Восстановление излучательной способности и оценка пенообразования на внутренних водоёмах ограниченного размера по данным микроволновых радиометров Jason

Ермакова О.С., Русаков Н.С., Поплавский Е.И.
Институт прикладной физики РАН
ermakova@ipfran.ru

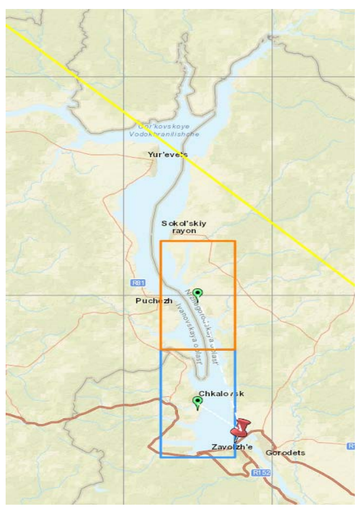
Проведено восстановление величин излучательной способности водной поверхности для внутренних водоёмов ограниченного размера по данным микроволновых радиометров Jason-1, 2, 3 (частоты 18 и 34 ГГц) с использованием данных реанализа ERA5 (Пятое поколение реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов 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. Особенностью подхода является калибровка 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. Получена эмпирическая параметризация излучательной способности от скорректированной скорости ветра, и, на ее базе, с учетом 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.

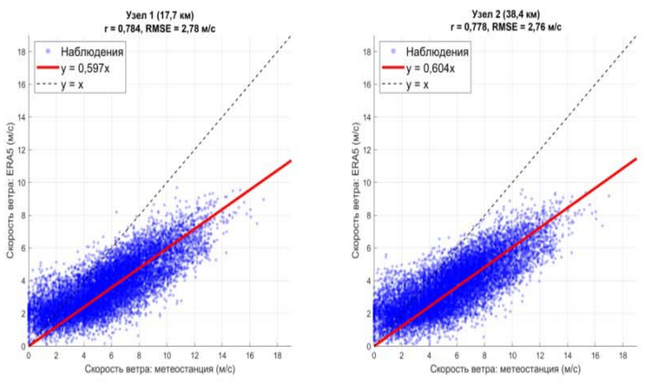
Используемые данные и методика восстановления излучательной способности

В работе использованы данные микроволновых радиометров JMR и AMR (Jason Microwave Radiometer и Advanced Microwave Radiometer), установленных на спутниках Jason-1, Jason-2 и Jason-3 на частотах 18,7 ГГц и 34,0 ГГц. Анализ данных проводился в безледный период с 2001 по 2024 гг. для всех проходов спутников Jason-1, 2, 3 над Горьковским водохранилищем по треку 142. Этот трек проходит через северную часть водохранилища в широтном направлении, пересекая его в районе города Юрьевец. 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 водоема, построенная по данным береговой линии высокого разрешения.

Для получения данных о скорости ветра и атмосферной коррекции при расчетах излучательной способности использованы данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) – 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 минут). При рассмотрении параметров, необходимых для атмосферной коррекции, пространственное осреднение проводилось по акватории Горьковского водохранилища с использованием маски водоема. 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).

Для определения скорости ветра на высоте 10 м были выбраны две ячейки реанализа ERA5, узел каждой из которых попадал в акваторию водоема. Для каждого из узлов было проведено сравнение с данными с метеостанции, установленной в южной части водохранилища, в узком моле на маяке на расстоянии 17,7 км от узла 1 и 38,4 км от узла 2. Метеостанция проводила сбор данных в безледный период с 2017-2019 гг.





Карта Горьковского водохранилища, желтая линия – трек спутников Jason-2,3 (трек 142), прямоугольные области соответствующие ячейкам ERA5 (синяя ячейка – узел 1, оранжевая ячейка – узел 2), красный символ – метеостанция; (б) скорость ветра на высоте 10 м, полученная по данным реанализа ERA5 в безледный период с 2017-2019 гг от скорости ветра, измеренной с метеостанции для узла 1; (в) для узла 2

Для расчёта доли пенного покрытия W использована параметризация из работы (Monahan, Zietlow, 1969), полученная на основе натурных наблюдений для пресных озёр: $W = a \cdot (U_{10} - b)^3$ где a=6,77×10^{-4}, b=2,56 м/с, при $U_{10} > b$; при $U_{10} \le b$ доля пенного покрытия принимается равной нулю.

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).

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

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

$$T_{down} = c_0 + c_1 V + c_2 V^2 + c_3 V^3 + c_4 V^4 + c_5 \cdot (T_S - T_V)$$
$$T_V = 273{,}16 + 0{,}8337 V - 3{,}029 \times 10^{-4} V^{3.33} \quad (V \le \text{48 мм})$$
$$T_V = 301{,}16 \text{ для } V > 48 \text{ мм})$$
$$T_{up} = T_{down} + c_6 + c_7 V$$

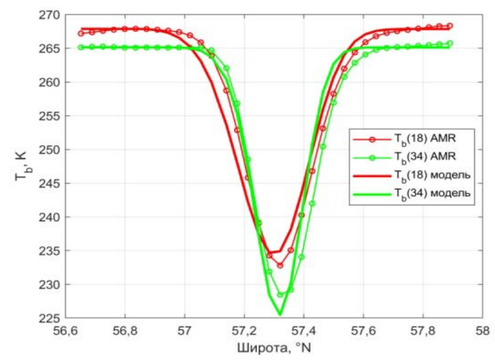
Коэффициенты поглощения для частот 18 и 34 ГГц

Параметр	18 ГГц	34 ГГц
(Нп)	0,025	0,035
(Нп·м²/кг)	0,0006	0,0010
(Нп·м²/кг)	0,04	0,20

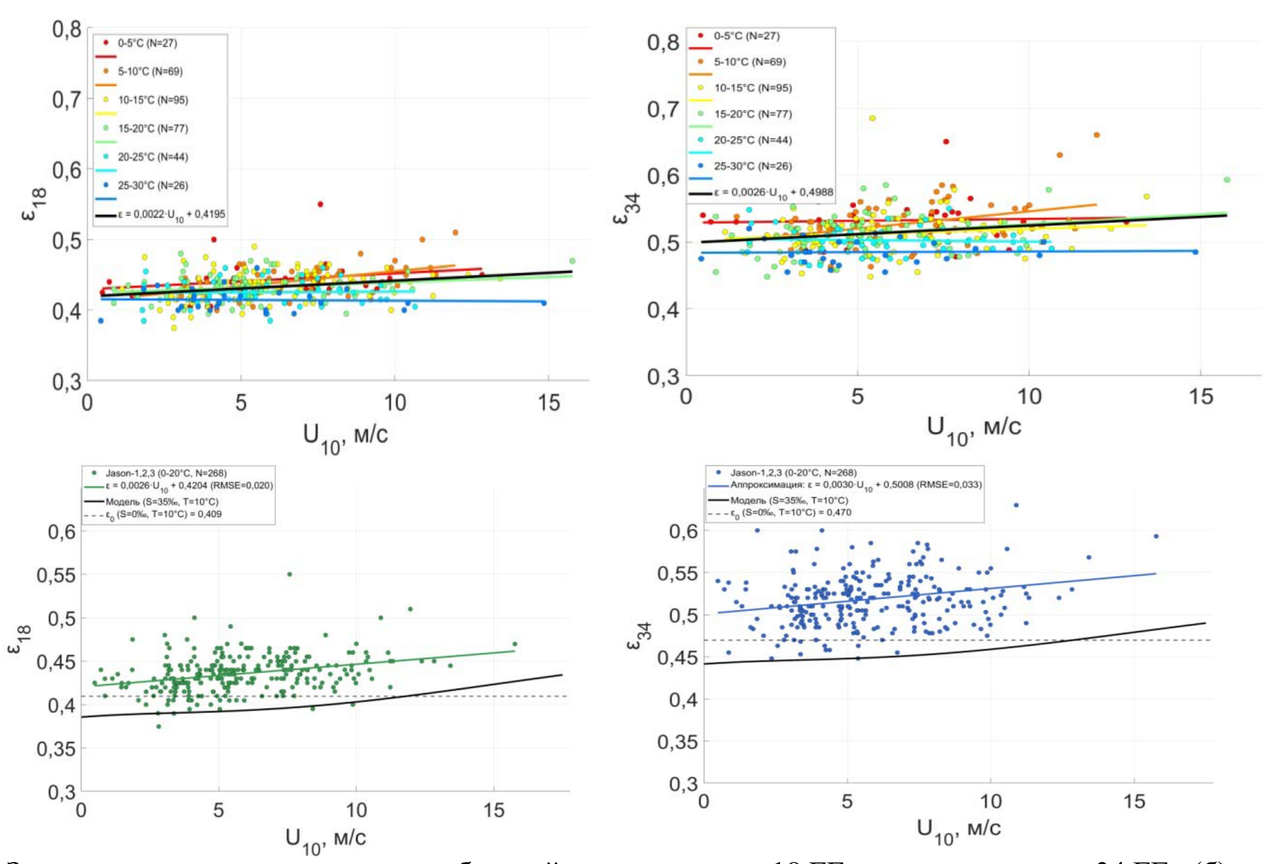
Для корректного сравнения модельных и измеренных значений яркостной температуры применяется процедура пространственной свёртки моделируемых полей с аппаратной функцией антенны, аппроксимируемой двумерной гауссовой функцией:

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

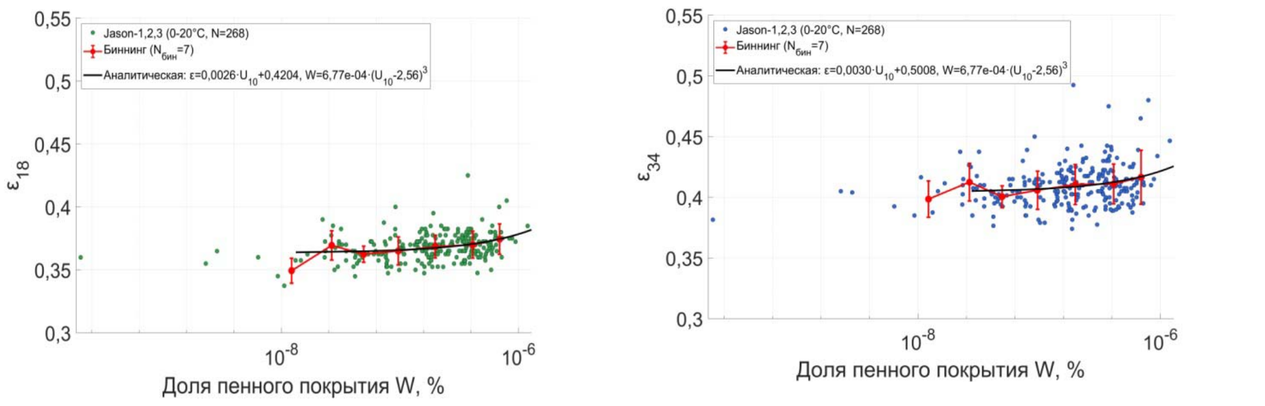
здесь σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения, определяемые размерами пятна.



Зависимость яркостной температуры вдоль пролета спутника Jason-2 над акваторией Горьковского водохранилища (трек 142) от 24 сентября 2008 23.16 UTC для частоты 18 ГГц (красные кривые) и 34 ГГц (зеленые кривые), полученные в результате измерений с AMR (сплошные кривые с точками) и рассчитанные по модели (сплошные кривые)



Зависимости излучательных способностей ε_{18} для частоты 18 ГГц и ε_{34} для частоты 34 ГГц (б) от скорости ветра U_{10}: цветами отмечены разные интервалы температуры поверхности, число точек N=324; зависимости $\varepsilon_{18}(U_{10})$ для частот 18 ГГц (в) и $\varepsilon_{34}(U_{10})$ для частоты 34 ГГц (г) после фильтрации периодов цветения ($T_S \le 20$°C). Точки – результаты оптимизации для каждого прохода (число точек N=268 для каждой частоты). Сплошные линии – линейные параметризации. Для 18 ГГц: r=0,314, RMSE=0,020; для 34 ГГц: r=0,301, RMSE=0,033 (p<0,001 для обеих частот).



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 = 0,021 и 0,033 соответственно

Выводы

Получены 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 внутренних пресноводных водоёмах. Важно подчеркнуть, что прямое восстановление доли пенного покрытия W по параметризации ε(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.