Восстановление излучательной способности и скорости ветра для внутренних водоёмов ограниченного размера на примере Горьковского водохранилища по данным микроволновых радиометров Jason-1, -2, -3

О. С. Ермакова, Н. С. Русаков, Е. И. Поплавский

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

Проведено восстановление величин излучательной способности водной поверхности для внутренних водоёмов ограниченного размера по данным микроволновых радиометров Jason-1, -2, -3 (частоты 18 и 34 ГГц) с использованием данных реанализа ERA5 (*англ.* ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis 5th generation) (пятого поколения реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF)) для атмосферной коррекции. Методика основана на решении обратной задачи в рамках одномерной модели переноса излучения и учитывает пространственное разрешение радиометра через свёртку с диаграммой направленности антенны. Особенность подхода заключается в калибровке ветрового поля: проведено сравнение данных ERA5 с измерениями автономной метеостанции, установленной в южной части Горьковского водохранилища, выявлено систематическое занижение скорости ветра в реанализе, на основе чего выполнена коррекция данных ERA5. Установлена эмпирическая параметризация излучательной способности от скорректированной скорости ветра и на её базе, с учётом существующей параметризации для пресных озёр, получена зависимость излучательной способности от доли пенного покрытия. Показано, что для Горьковского водохранилища значения доли пенного покрытия находятся в диапазоне 0,1–1,0 %, что согласуется с теоретическими оценками для пресных озёр. Разработанная методология масштабируема и может быть использована для оценки ветрового режима и интенсивности пенного покрытия на внутренних водоёмах с известным контуром береговой линии, где натурные измерения отсутствуют.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, Jason-1, Jason-2, Jason-3, ERA5, излучательная способность, пенное покрытие, внутренние водоёмы, Горьковское водохранилище, метеостанция, калибровка ветра

Одобрена к печати: 06.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-350-362

Введение

Микроволновая радиометрия занимает особое место среди методов дистанционного зондирования Земли благодаря возможности получения информации о параметрах атмосферы и подстилающей поверхности независимо от облачности и освещённости (Njoku, Li, 1999; Ulaby, Long, 2014). Одним из ключевых параметров, восстанавливаемых по данным микроволновых радиометров, считается излучательная способность подстилающей поверхности — безразмерная величина, характеризующая эффективность теплового излучения реальной поверхности по сравнению с излучением абсолютно чёрного тела (Klein, Swift, 1977).

На протяжении последних трёх десятилетий активно ведутся исследования, направленные на установление связи между излучательной способностью водной поверхности и скоростью приводного ветра. Физический механизм этой связи заключается в том, что с ростом скорости ветра увеличивается шероховатость водной поверхности. Теоретические основы этого направления были заложены в работах (Wentz, 1997) и (Ellison et al., 1998), где разработана модель диэлектрической проницаемости морской воды и описаны первые высокоточные алгоритмы восстановления параметров океана по данным спутников (приборов SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave Imager)), а также в исследованиях, обобщённых в диссертационной работе (Заболотских, 2016), посвящённой развитию спутниковых пассивных

микроволновых методов зондирования системы «океан – атмосфера». Было установлено, что излучательная способность морской поверхности повышается с ростом скорости ветра, что объясняется увеличением шероховатости и образованием пены при разрушении гребней волн (Meissner, Wentz, 2004). В исследовании (Stogryn, 1972) эти зависимости были уточнены и предложены параметризации для частот 6–90 ГГц и диапазона скоростей ветра до 35 м/с.

В работах (Zabolotskikh et al., 2012, 2013, 2016) предложены алгоритмы восстановления атмосферных и океанических параметров с использованием нейронных сетей для инверсии уравнения переноса излучения. Эти алгоритмы были применены к данным спутниковых приборов SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager Sounder) и AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) и показали высокую эффективность при исследовании экстремальных погодных явлений, включая тропические циклоны и штормовые ветры (Zabolotskikh et al., 2013). В работах (Zabolotskikh, Chapron, 2019a, 2021) выведены эмпирические геофизические модельные функции для холодных арктических морей на частотах K-, Ka- и X-диапазонов, учитывающие угол наблюдения. В исследовании (Zabolotskikh, Chapron, 2019b) проанализирована эффективность различных метеорологических фильтров в алгоритмах восстановления ледовитости, показана ключевая роль неопределённостей в модельных функциях скорости ветра при классификации открытой воды и льда.

Поскольку излучательная способность определяется состоянием водной поверхности, её можно параметризовать не только через скорость ветра, но и через долю пенного покрытия, которая оказывается значимым фактором при скоростях ветра выше порога пенообразования. Это становится возможным, поскольку пенное покрытие имеет излучательную способность, близкую к единице (0,95–1,00) (Anguelova, Gaiser, 2013; Smith, 1988), что значительно превышает излучательную способность чистой воды (0,4–0,6 на частотах 18–37 ГГц) (Wentz, 1997). Даже при небольшой доле покрытия (0,001–0,01) вклад пены в общую яркостную температуру может быть существенным (Monahan, Zietlow, 1969).

Необходимо отметить, однако, что подавляющее большинство существующих исследований и моделей ориентировано на морские акватории с солёностью около 35 ‰ (Anguelova, Gaiser, 2013; Monahan, Zietlow, 1969; Smith, 1988; Stogryn, 1972; Wentz, 1997). Пресноводные внутренние водоёмы представляют собой особый объект для микроволновой радиометрии, существенно отличающийся от океанических условий. Вода в континентальных водохранилищах характеризуется низкой солёностью (менее 0,1 ‰), что кардинально меняет её диэлектрические свойства и свойства пенного покрытия. Пена в солёной воде более устойчива: пузырьки в ней меньше и дольше не лопаются из-за более высокого поверхностного натяжения, препятствующего их слиянию (Monahan, Zietlow, 1969), кроме того, морская пена имеет более высокую вязкость и проводимость, что дополнительно влияет на её электродинамические свойства и, следовательно, на микроволновое излучение (Anguelova, Gaiser, 2011). Помимо этого, внутренние водоёмы имеют значительно меньшие размеры по сравнению с океанами, что создаёт проблемы, связанные с пространственным разрешением спутниковых приборов. Например, размер пятна для радиометров Jason-2, -3 составляет около 42 км на частоте 18 ГГц и 23 км на частоте 34 ГГц (https://database.eohandbook.com/database/instrumentsummary.aspx?instrumentID=1786), что зачастую может быть сопоставимо с размерами самих внутренних водоёмов. Это приводит к необходимости учёта эффектов смешения сигналов от воды и прилегающей суши, а также к тщательной фильтрации береговых зон.

Восстановление скорости ветра и доли пенного покрытия для внутренних пресноводных водоёмов представляет собой отдельную проблему. Данные о скорости ветра над акваторией, как правило, доступны только с береговых метеорологических станций, большинство из которых расположены в глубине суши, вдали от берега. Это приводит к очень значительному занижению измеряемой скорости ветра по сравнению с реальными условиями над открытой водой (Young, Verhagen, 1996). Количество таких станций невелико, а их временной ряд часто содержит пробелы. Что касается оценки доли пенного покрытия, то прямых измерений на внутренних водоёмах практически не существует. Единственным источником параметризации для пресных вод остаётся работа (Wentz, 1997), выполненная на основе ограниченного набора фотографических наблюдений на озёрах. В связи с этим актуальным остаётся вопрос

о восстановлении скорости ветра и доли пенного покрытия на акватории внутренних водоёмов. Решение этой проблемы может заключаться в построении параметризаций, связывающих излучательную способность водной поверхности, измеряемую спутниковым радиометром, со скоростью ветра и долей пенного покрытия (Meissner, Wentz, 2009; Melsheimer et al., 2008; Mitnik, Mitnik, 2010). Имея такие зависимости, можно решать обратную задачу: по измеренной яркостной температуре и данным атмосферной коррекции восстанавливать искомые параметры даже в условиях отсутствия натурных наблюдений, что особенно важно для внутренних водоёмов с редкой сетью метеостанций.

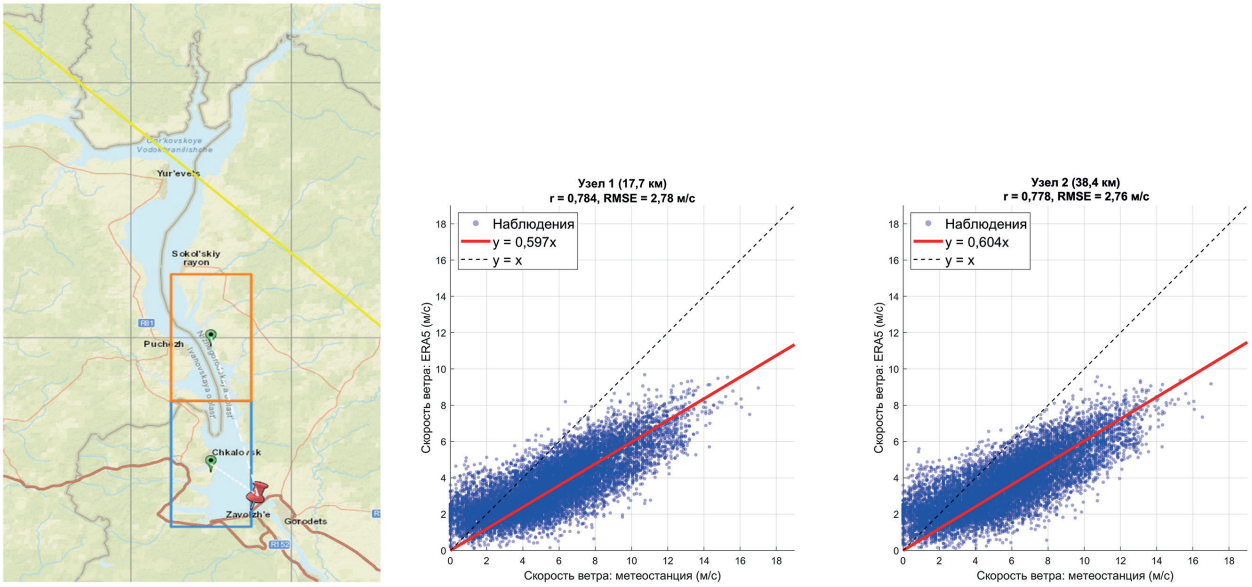
Цель настоящей работы — восстановление излучательной способности водной поверхности по данным микроволновых радиометров (спутники Jason-1, Jason-2 и Jason-3) для внутреннего водоёма на примере Горьковского водохранилища с использованием скорректированных данных реанализа ERA5 (*англ.* ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis 5th generation) для атмосферной коррекции, получение параметризаций излучательной способности от скорости ветра на высоте 10 м и проведение оценок доли пенного покрытия. Предлагаемый подход позволяет восстанавливать излучательную способность для водоёмов, размеры которых меньше или сравнимы с размером пятна засветки, и на базе этих расчётов с использованием полученных параметризаций оценивать скорость ветра на высоте 10 м и долю пенного покрытия.

Статья имеет следующую структуру. В разд. «Используемые данные и методика восстановления излучательной способности» описаны использованные данные и их предварительная обработка, включая калибровку ветра. Изложена методика моделирования переноса излучения, процедура свёртки и алгоритм оптимизации излучательной способности. Раздел «Результаты и обсуждение» содержит результаты восстановления излучательной способности и их анализ. В заключении сформулированы основные выводы.

Используемые данные и методика восстановления излучательной способности

В работе использованы данные микроволновых радиометров JMR (*англ.* Jason Microwave Radiometer) и AMR (*англ.* Advanced Microwave Radiometer), установленных на спутниках Jason-1, Jason-2 и Jason-3 и работающих на частотах 18,7 и 34,0 ГГц. Анализ данных проводился в безлёдный период с 2001 по 2024 г. для всех проходов спутников Jason-1, -2, -3 над Горьковским водохранилищем по треку 142 (*рис. 1*). Этот трек проходит через северную часть водохранилища в широтном направлении, пересекая его в районе города Юрьевец (см. *рис. 1а*). Для каждого прохода извлекались значения яркостной температуры на частотах 18,7 и 34,0 ГГц в точках трека, попадающих в акваторию водохранилища. Для минимизации влияния прилегающей суши использовалась маска водоёма, построенная по данным береговой линии высокого разрешения (Hersbach et al., 2020; Tapley et al., 1994).

Для получения данных о скорости ветра и атмосферной коррекции при расчётах излучательной способности использованы данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) (Hersbach et al., 2020). Данные ERA5 имеют пространственное разрешение 0,25×0,25° (около 28×25 км) и временное — 1 ч. В работе использованы следующие параметры ERA5 — температура поверхности, столбцовое содержание водяного пара, столбцовое содержание жидкой воды в облаках, а также компоненты скорости ветра на высоте 10 м U_{10}, необходимой для параметризации пенного покрытия и для анализа зависимости излучательной способности от ветра. Данные ERA5 отбирались по времени, ближайшему к моменту прохода спутника (максимальное расхождение 30 мин.). При рассмотрении параметров, необходимых для атмосферной коррекции, пространственное осреднение проводилось по акватории Горьковского водохранилища с использованием маски водоёма. Для суши значения этих параметров осреднялись по площади, исключая буферную зону шириной 15 км от береговой линии, чтобы минимизировать влияние переходных зон (например, подтопленных территорий, влажной почвы у берега, где свойства могут быть промежуточными между водой и сушей).



а *б* *в*

Рис. 1. Карта Горьковского водохранилища (*а*). Жёлтая линия — трек спутников Jason-2, -3 (трек 142), прямоугольные области соответствуют ячейкам ERA5 (синяя ячейка — узел 1, оранжевая — узел 2), красный символ — метеостанция. Зависимость скорости ветра на высоте 10 м, полученной по данным реанализа ERA5 в безлёдный период 2017–2019 гг., от скорости ветра, измеренной с метеостанции для узла 1 (*б*) и узла 2 (*в*). *r* — коэффициент корреляции Пирсона, RMSE (*англ.* Root Mean Square Error) — среднеквадратичная ошибка

Поскольку основная цель работы заключается в конструировании параметризаций излучательной способности от скорости ветра на высоте 10 м и от доли пенного покрытия, на начальном этапе исследований были определены источники для получения этих величин. Для установления скорости ветра на высоте 10 м были выбраны две ячейки реанализа ERA5, узел каждой из которых попадал в акваторию водоёма. Для каждого из узлов было проведено сравнение с данными с метеостанции, установленной в южной части водохранилища, на узком молу на маяке на расстоянии 17,7 км от узла 1 и 38,4 км от узла 2 (см. *рис. 1*). Метеостанция проводила сбор данных в безлёдный период с 2017–2019 гг. Осреднение измерений осуществлялось каждые 15 мин. Результаты сравнения представлены на *рис. 1б*, *в*.

Видно, что для обоих узлов наблюдается недооценка скорости ветра по сравнению с измерениями с метеостанции, для первого узла корреляция (*r*) немного выше, что может быть объяснено меньшим расстоянием от узла до метеостанции. Полученное облако точек было аппроксимировано линейной зависимостью, которая впоследствии использовалась для корректировки данных ERA5, полученных в период, когда метеостанция не работала.

Для расчёта доли пенного покрытия W использована параметризация из работы (Monahan, Zietlow, 1969), найденная на основе натурных наблюдений для пресных озёр. В отличие от океанических параметризаций (Scanlon, Ward, 2016), эта зависимость учитывает особенности пенообразования в условиях ограниченного разгона и пресной воды. В работе (Monahan, Zietlow, 1969) было установлено, что для пресных озёр существует порог образования пены, а доля покрытия при одинаковой скорости ветра значительно меньше, чем в океане. На основе этих данных была предложена параметризация:

$$W = a(U_{10} - b)^3, \quad (1)$$

где $a = 6{,}77 \cdot 10^{-4}$, $b = 2{,}56$ м/с при $U_{10} > b$; при $U_{10} \leqslant b$ доля пенного покрытия принимается равной нулю. Выбор этой параметризации обусловлен тем, что она была разработана на основе данных, полученных на пресноводных озёрах, что является более корректным для Горьковского водохранилища, чем стандартные океанические параметризации.

В настоящей работе предложена методика восстановления излучательной способности водной поверхности, основанная на решении обратной задачи посредством минимизации невязки между измеренной спутниковым радиометром яркостной температурой и результатами моделирования в рамках физической модели переноса микроволнового излучения в системе «атмосфера – подстилающая поверхность». Для каждого спутникового прохода подбирается такое значение излучательной способности ε, при котором среднеквадратичное отклонение модельной яркостной температуры от измеренной минимально. Оптимизация выполняется независимо для частот 18 и 34 ГГц, а также отдельно для водной поверхности и для суши.

Для расчёта яркостной температуры T_b на верхней границе атмосферы использована одномерная модель переноса излучения в приближении плоскопараллельной атмосферы, пренебрегающая рассеянием (Ellison et al., 1998; Wentz, 1997). Уравнение переноса для надирного направления имеет вид:

$$T_b = \varepsilon T_s^{\mathrm{ERA5}} \mathrm{e}^{-\tau(0,\infty)} + T_{up}\left(1 - e^{-\tau(0,\infty)}\right) +$$
$$+(1-\varepsilon)T_{down}\mathrm{e}^{-\tau(0,\infty)}(1-\mathrm{e}^{-\tau(0,\infty)}) + (1-\varepsilon)T_{cosm}\mathrm{e}^{-2\tau(0,\infty)},$$

здесь ε — излучательная способность поверхности; T_s^{ERA5} — физическая температура поверхности (по данным ERA5); τ — полная оптическая толщина атмосферы; T_{up} и T_{down} — эффективная температура восходящего и нисходящего атмосферного излучения (в K); $T_{cosm} = 2{,}7$ K — температура космического фона (Wentz, 1997).

Эффективные температуры атмосферы взяты из работы (Wentz, 1997):

$$T_{down} = c_0 + c_1 V + c_2 V^2 + c_3 V^3 + c_4 V^4 + c_5 (T_S - T_V),$$
$$T_V = 273{,}16 + 0{,}8337V - 3{,}029 \cdot 10^{-5} V^{0{,}33} \text{ (для } V \leqslant 48 \text{ мм)},$$
$$T_V = 301{,}16 \text{ (для } V > 48 \text{ мм)},$$
$$T_{up} = T_{down} + c_6 + c_7 V,$$

где V — столбцовое содержание водяного пара; T_s — температура поверхности; T_V — температура, типичная для данного значения V; коэффициенты c_i получены для частот 18 и 34 ГГц аппроксимацией частотных зависимостей c_i из работы (Wentz, 1997). Полная оптическая толщина атмосферы складывается из трёх компонент — поглощения микроволнового излучения молекулярным кислородом, водяными парами и капельной жидкой водой в облаках (Liebe et al., 1993; Rosenkranz, 1998):

$$\tau = \tau^{\mathrm{O_2}} + \alpha^{\mathrm{H_2O}} V + \alpha^{cloud} \mathrm{LWP},$$

здесь $\tau^{\mathrm{O_2}}$ — оптическая толщина, обусловленная поглощением микроволнового излучения молекулярным кислородом $\mathrm{O_2}$ в атмосфере; $\alpha^{\mathrm{H_2O}}$ — коэффициент поглощения водяными парами; α^{cloud} — коэффициент поглощения капельной жидкой водой в облаках; LWP — столбцовое содержание жидкой воды (его значение так же, как и значение V, извлекается из данных ERA5). Для расчёта коэффициентов поглощения были использованы модели O2-MPM93, H2O-MPM93 и liquidcloud-MPM93 из пакета ARTS (*англ.* Atmospheric Radiative Transfer Simulator), который реализует модель MPM93 (*англ.* Millimeter-wave Propagation Model (version 1993)) (Liebe et al., 1993). Коэффициенты поглощения приведены в *таблице*. Оценки также показали, что использование альтернативной модели PWR98 (*англ.* Rosenkranz water vapor model (1998)) (Rosenkranz, 1998) даёт незначительное отличие в 3 %, что не вносит существенной погрешности в дальнейшие расчёты.

Рассматриваемые радиометры AMR спутников Jason-2 и Jason-3 имеют эллиптическую диаграмму направленности с размером пятна 41,6 км для 18,7 ГГц и 22,9 км для 34,0 ГГц (https://database.eohandbook.com/database/instrumentsummary.aspx?instrumentID=1786), в то же время радиометр JMR имеет в два раза большее пятно засветки для всех частотных каналов. Для корректного сравнения модельных и измеренных значений яркостной температуры

применяется процедура пространственной свёртки моделируемых полей с аппаратной функцией антенны, аппроксимируемой двумерной гауссовой функцией:

Коэффициенты поглощения для частот 18 и 34 ГГц

Параметр	18 ГГц	34 ГГц
τ^{O_2} (в Нп)	0,025	0,035
α^{H_2O} (в Нп·м^2·кг$^{-1}$)	0,0006	0,0010
α^{cloud} (в Нп·м^2·кг$^{-1}$)	0,04	0,20

$$K(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right),$$

здесь σ_x и σ_y — среднеквадратические отклонения, определяемые размерами пятна. В дискретной форме для сетки ERA5 свёртка реализована как

$$T_b^{conv}(i,j)=\sum_{m=-M}^{M}\sum_{n=-N}^{N}K(m,n)T_b^{grid}(i+m,j+n),$$

где N — полуразмеры ядра в пикселях, определяемые из условия 6σ по каждому направлению. Граничные эффекты обрабатываются симметричным отражением сетки.

Для каждого спутникового прохода решается задача независимой оптимизации излучательной способности воды и суши для частот 18 и 34 ГГц с помощью поиска минимума среднеквадратичного отклонения ошибки RMSE между модельной $T_b^{\mathrm{mod}}(\varepsilon,x_i,y_i)$ и измеренной $T_b^{\mathrm{AMR}}(x_i,y_i)$ яркостной температурой:

$$\mathrm{RMSE}(\varepsilon)=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(T_b^{\mathrm{mod}}(\varepsilon,x_i,y_i)-T_b^{\mathrm{AMR}}(x_i,y_i)\right)^2}.$$

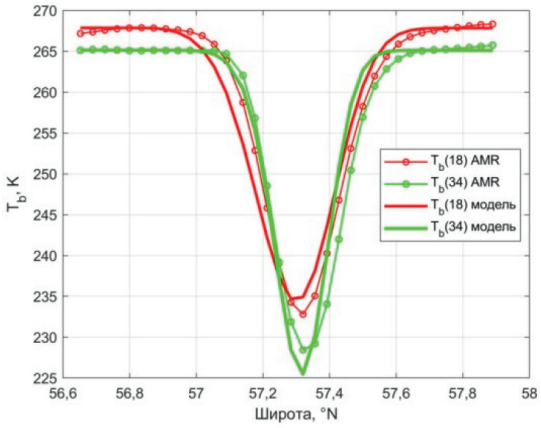


Рис. 2. Зависимость яркостной температуры вдоль пролёта спутника Jason-2 над акваторией Горьковского водохранилища (трек 142) от 24 сентября 2008 г., 23:16 UTC, для частоты 18 ГГц (красные кривые) и 34 ГГц (зелёные кривые), полученная в результате измерений с AMR (сплошные кривые с точками) и рассчитанная по модели (сплошные кривые)

Для суши использованы точки трека, удалённые от береговой линии более чем на 15 км, чтобы исключить влияние переходных зон «вода–суша» и минимизировать эффекты смешения сигналов (Liebe et al., 1993; Rosenkranz, 1998). Значения излучательной способности суши применяются в модели при расчёте яркостной температуры для точек, попадающих на сушу. Пример совмещения модельных и экспериментальных зависимостей яркостной температуры вдоль трека пролёта спутника Jason-2 над акваторией Горьковского водохранилища (трек 142) от 24 сентября 2008 г., 23:16 UTC (всемирное координированное время, *англ.* Coordinated Universal Time), приведён на *рис. 2.*

Результаты и обсуждение

На *рис. 3а*, *б* представлены экспериментальные точки зависимости восстановленной излучательной способности от скорости ветра на высоте 10 м U_{10} для частот 18 и 34 ГГц, размечены цветом по интервалам температуры поверхности воды T_s.

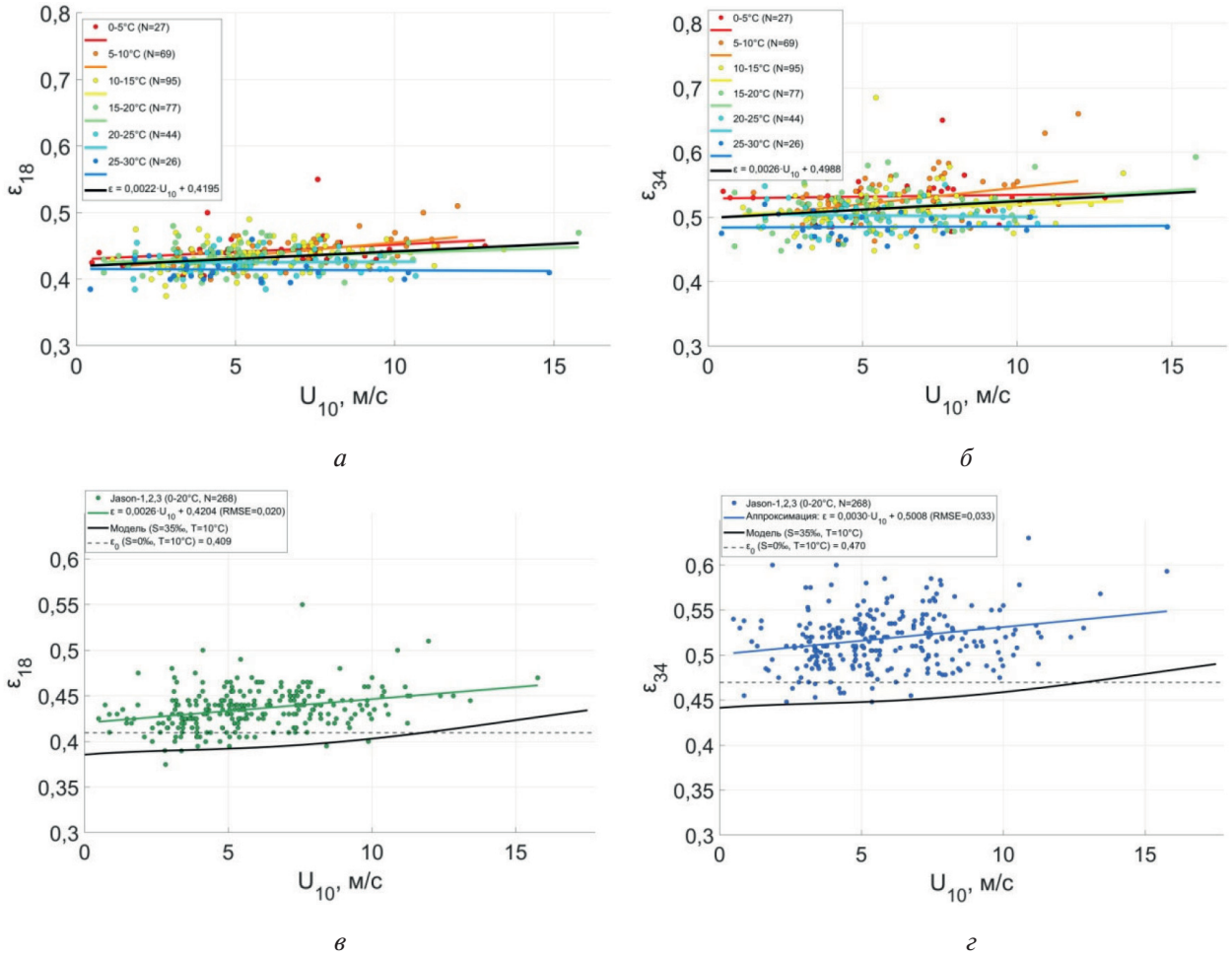


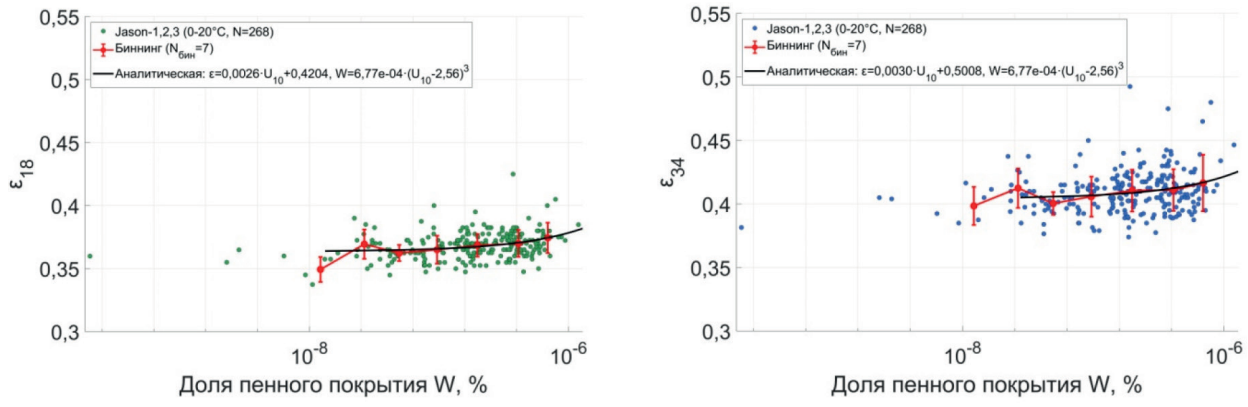
Рис. 3. Зависимость излучательной способности ε_{18} для частоты 18 ГГц (*а*) и ε_{34} для частоты 34 ГГц (*б*) от скорости ветра U_{10}. Цветами отмечены разные интервалы температуры поверхности, число точек $N = 324$. Зависимость $\varepsilon_{18}(U_{10})$ для частоты 18 ГГц (*в*) и $\varepsilon_{34}(U_{10})$ для частоты 34 ГГц (*г*) после фильтрации периодов цветения ($T_s \leqslant 20$ °C). Точки — результаты оптимизации для каждого прохода (число точек $N = 268$ для каждой частоты). Сплошные цветные линии — линейные параметризации. Сплошные чёрные линии — расчёты по модели (Meissner, Wentz, 2012) для морской воды с соленостью S = 35 ‰ и температурой поверхности T = 10 °C. Для 18 ГГц — $r = 0{,}314$; RMSE = 0,020; для 34 ГГц — $r = 0{,}301$; RMSE = 0,033 (уровень значимости $p < 0{,}001$ для обеих частот)

Видно, что точки, соответствующие температуре $T_s > 20$ °C (период июль–август), практически не демонстрируют тренда излучательной способности от скорости ветра, а их значения систематически смещены вниз. Это связано с ежегодно наблюдаемым на Горьковском водохранилище интенсивным цветением цианобактерий (Копылов и др., 2013). В этот период формируется густая биогенная плёнка и взвешенное органическое вещество, которые изменяют диэлектрические свойства поверхностного слоя, подавляют коротковолновое волнение и, как следствие, уменьшают чувствительность излучательной способности к ветровому волнению (Anguelova, Gaiser, 2011). Эти точки были исключены из дальнейшего анализа. На *рис. 3в*, *г* приведены данные после фильтрации периодов активного цвете-

ния вместе с предложенной эмпирической параметризацией. Для обеих частот наблюдается статистически значимая положительная корреляция: коэффициент корреляции Пирсона составляет $r = 0{,}314$ для 18 ГГц и $r = 0{,}301$ для 34 ГГц (уровень значимости $p < 0{,}001$ в обоих случаях, это означает, что зависимости статистически значимы с вероятностью более 99,9 %). Наклон зависимости для 34 ГГц (0,003 на 1 м/с) выше, чем для 18 ГГц (0,0026 на 1 м/с), что согласуется с теорией: на более высоких частотах вклад шероховатости поверхностного слоя в общий сигнал больше вследствие меньшей глубины проникновения электромагнитной волны (Meissner, Wentz, 2004). Среднеквадратичная ошибка RMSE аппроксимации составляет 0,020 для 18 ГГц и 0,033 для 34 ГГц, что объясняется естественной изменчивостью состояния поверхности (вариации температуры, остаточного волнения, биогенных факторов). Установленные значения излучательной способности для пресной воды систематически выше, чем для солёной (Meissner, Wentz, 2012) (для 18 ГГц 0,40–0,52, для 34 ГГц 0,47–0,62), что объясняется отсутствием ионной проводимости, уменьшающей излучение в морской воде (Ellison, 2007; Meissner, Wentz, 2004).

На основе полученных параметризаций для излучательных способностей на 18 и 34 ГГц $\varepsilon_{18}(U_{10})$ и $\varepsilon_{34}(U_{10})$ и литературной модели (Monahan, Zietlow, 1969) для пресных озёр (1) предложены комбинированные зависимости доли пенного покрытия W от излучательной способности ε_{18} и ε_{34}, изображённые сплошными линиями на *рис. 4*. Для построения экспериментальных точек на *рис. 4* каждой паре $\{U_{10}, \varepsilon_{18}\}$ или $\{U_{10}, \varepsilon_{34}\}$ с *рис. 3* была поставлена в соответствие пара $\{W, \varepsilon_{18}\}$ или $\{W, \varepsilon_{34}\}$, где W рассчитана по U_{10} с использованием параметризации (1) для пресных озёр. Видно, что основная масса данных ложится в область $W = 0{,}1–1{,}0$ %, что соответствует ожидаемым значениям для пресноводных водоёмов при скоростях ветра 8–12 м/с (Monahan, Zietlow, 1969).

Статистический анализ облака точек $\varepsilon_{18}(W)$ и $\varepsilon_{34}(W)$ показал наличие слабой, но статистически значимой положительной корреляции: коэффициент корреляции Пирсона составляет $r = 0{,}256$ для 18 ГГц и $r = 0{,}233$ для 34 ГГц (уровень значимости $p < 0{,}001$ в обоих случаях). Среднеквадратичная ошибка RMSE — 0,021 и 0,033 соответственно, что объясняется естественной изменчивостью состояния поверхности (вариации температуры, шероховатости, биогенных факторов).



а *б*

Рис. 4. Зависимость излучательной способности ε_{18} на частоте 18 ГГц (*а*) и ε_{34} на частоте 34 ГГц (*б*) от доли пенного покрытия W. Точки — экспериментальные данные, пересчитанные через полученные параметризации $\varepsilon_{18}(U_{10})$ и $\varepsilon_{34}(U_{10})$ и модель (Monahan, Zietlow, 1969). Сплошная линия — комбинированная параметризация. Красные символы — бинированные данные. Статистика: для 18 ГГц — $r = 0{,}256$; для 34 ГГц — $r = 0{,}233$ ($p < 0{,}001$), RMSE равна 0,021 и 0,033 соответственно

Бинирование данных (красные символы на *рис. 4*) демонстрирует монотонный рост средних значений излучательной способности с увеличением W — для 18 ГГц с 0,431 при $W = 0{,}001$ % до 0,443 при $W = 0{,}8$ %, для 34 ГГц с 0,508 до 0,534 соответственно. Это под-

утверждает наличие систематической зависимости, маскируемой случайным разбросом единичных измерений. Таким образом, прямое восстановление W по единичному измерению ε ненадёжно, но для определения доли пенного покрытия можно использовать двухступенчатую схему, согласно которой сначала проводится расчёт излучательной способности по модели и устанавливается скорость ветра на основе предложенной параметризации, а затем с использованием формулы (1) делается оценка пенного покрытия.

Заключение

В настоящей работе разработана и реализована методика восстановления спектральной излучательной способности водной поверхности на частотах 18 и 34 ГГц по данным микроволновых радиометров JMR (Jason-1) и AMR (Jason-2, -3), адаптированная для внутренних водоёмов ограниченного размера. Актуальность исследования обусловлена тем, что пресноводные внутренние водоёмы остаются слабо изученными с точки зрения микроволновой радиометрии, а существующие параметризации излучательной способности, разработанные для океана, не могут быть непосредственно применены к условиям ограниченного разгона волн и низкой солёности.

Для анализа были использованы данные спутников Jason-1 (2001–2013), Jason-2 и Jason-3 (2008–2024). Для каждого прохода извлекались значения яркостной температуры в точках трека 142, попадающих в акваторию Горьковского водохранилища. Для атмосферной коррекции использованы данные реанализа ERA5, включающие температуру поверхности, столбцовое содержание водяного пара, содержание жидкой воды в облаках и скорость ветра на высоте 10 м. Данные ERA5 отбирались по времени, ближайшему к моменту прохода спутника, с пространственным осреднением по акватории водохранилища и буферной зоной для суши.

Процедура восстановления излучательной способности включала несколько ключевых этапов. Была использована численная модель переноса микроволнового излучения в системе «атмосфера – подстилающая поверхность» на основе одномерного уравнения переноса в приближении плоскопараллельной атмосферы. Модель учитывает собственное излучение поверхности, ослабленное атмосферой, восходящее и нисходящее излучение атмосферы, а также отражённое космическое излучение. Оптическая толщина атмосферы рассчитывается как сумма вкладов кислорода, водяного пара и облачной жидкой воды с коэффициентами, определёнными на основе модели MPM93 (Liebe et al., 1993). Для учёта конечного пространственного разрешения радиометра реализована процедура свёртки моделируемых полей с диаграммой направленности антенны, аппроксимируемой гауссовым ядром, что особенно важно для внутренних водоёмов, размеры которых сопоставимы с размером пятна радиометра. Оптимизация излучательной способности выполнена независимо для воды и суши посредством минимизации среднеквадратичного отклонения между модельной и измеренной яркостной температурой.

Новизна работы заключается в нескольких аспектах. Впервые для Горьковского водохранилища по данным спутниковой радиометрии восстановлены значения спектральной излучательной способности с учётом влияния береговой линии и пространственного разрешения радиометров. Реализована процедура пространственной свёртки, адаптированная для узких водоёмов, что минимизирует влияние прилегающей суши на измерения. Проведена калибровка ветровых данных ERA5 по натурной метеостанции, установленной в южной части водохранилища, что позволило скорректировать систематическое занижение скорости ветра в реанализе.

Ключевой результат работы — эмпирические параметризации излучательной способности от скорости ветра для пресной воды на частотах 18 и 34 ГГц, полученные по данным Jason-1, -2, -3 после фильтрации периодов цветения. Эти параметризации демонстрируют статистически значимую положительную корреляцию ($r = 0{,}314$ и $r = 0{,}229$, $p < 0{,}001$) и могут быть использованы для оценки скорости ветра по данным радиометров Jason на внутрен-

них пресноводных водоёмах. Важно подчеркнуть, что прямое восстановление доли пенного покрытия W по параметризации $\varepsilon(W)$ невозможно из-за значительного разброса данных (RMSE = 0,021...0,033), обусловленного естественной изменчивостью состояния поверхности. Однако предложен двухэтапный подход: сначала по параметризации $\varepsilon(U_{10})$ восстанавливается скорость ветра, а затем с использованием литературной модели (Monahan, Zietlow, 1969) для пресных озёр оценивается доля пенного покрытия. Показано, что для Горьковского водохранилища значения W находятся в диапазоне 0,1–1,0 %, что согласуется с теоретическими оценками.

Хотя численные значения полученных параметризаций относятся к Горьковскому водохранилищу, сама методология, включающая решение обратной задачи с учётом пространственной свёртки, атмосферную коррекцию по глобально доступным данным ERA5, калибровку ветра по имеющимся натурным измерениям (или при их отсутствии — использование скорректированных данных реанализа) и последующую оценку W через комбинированную параметризацию, может считаться универсальной и масштабируемой. Для применения к другому внутреннему водоёму достаточно иметь его контур (для выделения точек трека) и данные ERA5. При этом, разумеется, для получения количественных оценок, специфичных для конкретного водоёма (например, коэффициентов параметризации $\varepsilon(U_{10})$ или порога пенообразования), может потребоваться адаптация на основе локальных данных или дополнительных спутниковых измерений. Однако предложенный алгоритмический подход остаётся неизменным и может быть воспроизведён для любого внутреннего водоёма ограниченного размера.

Таким образом, предложенный подход восполняет существующий пробел в области микроволновой радиометрии пресных внутренних водоёмов и предоставляет инструмент для количественной оценки состояния водной поверхности, скорости ветра и интенсивности пенообразования по спутниковым данным даже в условиях отсутствия натурных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 25-77-20016.

Литература

1. *Заболотских Е. В.* Развитие спутниковых пассивных микроволновых методов зондирования системы «океан – атмосфера» и их применение в задачах изучения экстремальных погодных явлений: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 2016. 36 с.
2. *Копылов А. И.*, *Стройнов Я. В.*, *Заботкина Е. А. и др.* Гетеротрофные микроорганизмы и вирусы в воде Горьковского водохранилища в период аномально высокой температуры воды // Биология внутренних вод. 2013. № 2. С. 16–24. DOI: 10.7868/S0320965213010075.
3. *Anguelova M. D.*, *Gaiser P. W.* Skin depth at microwave frequencies of sea foam layers with vertical profile of void fraction // J. Geophysical Research: Oceans. 2011. V. 116. Article C11016. 18 p. DOI: 10.1029/2011JC007372.
4. *Anguelova M. D.*, *Gaiser P. W.* Microwave emissivity of sea foam layers with vertically inhomogeneous dielectric properties // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 139. P. 81–96. DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.017.
5. *Ellison W. J.* Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25 THz and the temperature range 0–100 °C // J. Physical and Chemical Reference Data. 2007. V. 36. No. 1. P. 1–18. DOI: 10.1063/1.2360986.
6. *Ellison W. J.*, *Balana A.*, *Delbos G. et al.* New permittivity measurements of seawater // Radio Science. 1998. V. 33. No. 3. P. 639–648. DOI: 10.1029/97RS02223.
7. *Hersbach H.*, *Bell B.*, *Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorological Soc. 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
8. *Klein L. A.*, *Swift C. T.* An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1977. V. 25. No. 1. P. 104–111. DOI: 10.1109/TAP.1977.1141539.
9. *Liebe H. J.*, *Hufford G. A.*, *Cotton M. G.* Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz // AGARD Conf. Proc. Atmospheric Propagation Effects Through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Rdiation. Neuilly-sur-Cene, 1993. V. 542. P. 3.1–3.10.

10. *Meissner T.*, *Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. No. 9. P. 1836–1849. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888.
11. *Meissner T.*, *Wentz F.J.* Wind-vector retrievals under rain with passive satellite microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2009. V. 47. No. 9. P. 3065–3083. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2027012.
12. *Meissner T.*, *Wentz F.J.* The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incidence angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 8. P. 3004–3026. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2179662.
13. *Melsheimer C.*, *Heygster G.*, *Toudal Pedersen L.* Integrated retrieval of surface and atmospheric parameters over the arctic from AMSR-E satellite microwave radiometer data using inverse methods // Proc. IGARSS 2008. IEEE, 2008. P. IV-986–IV-989. DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4779890.
14. *Mitnik L.M.*, *Mitnik M.L.* AMSR-E advanced wind speed retrieval algorithm and its application to marine weather systems // Proc. IGARSS 2010. IEEE, 2010. P. 3224–3227. DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5649563.
15. *Monahan E.C.*, *Zietlow C.R.* Laboratory comparisons of fresh-water and salt-water whitecaps // J. Geophysical Research. 1969. V. 74. No. 28. P. 6961–6966. DOI: 10.1029/JC074i028p06961.
16. *Njoku E.G.*, *Li L.* Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6–18 GHz // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1999. V. 37. No. 1. P. 79–93. DOI: 10.1109/36.739125.
17. *Rosenkranz P.W.* Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // Radio Science. 1998. V. 33. No. 4. P. 919–928. DOI: 10.1029/98RS01182.
18. *Scanlon B.*, *Ward B.* The influence of environmental parameters on active and maturing oceanic whitecaps // J. Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. No. 5. P. 3325–3336. DOI: 10.1002/2015JC011230.
19. *Smith P.M.* The emissivity of sea foam at 19 and 37 GHz // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1988. V. 26. No. 5. P. 541–547. DOI: 10.1109/36.7679.
20. *Stogryn A.* The emissivity of sea foam at microwave frequencies // J. Geophysical Research. 1972. V. 77. No. 9. P. 1658–1666. DOI: 10.1029/JC077i009p01658.
21. *Tapley B.D.*, *Ries J.C.*, *Davis G.W. et al.* Precision orbit determination for TOPEX/POSEIDON // J. Geophysical Research: Oceans. 1994. V. 99. No. C12. P. 24383–24404. DOI: 10.1029/94JC01645.
22. *Ulaby F.T.*, *Long D.G.* Microwave radar and radiometric remote sensing. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014. 1116 p.
23. *Wentz F.J.* A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager // J. Geophysical Research: Oceans. 1997. V. 102. No. C4. P. 8703–8718. DOI: 10.1029/96JC01751.
24. *Young I.R.*, *Verhagen L.A.* The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Pt. 1. Total energy and peak frequency // Coastal Engineering. 1996. V. 29. No. 1–2. P. 47–78. DOI: 10.1016/S0378-3839(96)00006-3.
25. *Zabolotskikh E.V.*, *Chapron B.* (2019a) New geophysical model function for ocean emissivity at 89 GHz over arctic waters // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2019. V. 16. No. 4. P. 573–577. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2876731.
26. *Zabolotskikh E.V.*, *Chapron B.* (2019b) Consideration of atmospheric effects for sea ice concentration retrieval from satellite microwave observations // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. V. 44. No. 2. P. 124–129. DOI: 10.3103/S1068373919020055.
27. *Zabolotskikh E.V.*, *Chapron B.* Arctic sea X-band microwave emission modeling based on satellite data: Considering the measurement angle // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. V. 46. No. 4. P. 256–262. DOI: 10.3103/S1068373921040063.
28. *Zabolotskikh E.*, *Chapron B.*, *Bobylev L.* New satellite passive microwave retrieval algorithms and their application to study atmospheric phenomena and oceanic parameters // Proc. 2012 2nd Intern. Conf. on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. 2012. 4 p. DOI: 10.1109/RSETE.2012.6260637.
29. *Zabolotskikh E.V.*, *Mitnik L.M.*, *Chapron B.* New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 13. P. 3347–3350. DOI: 10.1002/grl.50664.
30. *Zabolotskikh E.V.*, *Reul N.*, *Chapron B.* Geophysical model function for the AMSR2 C-Band wind excess emissivity at high winds // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2016. V. 13. No. 1. P. 78–81. DOI: 10.1109/LGRS.2015.2497463.

Retrieval of emissivity and wind speed for inland water bodies of limited size using the example of Gorky Reservoir based on data from Jason-1, -2, -3 microwave radiometers

O. S. Ermakova, N. S. Rusakov, E. I. Poplavsky

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

Retrieval of surface emissivity for inland water bodies of limited size was performed using data from Jason-1, -2, -3 microwave radiometers (frequencies 18 and 34 GHz) and ERA5 (ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis fifth generation) data for atmospheric correction. The methodology is based on solving the inverse problem within a one-dimensional radiative transfer model and accounts for the spatial resolution of the radiometer through convolution with the antenna pattern. A distinctive feature of the approach is wind field calibration: a comparison of ERA5 data with measurements from an autonomous weather station installed in the southern part of Gorky Reservoir revealed a systematic underestimation of wind speed in the reanalysis, on the basis of which a correction of the ERA5 data was performed. An empirical parameterization of emissivity as a function of the corrected wind speed was obtained, and, based on it, using an existing parameterization for freshwater lakes, the dependence of emissivity on whitecap fraction was derived. It is shown that for Gorky Reservoir, the whitecap fraction values lie in the range of 0.1–1.0 %, which is consistent with theoretical estimates for freshwater lakes. The developed methodology is scalable and can be used to assess the wind regime and whitecap intensity on inland water bodies with a known shoreline contour, where *in situ* measurements are unavailable.

Keywords: microwave radiometry, Jason-1, Jason-2, Jason-3, ERA5, emissivity, whitecap fraction, inland water bodies, Gorky Reservoir, weather station, wind calibration

Accepted: 06.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-350-362

References

1. Zabolotskikh E. V., *Razvitie sputnikovykh passivnykh mikrovolnovykh metodov zondirovaniya sistemy "okean–atmosfera" i ikh primenenie v zadachakh izucheniya ehkstremal'nykh pogodnykh yavlenii: Avtoref. diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Development of satellite passive microwave sensing methods for the ocean–atmosphere system and their application to the study of extreme weather events, Dr. ph.-math. sci. thesis abstract), Saint Petersburg, 2016, 36 p. (in Russian).
2. Kopylov A. I., Stroinov Ya. V., Zabotkina E. A. et al., Heterotrophic microorganisms and viruses in the water of the Gorky reservoir during a period of anomalously high water temperature, *Inland Water Biology*, 2013, V. 6, No. 2, pp. 98–105, DOI: 10.1134/S1995082913010070.
3. Anguelova M. D., Gaiser P. W., Skin depth at microwave frequencies of sea foam layers with vertical profile of void fraction, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2011, V. 116, Article C11016, 18 p., DOI: 10.1029/2011JC007372.
4. Anguelova M. D., Gaiser P. W., Microwave emissivity of sea foam layers with vertically inhomogeneous dielectric properties, *Remote Sensing of Environment*, 2013, V. 139, pp. 81–96, DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.017.
5. Ellison W. J., Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25 THz and the temperature range 0–100 °C, *J. Physical and Chemical Reference Data*, 2007, V. 36, No. 1, pp. 1–18, DOI: 10.1063/1.2360986.
6. Ellison W. J., Balana A., Delbos G. et al., New permittivity measurements of seawater, *Radio Science*, 1998, V. 33, No. 3, pp. 639–648, DOI: 10.1029/97RS02223.
7. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, V. 146, No. 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
8. Klein L. A., Swift C. T., An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1977, V. 25, No. 1, pp. 104–111, DOI: 10.1109/TAP.1977.1141539.

9. Liebe H. J., Hufford G. A., Cotton M. G., Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz, *AGARD Conf. Proceedings. Atmospheric Propagation Effects through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Radiation*, Neuilly-sur-Cene, 1993, V. 542, pp. 3.1–3.10.
10. Meissner T., Wentz F. J., The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, V. 42, No. 9, pp. 1836–1849, DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888.
11. Meissner T., Wentz F. J., Wind-vector retrievals under rain with passive satellite microwave radiometers, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, V. 47, No. 9, pp. 3065–3083, DOI: 10.1109/TGRS.2009.2027012.
12. Meissner T., Wentz F. J., The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, V. 50, No. 8, pp. 3004–3026, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2179662.
13. Melsheimer C., Heygster G., Toudal Pedersen L., Integrated retrieval of surface and atmospheric parameters over the arctic from AMSR-E satellite microwave radiometer data using inverse methods, *Proc. IGARSS 2088*, IEEE, 2008, pp. IV-986–IV-989, DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4779890.
14. Mitnik L. M., Mitnik M. L., AMSR-E advanced wind speed retrieval algorithm and its application to marine weather systems, *Proc. IGARSS 2010*, IEEE, 2010, pp. 3224–3227, DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5649563.
15. Monahan E. C., Zietlow C. R., Laboratory comparisons of fresh-water and salt-water whitecaps, *J. Geophysical Research*, 1969, V. 74, No. 28, pp. 6961–6966, DOI: 10.1029/JC074i028p06961.
16. Njoku E. G., Li L., Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6–18 GHz, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1999, V. 37, No. 1, pp. 79–93, DOI: 10.1109/36.739125.
17. Rosenkranz P. W., Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models, *Radio Science*, 1998, V. 33, No. 4, pp. 919–928, DOI: 10.1029/98RS01182.
18. Scanlon B., Ward B., The influence of environmental parameters on active and maturing oceanic whitecaps, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2016, V. 121, No. 5, pp. 3325–3336, DOI: 10.1002/2015JC011230.
19. Smith P. M., The emissivity of sea foam at 19 and 37 GHz, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1988, V. 26, No. 5, pp. 541–547, DOI: 10.1109/36.7679.
20. Stogryn A., The emissivity of sea foam at microwave frequencies, *J. Geophysical Research*, 1972, V. 77, No. 9, pp. 1658–1666, DOI: 10.1029/JC077i009p01658.
21. Tapley B. D., Ries J. C., Davis G. W. et al., Precision orbit determination for TOPEX/POSEIDON, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, V. 99, No. C12, pp. 24383–24404, DOI: 10.1029/94JC01645.
22. Ulaby F. T., Long D. G., *Microwave radar and radiometric remote sensing*, Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014, 1116 p.
23. Wentz F. J., A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1997, V. 102, No. C4, pp. 8703–8718, DOI: 10.1029/96JC01751.
24. Young I. R., Verhagen L. A., The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Pt. 1. Total energy and peak frequency, *Coastal Engineering*, 1996, V. 29, No. 1–2, pp. 47–78, DOI: 10.1016/S0378-3839(96)00006-3.
25. Zabolotskikh E. V., Chapron B. (2019a), New geophysical model function for ocean emissivity at 89 GHz over arctic waters, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, V. 16, No. 4, pp. 573–577, DOI: 10.1109/LGRS.2018.2876731.
26. Zabolotskikh E. V., Chapron B. (2019b), Consideration of atmospheric effects for sea ice concentration retrieval from satellite microwave observations, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, V. 44, No. 2, pp. 124–129, DOI: 10.3103/S1068373919020055.
27. Zabolotskikh E. V., Chapron B., Arctic sea X-band microwave emission modeling based on satellite data: considering the measurement angle, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021, V. 46, No. 4, pp. 256–262, DOI: 10.3103/S1068373921040063.
28. Zabolotskikh E., Chapron B., Bobylev L., New satellite passive microwave retrieval algorithms and their application to study atmospheric phenomena and oceanic parameters, *Proc. 2012 2nd Intern. Conf. on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, 2012, 4 p., DOI: 10.1109/RSETE.2012.6260637.
29. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B., New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing, *Geophysical Research Letters*, 2013, V. 40, No. 13, pp. 3347–3350, DOI: 10.1002/grl.50664.
30. Zabolotskikh E. V., Reul N., Chapron B., Geophysical model function for the AMSR2 C-band wind excess emissivity at high winds, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, V. 13, No. 1, pp. 78–81, DOI: 10.1109/LGRS.2015.2497463.