

# Параметризация зависимости сечения обратного рассеяния в зависимости от сплоченности морского льда и скорости ветра

Панфилова М.А., Караев В.Ю.  
ИПФ РАН, Нижний Новгород

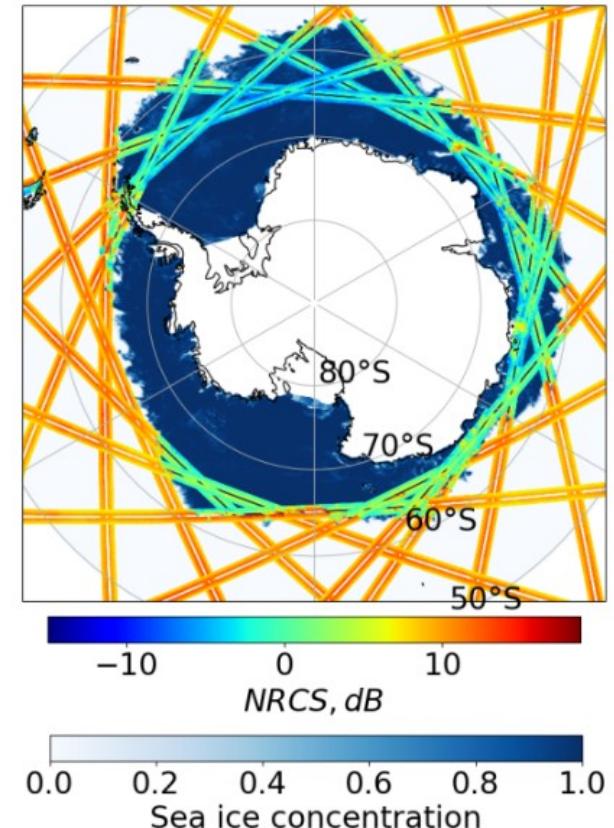
# Введение

---

- Радиолокационные измерения в полярных областях важны для понимания динамики льдов и изменчивости климата. Информацию о сплоченности льда можно получить с помощью активных и пассивных микроволновых данных.
- Осложняет задачу то, что на радиолокационный сигнал влияет множество других факторов, в том числе и ветровые условия.
- Актуальность: учет скорости приповерхностного ветра по данными бистатического зондирования был проведен в работе (Ban, W. et. al. 2025), что позволило улучшить алгоритм определения сплоченности ледяного покрова.
- В нашей работе рассматривается прямая задача. Используются данные зондирования при малых углах падения. Цель — получить параметризацию УЭПР в зависимости от сплоченности и скорости ветра.

# Данные

- Используются измерения радиолокатора Ки-диапазона Dual-Frequency Precipitation Radar (DPR), установленного на спутнике Global Precipitation Measurement (GPM).
- Радиолокатор сканирует поверхность океана при углах падения от 0 до 18 градусов с шагом 0.7 градуса. В данной работе использовались только данные для углов 4-11 градусов.
- Информация о сплошности морского льда была получена на веб-сайте Бременского университета. Эти данные переведены на сетку измерений DPR.  
Sea ice concentration — далее для краткости SIC.  
0 — открытая вода, 1- сплошной лед.
- Модуль скорости ветра по данным реанализа Japanese Global Analysis Model data (GANAL).
- Был сформирован объединенный массив данных за июль 2019 года в Антарктическом регионе.



УЭПР в треках DPR поверх карты сплошности, 30 июля 2019.

# Метод

Был проведен биннинг измерений УЭПР по ячейкам, соответствующим различным величинам скорости ветра и сплоченности. Шаг — 0.2 по сплоченности и 2 м/с по скорости ветра. Для каждого бина определено значение УЭПР соответствующее максимуму плотности вероятности.

Обозначим это значение  $\hat{\sigma}^0$ .

Зависимости будут получены для него .

Видно, что зависимость  $\hat{\sigma}^0$  от скорости ветра имеет пороговый характер (на рисунке — зависимости для различных скоростей ветра).

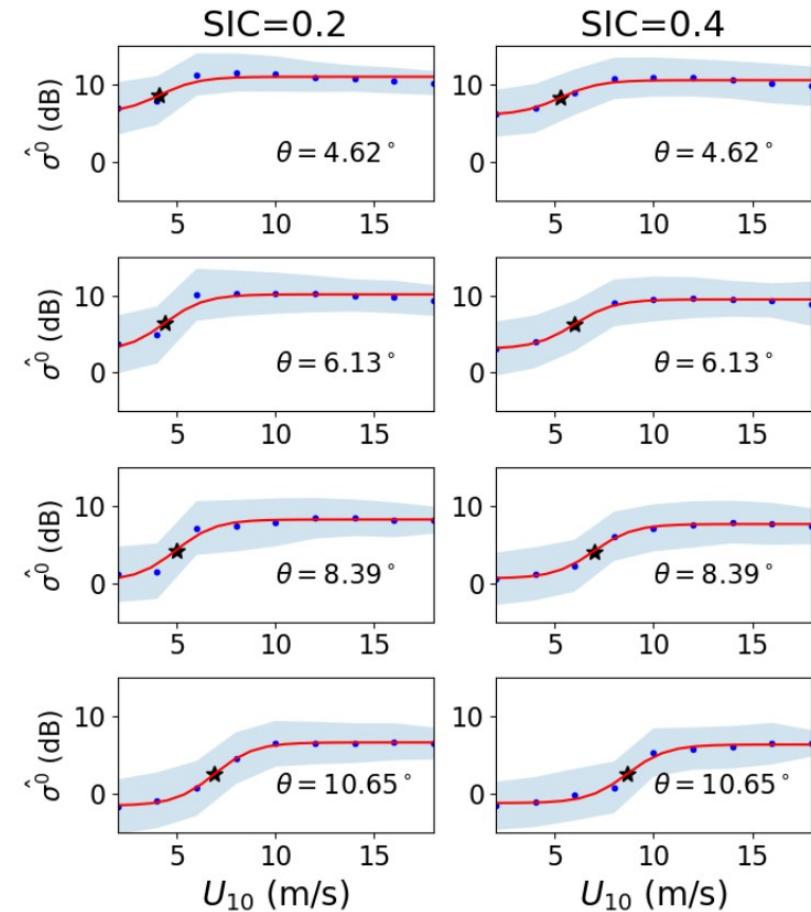
Синие точки — данные, красная кривая — параметризация (сигмоида)

$$\hat{\sigma}^0 = \sigma_b^0 + \frac{\Delta\sigma^0}{1 + \exp(U_{10}^{th} - U_{10})} \quad (1)$$

черная звездочка — пороговая скорость ветра  $U_{10}^{th}$ .

Пороговый характер генерации волнения был обнаружен ранее в лабораторном эксперименте (Sergeev et. al., 2023), где измерялась высота волнения.

В нашей работе получены аналогичные выводы: пороговое значение скорости ветра с увеличением сплоченности возрастает.



# Параметризация

- Теперь рассмотрим зависимости параметров из формулы (1) от сплоченности. Графики построены для 4x углов падения. Для остальных — промежуточные результаты.

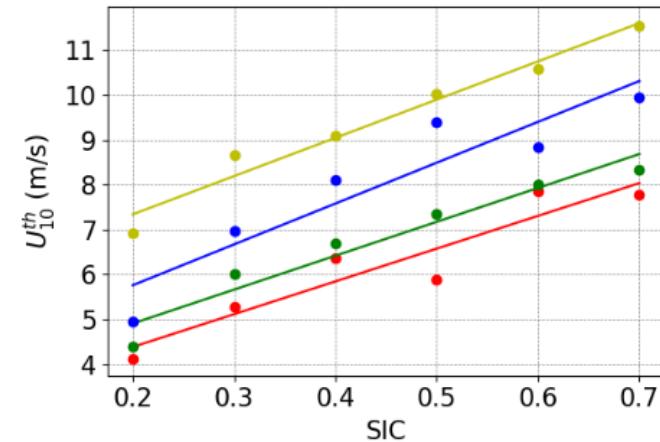
(1)  $U_{10}^{th}$  растет с увеличением сплоченности: чем больше масса льда, тем выше скорость ветра для генерации волнения.

(2)  $\Delta\sigma^0$  показывает различие между УЭПР без волнения и с наличием волнения при максимальной скорости ветра. Спадает с ростом сплоченности, выше для больших углов падения.

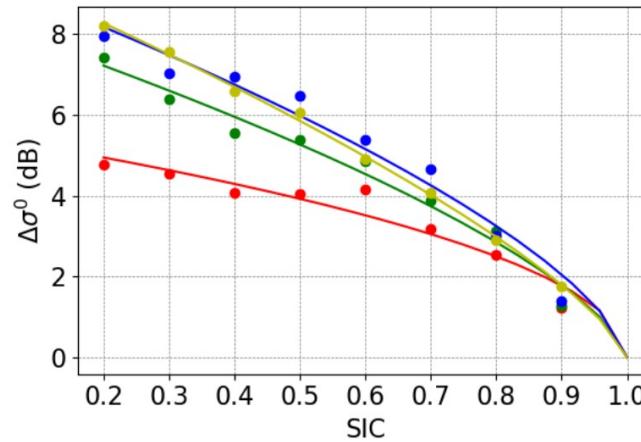
(3)  $\sigma_b^0$  соответствует УЭПР при минимальной скорости ветра. Зависимость от сплоченности проявляется, начиная с 0.7.

$$\bullet \quad 4.62^\circ \quad \bullet \quad 6.13^\circ \quad \bullet \quad 8.39^\circ \quad \bullet \quad 10.65^\circ$$

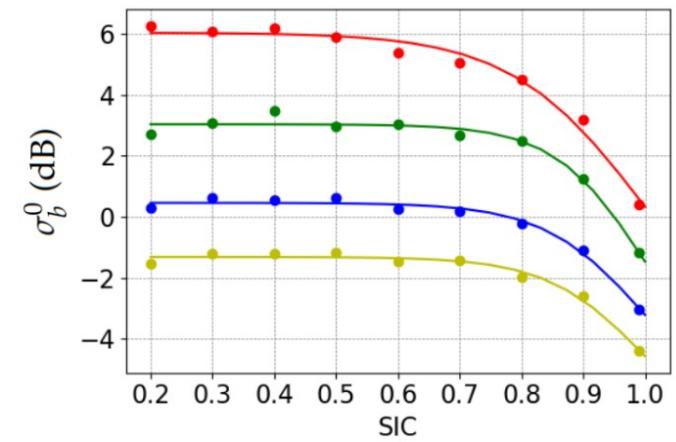
$$U_{10}^{th} = a \cdot SIC + b$$



$$\Delta\sigma^0 = f \cdot (1 - SIC)^g$$



$$\sigma_b^0 = c \cdot \tanh(d(1 - SIC)) + e$$



# Результаты

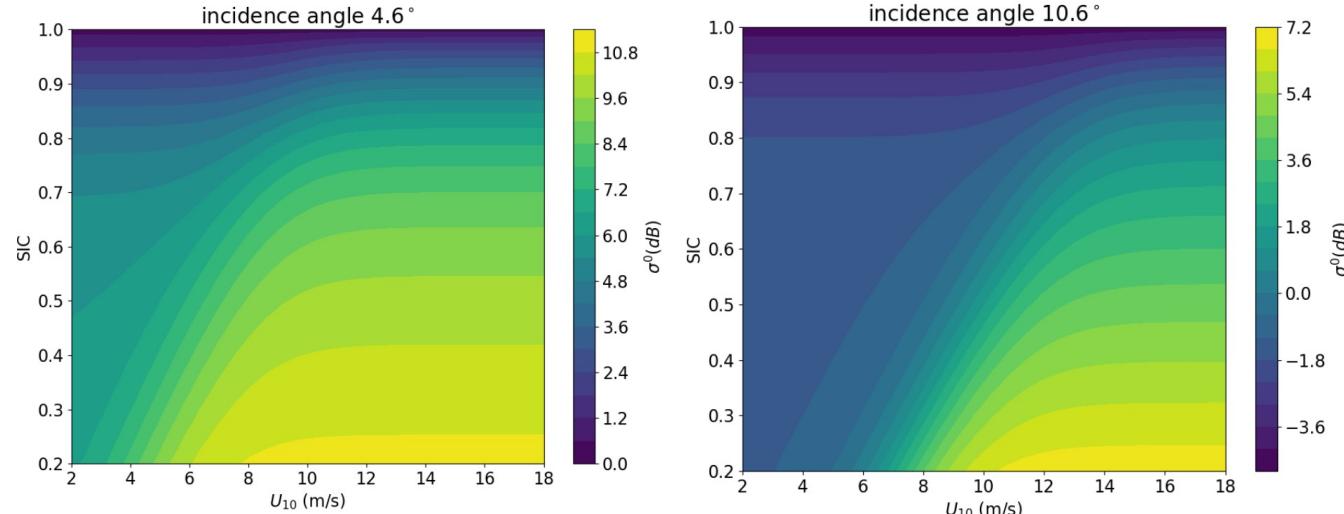
Зависимость УЭПР от двух переменных выглядит следующим образом:

$$\hat{\sigma}^0 = c \cdot \tanh(d(1 - SIC)) + \frac{f \cdot (1 - SIC)^g}{1 + \exp(-U_{10} + a \cdot SIC + b)} + e,$$

при этом коэффициенты  $a, b, c, d, e, f, g$  определяются для каждого угла падения отдельно.

Двумерные функции для углов падения 4.6 и 10.6 градусов приведены ниже.

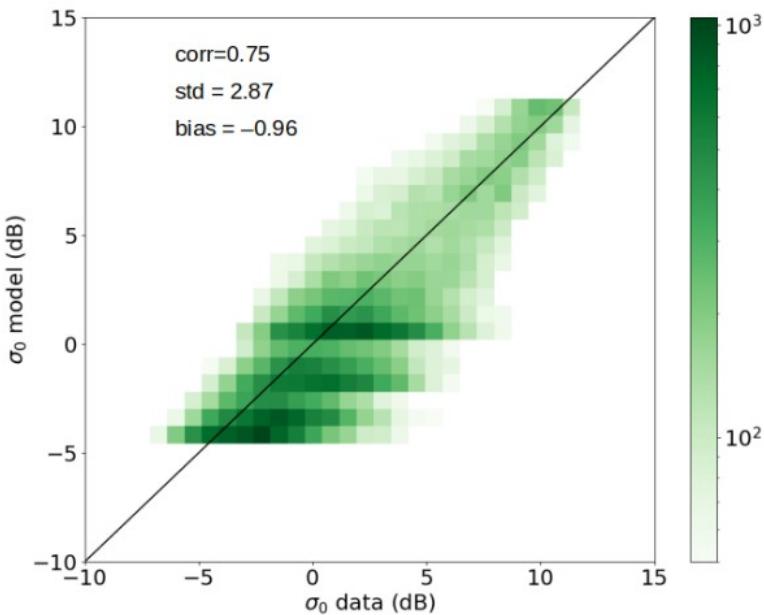
Можно выделить две зоны параметров на рисунке 8. При низкой скорости ветра сигнал радара нечувствителен к изменению SIC вплоть до значений SIC 0,7–0,8. При увеличении скорости ветра на поверхности возникают волны, что позволяет изменениям SIC проявиться в сигнале радара. Между этими двумя режимами существует переходная зона значений скорости ветра вокруг порогового значения  $U_{10}$ , положение которой зависит от SIC и угла падения. При больших углах падения этот переход происходит при более высоких скоростях ветра.



# Результаты

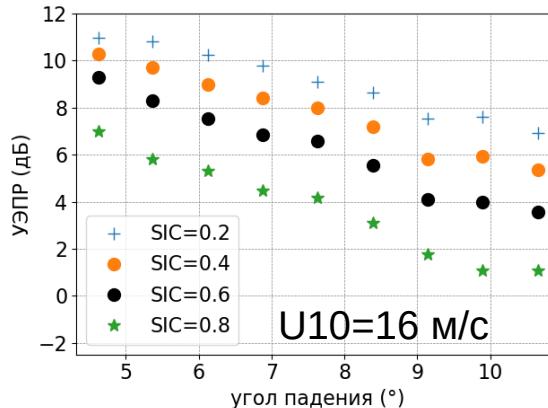
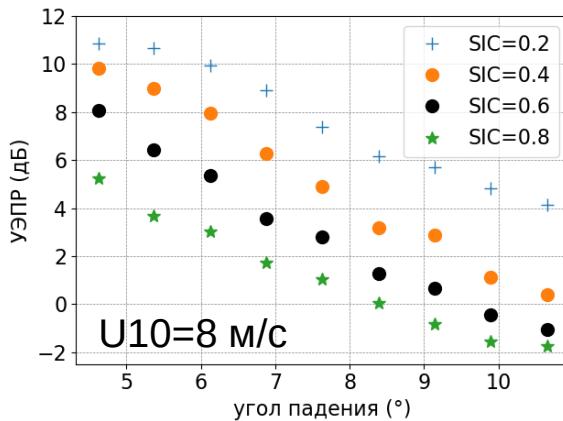
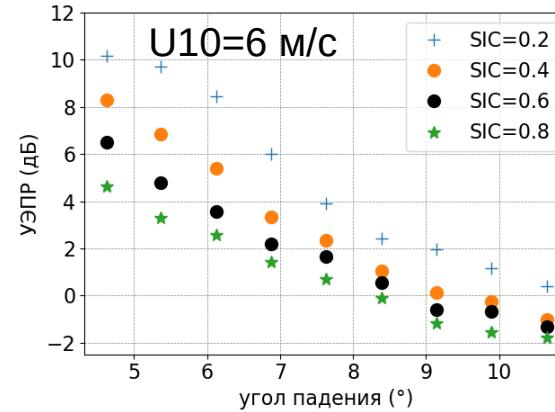
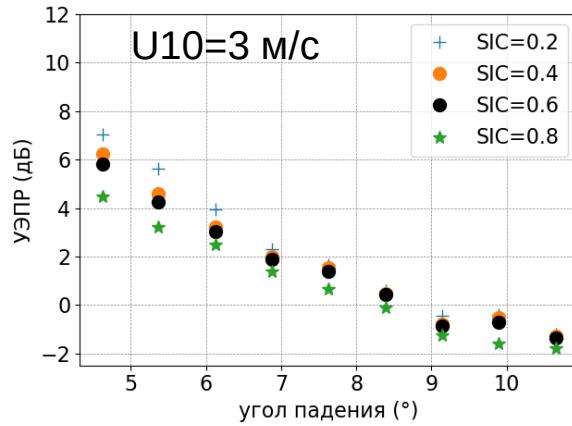
- Для всех данных, без применения биннинга, проведено сравнение измеренного и полученного по модели УЭПР.
- Расчет проведен для всех углов падения. Получено достаточно хорошее соответствие модели измерениям.

## Возможные причины разброса:



- В пределах элемента разрешения радиолокатора может присутствовать различная сплоченность морского льда
- Влияние атмосферы может привести к ошибкам в определении сплоченности по данным радиометра
- Скорость ветра определялась по данным реанализа, эти значения могут отличаться от реальных; однако на данный момент реанализ является единственным источником информации о скорости ветра над ледяным покровом: методы дистанционного зондирования, настроенные на водную поверхность, там не работают
- Не учитываются многочисленные факторы, касающиеся свойств льда: температура воды и льда, наличие и состояние снежного покрова, типы морского льда, размеры морских льдин, рельеф ледяного покрова, толщина и соленость льда и т. д.

# Зависимость УЭПР от угла падения



# Заключение

---

- Получена параметризация УЭПР для сигнала радиолокатора Ки-диапазона при малых углах падения над покрытой льдом морской поверхностью. Простая аналитическая функция была выведена с использованием нелинейной аппроксимации для углов падения 4-11°. Такой подход позволяет объяснить физический смысл параметров, входящих в модель, что затруднительно для подхода, основанного на нейронных сетях.
- Выявлено пороговое поведение УЭПР в зависимости от скорости ветра. Показано, что существуют два режима ветра: когда УЭПР практически нечувствительна к сплоченности при низких скоростях ветра, и другой режим при высоких скоростях ветра, когда вариации сплоченности отчетливо проявляются в радиолокационном сигнале. Поэтому, в целом, восстановление сплоченности, имея только данные по УЭПР, даст низкую точность. Однако при высокой скорости ветра (более 10-14 м/с, в зависимости от угла падения), когда развивается волнение, можно рассмотреть задачу восстановления сплоченности.
- Результат может быть применен для улучшения оценок сплоченности и восстановления скорости ветра в полярных районах по радиолокационным данным. Информация о пороговом поведении генерации волн в зависимости от скорости ветра может принести новые знания в области численных моделей для моделирования морских волн при наличии льда.

---

- **Литература**

1. Sergeev, D.A.; Kandaurov, A.A.; Troitskaya, Y.I. Investigation of the Pancake Ice Influence on the Wind-Wave Interaction Within Laboratory Modeling. In Conference the Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes—2022; Karev, V.I., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2023; pp. 257–261.
2. Ban, W.; Zhang, L.; Zhang, X.; Nie, H.; Chen, X.; Chen, X. Wind-Concerned Sea Ice Detection and Concentration Retrieval From GNSS-R Data Using a Modified Convolutional Neural Network. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2025, 18, 9755–9763.

**Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10064.**

[marygo@mail.ru](mailto:marygo@mail.ru)