Проблемы автоматизированного распознавания разрывов морского льда Арктики

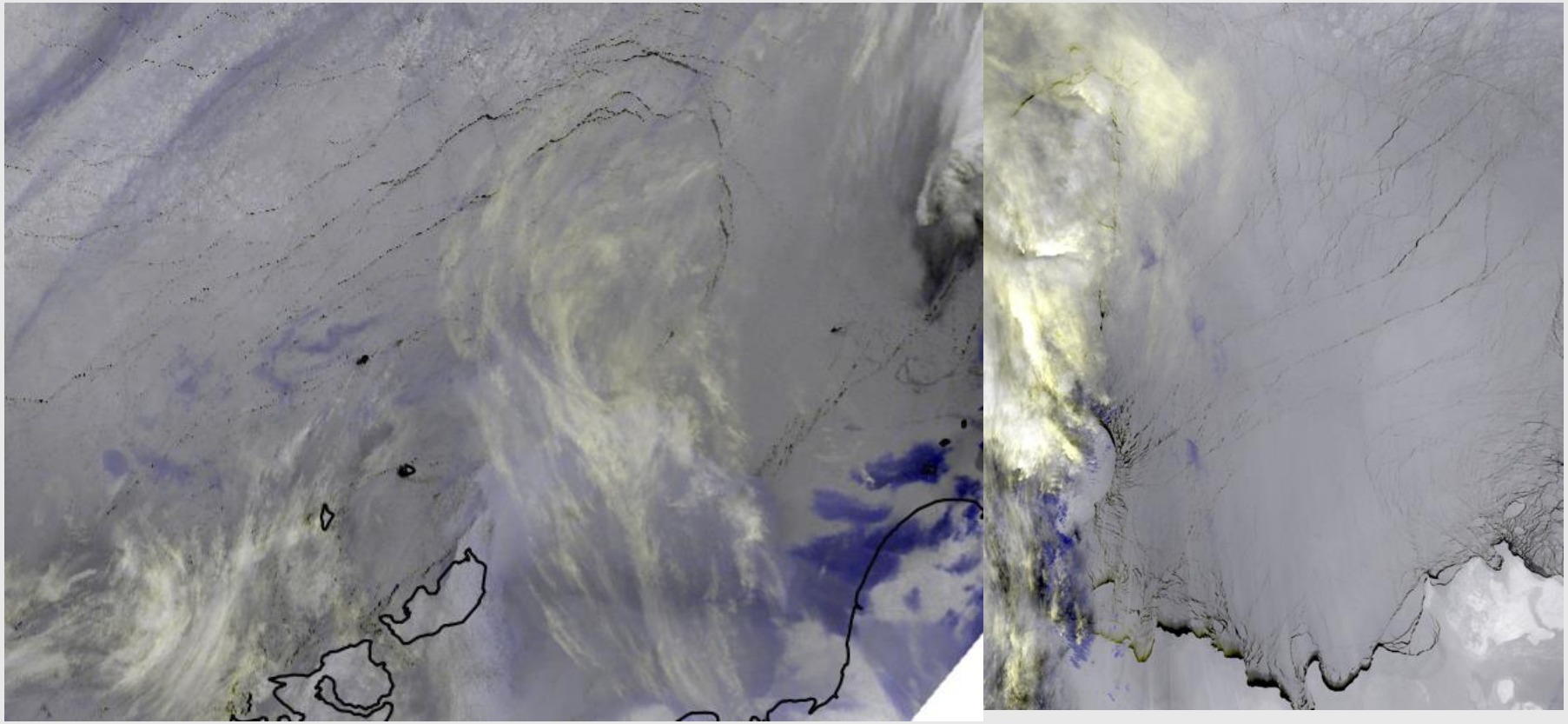
Вичаре А.С., *Максимович Н.В., Сидорина И.Е.*

Кафедра картографии и геоинформатики

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Актуальность

- Разрывы определяют навигацию на трассах СМП
- Разводья/Разрывы помогают проводке судов, но рядом возможны торошение и сжатие.
- Ручное дешифрирование ежедневных снимков не масштабируется



Примеры снимков VIIRS.

Цель и задачи

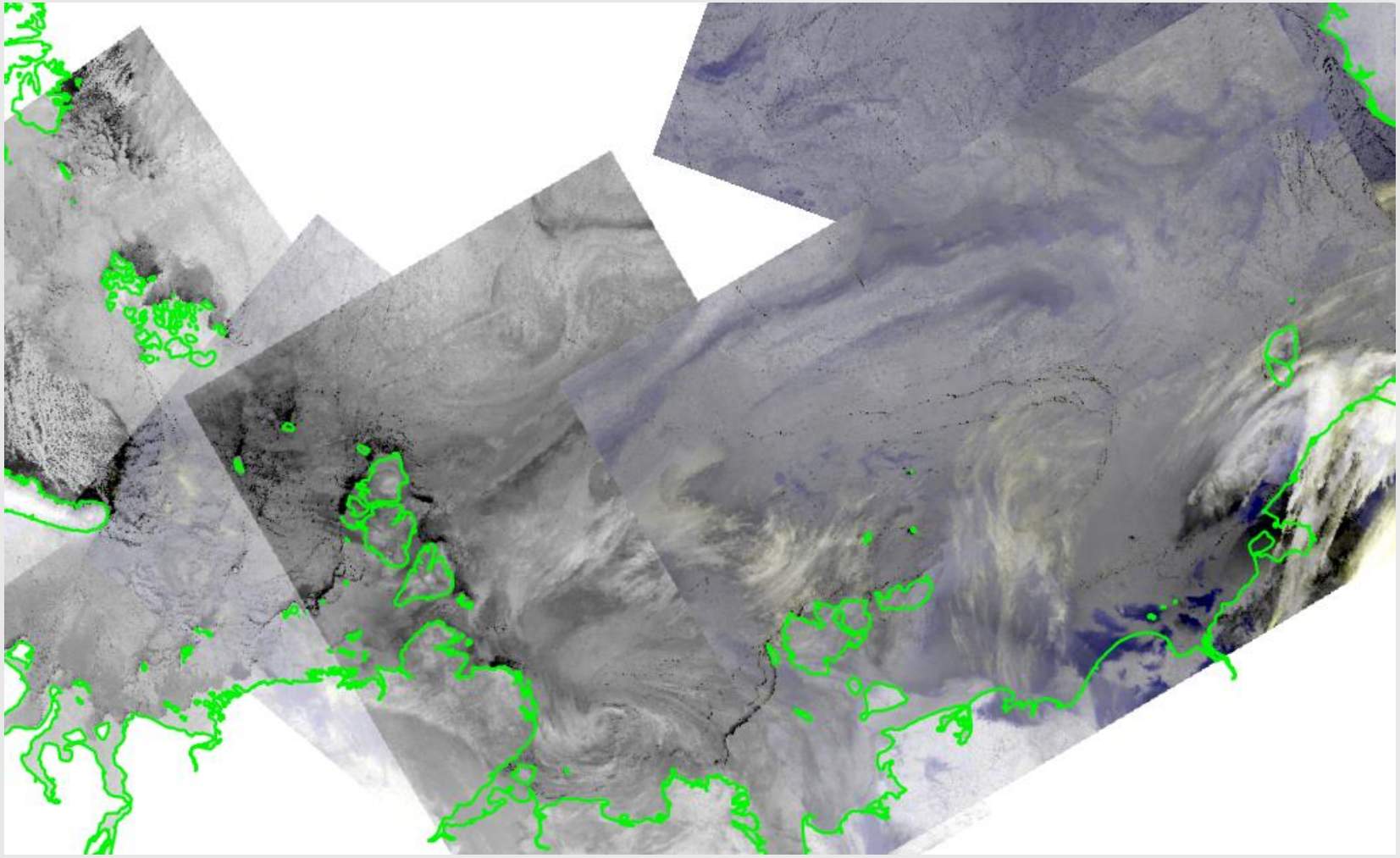
Цель: автоматизировать выделение длинных разрывов

Задачи: обзор проблем, подготовка данных, обучение U-Net и векторизация разрывов

Данные

Данные: VIIRS / Suomi NPP инфракрасный диапазоны)

Период: январь 2022



Мозаика снимков VIIRS за январь 2022 г

Существующие методы и их диапазоны

Оптика, радиолокация, инфракрасный диапазон

- Оптический диапазон: высокое разрешение, но зависимость от освещённости и облачности.
- РСА: всепогодность, но сложность интерпретации молодого льда и тонких разрывов.

ИК-диапазон: тепловой контраст «вода–лёд», но сильная чувствительность к облачности.

Общий недостаток: методы ориентированы на все нарушения сплошности, а не на крупные разрывы

Автор / Метод	Данные	Преимущества	Проблемы и ограничения
Кортикова, Бычкова, 2024	Landsat-8 (оптика)	Высокая детализация, видны узкие разрывы	Малая полоса обзора, зависит от облаков и освещенности
Murashkin et al., 2024	РСА (радар)	Всепогодность, съемка днем и ночью	Невозможно рассчитать ориентацию разрывов
Chen et al., 2025	Sentinel-1 (РСА)	Высокое разрешение	Ограниченное покрытие и цикл съемки (нет ежедневных карт для всей Арктики)
Lin et al., 2024	Sentinel-1 (РСА)	Текстурный анализ для выделения разрывов	Завышает ширину разрывов, пропускает узкие (<300 м), низкая полнота (recall)
Qu et al., 2021	Тепловой ИК	Быстрая обработка больших площадей	Ошибки определения ориентации из-за учета ширины разрывов
Hoffman et al., 2019	MODIS/VIIRS (ИК)	Векторизация (расчет длины, ширины)	Высокая чувствительность к облачности, путает границу припая с разрывом
Reiser et al., 2020	MODIS (ИК)	Ежедневный охват всей Арктики	Невозможно рассчитать ориентацию разрывов, ложные срабатывания на тонких облаках
Hoffman et al., 2021	MODIS/VIIRS, ИК + **U-Net**	Меньше ложных срабатываний, чем у старых алгоритмов	Мало данных для обучения, завышает ширину (до 15–20 км), не считает ориентацию
Willmes et al., 2023	MODIS (ИК)	Долгосрочный климатический архив	Завышает ширину/площадь узких разрывов, чувствителен к облакам
CTMLU-Net (IEEE), 2025	FY-3D MERSI-II (ИК)	Высокое разрешение для ИК-диапазона	Точное обнаружение при наличии облаков остается сложной задачей
Li et al., 2022	AMSR-E/AMSR2 (микроволны)	Огромный охват, не зависит от облаков	Ошибочно определяет толстый лед (>30 см) как разрыв, очень низкое разрешение

Проблема 1: спектральная неоднозначность

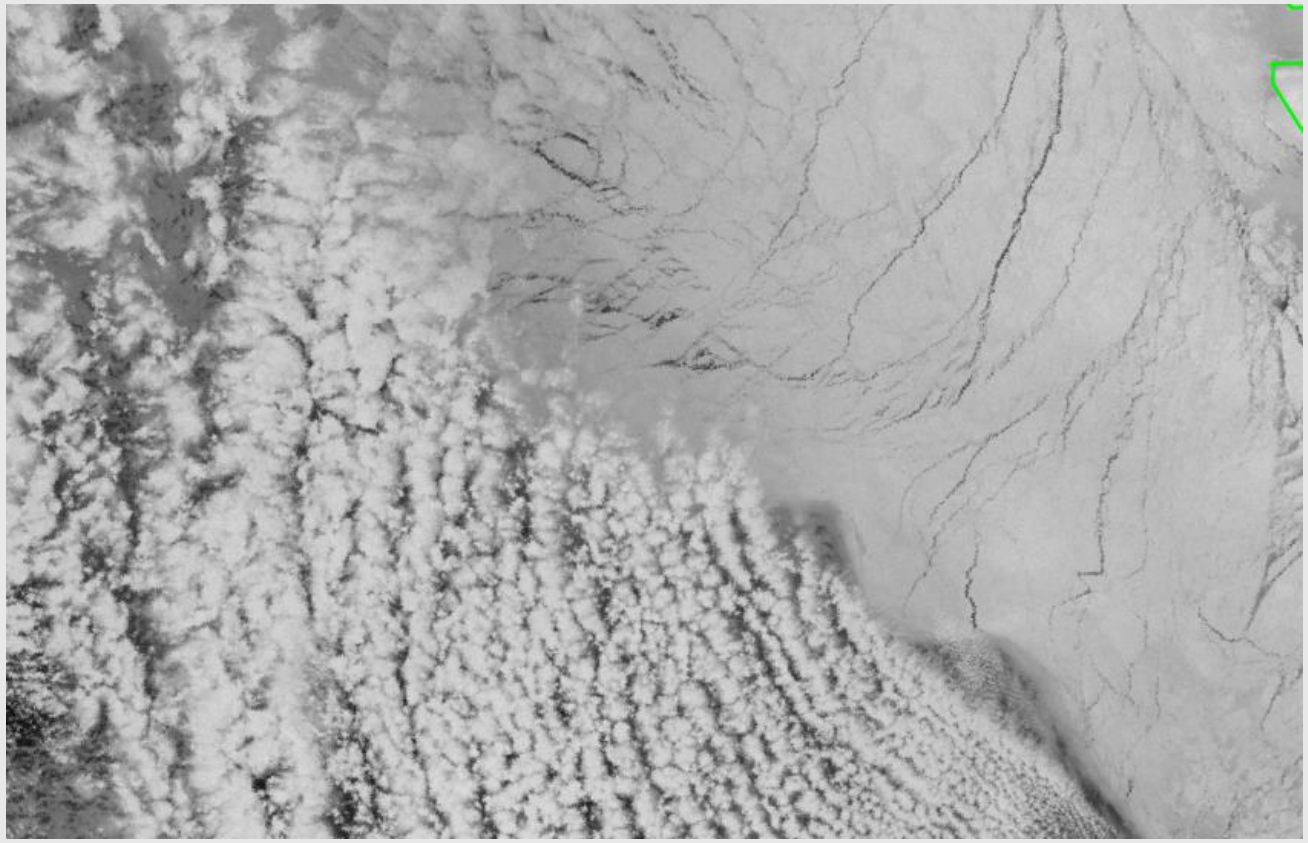
Снег, облака и смешанные пиксели

Снег и облака близки по спектральным характеристикам.

Смешанные пиксели размывают границу «лёд–вода».

Замёрзшие разводья и молодой лёд маскируются под сплошной лёд.

Слабый тепловой контраст затрудняет пороговые методы.



Снимок VIIRS: на границе облачности и льда сложно различить трещины из-за схожей яркости (спектральная неоднозначность).

Проблема 2: облачность и ложные разрывы

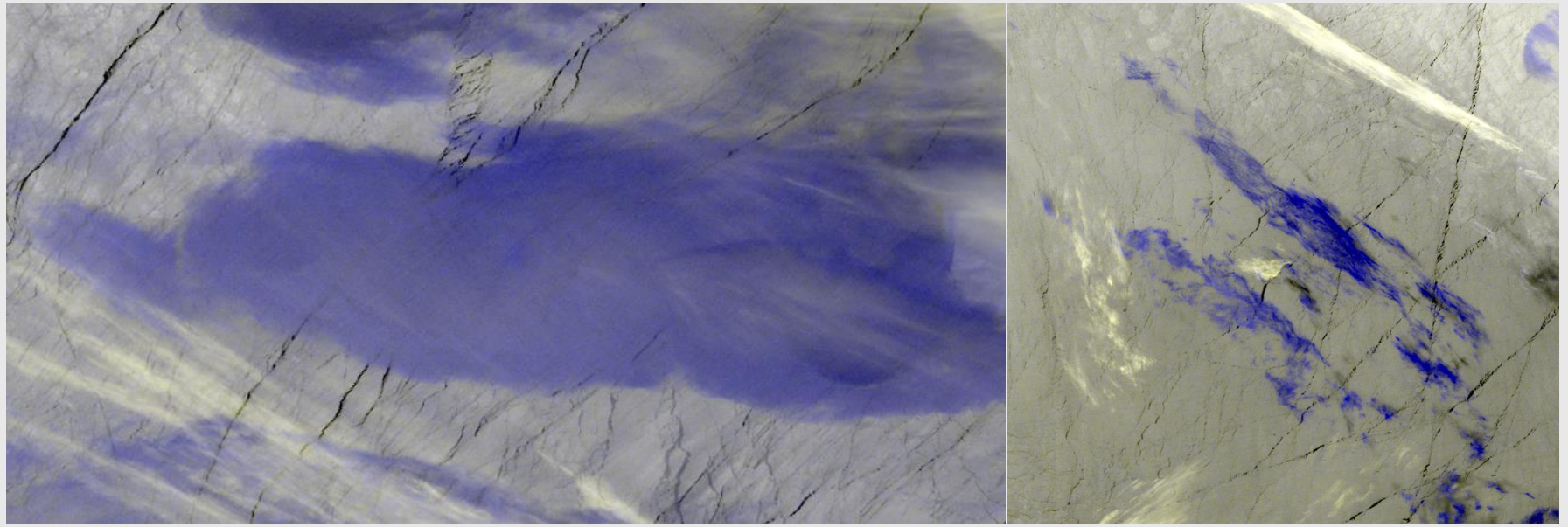
Облака — главный источник ошибок

Надёжной маски облачности нет.

На облачных участках формируются ложные разрывы.

Лёгкая облачность прерывает протяжённые разрывы.

Облачность снижает полноту обнаружения и искажает плотность разрывов.



Примеры ложных срабатываний: тени и тонкая облачность (синий цвет на композите) маскируют или имитируют разрывы.

Проблема 3: разрешение

Несовпадение пространственного разрешения

VIIRS 375 м.

Многие алгоритмы: MODIS / VIIRS 1 км.

Узкие разрывы видны на 375 м, но не идентифицируются на 1 км.

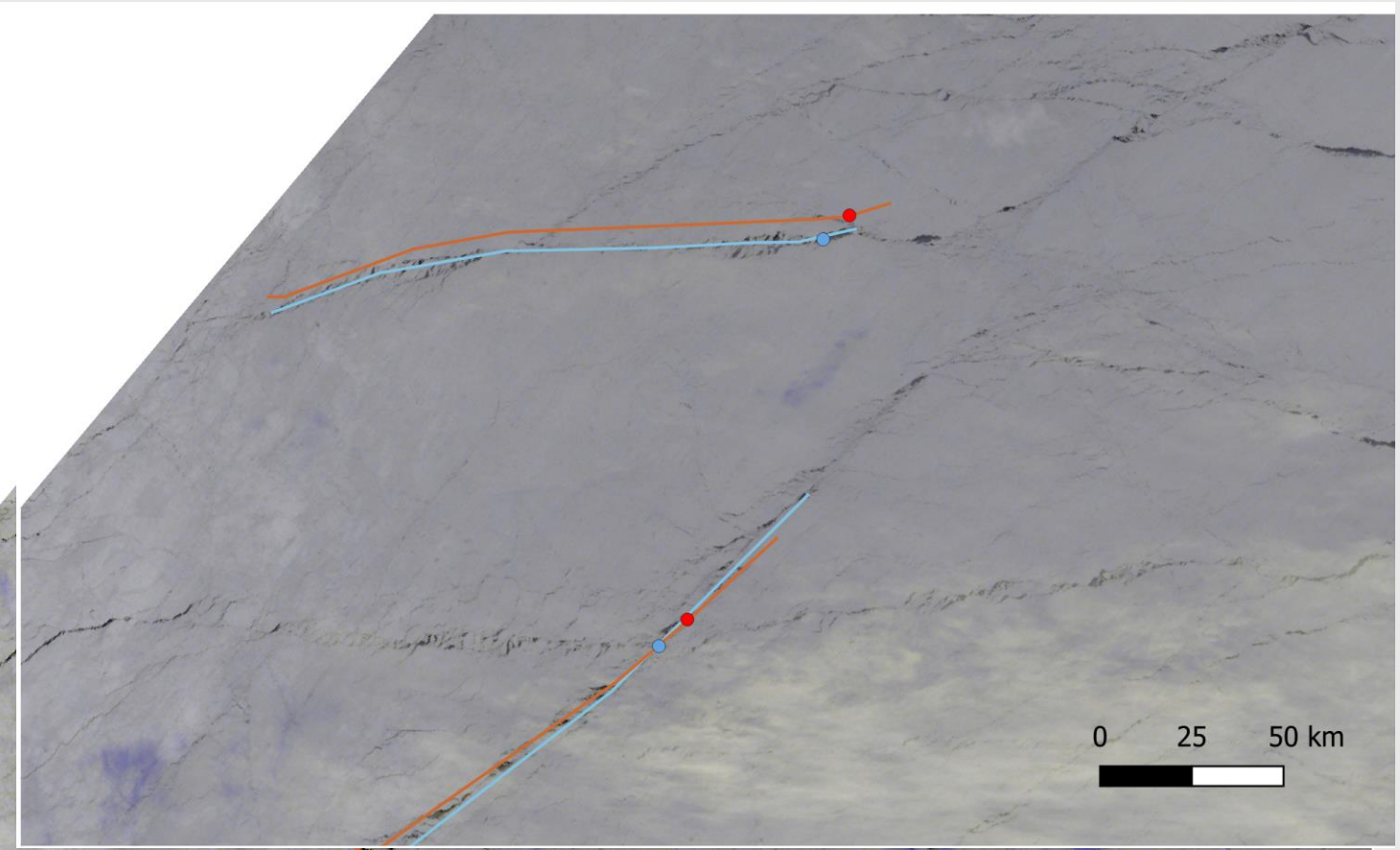
Возникают пропуски и занижение плотности разрывов.

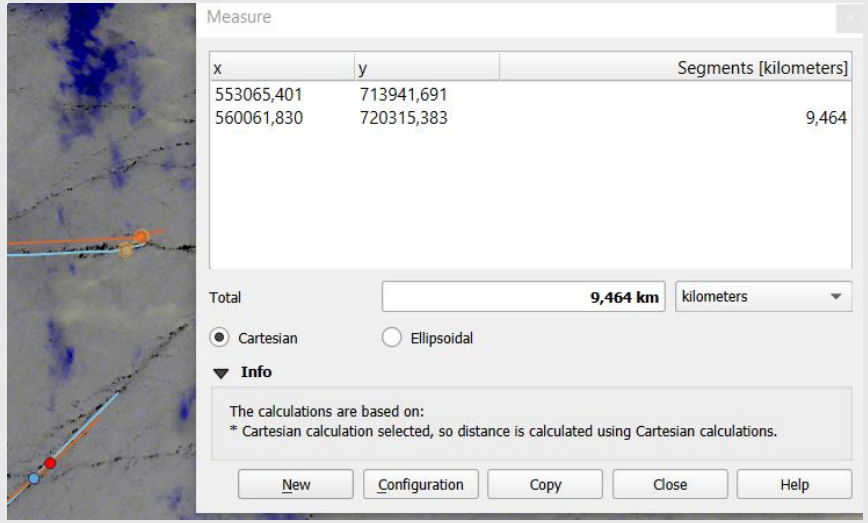
Проблема 4: динамика льда

Разрыв смещается за время между снимками

Алгоритмы с суточными композитами дают «двойники» разрывов.

Граница припая часто ошибочно выделяется как разрыв.





Смещение разрыва за сутки. Красная и голубая линии — положение разрыва в разное время.
Справа — измерение длины в ГИС.

Проблема 5: векторизация и ориентация

От маски к объекту и характеристикам

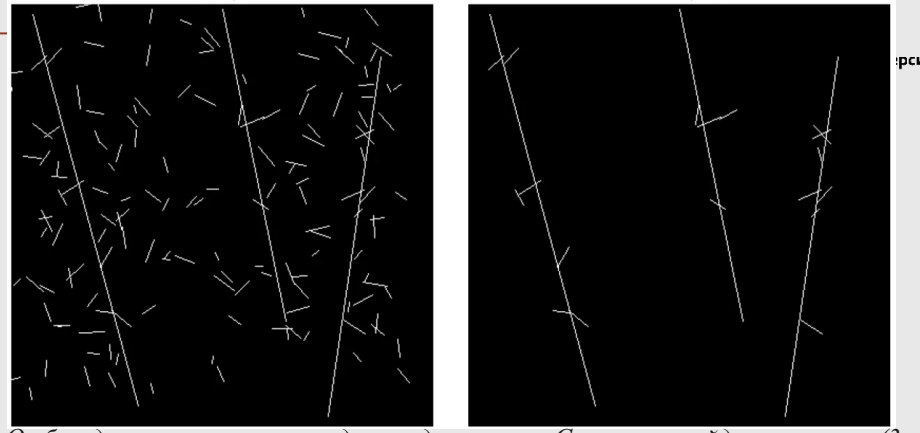
Нужно соединять несвязанные линии разрывов через облачные пропуски.

Угол поворота между линиями выбирается неоднозначно.

В узлах с несколькими линиями неясно место соединения разрывов.

На крупном масштабе проявляются узоры: крестообразные, волнистые, параллельные.

Без векторизации нельзя рассчитать ориентацию, длину и ширину.



Отбор длинных разрывов по длине вдоль линии. Слева: все найденные линии (3 длинных разрыва и много коротких). Справа: остаются только длинные. Синтетический пример.

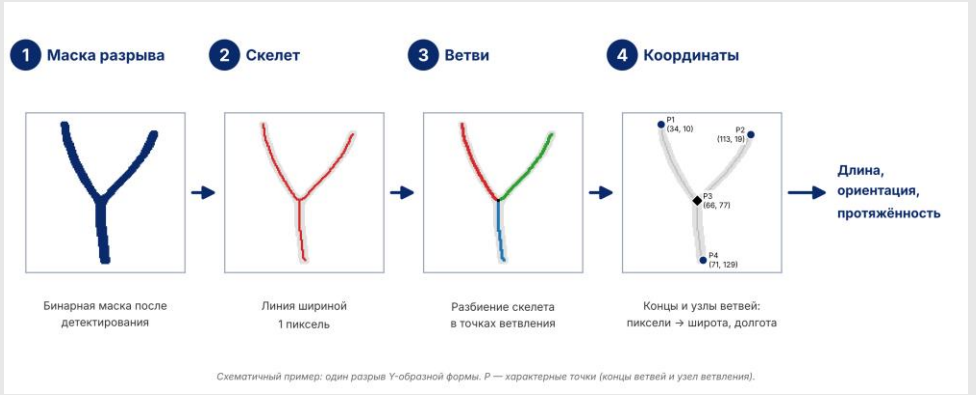


Схема векторизации: маска → скелет → ветви → координаты. Пример на одном Y-образном разрыве. (адаптировано из [Бойкая и др., 2025)



Обработка форм разрывов. Слева: исходная маска. В центре: после проверки тонкости. Справа: после соединения концов и скелетизации. Y-образные, X-образные и пунктирные разрывы сохраняются. Синтетический пример.

Классические алгоритмы и их ограничения

1. Метод теплового контраста (Thermal Contrast)

Ложные срабатывания на неоднородном льду

2. Попиксельная классификация и детектор границ Canny

Путает облака и трещины; линии получаются рваными

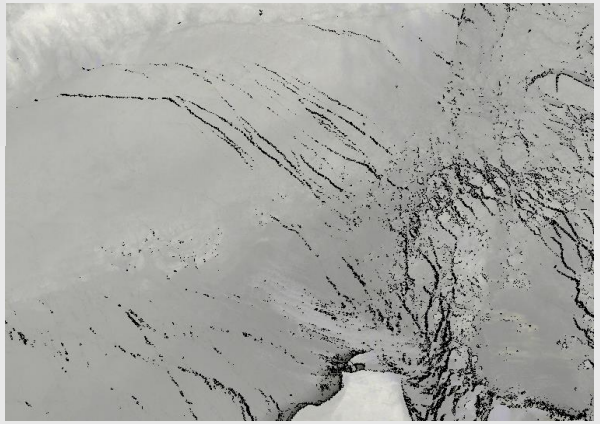
3. Детектор линий LSD (Line Segment Detector)

Разбивает один длинный разрыв на сотни мелких отрезков

$$T_b > \mu_{25\times25} + 1.5\,\text{K} \text{ и } T_b > \sigma_{25\times25}$$

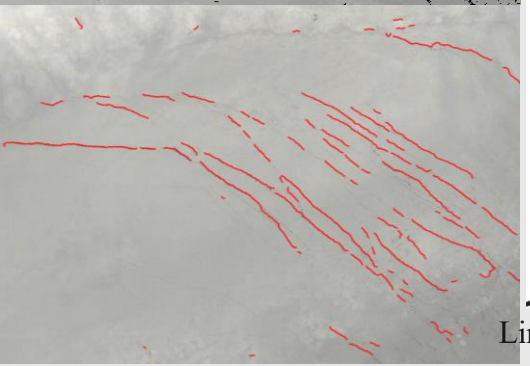
Где μ И σ — среднее значение и стандартное отклонение в локальном окне размером 25×25 пикселей

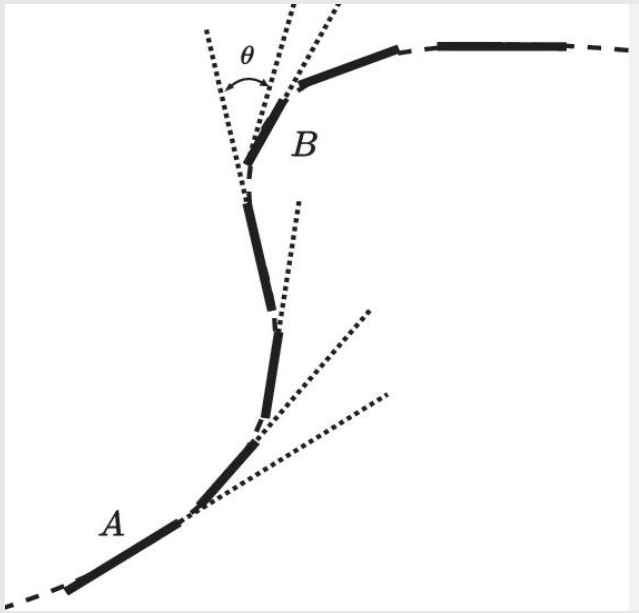
$T_b < 271\,\text{K}$ (точка замерзания соленной воды)



Thermal Contrast method



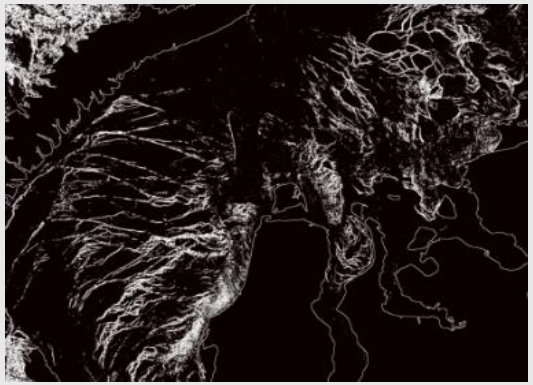




Line Segment Detector (LSD)



Pixel Classification



Method canny

Метод: U-Net

Архитектура: U-Net с энкодером ResNet (предобученный).

Обучающая выборка: 200 размеченных фрагментов (shapefile).
Параметры обучения: 150 эпох.
Предобработка: фильтрация и нормализация теплового контраста

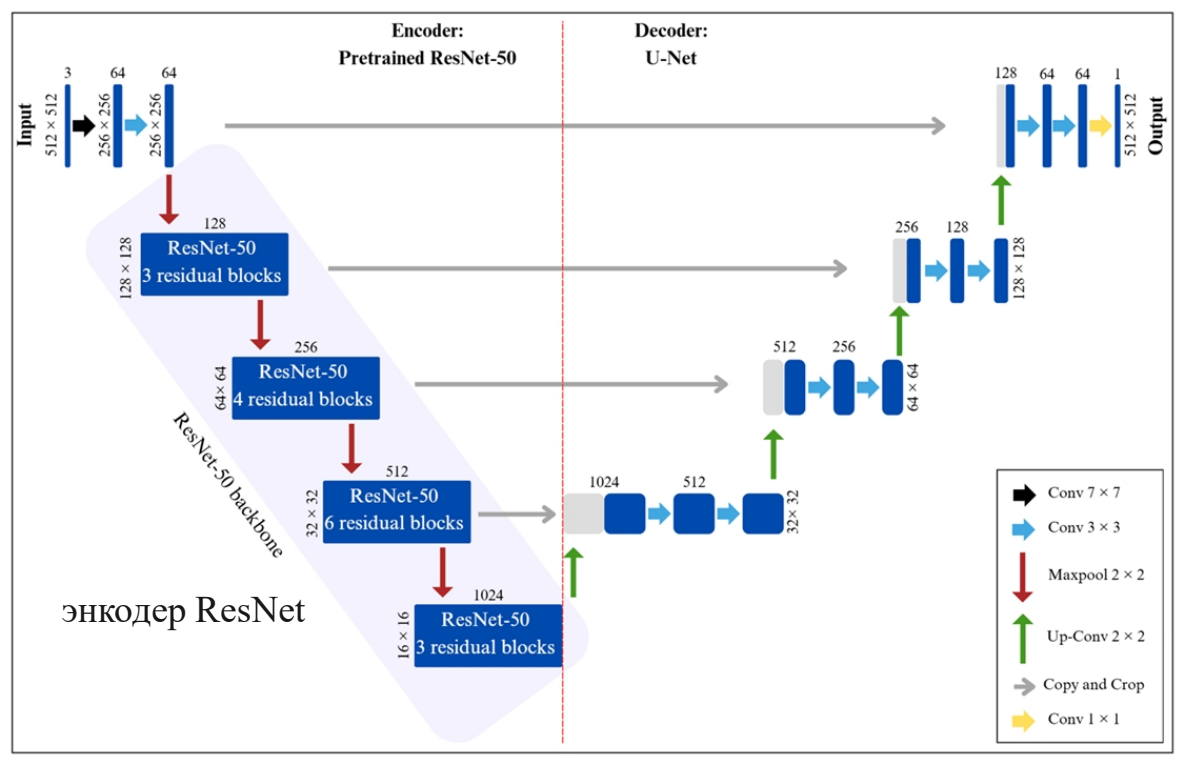
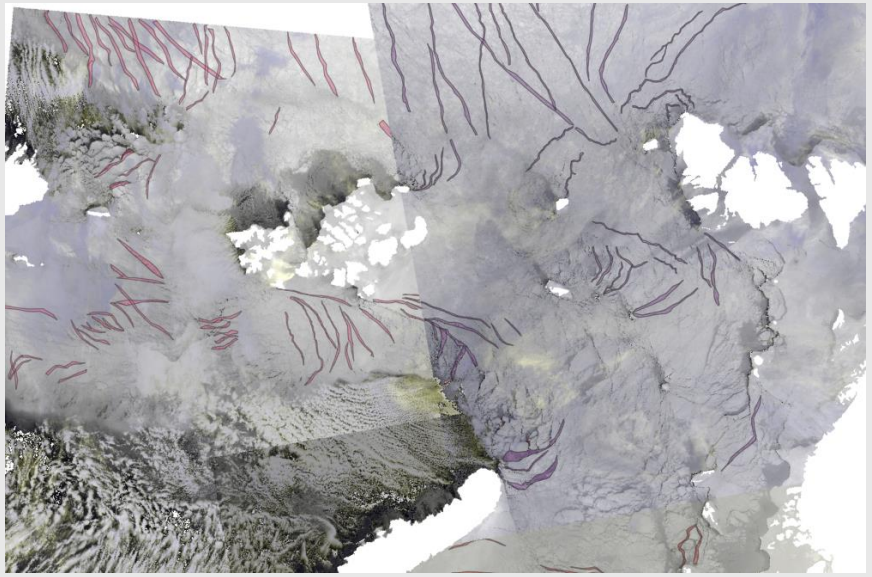


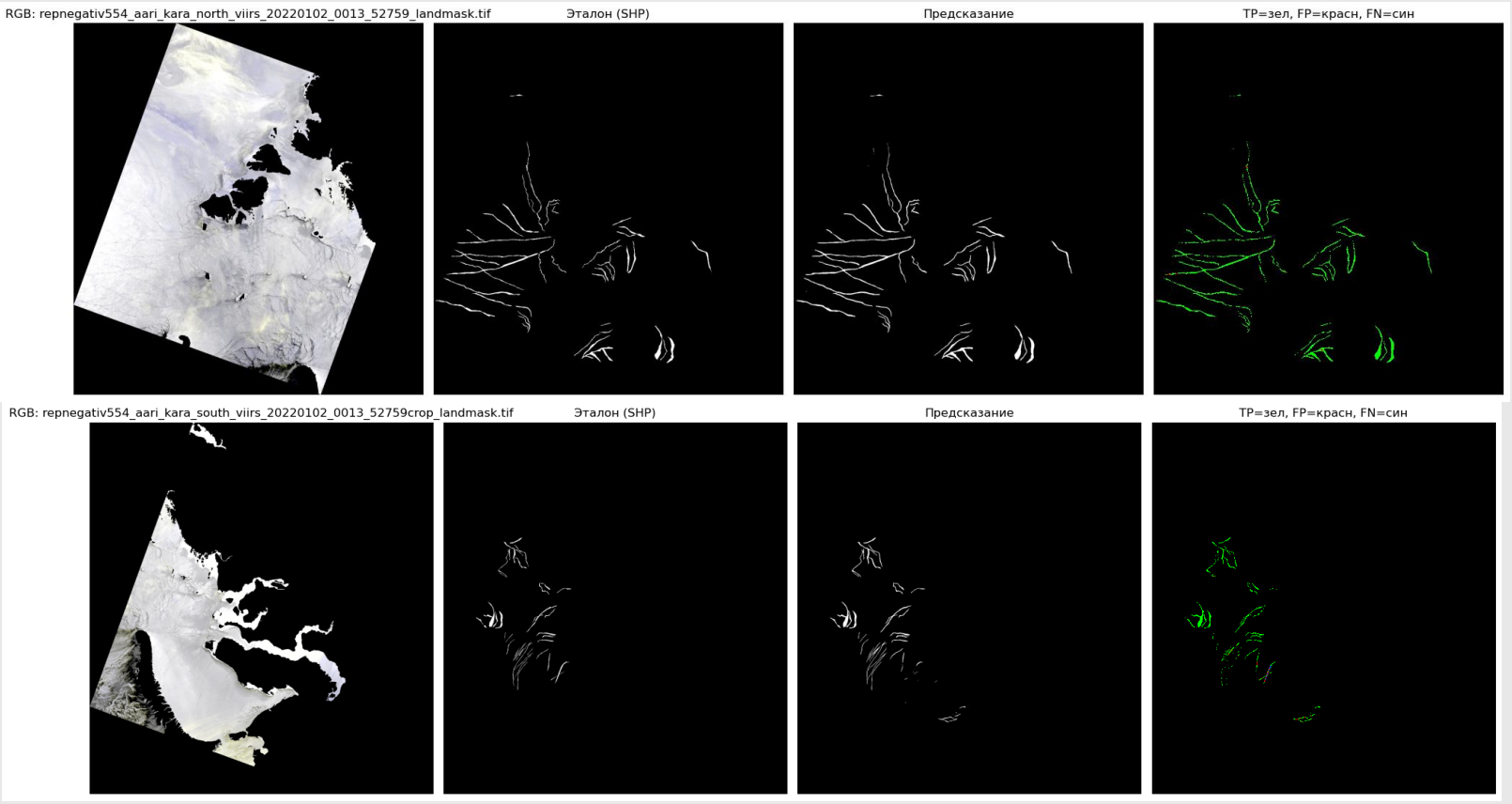
Схема архитектуры

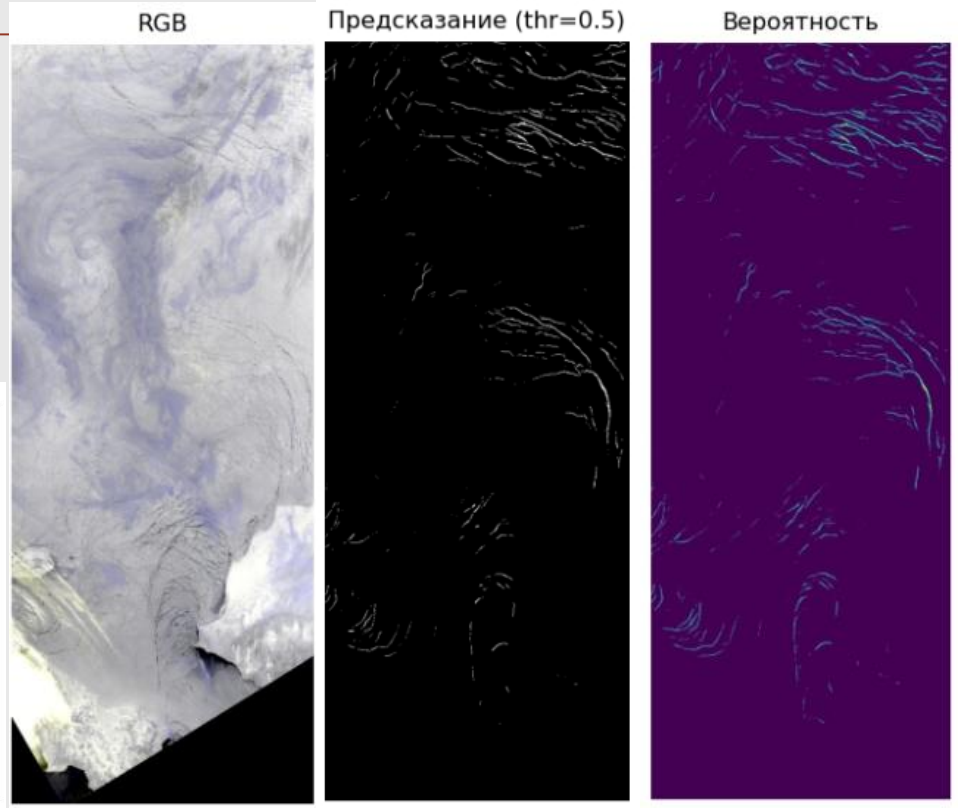


Исходный снимок VIIRS с наложенной маской выделенных разрывов

Результат

F1= 0.79





Пример работы модели

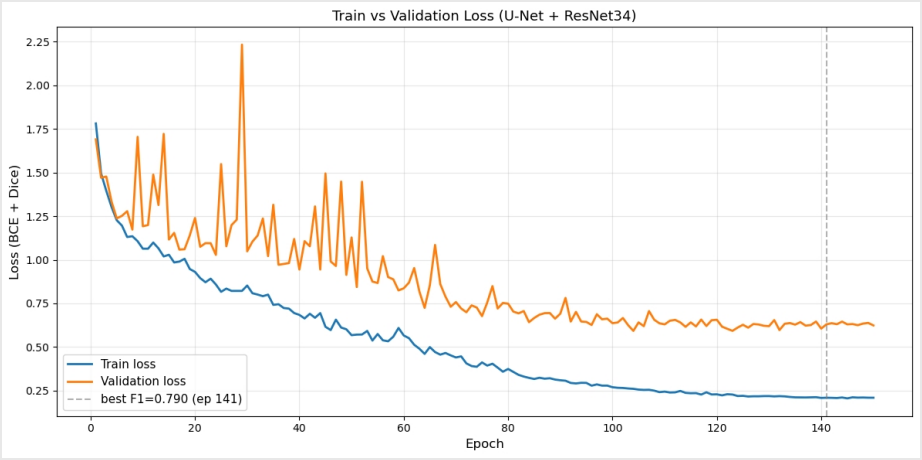


График потерь

1-й столбец — исходный RGB-снимок;2-й — эталонная маска (SHP);3-й — предсказание нейросети;
4-й — карта ошибок (зеленый — верно найденные TP, красный — ложные срабатывания FP

Выводы

- Главные проблемы: облачность, разное разрешение, динамика льда и сложная векторизация.
- Нейросети (в т.ч. U-Net) уже применяются, но они по-прежнему плохо справляются с длинными разрывами, если те прерываются облаками
- Обучена модель U-Net + ResNet (F1 = 0.79). Она хорошо находит длинные разрывы, но облака все еще прерывают их.
- Дальнейшая работа: расширение обучающей выборки, улучшение маски облаков, стабильная векторизация с расчетом ширины.

Спасибо за Внимание