, возможно, обусловлены тем, что выбранные модельные спектры могут оказаться совершенно нетипичными в условиях Горьковского вдхр. в связи с его особой геометрией: водохранилище имеет сильно вытянутую в одном направлении форму. Таким образом, очевидно, что выбранная модель нуждается в доработке с учётом формы спектра, характерного именно для условий Горьковского вдхр.

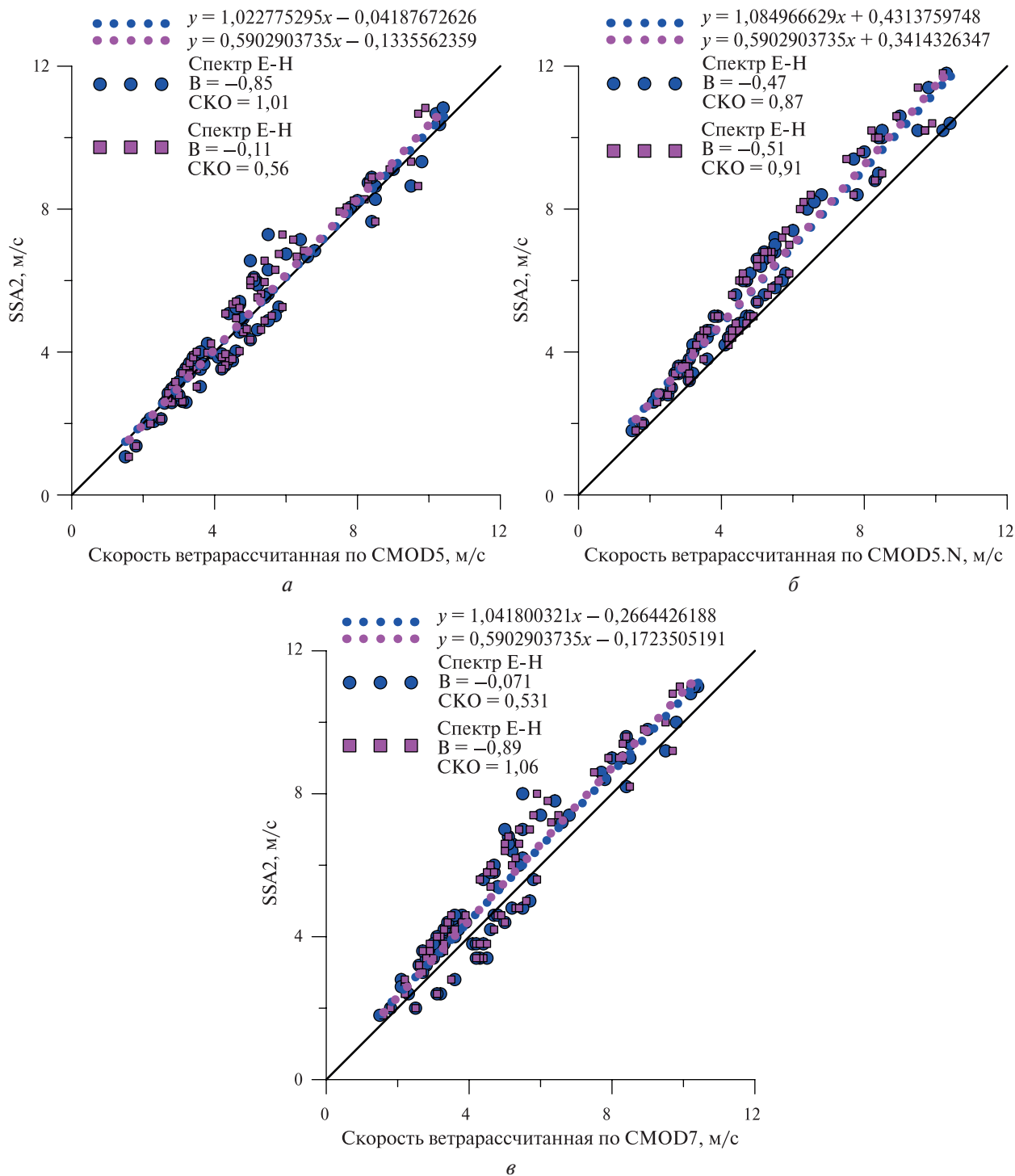


Рис. 5. Результаты сопоставления расчётов U_{10} согласно модели (Radkani, Zakeri, 2020) для спектров Е-Н (синие символы) и Н-М (розовые символы) с расчётами в рамках моделей CMOD5 (а), CMOD5.N (б) и CMOD7 (в)

Также необходимо учесть, что разработка модели (Radkani, Zakeri, 2020) проводилась для условий Каспийского моря, которое хотя и является слабосоленым, однако его диэлектрическая проницаемость несколько отличается от диэлектрической проницаемости пресноводного Горьковского вдхр.

На финальном этапе работы была выполнена дополнительная верификация на основе сравнения с результатами численного прогноза метеорологической обстановки высокого разрешения, полученного с использованием глобальной модели WRF (v. 4.3.1).

Применение модели WRF к условиям внутреннего водоёма было подробно описано авторами в публикации (Kuznetsova et al., 2019). В настоящей работе были использованы четыре вложенных домена с минимальным размером ячейки 1 км (рис. 6). В качестве входных данных были использованы данные реанализа CFSv2 (англ. Climate Forecast System Reanalysis Version 2) (ds094.0) (Saha et al., 2010). Расчёты были осуществлены с привлечением параметризации для планетарного пограничного слоя (ППС) по схеме Университета Йонсей (англ. Yonsei University — YSU, Сеул, Южная Корея) (Hong et al., 2006) и параметризации приземного слоя атмосферы по модифицированной схеме MM5 для более крупных областей (Jimenez et al., 2012). Для наименьшего домена использовался метод крупных вихрей для параметризации поверхностного слоя.

WPS Domain Configuration

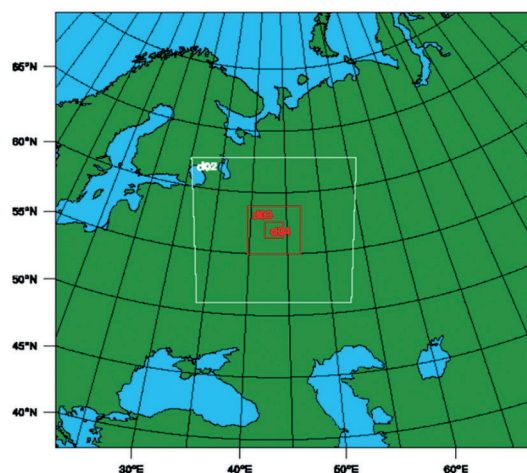


Рис. 6. Конфигурация доменов, используемых для WRF

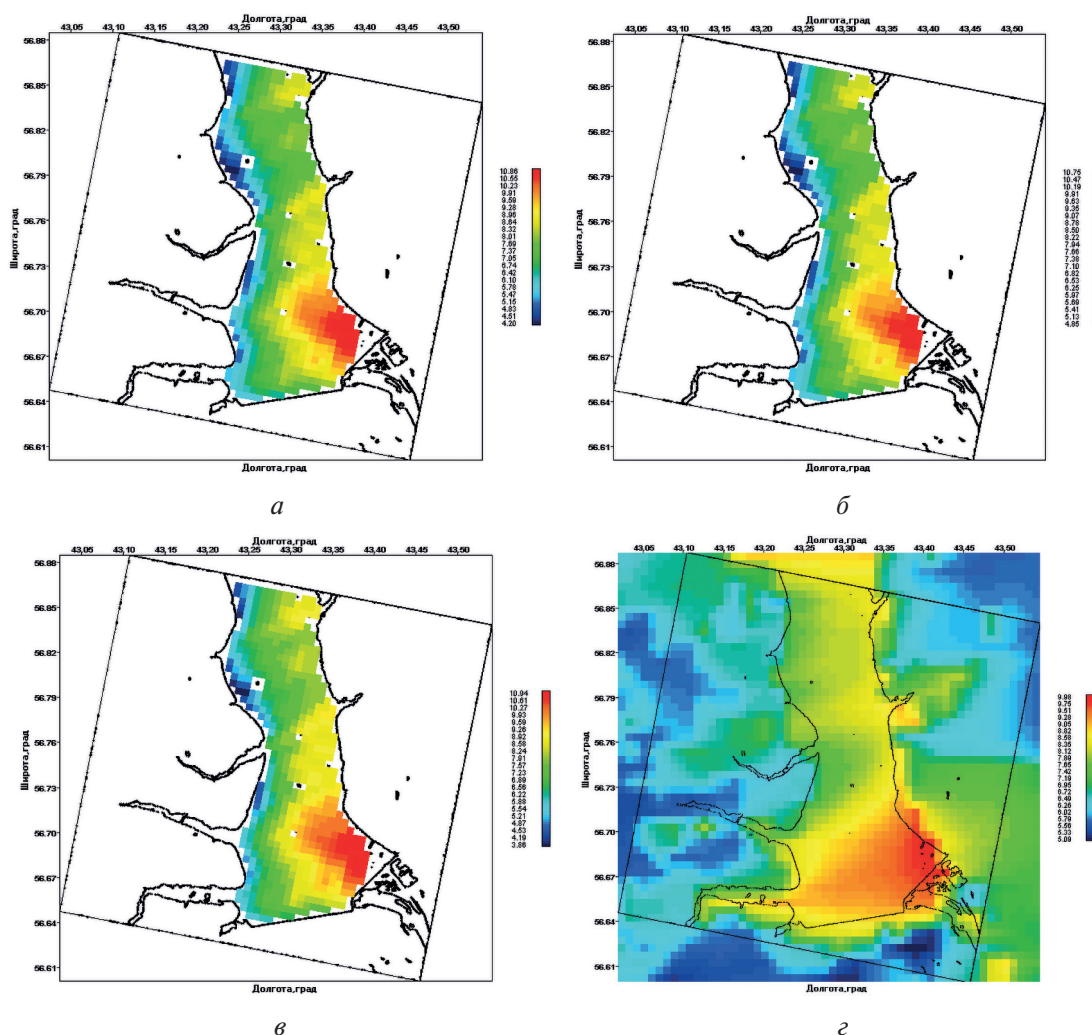


Рис. 7. Распределение скорости ветра, полученное с помощью моделей CMOD5 (а), CMOD5.N (б) и CMOD7 (в) (снимок от 28.09.2018, 03:29 UTC, шкала в м/с); распределение скорости ветра по данным расчётов WRF на 28.09.2018, 04:00 UTC, шкала в м/с (г)

Схема Кесслера (Kessler, 1969) использовалась для параметризации микрофизики облаков. При описании подстилающей поверхности применялась 5-слойная схема термодиффузии (Dudhia et al., 1996). Для описания коротковолнового и длинноволнового излучения использовались схемы Dudhia Shortwave Scheme (Dudhia et al., 1989) и RRTM (*англ.* Rapid Radiative Transfer Model) Longwave Scheme (Mlawer et al., 1997). Для сравнения был выбран снимок от 28.09.2018 03:29 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время), когда наблюдались ветры с порывами до 12 м/с. Полученное по результатам обработки снимка распределение U_{10} показано на *рис. 7а*. Максимальная скорость ветра при юго-западном направлении как раз была зафиксирована вблизи маяка.

На *рис. 7б* показан результат расчёта скорости ветра на высоте 10 м для 28.09.2018 04:00 UTC. Сравнивая поля скорости на *рис. 7*, можно убедиться в удовлетворительном качественном согласии пространственного распределения скорости ветра в случае расчётов WRF и CMOD. При этом следует отметить, что для данных, восстановленных по CMOD-моделям, минимальные скорости ветра у подветренного берега оказались меньше, чем в расчётах, а вблизи наветренного берега максимальные скорости оказались больше, чем в расчётах. Первое можно объяснить экранировкой береговой линии, особенности топографии которой не учитывались в расчётах (см. *рис. 7б*), а второе может быть связано с особенностями развития волнения и, соответственно, с характеристиками шероховатости для условий малых разгонов на внутренних водоёмах при сильных ветрах.

Заключение

В работе исследована возможность применения алгоритмов группы CMOD для восстановления величины скорости ветра на высоте 10 м по данным РСА спутника Sentinel-1 для условий Горьковского вдхр. Для анализа были использованы модели CMOD5, CMOD5.N и CMOD7. Основной мотивацией, послужившей толчком к проведению данного исследования, стала необходимость выяснения возможности применения для РСА широко используемых в современной практике алгоритмов, разработанных в основном для скаттерометров, а также исследование применимости алгоритмов, созданных для открытого океана, к условиям внутренних водоёмов.

За период с 2018 по 2022 г. было рассмотрено 80 РСА-изображений Горьковского вдхр. для IW-моды и соосной поляризации VV. Данные о направлении ветра, которые необходимы при использовании алгоритмов группы CMOD, брались по измерениям размещённой в южной части Горьковского вдхр. метеостанции.

Сопоставление результатов расчётов, выполненных в рамках моделей семейства CMOD, с данными, полученными с метеостанции, продемонстрировало наличие в среднем недооценки величины скорости ветра, рассчитанной всеми тремя моделями, по сравнению с натурными измерениями (отрицательные смещения для всех трёх моделей). Необходимо отметить, что, хотя в среднем для всего рассматриваемого диапазона скорости все алгоритмы дают заниженные значения скорости, внутри этих диапазонов для величины скорости ниже 4–5 м/с они скорость завышают, а для скорости в интервале от 4–12 м/с, наоборот, занижают. В то же время самый лучший результат с точки зрения статистических характеристик продемонстрировала модель CMOD5.N, которая обеспечила наименьшую среди остальных моделей величину смещения и среднеквадратичного отклонения. Она даёт наилучшую точность при восстановлении скорости в области выше 4–5 м/с. Для восстановления же скорости менее 4 м/с использование алгоритмов CMOD5 или CMOD7 даёт несколько большую точность.

Наряду с моделями CMOD была проанализирована эффективность применения модели, разработанной в исследовании (Radkani, Zakeri, 2020). Данная геофизическая модельная функция построена с применением приближения малых уклонов SSA2 (Voronovich, Zavorotny, 2001) и использованием комбинированных модельных спектров: (Hwang, 2005) и (Elfouhaily et al., 1997), (Hwang, 2005) и (McDaniel, 2001). Анализ рассчитанных по такой модели величин скорости показал, что статистические характеристики их зависимостей от на-

турных данных оказываются хуже, чем по всем моделям группы CMOD. Что, по-видимому, может быть связано с необходимостью пересмотра модели путём замены предложенных модельных спектров на спектр, типичный именно для Горьковского вдхр. Сравнение результатов расчётов величин скорости по модели (Radkani, Zakeri, 2020) с расчётами в рамках моделей CMOD показало, что наилучшее согласие наблюдается именно для модели CMOD5, в то время как именно эта модель хуже всего работает для Горьковского вдхр.

Проведено сравнение скорости ветра, полученной по РСА-изображениям на основе применения моделей CMOD, с результатами прогноза расчётов в рамках модели WRF. Следует отметить, что общая конфигурация пространственного распределения скорости ветра неплохо согласуется во всех случаях. Однако для данных, рассчитанных с помощью CMOD, минимальная скорость ветра у подветренного берега оказывается ниже, чем предсказанная на основе модели WRF, а у наветренного берега максимальная скорость ветра больше, чем предсказанная WRF. Расхождение результатов, наблюдаемое для подветренного берега, может быть связано с экранированием береговой линией, особенности топографии которой в расчётах не учитываются, а для наветренного — с особенностями развития волнения и, соответственно, с характеристиками шероховатости для условий малых разгонов, характерных для внутренних водоёмов.

Обработка данных дистанционного зондирования, анализ результатов и верификация выполнены при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 1-17-00214, численное моделирование с помощью модели WRF проведено при финансовой поддержке Научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего» (соглашение № 075-02-2023-911).

Литература

1. *Гурин С. Н.* Анализ обоснованности ограничений эксплуатации пассажирских судов в Горьковском водохранилище // Науч. проблемы водного транспорта. 2022. № 72. С. 167–179. DOI: 10.37890/jwt.vi72.256.
2. *Монин А. С., Обухов А. М.* Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1954. Т. 24. № 151. С. 163–187.
3. *Donnelly W. J., Carswell J. R., McIntosh R. E. et al.* Revised Ocean Backscatter Models at C- and Ku-band under High-wind Conditions // J. Geophysical Research. 1999. V. 104(C5). P. 11485–11497. DOI: 10.1029/1998JC900030.
4. *Dudhia J.* Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model // J. Atmospheric Sciences. 1989. V. 46. P. 3077–3107. DOI: 10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
5. *Dudhia J.* A multi-layer soil temperature model for MM5 // The 6th PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop. Boulder. 1996. P. 49–50.
6. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-Driven Waves // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 15781–15796. DOI: 10.1029/97jc00467.
7. *Hersbach H.* CMOD5.n: A C-band geophysical model function for equivalent neutral wind. Technical memorandum 554. 2008. 20 p. <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2008/9873-cmod5n-c-band-geophysical-model-function-equivalent-neutral-wind.pdf>.
8. *Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S.* An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5 // J. Geophysical Research. 2007. V. 112(C3). Article C03006. DOI: 10.1029/2006JC003743.
9. *Hong S. Y., Noh Y., Dudhia J.* A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes // Monthly Weather Review. 2006. V. 134. P. 2318–2341. DOI: 10.1175/MWR3199.1.
10. *Horstmann J., Koch W.* Measurement of ocean surface winds using synthetic aperture radars // IEEE J. Oceanic Engineering. 2005. V. 30. Iss. 3. P. 508–515. DOI: 10.1109/JOE.2005.857514.
11. *Horstmann J., Koch W., Lehner S., Tonboe R.* Ocean winds from Radarsat-1 ScanSAR // Canadian J. Remote Sensing. 2002. V. 28. P. 524–533. DOI: 10.5589/m02-043.
12. *Horstmann J., Schiller H., Schulz-Stellenfleth J., Lehner S.* Global wind speed retrieval from SAR // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. Iss. 10. P. 2277–2286. DOI: 10.1109/TGRS.2003.814658.
13. *Hwang P. A.* Wavenumber spectrum and mean square slope of intermediate-scale ocean surface waves // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. Article C10029. DOI: 10.1029/2005JC003002.

14. *Jimenez P.A., Dudhia J., Gonzalez–Rouco J. F. et al.* A revised scheme for the WRF surface layer formulation // *Monthly Weather Review*. 2012. V. 140. P. 898–918. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00056.1.
15. *Katona T., Bartsch A.* Estimation of wind speed over lakes in Central Europe using spaceborne C-band SAR // *European J. Remote Sensing*. 2018. V. 51. Iss. 1. P. 921–931. DOI: 10.1080/22797254.2018.1516516.
16. *Kessler E.* On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations // *Meteorological Monographs*. Boston: American Meteorological Society, 1969. V. 10. P. 1–84. DOI: 10.1007/978-1-935704-36-2_1.
17. *Kuznetsova A., Baydakov G., Papko V. et al.* 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. P. 1–13. DOI: 10.1155/2016/8539127.
18. *Kuznetsova A., Baydakov G., Sergeev D., Troitskaya Y.* High-resolution waves and weather forecasts using adapted WAVEWATCH III and WRF models // *J. Physics: Conf. Ser.* 2019. V. 1163. Iss. 1. Article 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1163/1/012031.
19. *Lehner S., Horstmann J., Koch W., Rosenthal W.* Mesoscale wind measurements using recalibrated ERS SAR images // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103(C4). P. 7847–7856. DOI: 10.1029/97JC02726.
20. *Lehner S., Schulz–Stellenfleth J., Schattler B. et al.* Wind and wave measurements using complex ERS SAR wave mode data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2000. V. 38. Iss. 5. P. 2246–2257. DOI: 10.1109/36.868882.
21. *Lin H., Xu Q., Zheng Q.* An Overview on SAR Measurements of Sea Surface Wind // *Progress in Natural Science*. 2008. V. 18. P. 913–919. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.03.008.
22. *Lu Y., Zhang B., Perrie W. et al.* A C-Band Geophysical Model Function for Determining Coastal Wind Speed Using Synthetic Aperture Radar // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. V. 11. Iss. 7. P. 2417–2428. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2836661.
23. *Mallard M., Nolte C., Spero T. et al.* Technical challenges and solutions in representing lakes when using WRF in downscaling applications // *Geoscientific Model Development*. 2015. V. 8. P. 1085–1096. DOI: 10.5194/gmd-8-1085-2015.
24. *McDaniel S. T.* Small-Slope Predictions of Microwave Backscatter from the Sea Surface // *Waves in Random Media*. 2001. V. 11. Iss. 3. P. 343–360. DOI: 10.1080/13616670109409789.
25. *Mlawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D. et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. P. 16663–16682. DOI: 10.1029/97JD00237.
26. *Monaldo F., Jackson C., Li X., Pichel W. G.* Preliminary evaluation of Sentinel-1A wind speed retrievals // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. Iss. 6. P. 2638–2642. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2504324.
27. *Mouche A., Chapron B.* Global C-Band Envisat, Radarsat-2 and Sentinel-1 SAR Measurements in Copolarization and Cross-polarization // *J. Geophysical Research*. 2015. V. 120. P. 7195–7207. DOI: 10.1002/2015JC011149.
28. *Quilfen Y., Chapron B., Elfouhaily T. et al.* Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103(C4). P. 7767–7786. DOI: 10.1029/97JC01911.
29. *Radkani N., Zakeri B. G.* Southern Caspian Sea wind speed retrieval from C-band Sentinel-1A SAR images // *Intern. J. Remote Sensing*. 2020. V. 41. Iss. 9. P. 3511–3534. DOI: 10.1080/01431161.2019.1706201.
30. *Saha S., Moorthi Sh., Pan H.-L. et al.* The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. American Meteorological Society*. 2010. V. 91. P. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
31. *Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 2008. 113 p. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
32. *Stoffelen A.* Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103(C4). P. 7755–7766. DOI: 10.1029/97JC03180.
33. *Stoffelen A., Anderson D.* Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD-4 // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. P. 5767–5780. DOI: 10.1029/96JC02860.
34. *Stoffelen A., Verspeek J. A., Vogelzang J., Verhoef A.* The CMOD7 Geophysical Model Function for ASCAT and ERS Wind Retrievals // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10(5). P. 2123–2134. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2681806.
35. *Takeyama Y., Ohsawa T., Kozai K. et al.* Comparison of Geophysical Model Functions for SAR Wind Speed Retrieval in Japanese Coastal Waters // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. P. 1956–1973. DOI: 10.3390/rs5041956.
36. *Vachon P. W., Dobson F. W.* Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean // *Global Atmosphere and Ocean System*. 1996. V. 5. P. 177–187. DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370377.
37. *Vachon P. W., Dobson F. W.* Wind retrieval from Radarsat SAR images: Selection of a suitable C-band HH polarization wind retrieval model // *Canadian J. Remote Sensing*. 2000. V. 26. P. 306–313. DOI: 10.1080/07038992.2000.10874781.
38. *Verhoef A., Portabella M., Stoffelen A.* High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. Iss. 7. P. 2481–2487. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175001.

39. Voronovich A. G., Zavorotny V. U. Theoretical Model for Scattering of Radar Signals in Ku- and C-bands from a Rough Sea Surface with Breaking Waves // *Waves in Random Media*. 2001. V. 11. Iss. 3. P. 247–269. DOI: 10.1080/13616670109409784.
40. Wackerman C., Rufenach C. L., Shuchman R. A. et al. Wind vector retrieval using ERS-1 synthetic aperture radar imagery // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1996. V. 34. P. 1343–1352. DOI: 10.1109/36.544558.
41. Wang H., Yang J., Mouche A. et al. GF-3 SAR ocean wind retrieval: The first view and preliminary assessment // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Iss. 694. DOI: 10.3390/rs9070694.
42. Wei S., Yang S., Xu D. On accuracy of SAR wind speed retrieval in coastal area // *Applied Ocean Research*. 2020. V. 95. Article 102012. DOI: 10.1016/j.apor.2019.102012.
43. Yang X., Li X., Pichel W. G., Li Z. Comparison of ocean-surface winds retrieved from QuikSCAT scatterometer and Radarsat-1 SAR in offshore waters of the US west coast // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2011. V. 8. No. 1. P. 163–167. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2053345.
44. Zhang B., Perrie W., He Y. Wind speed retrieval from Radarsat2 quad-polarization images using a new polarization ratio model // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116(C8). Article C08008. DOI: 10.1029/2010JC006522.

Study of the applicability of C-band geophysical model functions for SAR data in conditions of the Gorky Reservoir

N. S. Rusakov, D. A. Sergeev, O. S. Ermakova,
A. M. Kuznetsova, D. S. Gladskikh, E. I. Poplavsky

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: nikitariusakov@ipfran.ru

The study is concerned with the investigation of the applicability of the C-band geophysical model functions (GMF) CMOD5, CMOD5.N, CMOD7 in the conditions of an inland reservoir (using the example of the Gorky Reservoir). The proposed GMFs were used to calculate wind speed from SAR image data from the Sentinel-1 satellite for the IW mode and co-polarization. The wind speed direction values required for calculations within the framework of the selected GMF were obtained from weather station measurements installed in the southern part of the Gorky Reservoir. At the same time, the weather station data were combined with selected SAR images in time and space. It was found that the best result is provided by the CMOD5.N model. Additionally, wind speed calculations were carried out within the framework of a geophysical model function for inland water bodies developed on the basis of the SSA2 small slope approximation and combined model spectra. It was found that this GMF reproduces wind speed with less accuracy compared to CMOD models. It was also demonstrated that for the conditions of the Gorky Reservoir, the results of CMOD calculations are in satisfactory agreement with the predictions of spatial distribution of wind speed field calculated using the Weather Research and Forecasting (WRF) model.

Keywords: Sentinel-1 satellite, inland waters, SAR image, C-band, geophysical model function, oceanographic buoy

Accepted: 23.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-51-65

References

1. Girin S. N., Analysis of the validity of restrictions on the operation of passenger vessels in the Gorky reservoir, *Russian J. Water Transport*, 2022, Vol. 72, pp. 167–179 (in Russian), DOI: 10.37890/jwt.vi72.256.
2. Monin A. S., Obukhov A. M., Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, *Trudy Geofizicheskogo instituta Akademii nauk SSSR*, 1954, Vol. 24, pp. 164–187 (in Russian).

3. Donnelly W.J., Carswell J.R., McIntosh R.E. et al., Revised Ocean Backscatter Models at C- and Ku-band under High-wind Conditions, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104(C5), pp. 11485–11497, DOI: 10.1029/1998JC900030.
4. Dudhia J., Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmospheric Sciences*, 1989, Vol. 46, pp. 3077–3107, DOI: 10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
5. Dudhia J., A multi-layer soil temperature model for MM5, *The 6th PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop*, Boulder, 1996, pp. 49–50.
6. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D., A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-Driven Waves, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, pp. 15781–15796, DOI: 10.1029/97jc00467.
7. Hersbach H., *CMOD5.n: A C-band geophysical model function for equivalent neutral wind*, Technical memorandum 554, 2008, 20 p., <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2008/9873-cmod5n-c-band-geophysical-model-function-equivalent-neutral-wind.pdf>.
8. Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S., An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112(C3), Article C03006, DOI: 10.1029/2006JC003743.
9. Hong S.Y., Noh Y., Dudhia J., A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 2006, Vol. 134, pp. 2318–2341, DOI: 10.1175/MWR3199.1.
10. Horstmann J., Koch W., Measurement of ocean surface winds using synthetic aperture radars, *IEEE J. Oceanic Engineering*, 2005, Vol. 30, Issue 3, pp. 508–515, DOI: 10.1109/JOE.2005.857514.
11. Horstmann J., Koch W., Lehner S., Tonboe R., Ocean winds from Radarsat-1 ScanSAR, *Canadian J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 28, pp. 524–533, DOI: 10.5589/m02-043.
12. Horstmann J., Schiller H., Schulz-Stellenfleth J., Lehner S., Global wind speed retrieval from SAR, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, Issue 10, pp. 2277–2286, DOI: 10.1109/TGRS.2003.814658.
13. Hwang P.A., Wavenumber spectrum and mean square slope of intermediate-scale ocean surface waves, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Article C10029, DOI: 10.1029/2005JC003002.
14. Jimenez P.A., Dudhia J., Gonzalez–Rouco J.F. et al., A revised scheme for the WRF surface layer formulation, *Monthly Weather Review*, 2012, Vol. 140, pp. 898–918, DOI: 10.1175/MWR-D-11-00056.1.
15. Katona T., Bartsch A., Estimation of wind speed over lakes in Central Europe using spaceborne C-band SAR, *European J. Remote Sensing*, 2018, Vol. 51, Issue 1, pp. 921–931, DOI: 10.1080/22797254.2018.1516516.
16. Kessler E., On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations, In: *Meteorological Monographs*, Boston: American Meteorological Society, 1969, Vol. 10, pp. 1–84, DOI: 10.1007/978-1-935704-36-2_1.
17. Kuznetsova A., Baydakov G., Papko V. et al., 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, pp. 1–13, DOI: 10.1155/2016/8539127.
18. Kuznetsova A., Baydakov G., Sergeev D., Troitskaya Y., High-resolution waves and weather forecasts using adapted WAVEWATCH III and WRF models, *J. Physics: Conf. Ser.*, 2019, Vol. 1163, Issue 1, Article 012031, DOI: 10.1088/1742-6596/1163/1/012031.
19. Lehner S., Horstmann J., Koch W., Rosenthal W., Mesoscale wind measurements using recalibrated ERS SAR images, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103(C4), pp. 7847–7856, DOI: 10.1029/97JC02726.
20. Lehner S., Schulz-Stellenfleth J., Schattler B. et al., Wind and wave measurements using complex ERS SAR wave mode data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, Issue 5, pp. 2246–2257, DOI: 10.1109/36.868882.
21. Lin H., Xu Q., Zheng Q., An Overview on SAR Measurements of Sea Surface Wind, *Progress in Natural Science*, 2008, Vol. 18, pp. 913–919, DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.03.008.
22. Lu Y., Zhang B., Perrie W. et al., A C-Band Geophysical Model Function for Determining Coastal Wind Speed Using Synthetic Aperture Radar, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, Vol. 11, Issue 7, pp. 2417–2428, DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2836661.
23. Mallard M., Nolte C., Spero T. et al., Technical challenges and solutions in representing lakes when using WRF in downscaling applications, *Geoscientific Model Development*, 2015, Vol. 8, pp. 1085–1096, DOI: 10.5194/gmd-8-1085-2015.
24. McDaniel S.T., Small-Slope Predictions of Microwave Backscatter from the Sea Surface, *Waves in Random Media*, 2001, Vol. 11, Issue 3, pp. 343–360, DOI: 10.1080/13616670109409789.
25. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D. et al., Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, pp. 16663–16682, DOI: 10.1029/97JD00237.

26. Monaldo F., Jackson C., Li X., Pichel W. G., Preliminary evaluation of Sentinel-1A wind speed retrievals, *IEEE J Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 6, pp. 2638–2642, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2504324.
27. Mouche A., Chapron B., Global C-Band Envisat, Radarsat-2 and Sentinel-1 SAR Measurements in Copolarization and Cross-polarization, *J. Geophysical Research*, 2015, Vol. 120, pp. 7195–7207, DOI: 10.1002/2015JC011149.
28. Quilfen Y., Chapron B., Elfouhaily T. et al., Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103(C4), pp. 7767–7786, DOI: 10.1029/97JC01911.
29. Radkani N., Zakeri B. G., Southern Caspian Sea wind speed retrieval from C-band Sentinel-1A SAR images, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 41, Issue 9, pp. 3511–3534, DOI: 10.1080/01431161.2019.1706201.
30. Saha S., Moorthi Sh., Pan H.-L. et al., The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. American Meteorological Society*, 2010, Vol. 91, pp. 1015–1057, DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
31. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al., *A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 2008, 113 p., DOI: 10.5065/D68S4MVH.
32. Stoffelen A., Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103(C4), pp. 7755–7766, DOI: 10.1029/97JC03180.
33. Stoffelen A., Anderson D., Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD-4, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, pp. 5767–5780, DOI: 10.1029/96JC02860.
34. Stoffelen A., Verspeek J. A., Vogelzang J., Verhoef A., The CMOD7 Geophysical Model Function for ASCAT and ERS Wind Retrievals, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10(5), pp. 2123–2134, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2681806.
35. Takeyama Y., Ohsawa T., Kozai K. et al., Comparison of Geophysical Model Functions for SAR Wind Speed Retrieval in Japanese Coastal Waters, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, pp. 1956–1973, DOI: 10.3390/rs5041956.
36. Vachon P. W., Dobson F. W., Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean, *Global Atmosphere and Ocean System*, 1996, Vol. 5, pp. 177–187, DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370377.
37. Vachon P. W., Dobson F. W., Wind retrieval from Radarsat SAR images: Selection of a suitable C-band HH polarization wind retrieval model, *Canadian J. Remote Sensing*, 2000, Vol. 26, pp. 306–313, DOI: 10.1080/07038992.2000.10874781.
38. Verhoef A., Portabella M., Stoffelen A., High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, Issue 7, pp. 2481–2487, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175001.
39. Voronovich A. G., Zavorotny V. U., Theoretical Model for Scattering of Radar Signals in Ku- and C-bands from a Rough Sea Surface with Breaking Waves, *Waves in Random Media*, 2001, Vol. 11, Issue 3, pp. 247–269, DOI: 10.1080/13616670109409784.
40. Wackerman C., Rufenach C. L., Shuchman R. A. et al., Wind vector retrieval using ERS-1 synthetic aperture radar imagery, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1996, Vol. 34, pp. 1343–1352, DOI: 10.1109/36.544558.
41. Wang H., Yang J., Mouche A. et al., GF-3 SAR ocean wind retrieval: The first view and preliminary assessment, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Issue 694, DOI: 10.3390/rs9070694.
42. Wei S., Yang S., Xu D., On accuracy of SAR wind speed retrieval in coastal area, *Applied Ocean Research*, 2020, Vol. 95, Article 102012, DOI: 10.1016/j.apor.2019.102012.
43. Yang X., Li X., Pichel W. G., Li Z., Comparison of ocean-surface winds retrieved from QuikSCAT scatterometer and Radarsat-1 SAR in offshore waters of the US west coast, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, Vol. 8, Issue 1, pp. 163–167, DOI: 10.1109/LGRS.2010.2053345.
44. Zhang B., Perrie W., He Y., Wind speed retrieval from Radarsat2 quad-polarization images using a new polarization ratio model, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116(C8), Article C08008, DOI: 10.1029/2010JC006522.