

## Разработка геофизической модельной функции для восстановления скорости приводного ветра для условий Горьковского водохранилища

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

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

Работа посвящена разработке метода восстановления скорости ветра на стандартной метеорологической высоте на основе расчётов рассеяния электромагнитного излучения в рамках двухмасштабной модели и его верификации с привлечением данных с радиолокатора с синтезированной апертурой в С-диапазоне спутника Sentinel-1 для прямой поляризации VV и измерений метеостанции. В основе метода лежит применение новой геофизической модельной функции (ГМФ), представляющей собой соотношение удельной эффективной площади рассеяния со скоростью приводного ветра, углом падения микроволнового излучения, направлением ветра и разгоном поверхностных волн. При разработке новой ГМФ был задействован спектр, специфичный для внутренних водоёмов, учитывающий диапазон безразмерных разгонов от 2000 и до 20 000. Предложенная в работе ГМФ была верифицирована на основе натуральных измерений скорости ветра, проводимых в южной части акватории Горьковского водохранилища в период 2017–2019 гг., и коллоцированных с ними изображений, полученных с радиолокаторов с синтезированной апертурой спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B. Было показано, что точность воспроизведения скорости ветра на основе предложенной ГМФ выше, чем в случае применения моделей CMOD7 и моделей, разработанных для Каспийского моря.

**Ключевые слова:** внутренний водоём, двухмасштабная модель, С-диапазон, PCA-изображение, Sentinel-1, прямая поляризация, геофизическая модельная функция, разгон

Одобрена к печати: 13.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-231-244

### Введение

Внутренние водоёмы играют существенную роль в регулировании климатических процессов на региональных масштабах, оказывают заметное влияние на жизнь наземной биосферы и активно используются в промышленности, сельскохозяйственной деятельности и водном транспорте. В связи с этим важной является задача о перераспределении водных ресурсов под воздействием различных факторов (антропогенных и климатических). Неотъемлемая часть этой проблемы — прогнозирование и мониторинг метеорологической обстановки в акватории внутренних водоёмов, поскольку приводный ветер играет ключевую роль в вопросах безопасности судоходства и регулировании процессов обмена энергией, теплом и влагой на границе раздела «вода — воздух», определяющих региональный климат. Одним из основных инструментов мониторинга метеорологической обстановки в акватории внутренних водоёмов представляется стандартная метеорологическая сеть, включающая в себя метеостанции, позволяющие получать значения скорости и направления ветра. Необходимо отметить, однако, что все метеостанции расположены на значительном расстоянии от береговой линии и в подавляющем большинстве не дают адекватного представления о метеорологической обстановке в районе акватории внутренних водоёмов. В связи с этим хорошей альтернативой для мониторинга метеорологического состояния становится привлечение инструментов дистанционного зондирования Земли из космоса.

В последние десятилетия активное применение получили радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые считаются одним из наиболее эффективных инструментов для наблюдения за водной поверхностью. Методология определения скорости ветра с помощью РСА базируется на разработке и адаптации так называемых геофизических модельных

функций (ГМФ), представляющих собой эмпирические зависимости скорости ветра от удельной эффективной площади рассеяния, полученной по РСА-данным с привлечением дополнительной информации о направлении ветра и угле падения радиолокационного излучения (Zhou et al., 2017). Широкое распространение получили ГМФ семейства CMOD, разработанные по данным скаттерометров, работающих в С-диапазоне: CMOD4 (Stoffelen, Anderson, 1997), CMOD-IFR2 (Quilfen et al., 1998) и CMOD5 (Hersbach et al., 2007), которые были адаптированы также и для восстановления скорости ветра по РСА-изображениям, в том числе для спутников ERS-1/2 (*англ.* European Remote-Sensing Satellite) (Fetterer et al., 1998), Envisat (ASAR (*англ.* Advanced Synthetic Aperture Radar)) (Yang et al., 2011), Radarsat-1/2 (Komarov et al., 2011), Sentinel-1 (Monaldo et al., 2016) и GF-3 (*англ.* Gaofen 3) (Zhang et al., 2019). Более современные версии семейства CMOD — CMOD7 (Stoffelen et al., 2017) и C-SARMOD2 (Lu et al., 2018) — дополнительно не были адаптированы для применения к РСА-данным, поэтому дают более высокие среднеквадратичные ошибки при восстановлении скорости ветра (Li et al., 2018). Необходимо отметить, однако, что все вышеперечисленные алгоритмы были разработаны именно для акватории открытого океана, в то время как их применимость для внутренних водоёмов практически не исследована. В работе (Русаков и др., 2024) была проведена верификация результатов восстановления скорости ветра с использованием алгоритмов CMOD4, CMOD5, CMOD5.N и CMOD7 для акватории Горьковского водохранилища и было показано, что все эти алгоритмы демонстрируют высокий уровень среднеквадратичного отклонения (СКО) от реально измеренной скорости ветра.

Следует отметить также и существенный недостаток моделей для восстановления скорости ветра, сконструированных непосредственно для акваторий внутренних вод суши. Попытки построения таких моделей были сделаны в работе (Katona, Bartsch, 2018), где скорость ветра восстанавливалась для озёр Нойзидль, Зальцкаммергут и Балатон, расположенных в Венгрии и Австрии, на основе экспоненциальных эмпирических зависимостей удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) по данным со спутника Sentinel-1 от скорости ветра. Предложенные алгоритмы восстановления скорости ветра тем не менее показали значительные СКО при сравнении с натурными данными. Ещё одна геофизическая модельная функция для восстановления скорости ветра над акваторией южной части Каспийского моря на основе использования модели малых уклонов (Voronovich, Zavorotny, 2001) была представлена в работе (Radkani, Zakeri, 2020). Однако, как было показано в публикации (Sergeev et al., 2023), эта модель не позволяет с достаточной степенью точности восстанавливать скорость ветра над акваторией Горьковского водохранилища.

Такие расхождения могут быть связаны с тем, что Горьковское водохранилище представляет собой водоём с особой геометрией — его поперечные размеры на порядок меньше, чем продольные, при этом очевидно, что при построении моделей восстановления скорости ветра по данным радиолокационного рассеяния необходимо учитывать спектр волнения, специфичный именно для такого водоёма, а значит стандартные модели, разработанные для условий океана или использующие при расчётах УЭПР океанские спектры (как это, например, сделано в работах (Radkani, Zakeri, 2020; Sergeev et al., 2023)), будут давать значительные погрешности.

Основная задача текущего исследования — разработка метода восстановления скорости ветра по данным активного дистанционного зондирования (по РСА-изображениям) в С-диапазоне, учитывающего особенности ветровых волн, специфичных для условий внутреннего водоёма, на примере Горьковского водохранилища. Для решения поставленной задачи проведена разработка геофизической модельной функции на основе двухмасштабной модели рассеяния микроволнового сигнала, при этом в расчётах применяется спектр, полученный с использованием данных с внутренних водоёмов (Караев, Баландина, 2000). Проведено сопоставление работоспособности новой модели и моделей семейства CMOD для расширенного по сравнению с работой (Sergeev et al., 2023) массива данных, полученных со спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B на соосной поляризации.

## Оценка работоспособности существующих алгоритмов восстановления скорости ветра по спутниковым данным для акватории Горьковского водохранилища

Для проверки работоспособности существующих и разработанных ГМФ в настоящем исследовании использованы РСА-изображения в С-диапазоне, полученные со спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, загруженные с сайта <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Для работы были выбраны снимки, сделанные в режиме IW (англ. Interferometric Wide mode), поскольку именно для этой моды обеспечивается регулярная съёмка акватории водохранилища и высокое разрешение. Также было отобрано 52 РСА-изображения в период с апреля 2017 по октябрь 2019 г. (исключая периоды ледостава), охватывающих южную или южную и центральную часть водохранилища. Для определения скорости приводного ветра использованы данные Sentinel-1A, Sentinel-1B IW GRDH (англ. Ground Range Detected High-resolution) уровня 1 для VV (V, англ. vertical) поляризации, для которых для каждого из спутников была проведена калибровка и удаление термического шума. С целью облегчения дальнейшей обработки для всех РСА-изображений была проведена процедура выделения акватории Горьковского водохранилища. Для этого использовался доступный в Google Earth Engine набор данных, содержащий глобальное месторасположение водных объектов JRC Global Surface Water Mapping Layers. Помимо местоположения водных объектов, этот набор данных отображает изменение пространственного расположения этих объектов за последние 38 лет. Для выделения Горьковского водохранилища использовался один из каналов описанного выше набора данных, характеризующий частоту наблюдения воды в каждом пикселе (от 0 до 100 %). Для исследуемого региона, согласно эмпирическому анализу, использовалось 80 %.

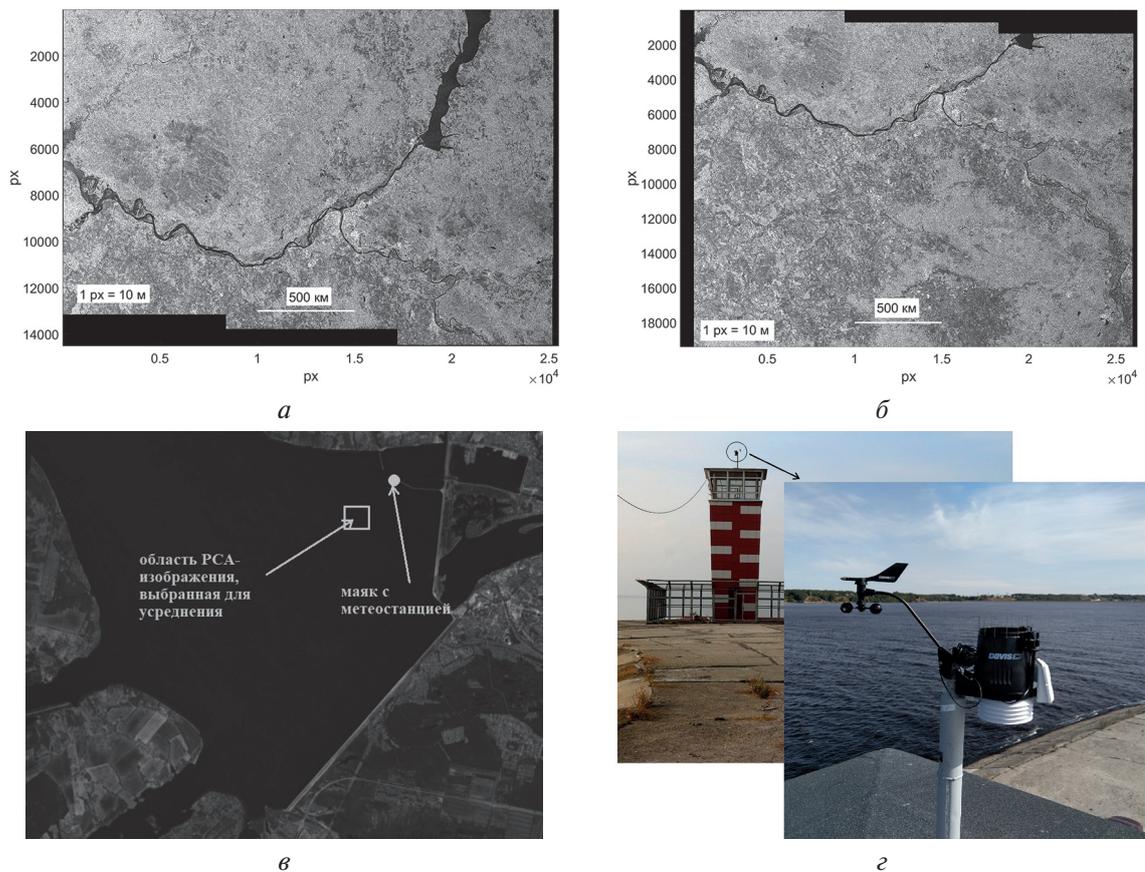


Рис. 1. РСА-изображения Горьковского водохранилища со спутника Sentinel-1: а — южная и центральная часть водохранилища 25.08.2020; б — южная часть водохранилища 31.08.2020; в — изображение южной части Горьковского водохранилища с разметкой области обработки РСА-изображений; г — маяк с метеостанцией

Изображения с РСА были отобраны таким образом, чтобы их можно было совместить во времени и пространстве с данными метеостанции, размещённой на маяке на высоте 9,5 м, расположенном в южной части водохранилища на конце мола, являющегося границей аванпорта (рис. 1, см. с. 233). С метеостанции проводилось непрерывное измерение скорости и направления ветра в период 2017–2018 гг. В течение 2019 г. метеостанция передавала лишь данные о скорости ветра. В связи с этим для восполнения недостатка данных о направлении скорости ветра в 2019 г. дополнительно были привлечены данные реанализа NCEP (англ. National Centers for Environmental Prediction) FNL (англ. final) высокого разрешения (<https://rda.ucar.edu/>) на основе Глобальной системы ассимиляции данных GDAS (англ. Global Data Assimilation System). Реанализ предоставляет данные о двух компонентах скорости ветра на стандартной метеорологической высоте, по которым определяется направление ветра, разрешение при этом составляет 0,25°.

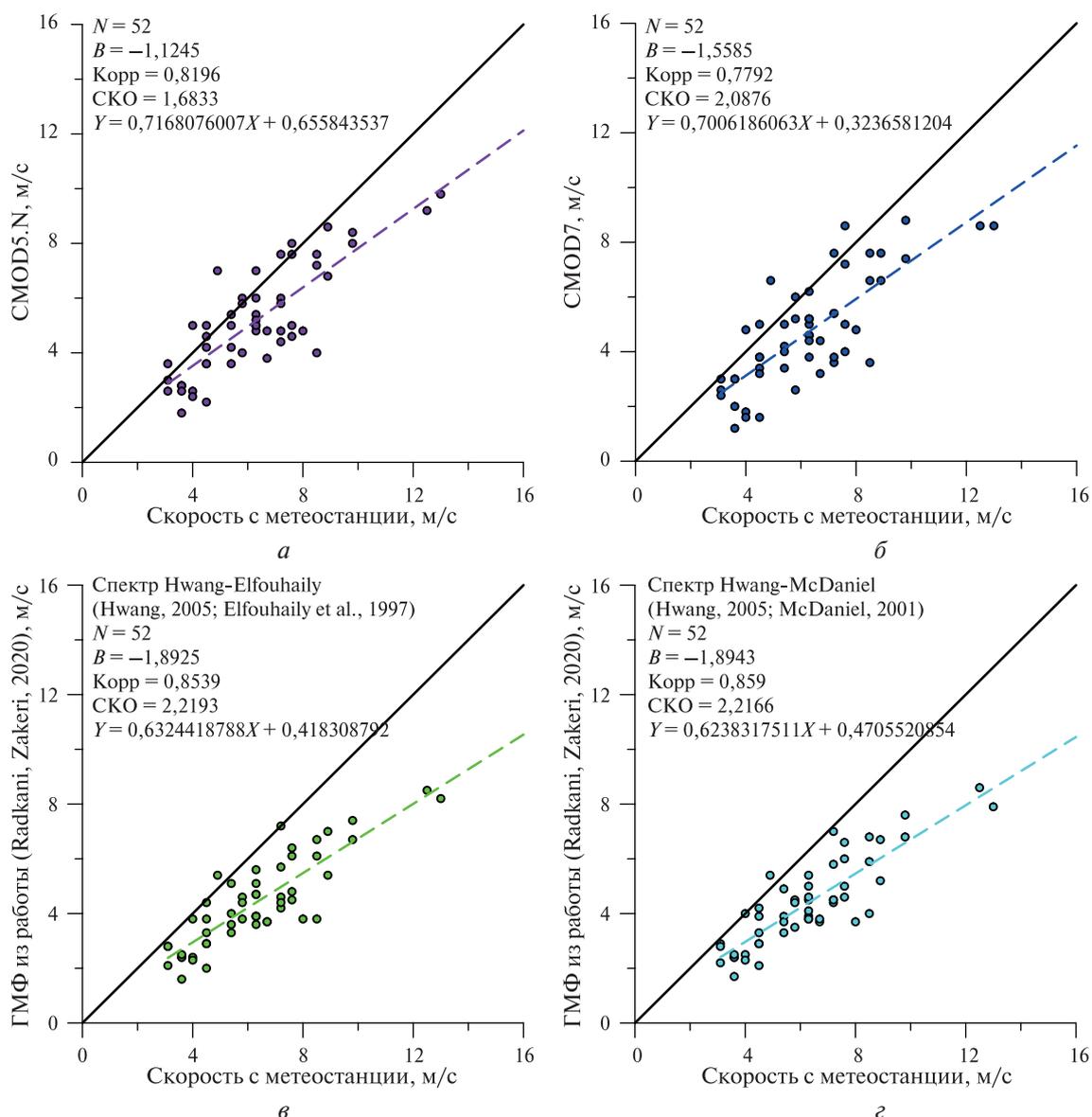


Рис. 2. Результаты сопоставления измерений скорости ветра по данным метеостанции на Горьковском водохранилище и результатов расчёта: *а* — по модели CMOD5.N; *б* — модели CMOD7; *в* — ГМФ из работы (Radkani, Zakeri, 2020) со спектрами Elfouhaily и Hwang (Elfouhaily et al., 1997; Hwang, 2005); *г* — ГМФ из работы (Radkani, Zakeri, 2020) со спектрами McDaniel и Hwang (Hwang, 2005; McDaniel, 2001). Сплошные чёрные прямые —  $y = x$ , пунктирные линии — линейные аппроксимации, Корр — коэффициент корреляции

Усреднённое значение УЭПР для радиолокационных снимков рассчитывалось для квадратной области размером  $500 \times 500$  м, центр которой был расположен на расстоянии 1,5 км от берега (см. рис. 1) и в непосредственной близости (около 1 км западнее) от маяка. Угол падения для снимков имел два значения:  $34,2$  и  $41,7^\circ$ .

На первоначальном этапе исследований была проведена оценка работоспособности существующих алгоритмов восстановления скорости ветра для С-диапазона, разработанных для условий океана или моря. В качестве тестовых были использованы модели CMOD5.N, CMOD7 и две модели из работы (Radkani, Zakeri, 2020). Каждому значению скорости ветра, измеренному метеостанцией, было поставлено в соответствие рассчитанное значение скорости ветра (рис. 2, см. с. 234).

Анализируя рис. 2, можно сделать вывод, что с точки зрения СКО и смещения  $B$  от референсной прямой  $y = x$  лучше всех себя показывает модель CMOD5.N, а модели из работы (Radkani, Zakeri, 2020) хуже, чем обе модели семейства CMOD. Однако модели из работы (Radkani, Zakeri, 2020) демонстрируют лучший результат в части корреляции данных. Необходимо отметить, что все выбранные ГМФ показывают заметную недооценку скорости ветра, что проявляется в отрицательном значении смещения. Такая недооценка возможно связана с различием спектров ветрового волнения в условиях открытого океана, для которых характерно развитое волнение, и внутреннего водоёма, где волнение молодое, что может приводить к погрешностям в оценке среднеквадратичных уклонов при применении общепринятых океанских спектров и ошибкам при расчёте УЭПР. Таким образом, чтобы уменьшить погрешности при определении скорости ветра по характеристикам рассеянного сигнала, целесообразным представляется использовать спектр, опирающийся на данные именно с внутренних водоёмов, учитывающий не только зависимость от скорости ветра, но и зависимость от разгона.

### Построение геофизической модельной функции для восстановления скорости ветра в акватории Горьковского водохранилища

При конструировании геофизической модельной функции для восстановления скорости ветра в области Горьковского водохранилища была использована двухмасштабная модель рассеяния электромагнитного сигнала на взволнованной водной поверхности (Bass et al., 1968; Wright, 1968). Эта модель учитывает модуляцию уклонов коротких брэгговских волн более длинными волнами, при этом вся поверхность длинной волны разбивается на небольшие участки, для которых справедлива брэгговская теория, и для каждой площадки угол падения определяется локальным уклоном водной поверхности, обусловленным наличием длинной волны. Итоговая УЭПР получается при суммировании локальных УЭПР и осреднении по уклонам длинных волн (Kudryavtsev et al., 2003):

$$\sigma_{PP} = 16\pi k_i^4 \left| G_{PP}(\theta_i - \xi_x, \xi_y) \right| F(0, k_b). \quad (1)$$

Здесь  $\theta$  — это угол падения;  $F(0, k_b)$  — спектральная плотность мощности в области брэгговского волнового числа;  $\xi_x$  и  $\xi_y$  — среднеквадратичные уклоны длинных волн вдоль и поперёк плоскости зондирования;  $k_b = 2k_i \sin(\theta_i - \xi_x)$  — волновое число Брэгга;  $k_i$  — волновое число излучения радара;  $G_{PP}$  — коэффициенты рассеяния (PP — вертикальная (VV) или горизонтальная (HH (H, *англ.* horizontal)) поляризация электромагнитного излучения), которые определяются как (Kudryavtsev et al., 2003):

$$\left. \begin{aligned} G_{VV}(\theta_i - \xi_x, \xi_y) &= G_{VV}(\theta_i - \xi_x), \\ G_{HH}(\theta_i - \xi_x, \xi_y) &= G_{HH}(\theta_i - \xi_x) + \frac{\xi_y}{\sin \theta_i} G_{VV}(\theta_i), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} |G_{VV}(\theta_i)|^2 &= \frac{(\varepsilon - 1)^2 \cos^4 \theta_i \left( \varepsilon (1 + \sin^2 \theta_i) - \sin^2 \theta_i \right)^2}{\left( \varepsilon \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right)^4}, \\ |G_{HH}(\theta_i)|^2 &= \frac{(\varepsilon - 1)^2 \cos^4 \theta_i}{\left( \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i} \right)^4}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость воды.

Можно считать, что модулирующие волны имеют малый среднеквадратичный уклон. Этот факт подтверждается в ряде работ (Elfouhaily et al., 1997; Hwang, 2005; Kudryavtsev et al., 2003; Ryabkova et al., 2019). Таким образом, может быть проведено разложение выражений (1)–(3) в ряд до второго порядка по уклонам длинных волн (Kudryavtsev et al., 2003). В этом случае можно получить следующее выражение для УЭПР:

$$\sigma_{PP} = \frac{16\pi k_i^4 |G_{pp0}|^2}{k_{b0}^4} B(k_{b0}, \varphi) \left( 1 + g_{pp} \overline{\xi_x^2} - \frac{M_{i0}^{pp}}{B(k_{b0}, \varphi)} \overline{\xi_x} \tilde{B}(k_b, \varphi) \right), \quad (4)$$

$$g_{VV} = \frac{1}{2\sigma_{b0}^{VV}} \cdot \frac{\partial^2 \sigma_{b0}^{VV}}{\partial^2 \theta_i^2}, \quad g_{HH} = \frac{1}{2\sigma_{b0}^{HH}} \cdot \frac{\partial^2 \sigma_{b0}^{HH}}{\partial^2 \theta_i^2} + \frac{\left( \frac{2}{\sin^2 \theta_i} \right) G_{VV}(\theta_i)}{\left( \frac{\xi_y^2}{\xi_x^2} \right) G_{HH}(\theta_i)}, \quad (5)$$

здесь  $k_{b0} = 2k_i \sin \theta_i$ ;  $B(k_{b0}, \varphi)$  — спектр кривизны;  $\sigma_{b0}^{PP} = \frac{16\pi k_i^4 |G_{pp0}|^2}{k_{b0}^4} B(k_{b0}, \varphi)$  — удельная эффективная площадь водной поверхности для «чистого» брэгговского рассеяния;

$M_{i0}^{pp} = \frac{1}{\sigma_{b0}^{PP}} \cdot \frac{\partial \sigma_{b0}^{PP}}{\partial \theta_i}$  — модуляционная передаточная функция;  $\tilde{B}(k_b, \varphi)$  — вариации спектра кривизны за счёт модуляции на длинной волне. Второй член в уравнении (4) отвечает за эффект модуляции угла уклона поверхности длинными волнами, а третий член описывает взаимную корреляцию геометрического и гидродинамического эффекта и отвечает за разницу при вычислении УЭПР для направления вдоль ветра и против него.

В настоящем исследовании разработка геофизической модельной функции проводилась на основе расчёта УЭПР в рамках выражения (4) без учёта третьего члена, поскольку он предполагается малым по сравнению с членом, описывающим модуляционный эффект (Kudryavtsev et al., 2003). Расчёты были выполнены для частоты 5,405 ГГц и поляризации VV в соответствии с анализируемыми данными со спутника Sentinel-1. Традиционно считается, что волновые числа модулирующих волн составляют 0,1–0,2 от волнового числа брэгговских волн (Kudryavtsev et al., 2003). В данной работе использовано соотношение  $k = 0,2k_{b0}$ , где  $k$  — максимальное волновое число модулирующих волн, соответственно нижняя граница длин модулирующих волн при выбранной частоте зондирующего сигнала составляет порядка 20–30 см.

При расчётах коэффициентов отражения согласно формулам (3) диэлектрическая проницаемость предполагается равной 81, что характерно для средней температуры 16 °С (Klein, Swift, 1977). Необходимо отметить, что диэлектрическая проницаемость зависит от температуры (Klein, Swift, 1977), а температурные вариации в выбранный период могут достигать 25° (Гири́н, 2022). При этом диэлектрическая проницаемость, как следует из формулы (3), оказывает влияние на коэффициент отражения, однако разница в коэффициентах (5), рассчитанных для диэлектрической проницаемости, соответствующей максимальной (25 °С) и минимальной (0 °С) температуре сезонных колебаний, не превышает по оценкам авто-

ров 2 %. Таким образом, в рамках данных расчётов влиянием температурных вариаций можно пренебречь.

Для Горьковского водохранилища наиболее характерны слабые и умеренные ветра — в весенне-летний период наблюдается штиль или лёгкий ветер, в среднем не превышающий 3,4–5,2 м/с, а в осенне-зимний период скорость ветра обычно лежит в диапазоне 3,9–7,4 м/с. При этом штормовая скорость ветра (более 15 м/с) наблюдается чрезвычайно редко (Гири́н, 2022). Таким образом, при расчётах рассматриваемый диапазон скорости ветра включал в себя величины от 3 до 15 м/с (слабые и умеренные ветра). Диапазон углов падения составлял 30–45°, а для относительного направления ветра рассматривался диапазон 0–180°. В связи с тем, что Горьковское водохранилище имеет специфическую форму (озёрная часть водохранилища имеет протяжённость в направлении с севера на юг 97 км, что на порядок превышает поперечные размеры с востока на запад, изменяющиеся от 3 до 14 км), размерный разгон волн может варьироваться от километров до десятков километров в зависимости от направления ветра. Вместе со скоростью ветра разгон влияет на положение и амплитуду пиков спектра волнения, т. е. на длинноволновую часть, участвующую в моделировании УЭПР в рамках двухмасштабной модели как эффект модулирования угла уклона длинными поверхностными волнами. Этот факт был подтверждён измерениями на водохранилище (Байдаков и др., 2018). Данное обстоятельство обуславливает необходимость использования спектральной модели волнения, зависящей как от скорости ветра, так и от разгона. В отличие от исследования (Radkani, Zakeri, 2020), где функции углового распределения были взяты из работ (Elfouhaily et al., 1997; McDaniel, 2001), а зависимость спектра от модуля волнового числа из публикации (Hwang, 2005), который не зависит от разгона волн, в рамках данной работы была использована модель спектра, разработанная в статье (Караев, Баландина, 2000), одним из преимуществ которого является наличие зависимости от разгона и как следствие возможность моделировать ГМФ от него. Модель спектра была разработана на базе данных экспериментов JONSWAP (*англ.* Joint North Sea Wave Observation Project) и экспериментов, проведённых в морях и внутренних водоёмах СССР, и хорошо работает для широкого диапазона длин волн (от сотен метров до миллиметров) (Ryabkova et al., 2019), что является особенно важным с точки зрения применения двухмасштабной модели, где задействованы как длинные гравитационные волны, так и более короткие гравитационно-капиллярные, на которых непосредственно происходит брэгговское рассеяние.

Расчёты проводились по формуле (4) с шагом 2,5° для угла падения, 5° для относительного направления ветра, 0,1 м/с для скорости ветра и 500 для безразмерного ветрового разгона  $X = \frac{xg}{U_{10}^2}$ , здесь  $x$  — размерный ветровой разгон.

Для построения новой ГМФ мы будем использовать эмпирическое функциональное соотношение, которое применяется для всех моделей СМОД, представляющее собой зависимость УЭПР  $\sigma$  от скорости ветра на высоте 10 м  $U_{10}$ , угла падения  $\theta_i$ , безразмерного ветрового разгона  $X$  и относительного направления ветра  $\varphi$ :

$$\sigma = A_0(U_{10}, \theta_i, X) + A_1(U_{10}, \theta_i, X) \cos(\varphi) + A_2(U_{10}, \theta_i, X) \cos(2\varphi).$$

Будем считать, что величина  $A_1$  равна нулю, поскольку при моделировании мы пренебрегаем членом, отвечающим за различие в УЭПР в направлении по ветру и против него. Для определения значений  $A_0$  и  $A_2$  мы используем следующие полиномиальные аппроксимации:

$$A_0(U_{10}, \theta_i) = p_{00} + p_{10}U_{10} + p_{01}\theta_i + p_{11}U_{10}\theta_i + p_{02}\theta_i^2 + p_{12}U_{10}\theta_i^2 + p_{03}\theta_i^3, \quad (6)$$

$$A_2(U_{10}, \theta_i) = p'_{00} + p'_{10}U_{10} + p'_{01}\theta_i + p'_{11}U_{10}\theta_i + p'_{02}\theta_i^2 + p'_{12}U_{10}\theta_i^2 + p'_{03}\theta_i^3. \quad (7)$$

При этом предполагалось, что все коэффициенты  $p_{ij}$  зависят от безразмерного ветрового разгона. Для восстановления коэффициентов на первом этапе строились зависимости УЭПР от относительного направления ветра, для скорости ветра и углов падения в выбранном интервале с заданным шагом. При этом в результате аппроксимации полученных зависимостей

косинусом (рис. 3а, б) для каждого значения скорости ветра, угла и разгона были восстановлены величины констант  $A_0$  и  $A_2$ . Далее для каждого разгона проводилась аппроксимация этих констант двумерными поверхностями в соответствии с формулами (6) и (7) (см. рис. 3в, г). В результате такой аппроксимации были получены коэффициенты  $p_{ij}$  для определённого разгона. На финальном этапе зависимость каждого из коэффициентов  $p_{ij}$  от разгона была аппроксимирована полиномом шестой степени с коэффициентами  $c_i$  (где  $i$  принимает значения от 1 до 7) вида  $p_{ij} = c_7X^7 + c_6X^6 + c_5X^5 + c_4X^4 + c_3X^3 + c_2X^2 + c_1X$ .

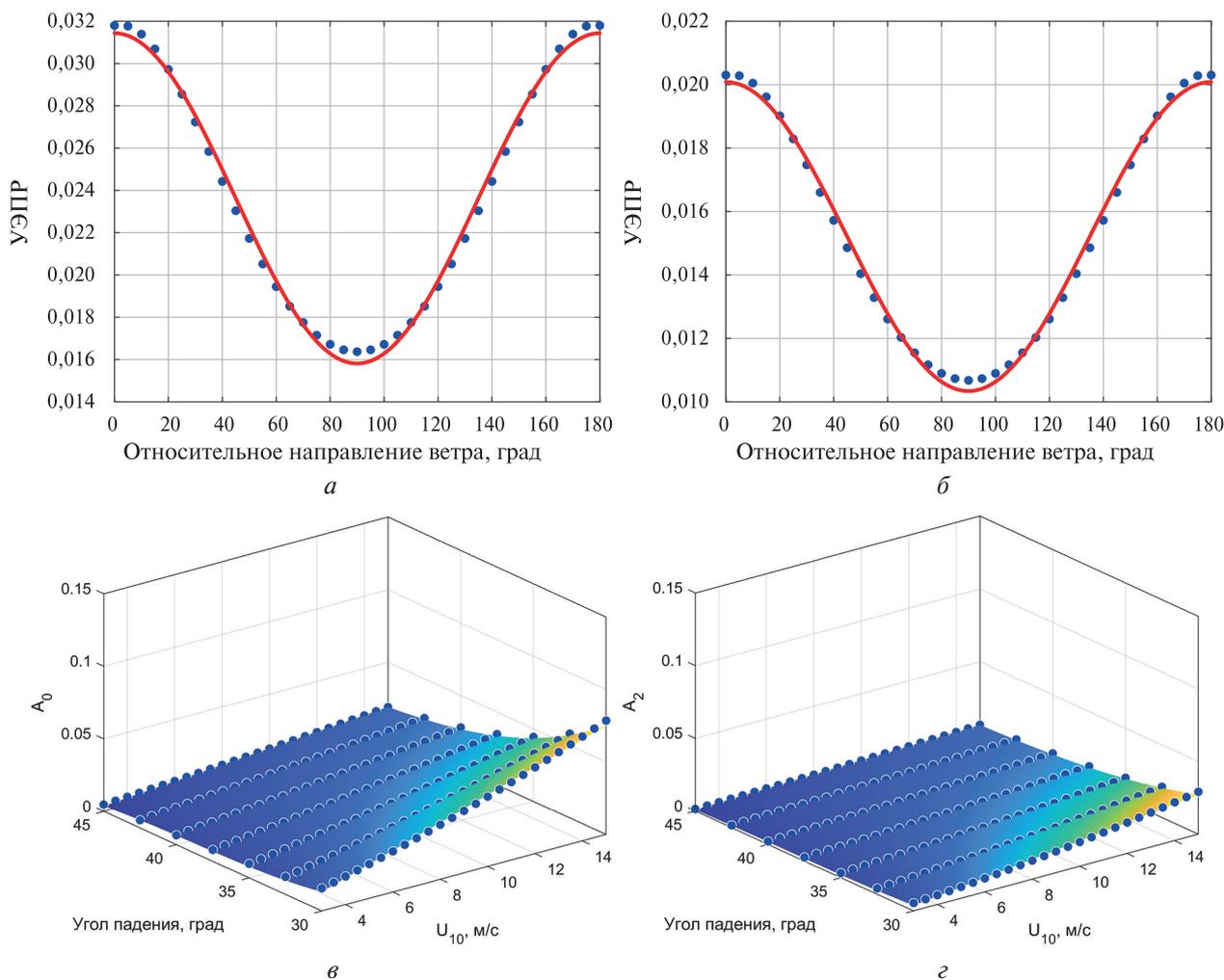


Рис. 3. Зависимость УЭПР от относительного направления ветра, для угла падения  $\theta_i = 30^\circ$ ,  $U_{10} = 5$  м/с и безразмерного ветрового разгона 2000 (а) и 20 000 (б). Аппроксимация зависимостей  $A_0$  (в) и  $A_2$  (г) от угла падения и скорости ветра  $U_{10}$  выражениями (6) и (7) для безразмерного разгона 2000

В ходе выполненных аппроксимаций были найдены все коэффициенты в выражениях (6) и (7), они представлены в таблице.

Применение предложенной ГМФ может быть осуществлено по следующей схеме. В качестве входных параметров необходимо использовать УЭПР и угол падения, полученные по спутниковому изображению Sentinel-1, а также направление ветра в выбранной области снимка — эта априорная информация может быть получена на основании данных реанализа или анализа ветровой тени на РСА-изображении. Далее на основе полученных данных о направлении ветра можно провести оценку размерного разгона, считая его равным дистанции от выбранной точки на снимке до берега в направлении действия ветра. Используя сетку диапазона скорости ветра, валидную для предложенной ГМФ (от 3 до 15 м/с), вычис-

ляются безразмерные разгоны, соответствующие каждой скорости ветра в сетке и УЭПР, как функция скорости ветра. Далее находится ближайшая к реально измеренной величина УЭПР и скорость ветра, при которой она была получена.

Коэффициенты в выражениях (6) и (7), описывающих разработанную ГМФ

Конс- танта	$p_{ij}$	$c_7$	$c_6$	$c_5$	$c_4$	$c_3$	$c_2$	$c_1$
$A_0$	$p_{00}$	$-7,83 \cdot 10^{-26}$	$-1,08 \cdot 10^{-26}$	$7,29 \cdot 10^{-27}$	$4,75 \cdot 10^{-28}$	$-2,14 \cdot 10^{-28}$	$-5,36 \cdot 10^{-30}$	$2,022 \cdot 10^{-30}$
	$p_{10}$	$5,64 \cdot 10^{-21}$	$7,81 \cdot 10^{-22}$	$-5,26 \cdot 10^{-22}$	$-3,43 \cdot 10^{-23}$	$1,546 \cdot 10^{-23}$	$3,87 \cdot 10^{-25}$	$-1,46 \cdot 10^{-25}$
	$p_{01}$	$-1,62 \cdot 10^{-16}$	$-2,24 \cdot 10^{-17}$	$1,508 \cdot 10^{-17}$	$9,849 \cdot 10^{-19}$	$-4,435 \cdot 10^{-19}$	$-1,11 \cdot 10^{-20}$	$4,191 \cdot 10^{-21}$
	$p_{11}$	$2,32 \cdot 10^{-12}$	$3,228 \cdot 10^{-13}$	$-2,17 \cdot 10^{-13}$	$-1,42 \cdot 10^{-14}$	$6,39 \cdot 10^{-15}$	$1,606 \cdot 10^{-16}$	$-6,04 \cdot 10^{-17}$
	$p_{02}$	$-1,7 \cdot 10^{-8}$	$-2,39 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,05 \cdot 10^{-10}$	$-4,72 \cdot 10^{-11}$	$-1,19 \cdot 10^{-12}$	$4,47 \cdot 10^{-13}$
	$p_{12}$	$4,824 \cdot 10^{-5}$	$7,164 \cdot 10^{-6}$	$-4,655 \cdot 10^{-6}$	$-3,18 \cdot 10^{-7}$	$1,394 \cdot 10^{-7}$	$3,616 \cdot 10^{-9}$	$-1,332 \cdot 10^{-9}$
	$p_{03}$	0,292	0,03	-0,025	-0,001	0,00067	$1,398 \cdot 10^{-5}$	$-6,088 \cdot 10^{-6}$
$A_2$	$p'_{00}$	$-2,54 \cdot 10^{-26}$	$-4,65 \cdot 10^{-27}$	$2,63 \cdot 10^{-27}$	$2,04 \cdot 10^{-28}$	$-8,1 \cdot 10^{-29}$	$-2,31 \cdot 10^{-30}$	$7,86 \cdot 10^{-31}$
	$p'_{10}$	$1,81 \cdot 10^{-21}$	$3,37 \cdot 10^{-22}$	$-1,88 \cdot 10^{-22}$	$-1,48 \cdot 10^{-23}$	$5,82 \cdot 10^{-24}$	$1,67 \cdot 10^{-25}$	$-5,66 \cdot 10^{-26}$
	$p'_{01}$	$-5,06 \cdot 10^{-17}$	$-9,75 \cdot 10^{-18}$	$5,32 \cdot 10^{-18}$	$4,28 \cdot 10^{-19}$	$-1,66 \cdot 10^{-19}$	$-4,83 \cdot 10^{-21}$	$1,62 \cdot 10^{-21}$
	$p'_{11}$	$6,99 \cdot 10^{-13}$	$1,42 \cdot 10^{-13}$	$-7,51 \cdot 10^{-14}$	$-6,24 \cdot 10^{-15}$	$2,36 \cdot 10^{-15}$	$7,04 \cdot 10^{-17}$	$-2,31 \cdot 10^{-17}$
	$p'_{02}$	$-4,73 \cdot 10^{-9}$	$-1,08 \cdot 10^{-9}$	$5,314 \cdot 10^{-10}$	$4,74 \cdot 10^{-11}$	$-1,7 \cdot 10^{-11}$	$-5,34 \cdot 10^{-13}$	$1,686 \cdot 10^{-13}$
	$p'_{12}$	$9,22 \cdot 10^{-6}$	$3,59 \cdot 10^{-6}$	$-1,34 \cdot 10^{-6}$	$-1,57 \cdot 10^{-7}$	$4,67 \cdot 10^{-8}$	$1,77 \cdot 10^{-9}$	$-4,84 \cdot 10^{-10}$
	$p'_{03}$	0,125	0,011	-0,0102	-0,0005	0,000278	$5,068 \cdot 10^{-6}$	$-2,48 \cdot 10^{-6}$

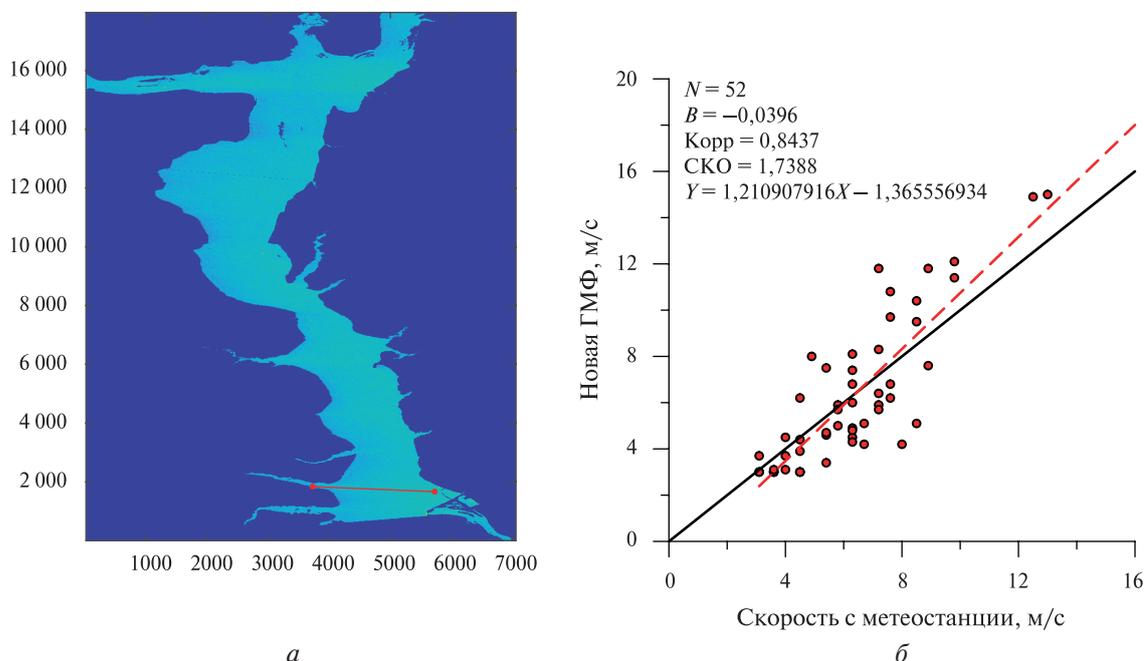


Рис. 4. Иллюстрация расчёта ветрового разгона (красным цветом) на примере РСА-изображения Sentinel-1A от 07.08.2019 (а), направление ветра 275°; результаты сопоставления измерений скорости ветра по данным метеостанции на Горьковском водохранилище и результатов расчёта на основе разработанной ГМФ (б)

Предложенная ГМФ была верифицирована, при этом использовался массив РСА-данных, измерений с метеостанции и данных реанализа, описанный в предыдущей главе. Для оценки ветрового разгона по данным метеостанции (для 2017–2018 гг.) или по данным реанализа (для 2019 г.) была выполнена оценка направления ветра, а далее в этом направлении рассчитывалось расстояние от центра квадратной области, в которой проводился расчёт УЭПР до берега, полученная дистанция предполагалась равной размерному разгону  $x$  (рис. 4а, см. с. 239). Результат расчёта величины скорости ветра на основе предложенной ГМФ представлен на рис. 4б.

Анализируя рис. 4б и 2, можно сделать вывод, что предложенная ГМФ даёт меньшее СКО, чем у СМОД7 и у ГМФ, разработанных в работе (Radkani, Zakeri, 2020), в то же время значение СКО для новой ГМФ оказывается близким, но чуть больше, чем у СМОД5.N. С точки зрения смещения ( $B$ ), которое рассчитывается как усреднённая по всем точкам разность смоделированного и измеренного значения скорости, новая ГМФ показывает наилучший результат по сравнению с остальными моделями. Что касается коэффициента корреляции, то самый лучший результат демонстрируют функции, разработанные в работе (Radkani, Zakeri, 2020), и близкий к ней результат показывает новая ГМФ, остальные модели имеют более низкие коэффициенты корреляции. Таким образом, можно утверждать, что новая геофизическая модельная функция даёт неплохой результат в части среднеквадратичного отклонения и смещения данных, а также демонстрирует наилучшее соответствие референсной прямой  $y = x$ , что может быть обусловлено учётом разгона поверхностных волн и использованием специфического спектра из публикации (Караев, Баландина, 2000).

## Заключение

В работе представлены результаты по созданию новой ГМФ для восстановления скорости ветра в акватории Горьковского водохранилища. Геофизическая модельная функция была разработана на базе двухмасштабной модели рассеяния электромагнитных волн на взволнованной поверхности, вклад от которой определяется наличием двух характерных масштабов — брэгговского масштаба и масштаба более длинных модулирующих волн. При моделировании УЭПР в рамках двухмасштабной модели был использован спектр из работы (Караев, Баландина, 2000), поскольку он был разработан на основе массива данных, включающих в себя данные для внутренних водоёмов. Кроме того, этот спектр имеет зависимость от ветрового разгона, что позволило учесть это и при создании новой геофизической модельной функции. При разработке ГМФ в рамках расчётов УЭПР согласно двухмасштабной модели была использована общепринятая для семейства моделей СМОД форма зависимости УЭПР от азимутального угла, при этом соответствующие коэффициенты в разложении по азимутальному углу считались функциями угла падения и разгона. Учёт зависимости от разгона является важным для водоёмов небольших размеров, поскольку ветровой разгон может оказывать критическое влияние на спектр поверхностных волн, а значит и на характеристики обратного рассеяния электромагнитного излучения.

Верификация полученной ГМФ проводилась на основе данных с метеостанции, расположенной в южной части водохранилища, и 52 РСА-изображений, полученных со спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B для прямой поляризации VV в период с апреля 2017 по октябрь 2019 г. (исключая периоды ледостава), охватывающих южную или южную и центральную часть водохранилища.

Дополнительно осуществлена оценка работоспособности моделей СМОД5.N, СМОД7 и моделей из работы (Radkani, Zakeri, 2020). Выполнен расчёт статистических характеристик для всех упомянутых ГМФ и проведено их сравнение со статистическими характеристиками для новой ГМФ. В результате было установлено, что разработанная геофизическая модельная функция превосходит все упомянутые модели при расчёте смещения, показывает результат лучше для среднеквадратичного отклонения, чем модель СМОД7 и модели из работы (Radkani, Zakeri, 2020), и более высокий уровень корреляции данных с натурными данными, чем модели СМОД5.N, СМОД7.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 25-77-20016, <https://rscf.ru/project/25-77-20016/> (сбор и обработка спутниковых данных, анализ работоспособности существующих алгоритмов восстановления скорости ветра), и госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FFUF-2025-0005 (разработка метода восстановления скорости ветра по РСА-изображениям).

## Литература

1. Байдаков Г. А., Кандауров А. А., Кузнецова А. М., Сергеев Д. А., Троицкая Ю. И. Натурные исследования особенностей ветрового волнения при малых значениях разгонах // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1569–1573.
2. Гурин С. Н. Анализ обоснованности ограничений эксплуатации пассажирских судов в Горьковском водохранилище // Науч. проблемы водного транспорта. 2022. № 72. С. 167–179. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.256>.
3. Караев В. Ю., Баландина Г. Н. Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 1–12.
4. Русаков Н. С., Сергеев Д. А., Ермакова О. С. и др. Исследование применимости геофизических модельных функций С-диапазона для радиолокационных данных в условиях Горьковского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 51–65. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-51-65.
5. Bass F. G., Fuks I. M., Kalmykov A. I. et al. Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface Part II: Scattering from an actual sea surface // IEEE Trans. on Antennas Propagation. 1968. V. 16. No. 5. P. 560–568. DOI: 10.1109/TAP.1968.1139244.
6. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophysical Research: Oceans. 1997. V. 102. No. C7. P. 15781–15796. <http://dx.doi.org/10.1029/97jc00467>.
7. Fetterer F., Gineris D., Wackerman C. C. Validating a scatterometer wind algorithm for ERS-1 SAR // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. No. 2. P. 479–492. DOI: 10.1109/36.662731.
8. Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5 // J. Geophysical Research: Oceans. 2007. V. 112. No. C3. Article C03006. <https://doi.org/10.1029/2006JC003743>.
9. Hwang P. A. Wavenumber spectrum and mean square slope of intermediate-scale ocean surface waves // J. Geophysical Research: Oceans. 2005. V. 110. No. C10. Article C10029. <https://doi.org/10.1029/2005JC003002>.
10. 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. No. 1. P. 921–931. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1516516>.
11. Klein L., Swift C. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1977. V. 25. No. 1. P. 104–111. <https://doi.org/10.1109/TAP.1977.1141539>.
12. Komarov S., Komarov A., Zabeline V. Marine wind speed retrieval from RADARSAT-2 dual-polarization imagery // Canadian J. Remote Sensing. 2011. V. 37. No. 5. P. 520–528. <https://doi.org/10.5589/m11-063>.
13. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // J. Geophysical Research: Oceans. 2003. V. 108. No. C3. P. FET 2-1–FET 2-24. <https://doi.org/10.1029/2001JC001003>.
14. McDaniel S. T. Small-slope predictions of microwave backscatter from the sea surface // Waves in Random Media. 2001. V. 11. No. 3. P. 343–360. DOI: 10.1080/13616670109409789.
15. Monaldo F. M., 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. No. 6. P. 2638–2642. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2504324.
16. Li X.-M., Zhang T., Huang B., Jia T. Capabilities of Chinese Gaofen-3 synthetic aperture radar in selected topics for coastal and ocean observations // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 12. Article 1929. <https://doi.org/10.3390/rs10121929>.
17. 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. No. 7. P. 2417–2428. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2836661.

18. *Quilfen Y., Chapron B., Elfouhaily T. et al.* Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1998. V. 103. No. C4. P. 7767–7786. <https://doi.org/10.1029/97JC01911>.
19. *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. No. 9. P. 3511–3534. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1706201>.
20. *Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Yu.* A review of wave spectrum models as applied to the problem of radar probing of the sea surface // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. No. 10. P. 7104–7134. <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
21. *Sergeev D., Ermakova O., Rusakov N. et al.* Verification of C-band geophysical model function for wind speed retrieval in the open ocean and inland water conditions // *Geosciences*. 2023. V. 13. No. 12. Article 361. <https://doi.org/10.3390/geosciences13120361>.
22. *Stoffelen A., Anderson D.* Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4 // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1997. V. 102. No. C3. P. 5767–5780. <https://doi.org/10.1029/96JC02860>.
23. *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. No. 5. P. 2123–2134. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2681806.
24. *Voronovich A. G., Zavorotny V. U.* Theoretical model for scattering of radar signals in  $K_u$ - and C-bands from a rough sea surface with breaking waves // *Waves in Random Media*. 2001. V. 11. No. 3. P. 247–269. DOI: 10.1080/13616670109409784.
25. *Wright J.* A new model for sea clutter // *IEEE Trans. on Antennas Propagation*. 1968. V. 16. No. 2. P. 217–223. DOI: 10.1109/TAP.1968.1139147.
26. *Yang X., Li X., Zheng Q. et al.* Comparison of ocean-surface winds retrieved from QuikSCAT scatterometer and Radarsat-1 SAR in offshore waters of the U. S. West Coast // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2011. V. 8. No. 1. P. 163–167. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2053345.
27. *Zhang T., Li X.-M., Feng Q. et al.* Retrieval of sea surface wind speeds from Gaofen-3 full polarimetric data // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 7. Article 813. <https://doi.org/10.3390/rs11070813>.
28. *Zhou L., Zheng G., Li X. et al.* An improved local gradient method for sea surface wind direction retrieval from SAR imagery // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 7. Article 671. <https://doi.org/10.3390/rs9070671>.

## Development of a geophysical model function for surface wind speed retrieval in conditions of Gorky Reservoir

O. S. Ermakova, N. S. Rusakov, E. I. Poplavsky,  
O. A. Danilicheva, G. A. Baidakov, D. A. Sergeev

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

The paper is devoted to the development of a method for the retrieval of wind speed at a standard meteorological height based on electromagnetic scattering calculated within a two-scale model and verified using data from the Sentinel-1 C-band synthetic aperture radar (SAR) for direct VV polarization and collocated meteorological station measurements. The method is based on a new geophysical model function (GMF) representing the relationship between specific effective scattering cross-section and surface wind speed, incidence angle of microwave signal, wind direction, and wave fetch. When developing the new GMF, a spectrum specific to inland waters was used, taking into account the range of dimensionless fetches from 2000 to 20 000. The GMF proposed in this work was verified based on *in situ* wind speed measurements conducted in the southern part of Gorky Reservoir between 2017 and 2019 along with collocated images from Sentinel-1A, -1B SARs. It was shown that the accuracy of wind speed reconstruction based on the proposed GMF is higher than that obtained using the CMOD7 models and models developed for the Caspian Sea.

**Keywords:** SAR image, C-band, Sentinel-1, co-polarization, inland water body, geophysical model function, fetch, two-scale model

Accepted: 13.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-231-244

## References

1. Baydakov G. A., Kandaurov A. A., Kuznetsova A. M., Sergeev D. A., Troitskaya Y. I., Field studies of features of wind waves at short fetches, *Bull. of Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, V. 82, No. 11, pp. 1431–1434.
2. Girin S. N., Analysis of the validity of restrictions on the operation of passenger vessels in the Gorky reservoir, *Russian J. Water Transport*, 2022, No. 72, pp. 167–179 (in Russian), <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.256>.
3. Karayev V. Yu., Balandina G. N., Modified wave spectrum and remote sensing, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2000, No. 5, pp. 1–12 (in Russian).
4. Rusakov N. S., Sergeev D. A., Ermakova O. S. et al., Study of the applicability of C-band geophysical model function for SAR data in conditions of the Gorky Reservoir, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 51–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-51-65.
5. Bass F. G., Fuks I. M., Kalmykov A. I. et al., Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface Part II: Scattering from an actual sea surface, *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1968, V. 16, No. 5, pp. 560–568, DOI: 10.1109/TAP.1968.1139244.
6. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D., A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1997, V. 102, No. C7, pp. 15781–15796, <http://dx.doi.org/10.1029/97jc00467>.
7. Fetterer F., Gineris D., Wackerman C. C., Validating a scatterometer wind algorithm for ERS-1 SAR, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, V. 36, No. 2, pp. 479–492, DOI: 10.1109/36.662731.
8. Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S., An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2007, V. 112, No. C3, Article C03006, <https://doi.org/10.1029/2006JC003743>.
9. Hwang P. A., Wavenumber spectrum and mean square slope of intermediate-scale ocean surface waves, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2005, V. 110, No. C10, Article C10029, <https://doi.org/10.1029/2005JC003002>.
10. 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, No. 1, pp. 921–931, <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1516516>.
11. Klein L., Swift C., An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1977, V. 25, No. 1, P. 104–111, <https://doi.org/10.1109/TAP.1977.1141539>.
12. Komarov S., Komarov A., Zabeline V., Marine wind speed retrieval from RADARSAT-2 dual-polarization imagery, *Canadian J. Remote Sensing*, 2011, V. 37, No. 5, pp. 520–528, <https://doi.org/10.5589/m11-063>.
13. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2003, V. 108, No. C3, pp. FET 2-1–FET 2-24, <https://doi.org/10.1029/2001JC001003>.
14. McDaniel S. T., Small-slope predictions of microwave backscatter from the sea surface, *Waves in Random Media*, 2001, V. 11, No. 3, pp. 343–360, <https://doi.org/10.1080/13616670109409789>.
15. Monaldo F. M., 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, No. 6, pp. 2638–2642, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2504324>.
16. Li X.-M., Zhang T., Huang B., Jia T., Capabilities of Chinese Gaofen-3 synthetic aperture radar in selected topics for coastal and ocean observations, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 12, Article 1929, <https://doi.org/10.3390/rs10121929>.
17. 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, No. 7, pp. 2417–2428, DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2836661.
18. Quilfen Y., Chapron B., Elfouhaily T. et al., Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1998, V. 103, No. C4, pp. 7767–7786, <https://doi.org/10.1029/97JC01911>.

19. 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, No. 9, pp. 3511–3534, <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1706201>.
20. Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Yu., A review of wave spectrum models as applied to the problem of radar probing of the sea surface, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, V. 124, No. 10, pp. 7104–7134, <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
21. Sergeev D., Ermakova O., Rusakov N. et al., Verification of C-band geophysical model function for wind speed retrieval in the open ocean and inland water conditions, *Geosciences*, 2023, V. 13, No. 12, Article 361, <https://doi.org/10.3390/geosciences13120361>.
22. Stoffelen A., Anderson D., Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1997, V. 102, No. C3, pp. 5767–5780, <https://doi.org/10.1029/96JC02860>.
23. 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, No. 5, pp. 2123–2134, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2681806>.
24. Voronovich A.G., Zavorotny V.U., Theoretical model for scattering of radar signals in  $K_u$ - and C-bands from a rough sea surface with breaking waves, *Waves in Random Media*, 2001, V. 11, No. 3, pp. 247–269, <https://doi.org/10.1080/13616670109409784>.
25. Wright J., A new model for sea clutter, *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1968, V. 16, No. 2, pp. 217–223, DOI: 10.1109/TAP.1968.1139147.
26. Yang X., Li X., Zheng Q. et al., Comparison of ocean-surface winds retrieved from QuikSCAT scatterometer and Radarsat-1 SAR in offshore waters of the U.S. West Coast, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, V. 8, No. 1, pp. 163–167, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2053345>.
27. Zhang T., Li X.-M., Feng Q. et al., Retrieval of sea surface wind speeds from Gaofen-3 full polarimetric data, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 7, Article 813, <https://doi.org/10.3390/rs11070813>.
28. Zhou L., Zheng G., Li X. et al., An improved local gradient method for sea surface wind direction retrieval from SAR imagery, *Remote Sensing*, 2017, V. 9, No. 7, Article 671, <https://doi.org/10.3390/rs9070671>.