Алгоритм определения сроков замерзания и вскрытия внутренних водоёмов по данным микроволновых радиометров спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1, -2, -3: применение для водохранилищ Волги и Северного Каспия

Поплавский Е.И., Ермакова О.С., Русаков Н.С., Гладских Д.С., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.
poplavsky@ipfran.ru
Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Сроки замерзания и вскрытия льда на внутренних водоёмах - один из наиболее чувствительных индикаторов климатических изменений [1]. Наземные наблюдения редки и не отражают пространственную неоднородность ледового покрова. Оптические спутниковые методы зависят от облачности и освещённости. Пассивная микроволновая радиометрия работает при любой погоде, однако её пространственное разрешение грубое, и для средних водоёмов шириной 15-20 км сигнал сильно искажается влиянием прилегающей суши. Существующие пороговые методы в пространстве «коэффициент обратного рассеяния - яркостная температура» надёжно работают только для крупных акваторий [2].

Цель работы - разработать и валидировать алгоритм определения дат замерзания и вскрытия внутренних водоёмов, устойчивый к влиянию суши, и построить на его основе многолетний ряд фенологии льда для волжских водохранилищ и Северного Каспия.

Данные и районы исследований

Спутниковые миссии: TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3.
Период: 1992-2022 гг., повторяемость трека около 10 суток.
Радиометры: каналы 18/18.7 ГГц и 34/37 ГГц.
Объекты: Рыбинское, Горьковское, Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское водохранилища, северная часть Каспийского моря.
Ширина водоёмов: от 15 км (Горьковское, Волгоградское) до 100-200 км (северный Каспий).
Наземная валидация: Российский регистр гидротехнических сооружений.

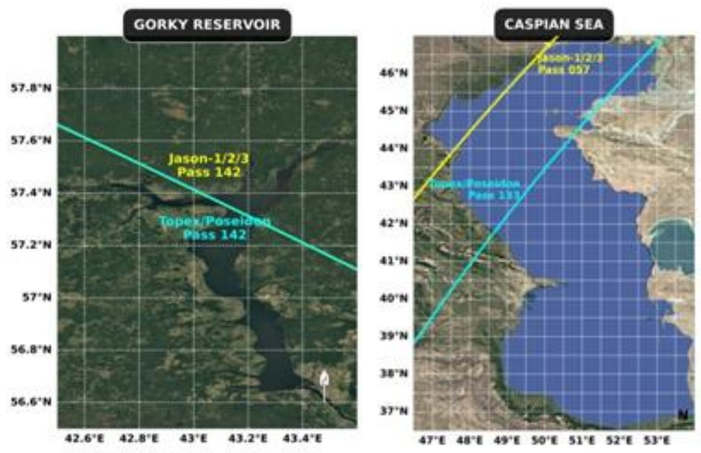


Рис. 1. Спутниковые траектории миссий TOPEX/Poseidon и Jason-1, -2, -3, пересекающие исследуемые водоемы.

Метод

Контраст диэлектрических свойств воды и льда определяет разницу излучательной способности: около 0.4 для открытой воды и около 0.9 для льда и снега. Поэтому над открытой водой вдоль трека формируется выраженное понижение яркостной температуры, а при ледоставе профиль становится почти плоским. Для количественной проверки этого эффекта выполнено моделирование переноса излучения по модели Wentz [3] с учётом поглощения в кислороде, водяном паре и облачной жидкой воде. Рассчитанное поле яркостной температуры свертывалось с диаграммой направленности антенны для двух водоемов: широкого Рыбинского (около 60 км) и узкого Горьковского (около 15 км) водохранилищ. Результаты сопоставлены с натурными спутниковыми наблюдениями. Даже для узкого Горьковского водохранилища понижение яркостной температуры (Tb) над открытой водой сохраняется после свертки, а при ледоставе профиль выравнивается. Наибольший контраст (35-40 К) наблюдается для Рыбинского водохранилища и северного Каспия, для узких водохранилищ - 15-25 К.

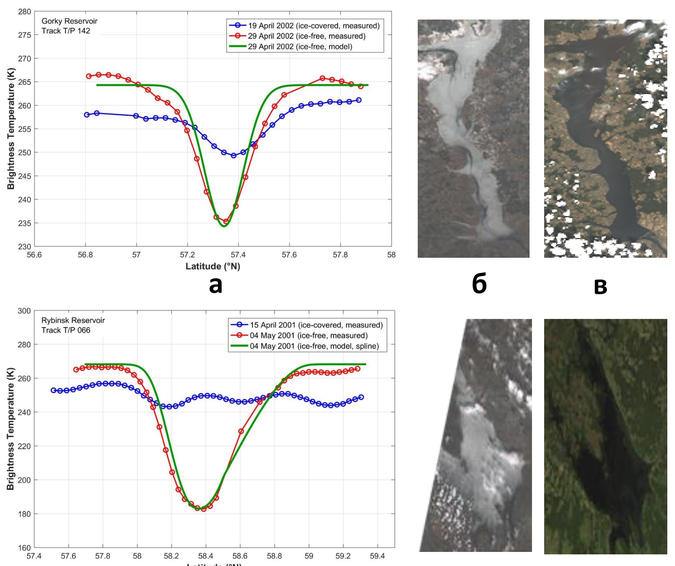


Рис. 2. Профили Tb вдоль трека для Горьковского (а) и Рыбинского (г) водохранилищ: синие кривые - ледостав, красные - открытая вода, зелёные - модель после свёртки с диаграммой направленности антенны; (б, в, д, е) - снимки Landsat/MODIS, подтверждающие состояние поверхности.

1. Для каждого прохождения спутника вдоль трека выделяется окно, охватывающее акваторию и по два береговых пикселя с каждой стороны
2. Вычисляется размах яркостной температуры: ΔTb = max(Tb) − min(Tb)
3. В безледный период контраст между водой и сушей большой -> ΔTb высокий
4. При ледоставе яркостные температуры воды, льда и суши сближаются -> ΔTb резко падает
5. Порог лед/вода определяется автоматически методом кластеризации k-средних
6. Дата замерзания - устойчивый переход ниже порога (три последовательных наблюдения), дата вскрытия - устойчивый переход выше порога

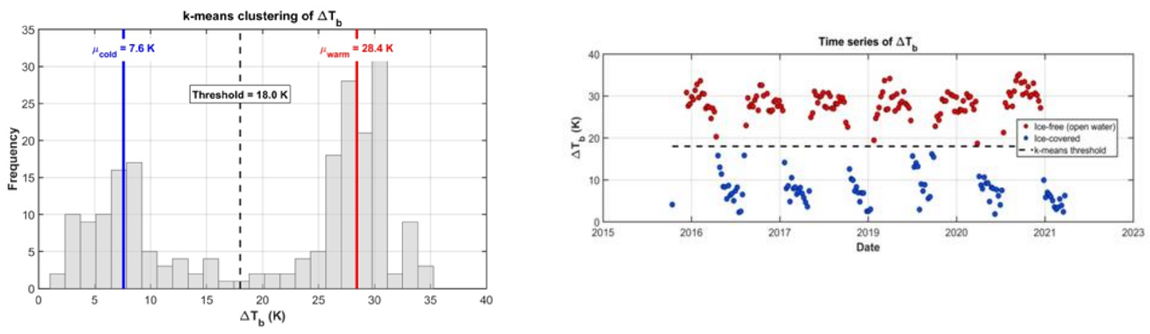


Рис. 3. Кластеризация k-средних: гистограмма ΔTb и временной ряд с порогом (Горьковское водохранилище)

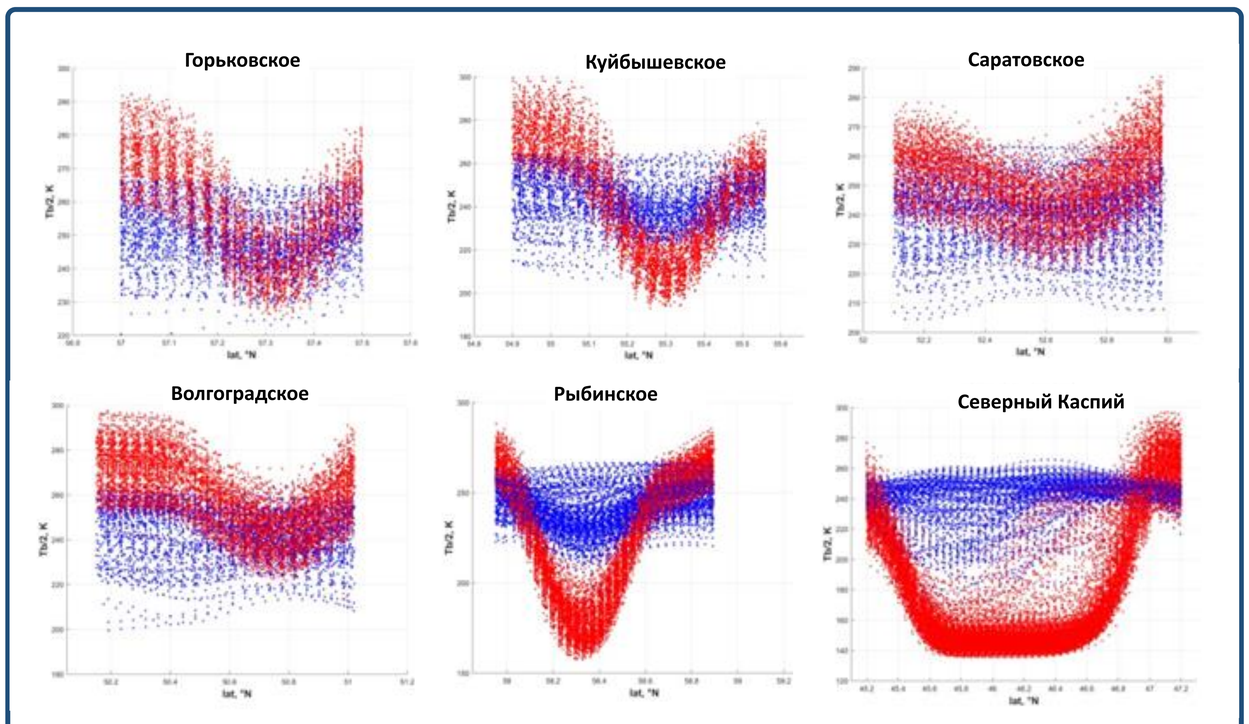


Рис. 4. Профили Tb для шести объектов: красные - открытая вода, синие - лёд

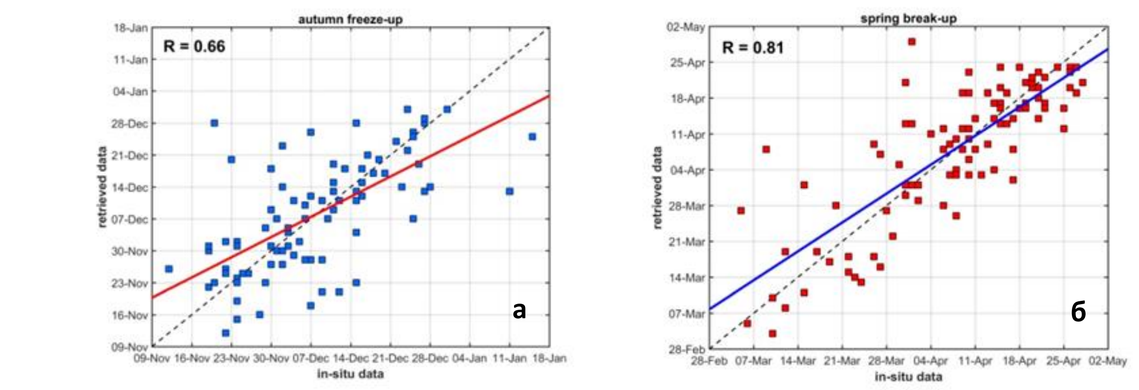


Рис. 5. Сравнение спутниковых и наземных данных: даты замерзания (а) и вскрытия (б) льда

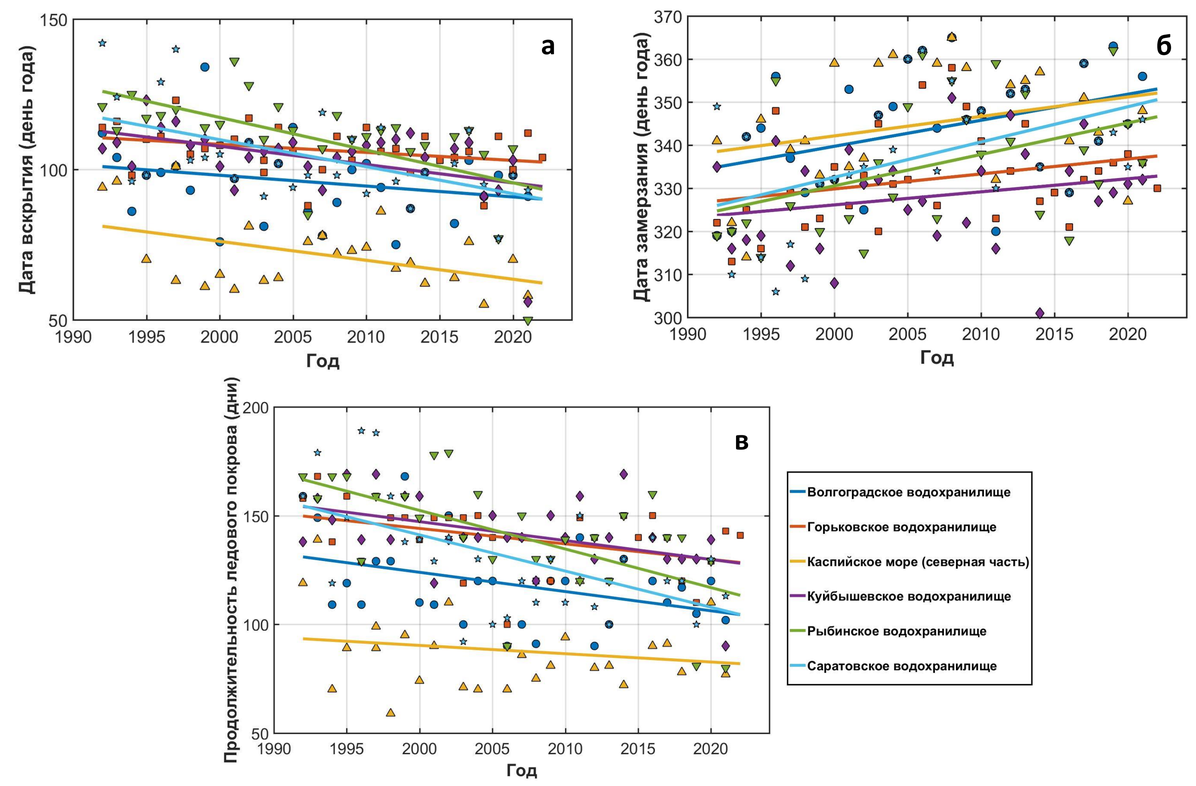


Рис. 6. Климатические тренды фенологии льда для шести исследованных водоёмов за 1992–2022 гг.: (а) даты вскрытия, (б) даты замерзания, (в) продолжительность ледостава. Точки - значения по годам для каждого водоёма, линии - линейные тренды.

- Даты замерзания смещаются позже на 3.0-8.2 суток за десятилетие
- Даты вскрытия смещаются раньше на 2.7-10.9 суток за десятилетие
- Продолжительность ледостава сокращается на 3.8-17.7 суток за десятилетие, или на 11-53 суток за 30 лет
- Наиболее быстрые изменения - у Рыбинского (-17.7 суток/десятилетие) и Саратовского (-16.7 суток/десятилетие) водохранилищ
- Все тренды статистически значимы ($p < 0.05$)

Результаты

- Предложен алгоритм фенологии льда внутренних водоёмов, не требующий абсолютной калибровки и настройки под конкретный объект
- Алгоритм устойчив к влиянию суши и применим к водоёмам шириной от 15 км
- Метод согласованно работает для нескольких спутниковых миссий
- Получены статистически значимые тренды сокращения продолжительности ледостава на волжских водохранилищах и северном Каспии
- Результаты могут использоваться в гидрологических и климатических моделях, а также в задачах управления водными ресурсами

Литература:
1. *J. J. Magnuson et al., "Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere," Science, vol. 289, no. 5485, pp. 1743–1746, Sep. 2000.*
2. *A. V. Kouraev, F. Papa, P. I. Buharizin, A. Cazenave, J.-F. Cretaux, J. Dozortseva, and F. Remy, "Ice cover variability in the Caspian and Aral seas from active and passive microwave satellite data," Polar Research, vol. 22, no. 1, pp. 43–50, Jan. 2003.*
3. *F. J. Wentz, "A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager," Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 102, no. C4, pp. 8703–8718, Apr. 1997.*