

# Метод автоматической идентификации разрывов в морском ледяном покрове по снимкам спутника SuomiNPP

*Бойкая Е.Г., Кортикова К.Г., Дымент Л.Н., Ершова А.А.*



ААНИИ

Арктический  
и антарктический  
научно-исследовательский  
институт

*Исследования выполнены при поддержке Российского  
научного фонда, грант №25-27-00008.*

2025

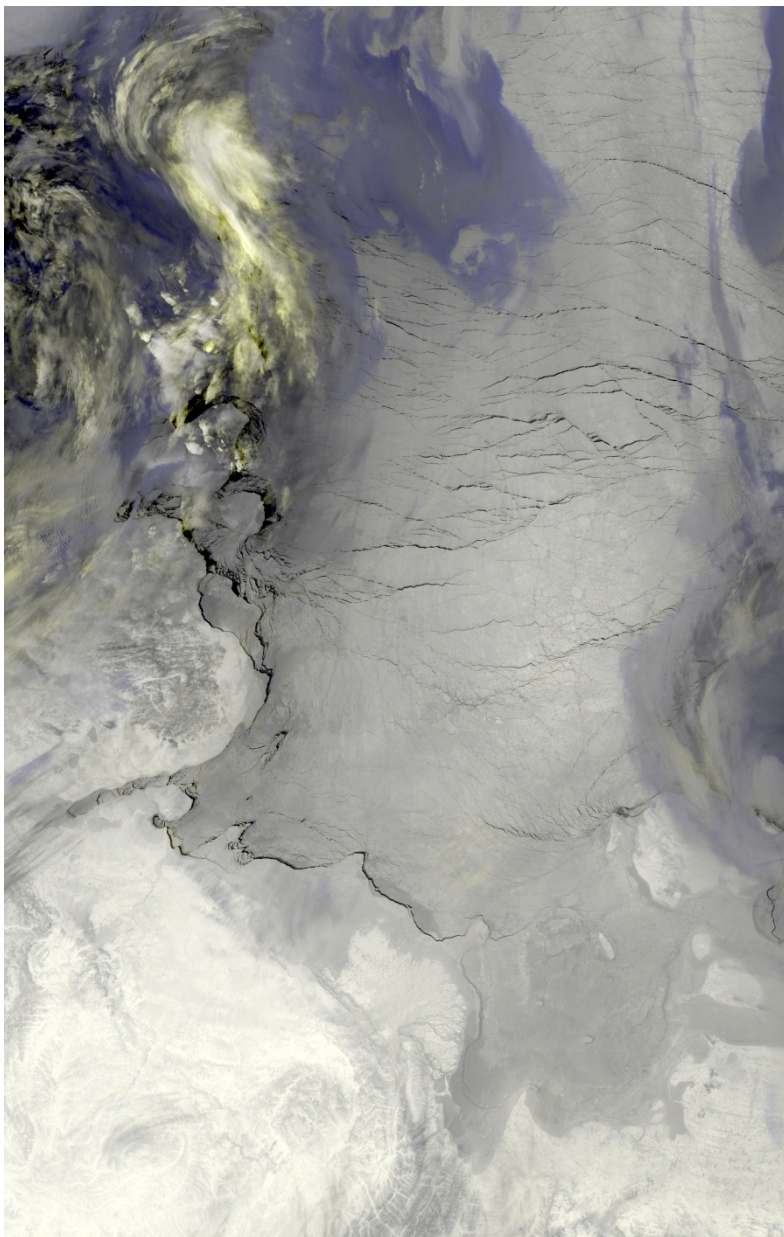




**Движение судна по разрыву в ледяном покрове**  
Фото Александра Зубкова

Разрывы в ледяном покрове – протяженные участки, покрытые водой или молодым льдом. Протяженность разрывов может достигать сотен км, а ширина – от нескольких метров до нескольких км.

# СПУТНИКОВЫЕ СНИМКИ

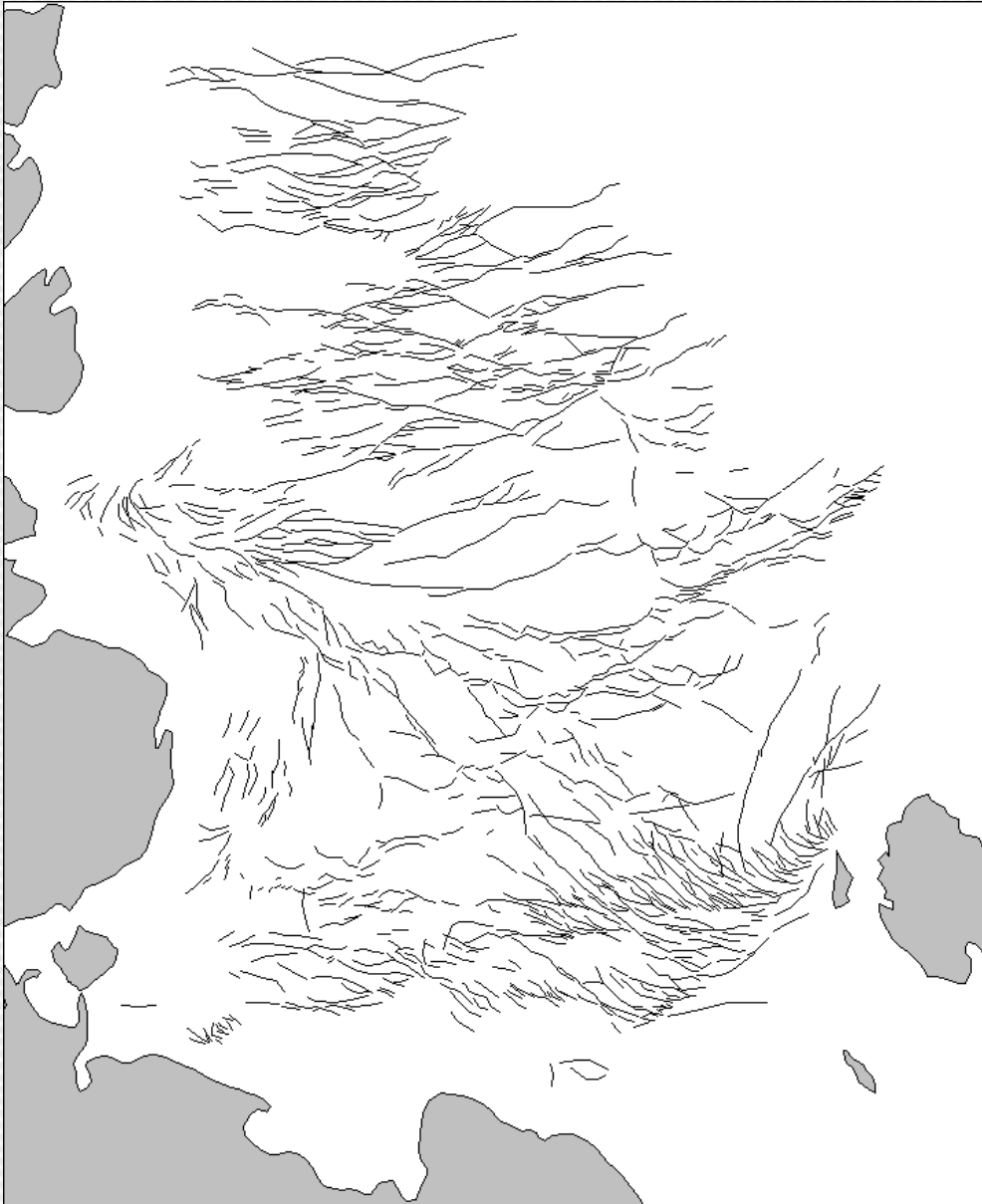


Пример снимка  
ледяного покрова моря  
Лаптевых с ИСЗ  
SuomiNPP радиометром  
VIIRS.

Пространственное  
разрешение 375 м.

Снимок получен с  
помощью спутниковой  
наземной станции  
Российской научной  
экспедиции на  
архипелаге Шпицберген  
(РАЭШ) ААНИИ.

# ЭКСПЕРТНОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ



Пример ручного  
дешифрирования  
разрывов на  
снимке моря  
Лаптевых за  
03.01.2024 из  
архива ААНИИ

# СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАЗРЫВОВ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ

- Кортикова К.Г., Бычкова И.А., 2024
  - Пространственное разрешение (ПР) 30 м
- Murachkin D., Spreen G., Huntemann M., 2024
  - ПР 40 м
  - Невозможно рассчитать ориентацию разрывов
- Qu, M., Pang, X., Zhao, X., Lei, R., Ji, Q., Liu, Y., & Chen, Y., 2021
  - ПР 1 км
  - Ошибки определения ориентации из-за учета ширины разрывов
- Hoffman et al., 2019
  - ПР 1 км
  - Высокая чувствительность к облачности
- Reiser et al., 2020 и Hoffman et al., 2021
  - ПР 1 км
  - Невозможно рассчитать ориентацию разрывов
- Li, M., Liu, J., Qu, M., Zhang, Z., & Liang, X., 2022
  - ПР 6,25 км

# Алгоритм

- *Подготовка данных*
- *Обучение нейронной сети*
- *Создание объектов-разрывов*

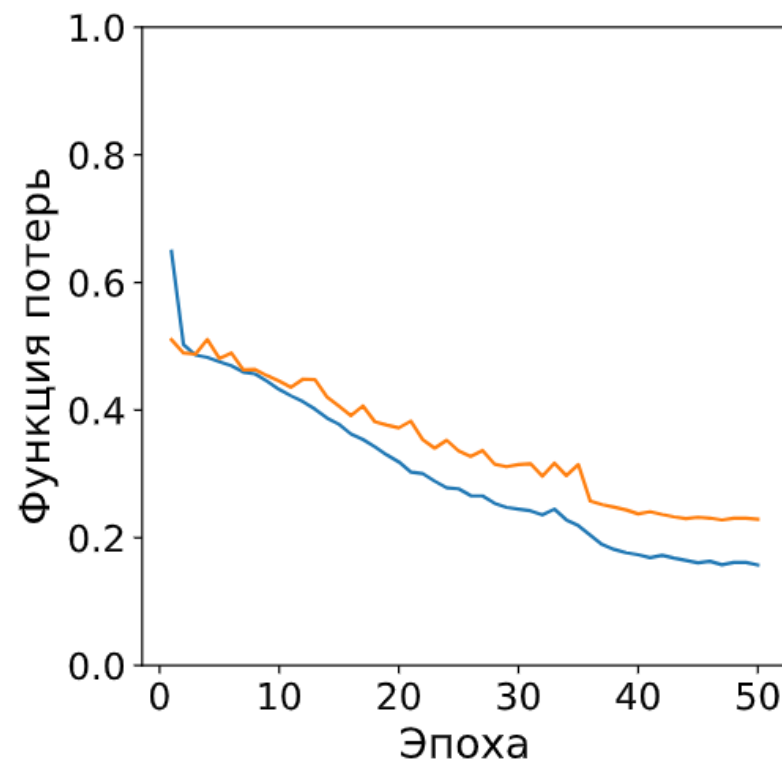
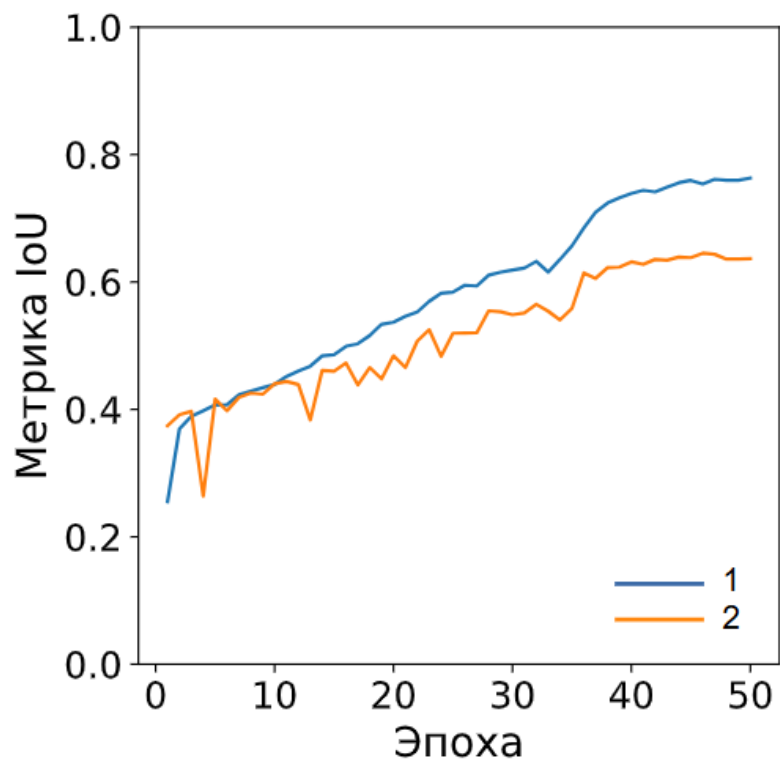
# Подготовка данных

- Снимки - трехканальные композитные изображения 554 (каналы I4 и I5)
- Количество: 66 снимков – море Лаптевых, 121 – Восточно-Сибирское; 22422 пар фрагментов 512 × 512 пикселей и соответствующих им 0-1 масок в обучающей выборке, 5606 в тестовой.
- Нормализация по формуле: 
$$\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

# Параметры нейронной сети

- Архитектура U-Net
- Язык: Python
- Фреймворк TensorFlow/Keras на GPU
- Оптимизатор Adam
- Начальная скорость обучения 0,0001
- Функция потерь Дайса
- Остановка – 7 эпох без улучшения
- Адаптивное уменьшение скорости обучения в 5 раз после 3 эпох без улучшений
- Минимальная скорость обучения  $1 \times 10^{-6}$

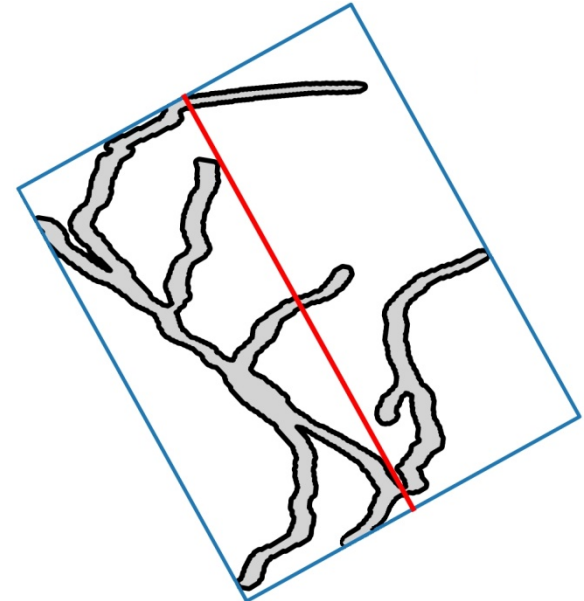
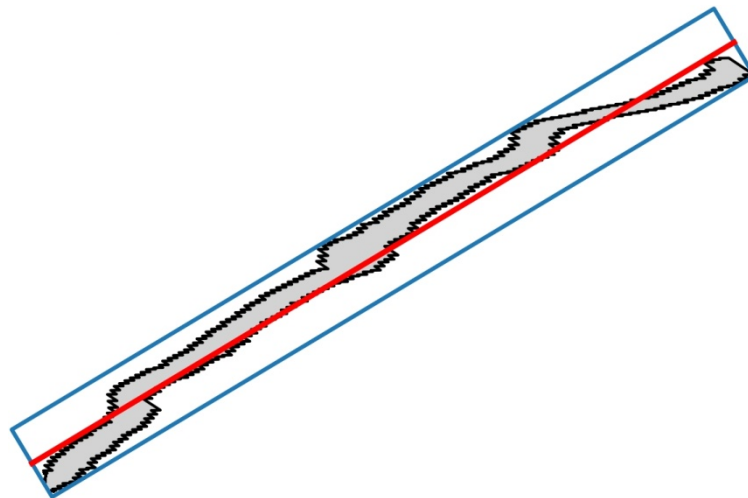
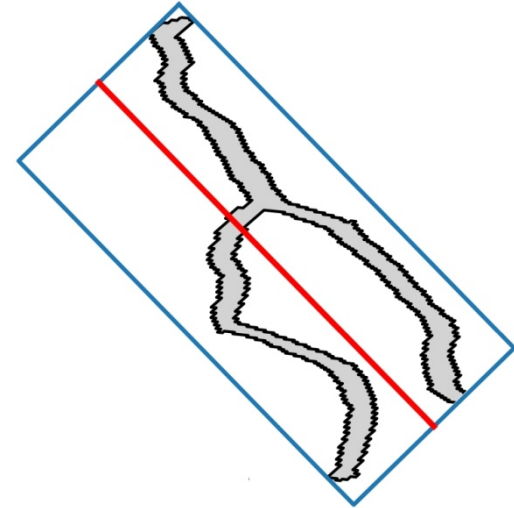
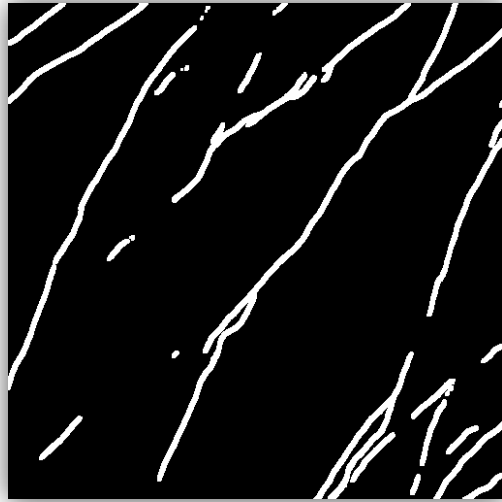
# Результаты обучения



Остановка на 47-ой эпохе.  
Значения метрик на тестовой выборке:  
IoU (коэффициент Жаккарда) — 0,64,  
функция потерь — 0,23 (Dice =  $1 - 0,23 = 0,77$ ).

1 - обучающая выборка  
2 - тестовая выборка

# Верификация. Метод описанного прямоугольника.



# Верификация. Метод «ветвления».

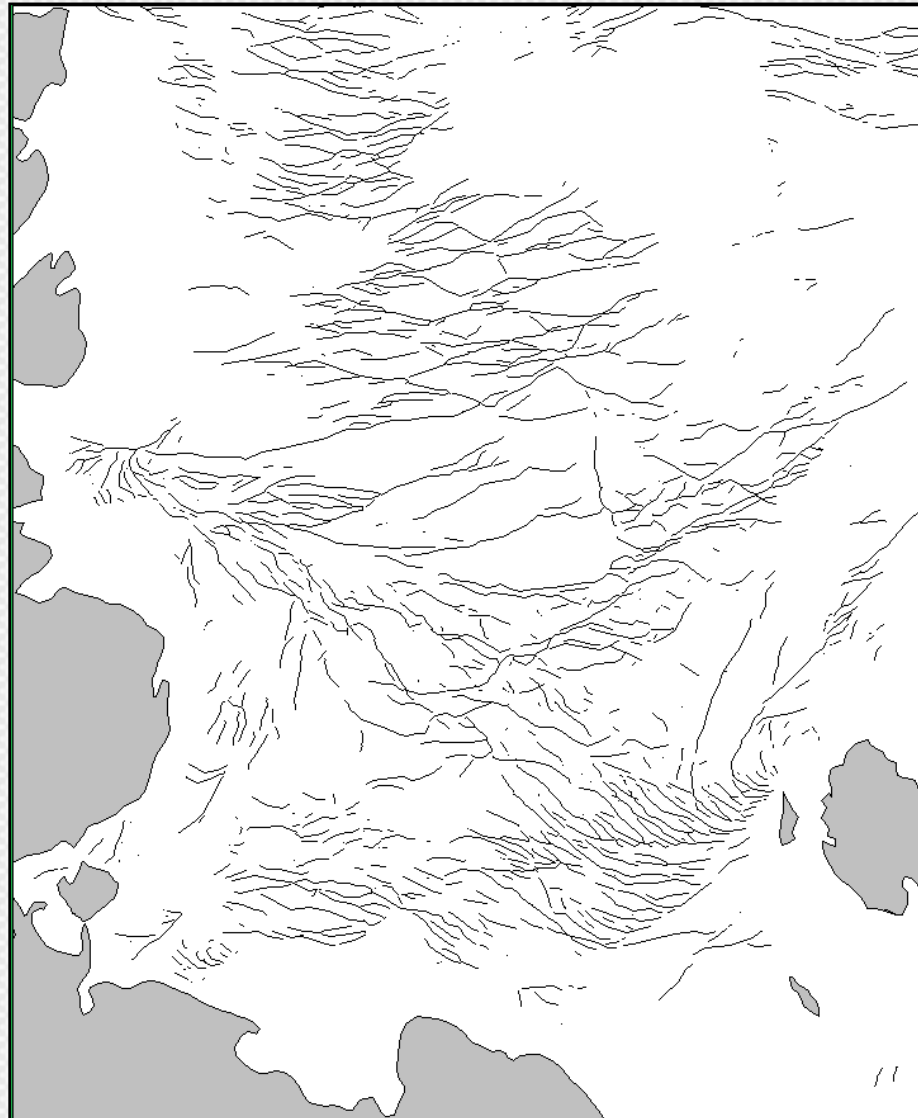


- 1) Скелетизация с помощью пакета skimage (Python)
- 2) Фиксирование точек смены направления
- 3) Поиск начала разрыва и фиксирование точек на одной непрерывной линии
- 4) Сглаживание небольших углов парной линейной регрессией для нескольких последовательных точек
- 5) Удаление пройденной линии

# Разрывы в ледяном покрове моря Лаптевых 03.01.2024



Экспертное дешифрирование



Автоматическое дешифрирование

# ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА

Различия ориентации, градусы	Расчет по методу описанного прямоугольника	Расчет по алгоритму «ветвления»
Модальная ориентация		
0–10	69,9	79,2
10–20	22,5	15,9
20–30	4,9	3,7
30–40	1,9	0,8
40–50	0,2	0,2
50–60	0,4	0,2
60–70	0,1	0
70–80	0	0
80–90	0,1	0
Среднее значение, градусы	9	7
СКО, градусы	8,4	6,9
Удельная длина		
Среднее значение, м/км <sup>2</sup>	20	15
СКО, м/км <sup>2</sup>	19,8	16,0

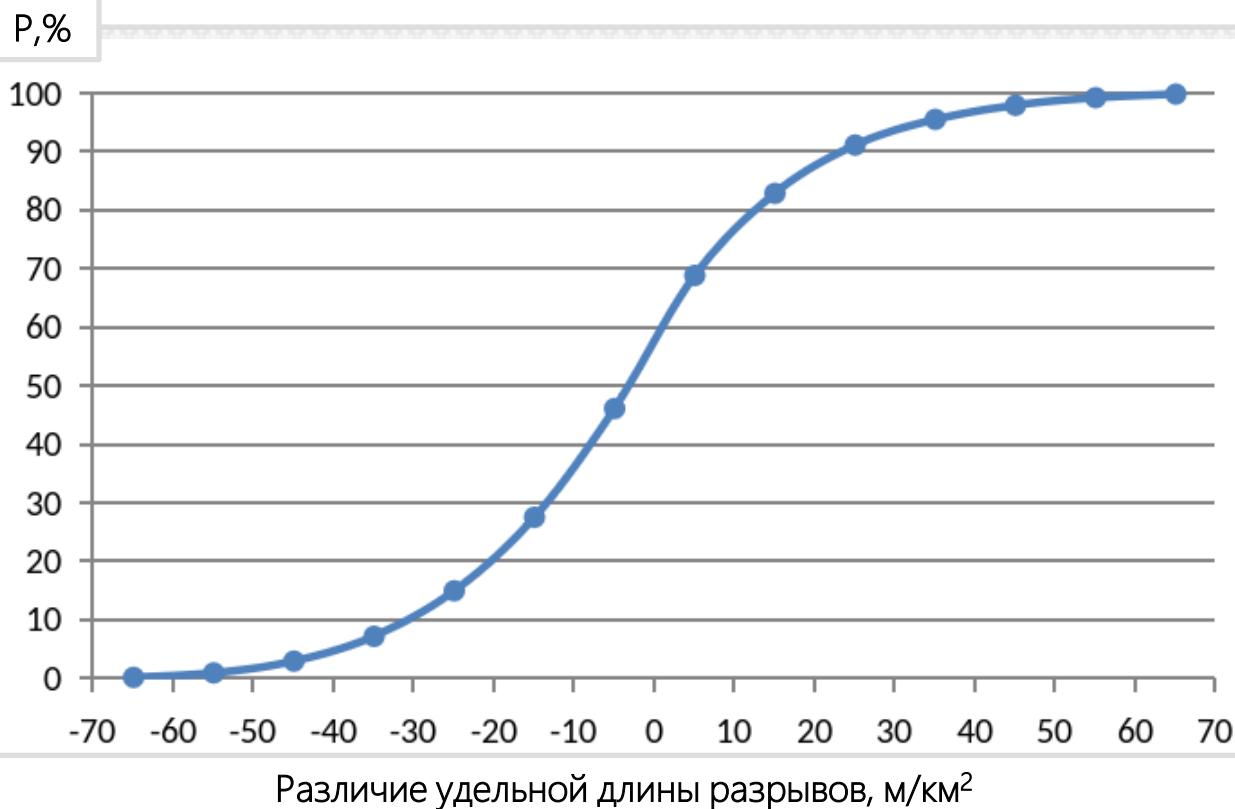
➤ 30 снимков SuomiNPP акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского за ледовые сезоны 2022-2025 гг.

➤ 1325 квадратов 100 × 100 км, обеспеченных данными

# Верификация по всему архиву ААНИИ

Снимки по морям Лаптевых и Восточно-Сибирскому за 411 дат.  
Общее число квадратов, участвовавших в анализе - 19458

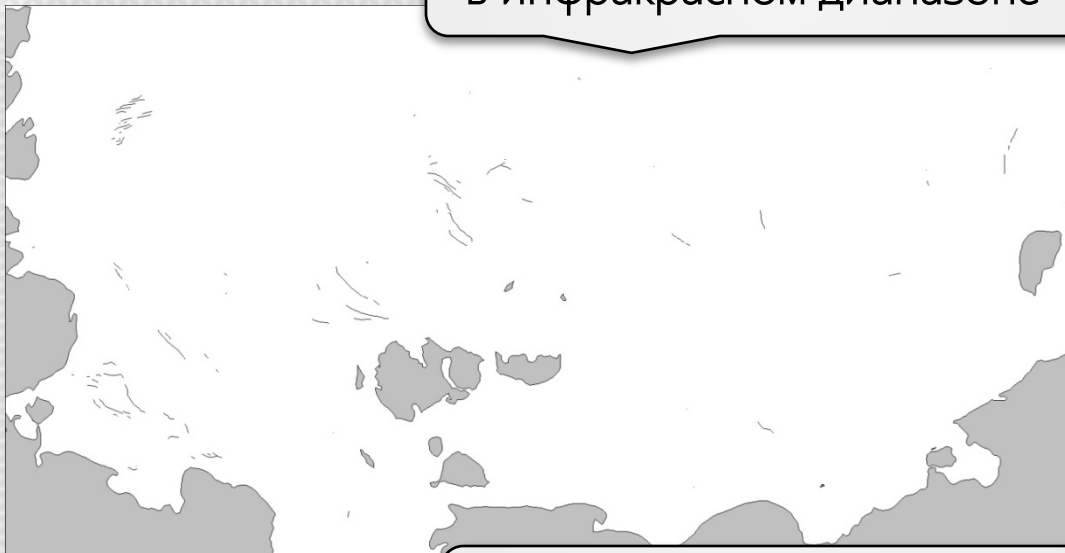
Среднее значение отклонения по модальной ориентации:  $8^\circ$   
Среднее значение отклонения удельной длины:  $1,6 \text{ м/км}^2$



Функция  
распределения  
различий в удельной  
длине между  
экспертным и  
автоматическим  
дешифрованием

# МОДЕЛЬ ДЛЯ СНИМКОВ ЗА АПРЕЛЬ И МАЙ

Результаты обработки снимка  
в инфракрасном диапазоне



20.04.2020

Результаты обработки снимка  
в видимом диапазоне



Метрики:

Функция потерь = 0,1105

IOU = 0,7544

Dice = 0,8895

Для верификации  
использовались:

21 снимок, 454 квадрата

Среднее отклонение от  
экспертного  
дешифрирования:

Модальная ориентация: 8°

Удельная длина: 10 м/км<sup>2</sup>



## ВЫВОДЫ

- ✓ Создан метод автоматической идентификации разрывов на снимках со спутника SuomiNPP для видимого и инфракрасного диапазона.
- ✓ Проведена верификация метода. Рассчитанные по данным ручного и автоматического дешифрирования модальная ориентация и удельная длина разрывов в среднем различаются незначительно.
- ✓ Сформирован архив данных о разрывах в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском за 2018-2025 гг.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!