



*Институт
прикладной физики
РАН*

Численное моделирование радиолокационного изображения айсберга при малых углах зондирования.

Я. А. Кузнецов¹, В. Ю. Караев¹,

Ю. А. Титченко¹

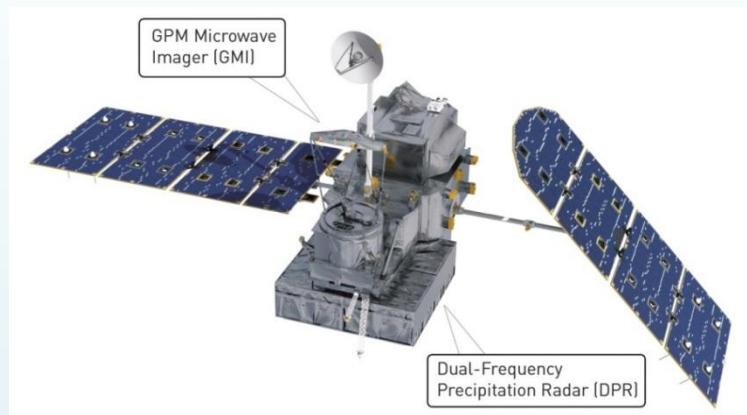
¹ ИПФ РАН

Введение

Цель работы – численное моделирование радиолокационных изображений айсберга при использовании метода вблизинадирного зондирования.

Обнаружение льда этим способом стало возможным после появления нового поколения спутников, один из которых DPR – Dual-frequency Precipitation Radar (Миссия GPM – Global Precipitation Measurement). Двухчастотный радиолокатор работает в Ка- и Ки-диапазонах.

- В исследовании используется численное моделирование для изучения свойств радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью с сплочённостью льда определенного распределения при малых углах падения (-18, +18).
- Рассматривается метод восстановления сплочённости морского льда, заданной в рамках численного моделирования. Приводятся результаты восстановления сплочённости морского льда при моделировании отражённого излучения с разными скоростями и направлениями ветра.



Типы айсбергов

1. Столообразные (*Рис. 1а*) – наиболее крупные айсберги с плоской поверхностью и вертикальными боковыми стенками. Характерны для Южного полушария.
2. Горообразные (*Рис. 1б*) – айсберги с заостренной вершиной, получаются в результате разрушения и эрозии столообразных.



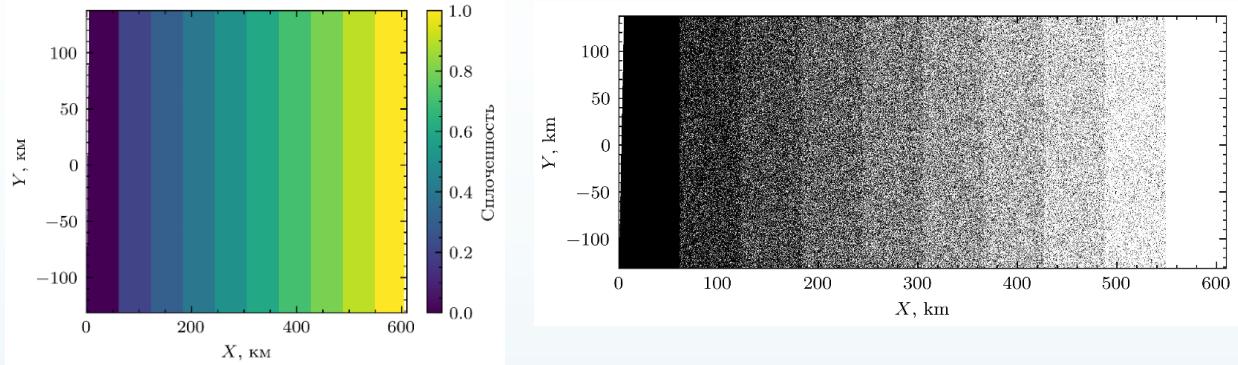
Рис. 1а



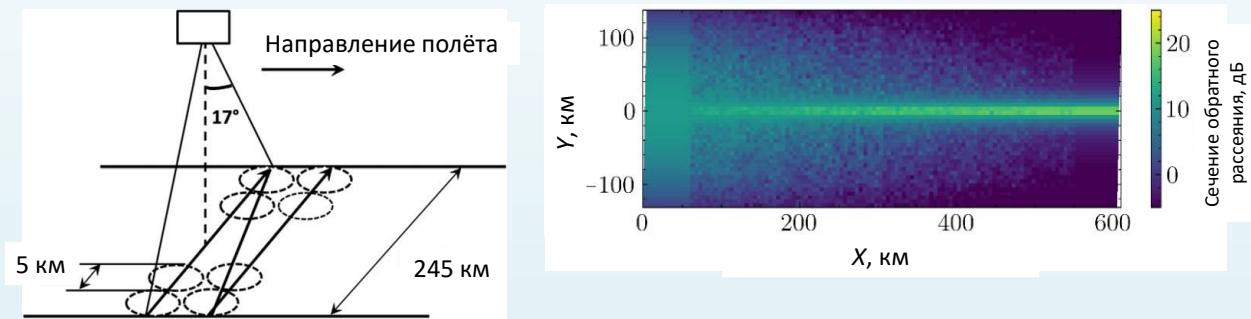
Рис. 1б

Метод

1. Моделирование отражающей поверхности



2. Схема измерений



3. Нахождение параметров отражённого сигнала для элементарной рассеивающей площадки на поверхности

$$\sigma_{ice}(\theta) = 10^{RCS_{ice}(\theta)/10}$$

$$\sigma_{sea}(\theta) = 10^{RCS_{sea}(\theta)/10}$$

Моделирование ледяного покрова

Воспользуемся аппроксимацией экспериментальных данных для Ки-диапазона, выполненной в работе[1] для моделирования отражения от морского льда. Аппроксимация зависимостей сечения обратного рассеяния от угла падения для морского льда была создана по данным измерений радиолокатора DPR при наблюдении Охотского моря в феврале 2020 при отрицательной температуре воздуха(“сухой лед”).

$$RCS_{ice}(\theta) = a_{ice} + b_{ice}|\theta| + c_{ice}\theta^2 + d_{ice} \exp(-e_{ice}|\theta|), \text{ где:}$$

$$a_{ice} = -3,15 \pm 0,1;$$

$$b_{ice} = -(9 \pm 3) * 10^{-3};$$

$$c_{ice} = -(169 \pm 5) * 10^{-4};$$

$$d_{ice} = 26,0 \pm 0,3;$$

$$e_{ice} = (53 \pm 2) * 10^{-2}.$$

В дальнейшем используем:

$$\sigma_{ice}(\theta) = 10^{RCS_{ice}(\theta)/10}$$

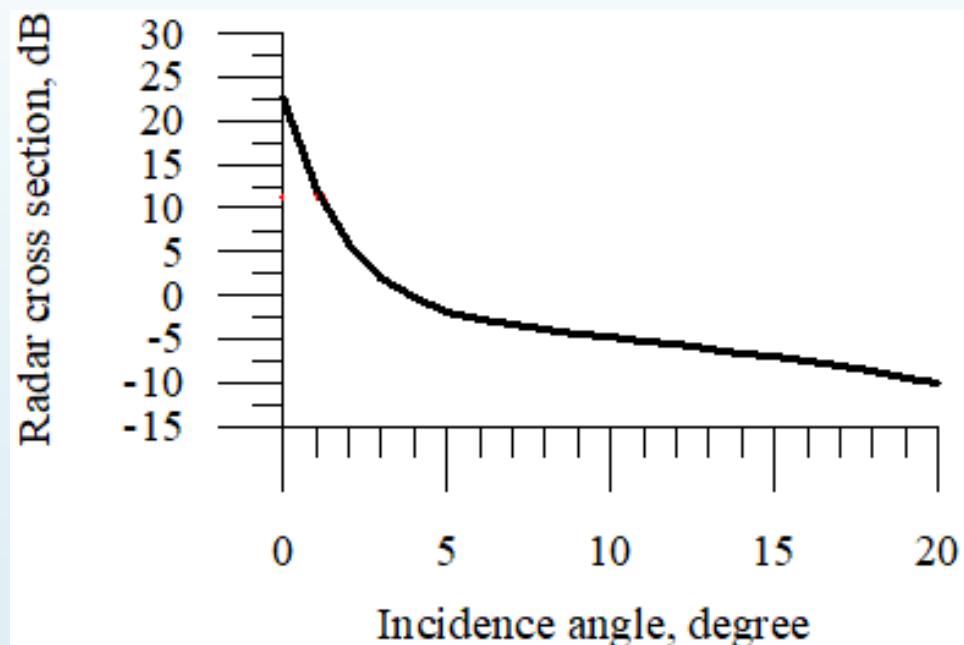


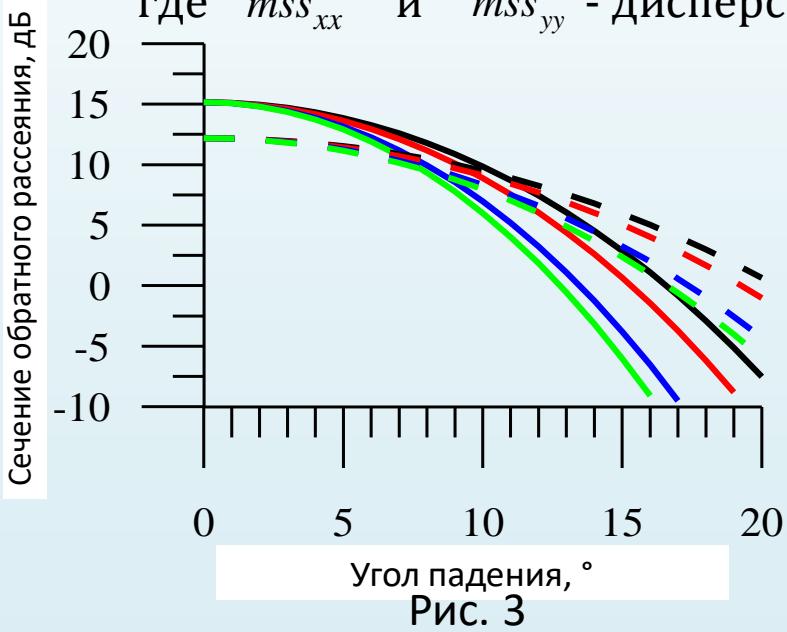
Рис. 2

Моделирование водной поверхности

Волнение на морской поверхности может сформироваться под действием разных скоростей ветра и в общем виде зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения будет описываться следующей формулой [2]:

$$\sigma_0(\theta) = \frac{\left| R_{eff}(0) \right|^2}{2 \cos^4 \theta \sqrt{mss_{xx} mss_{yy} - mss_{xy}^2}} \exp \left[-\frac{\operatorname{tg}^2 \theta}{2(mss_{xx} mss_{yy} - mss_{xy}^2)} \cdot mss_{yy} \right], \quad (2)$$

где mss_{xx} и mss_{yy} - дисперсия уклонов крупномасштабных шероховатостей,



Зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для морского волнения для разных скоростей (5 м/с – сплошные линии и 10 м/с – штриховые линии) и направлений ветра (0° – чёрные, 30° – красные, 60° – синие, и 90° – зелёные линии)

Рис. 3

Метод решения обратной задачи восстановления сплочённости

Для решения обратной задачи нам требуется знать зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для морского льда и для морского волнения с учетом конкретных условий формирования. Для решения обратной задачи для морского волнения воспользуемся аппроксимацией экспериментальных данных, полученных в Охотском море:

$$RCS_{sea}(\theta) = a_{sea} + b_{sea} |\theta| + c_{sea} \theta^2 + d_{sea} \theta^3 + e_{sea} \theta^4 + f_{sea} \theta^5, \text{ где:}$$

$$a_{sea} = 11,29 \pm 0,02;$$

$$b_{sea} = (6 \pm 4) \cdot 10^{-3};$$

$$c_{sea} = -(407 \pm 4) \cdot 10^{-4};$$

$$d_{sea} = -(10 \pm 5) \cdot 10^{-6};$$

$$e_{sea} = (14 \pm 1) \cdot 10^{-6};$$

$$f_{sea} = (8 \pm 13) \cdot 10^{-8}$$

Формула для вычисления сплочённости морского льда в каждом элементе разрешения будет выглядеть следующим образом:

$$S_{ice}(\theta) = \frac{\sigma_m(\theta) - \sigma_{sea}(\theta)}{\sigma_{ice}(\theta) - \sigma_{sea}(\theta)}$$

Моделирование РЛИ

В качестве примера выступает РЛИ айсберга A23A за 8 января 2024 года, полученное с помощью программы, обрабатывающей данные DPR.

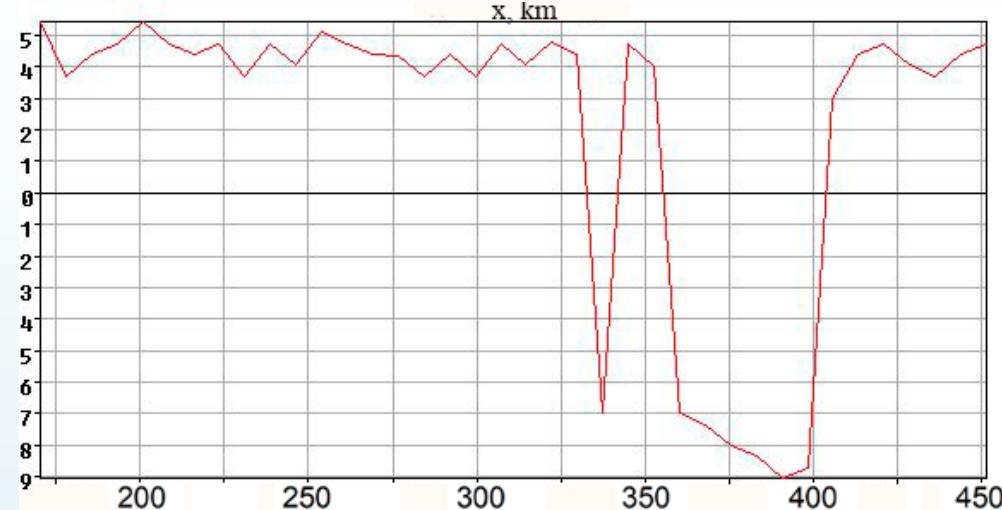
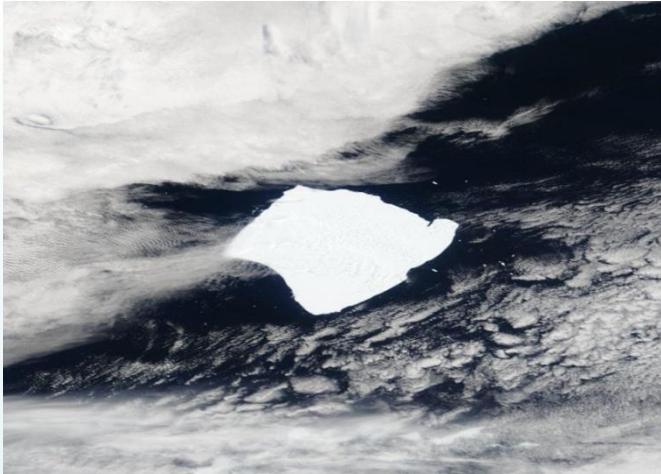


Рис. 4а

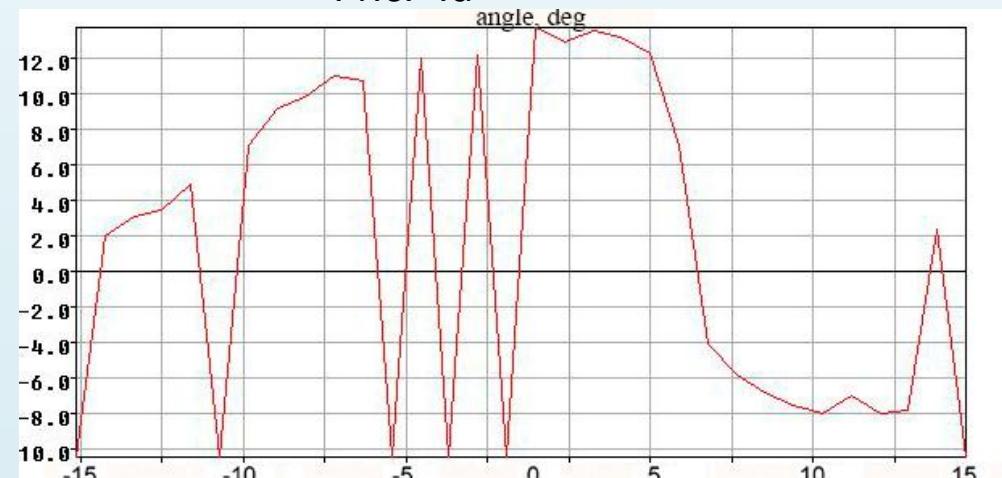
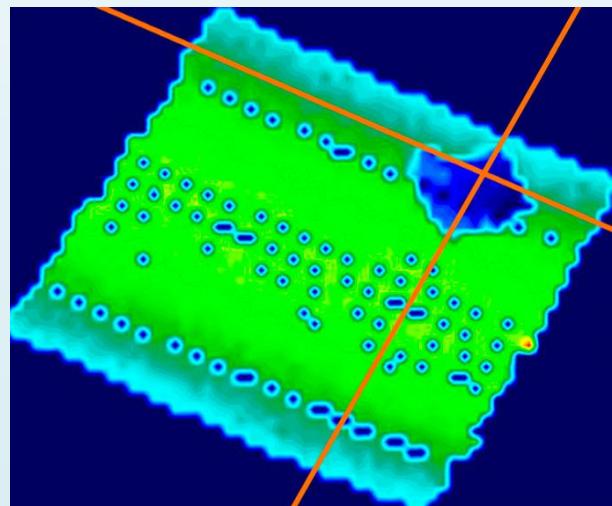


Рис. 4б

Моделирование РЛИ

РЛИ, полученное численным моделированием, с заранее заданным распределением льда(лёд повторяет форму айсберга A23A).

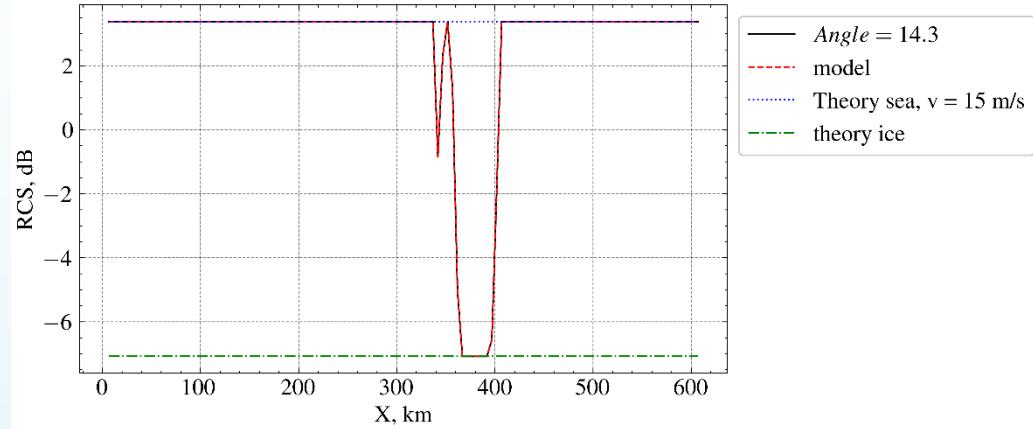


Рис. 5а

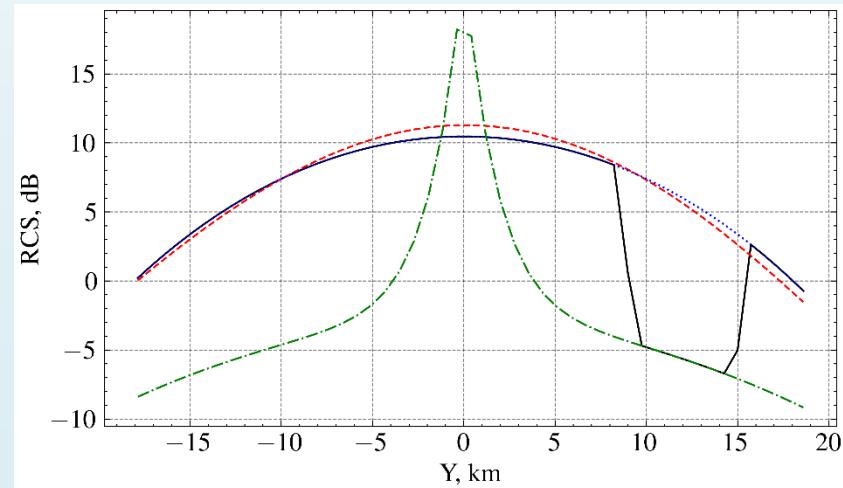
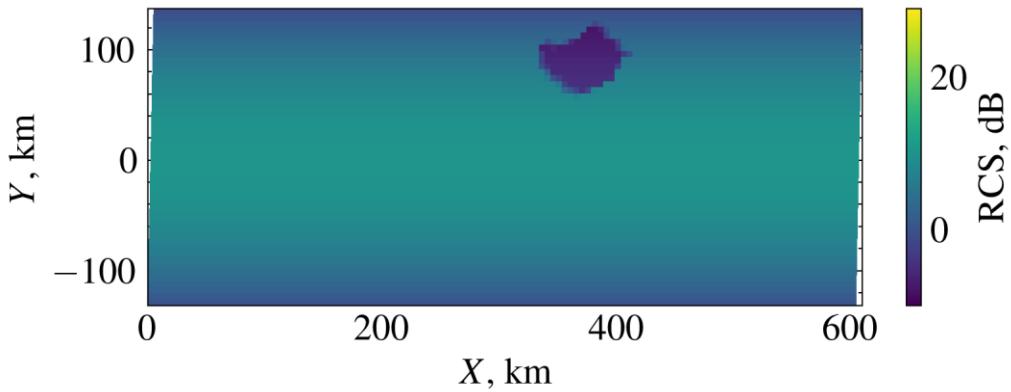
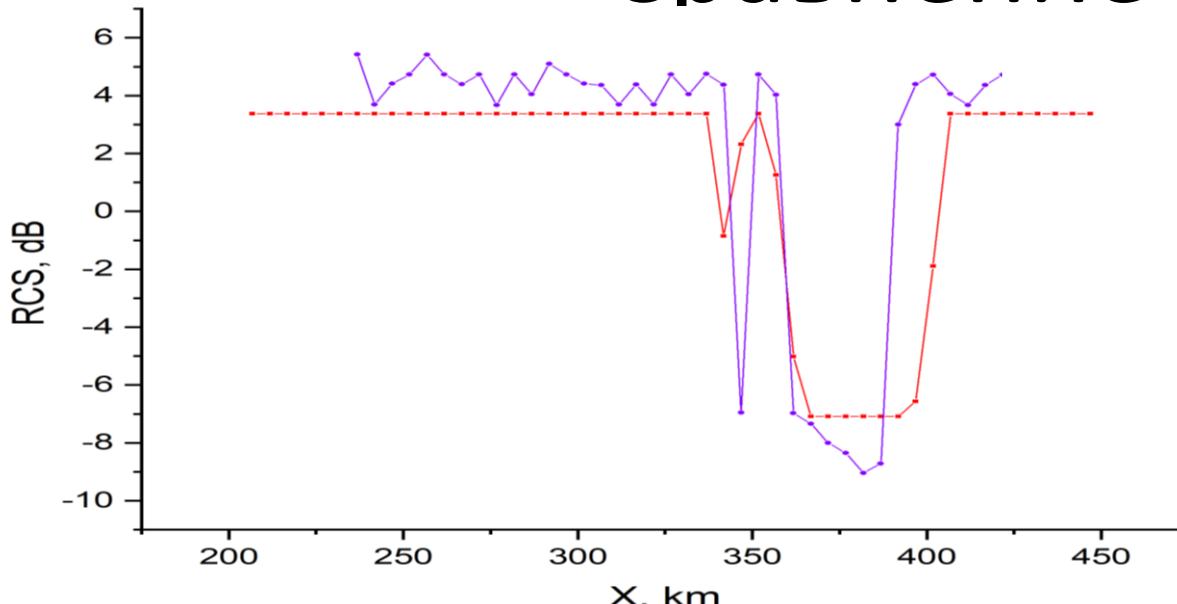


Рис. 5б

Сравнение



Фиолетовый – RCS по
данным DPR
Красный –
смоделированное RCS

Рис. 6а

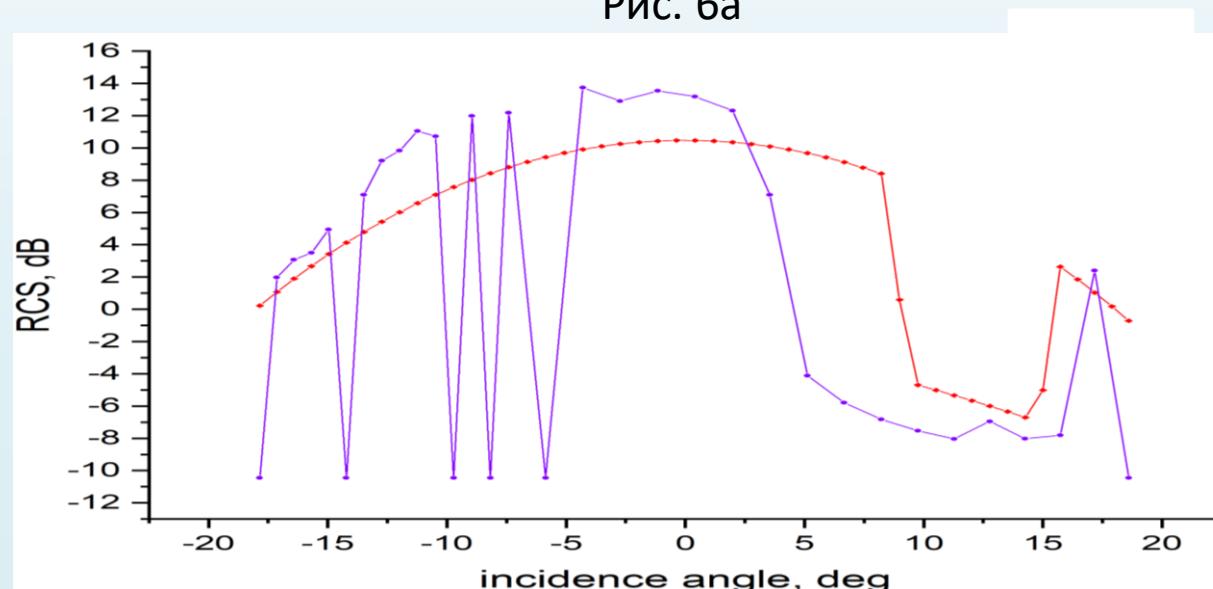


Рис. 6б

Относительная ошибка

Y , km

100

0

-100

0

200

400

600

X , km

Рис. 7а

Relative algorithm error
0 50

Для случайного
распределения
ледяного покрова с
заданными
полосами
концентрации

Y , km

100

0

-100

0

200

400

600

X , km

Рис. 7б

Relative algorithm error
0 50

Для распределения
ледяного покрова в
виде айсберга A23A

Дополнительные РЛИ

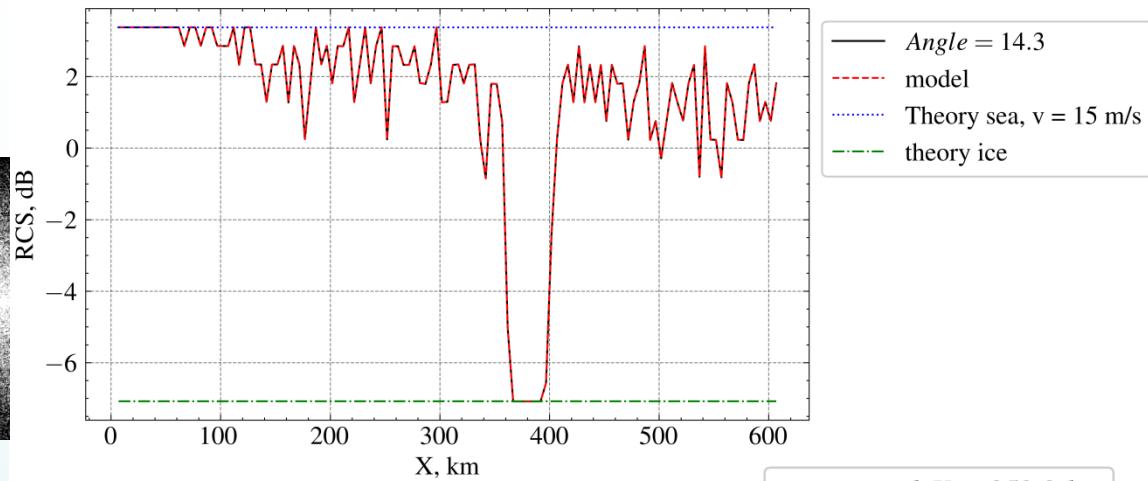
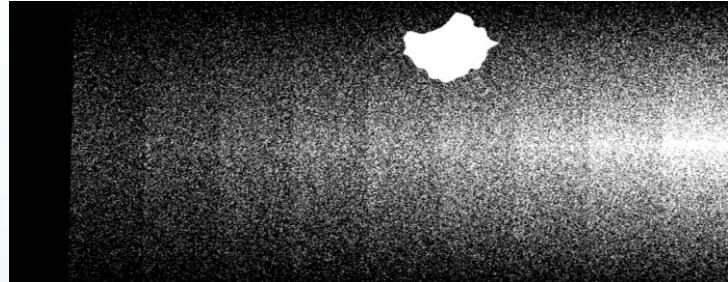


Рис. 8а

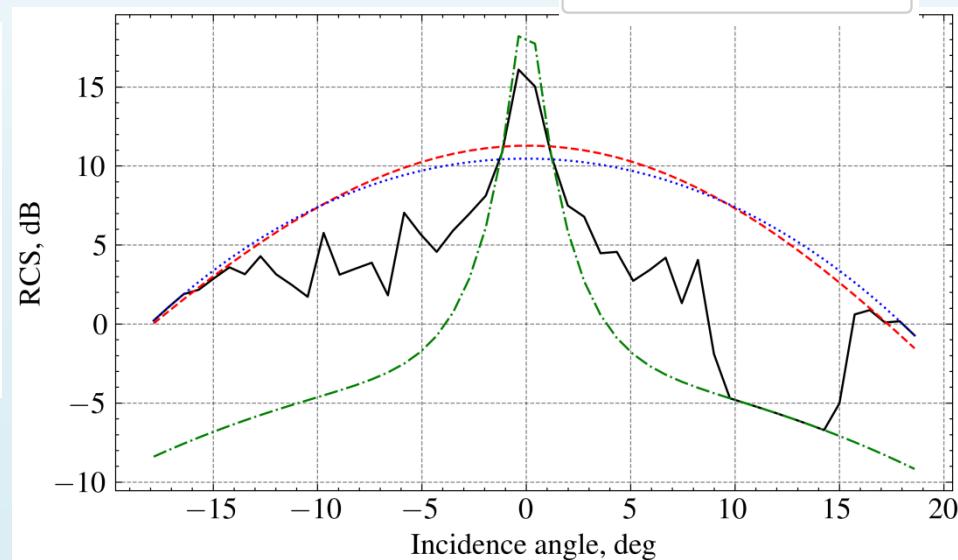
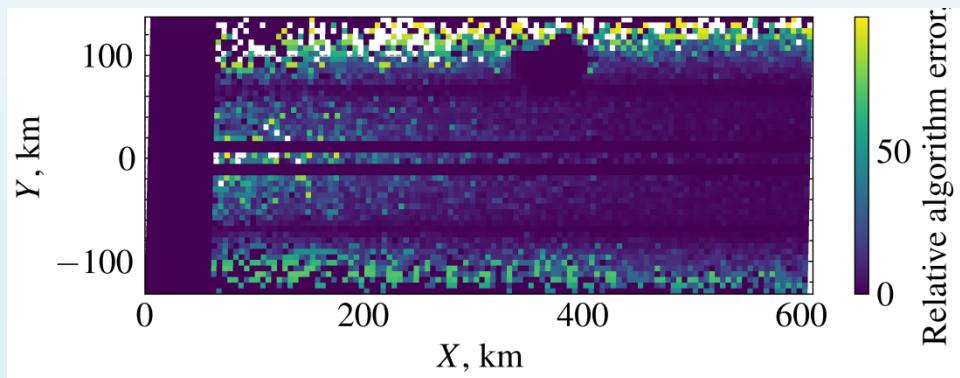


Рис. 8б

Выводы

- Промоделированы РЛИ айсбергов, что полезно для развития алгоритмов их обнаружения. Дальнейшее развитие связано с учетом различных эффектов, например затенение ветра айсбергом.
- В случаях отсутствия льда и в случае большой сплоченности льда ошибка алгоритма решения обратной задачи равна нулю. При этом в случае промежуточных значений сплоченности ошибка растет по мере уменьшения сплоченности.
- Для того, чтобы уменьшить ошибку необходимо знать конкретные зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для ледяного покрова и воды в конкретных условиях наблюдения.
- В результате работы продемонстрирована возможность наблюдения ледяного покрова под малыми углами падения и этот подход необходимо развивать дальше.

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