



Субмезомасштабные процессы и динамика морского льда в Карском море и Обь-Енисейском регионе на основе анализа данных высокого разрешения

Козлов И.Е., Плотников Е.В., Кубряков А.А., Мизюк А.И., Новиков Б.А.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь



Мотивация

- Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований показывают, что субмезомасштабные гидрофизические процессы (внутренние волны, фронты, вихревые структуры) могут играть важную роль в интенсификации перемешивания, переносе тепла и биогеохимических трассеров в Арктике, а также оказывать влияние на морской лед [Rippeth et al., 2017; Manucharyan, Thompson, 2017; von Appen et al., 2018; Fine et al., 2019; Fer et al., 2020].
- Новым подходом по исследованию этих процессов и характеристик дрейфа морского льда на малых масштабах является совместное использование данных высокого пространственного разрешения с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спутниковых датчиков, а также результатов численного моделирования и натурных наблюдений.
- Использование такого подхода позволяет напрямую оценивать кинематические характеристики этих процессов для решения различных прикладных задач.

Цель работы

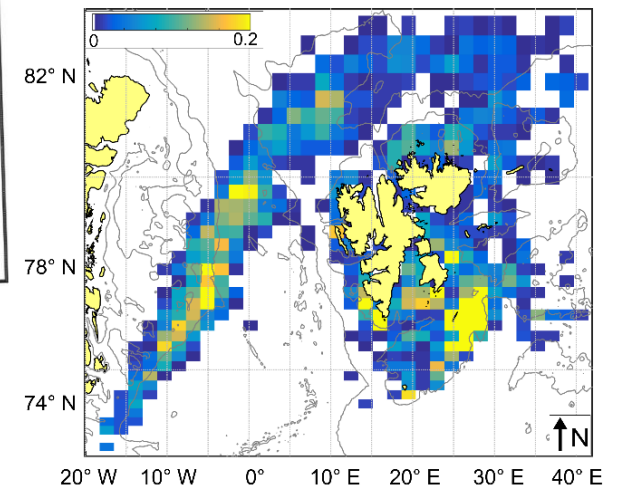
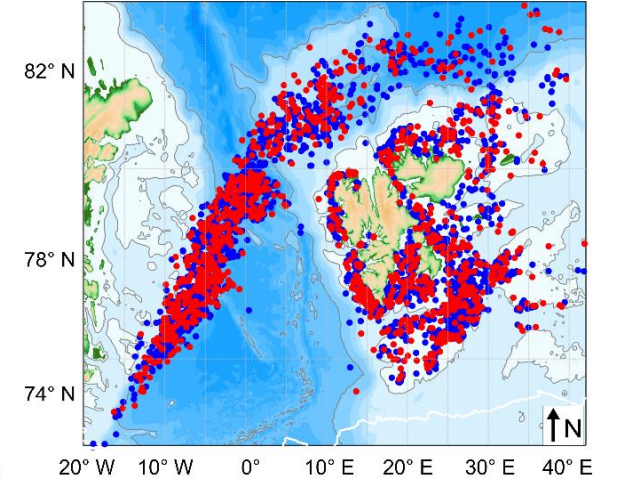
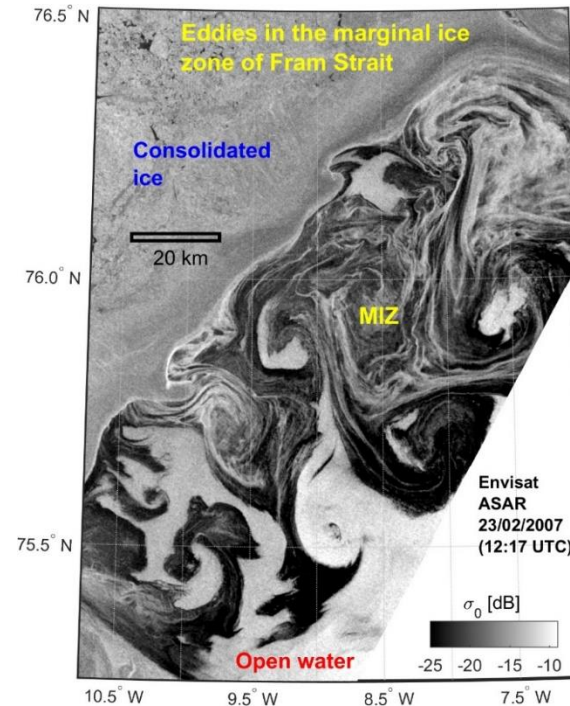
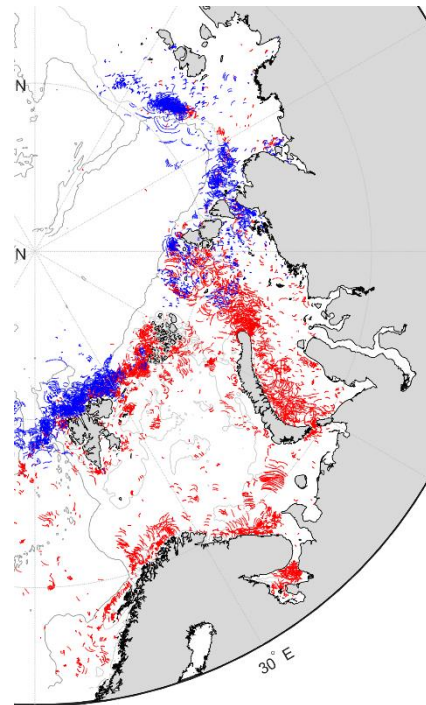
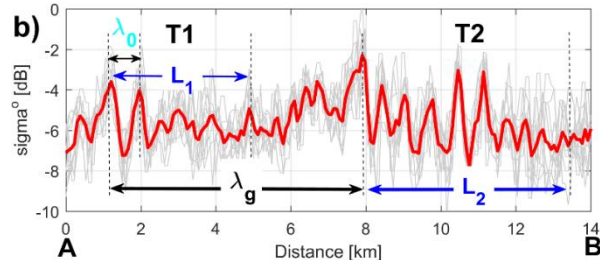
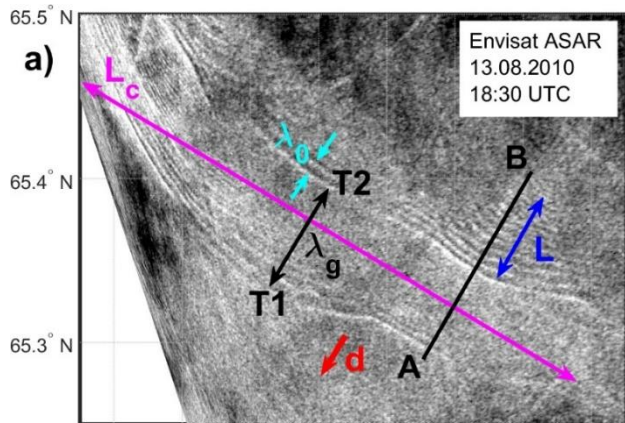
- Продемонстрировать возможности и результаты применения описанного выше подхода для акватории **Карского моря и Обь-Енисейского устьевого региона** на основе **методов, алгоритмов и моделей**, разработанных в **Морском гидрофизическом институте РАН**.

Данные и методы. Спутниковые наблюдения

- Создан набор методов для количественной оценки параметров различных гидрофизических процессов по их поверхностным проявлениям в спутниковых данных высокого разрешения (РСА, оптика, ИК)

Идентификация вихревых структур и их параметров по данным спутниковых РСА

Идентификация внутренних волн и их параметров по данным спутниковых РСА

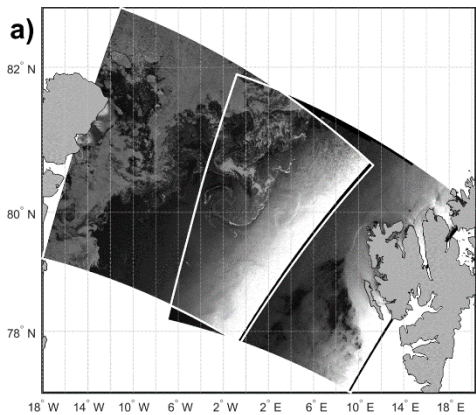


Данные и методы. Спутниковые наблюдения

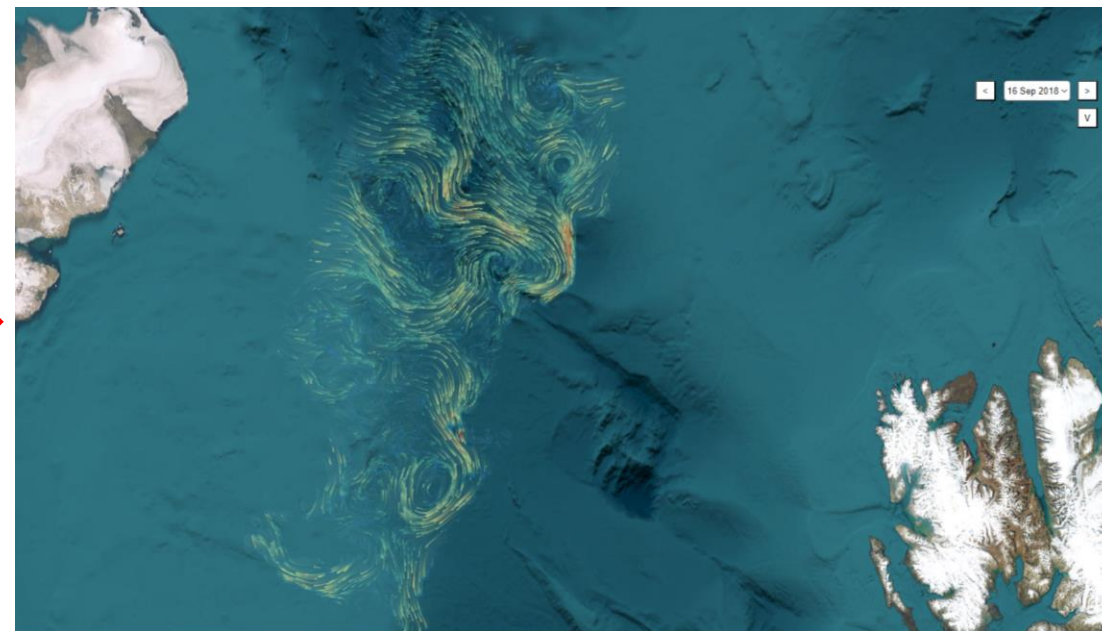
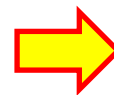
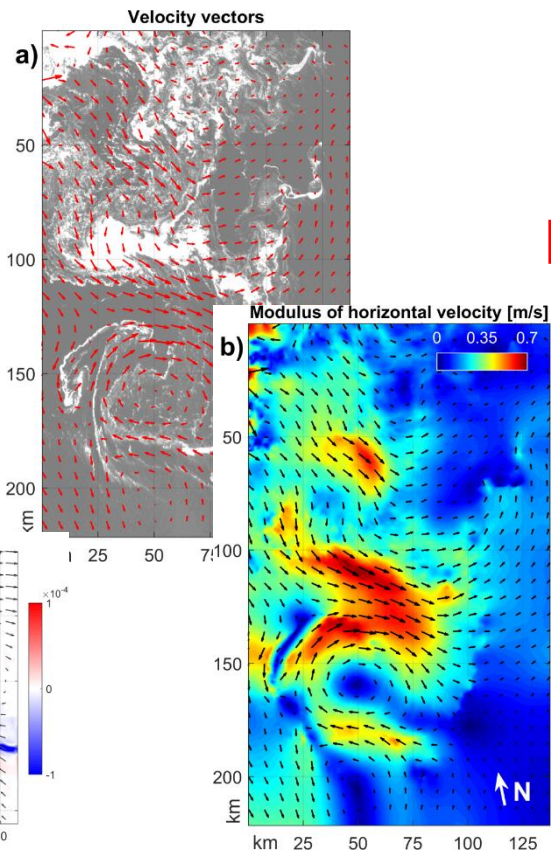
- Создана система автоматизированного расчета, хранения и визуализации полей дрейфа льда по последовательным спутниковым измерениям (РСА, оптика, ИК):

Спутниковые продукты по дрейфу льда в прикромочной зоне в формате NetCDF

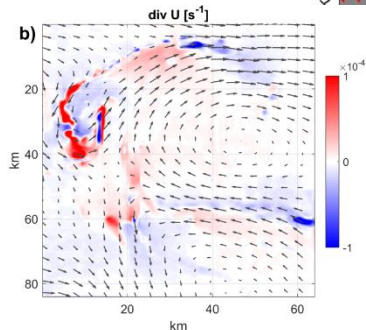
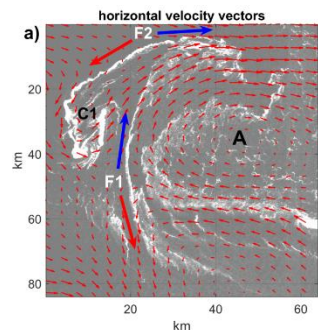
Последовательные РСА-измерения



Расчет скорости дрейфа льда



http://polar-space.ru/arctic_currents/



Данные и методы. Численное моделирование

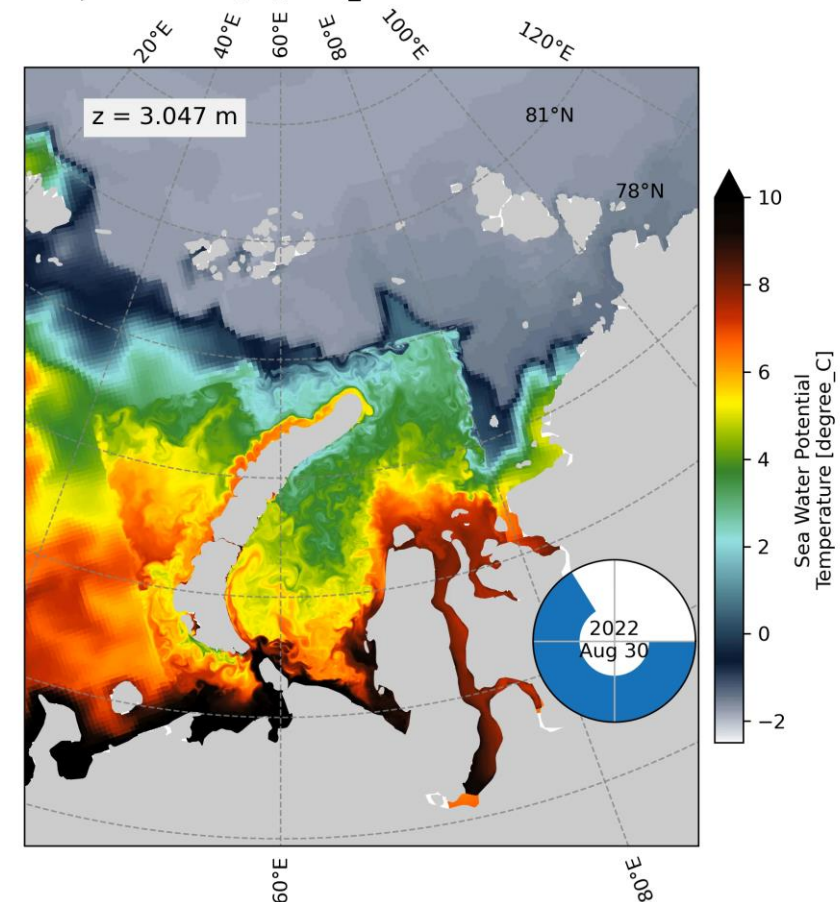
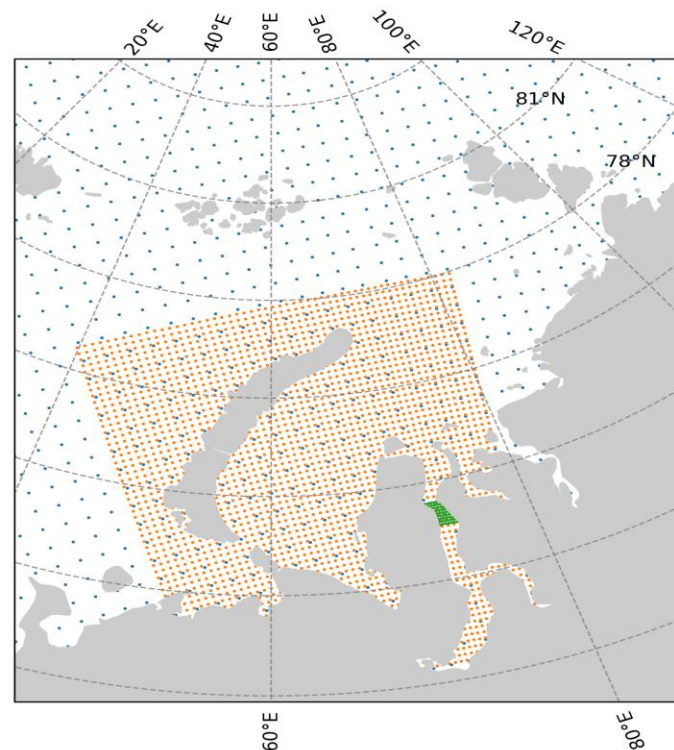
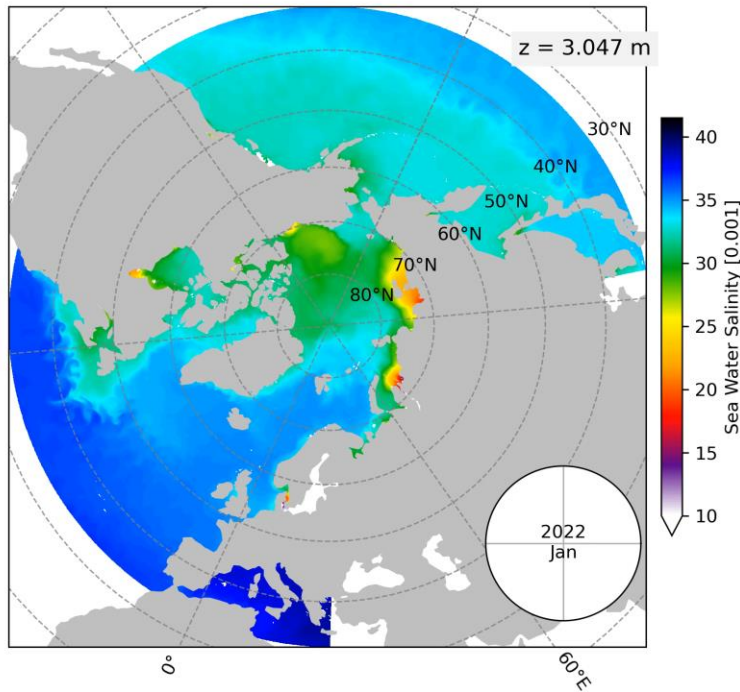
Оперативная система моделирования и прогноза состояния Мирового океана

В МГИ РАН создана система мониторинга, позволяющая оперативно моделировать и прогнозировать состояние всего Мирового океана, Арктики и ее отдельных районов на основе технологии вложенных сеток с пространственным разрешением до 1 км.

Вычислительный
кластер МГИ
(17 Тфлопс)

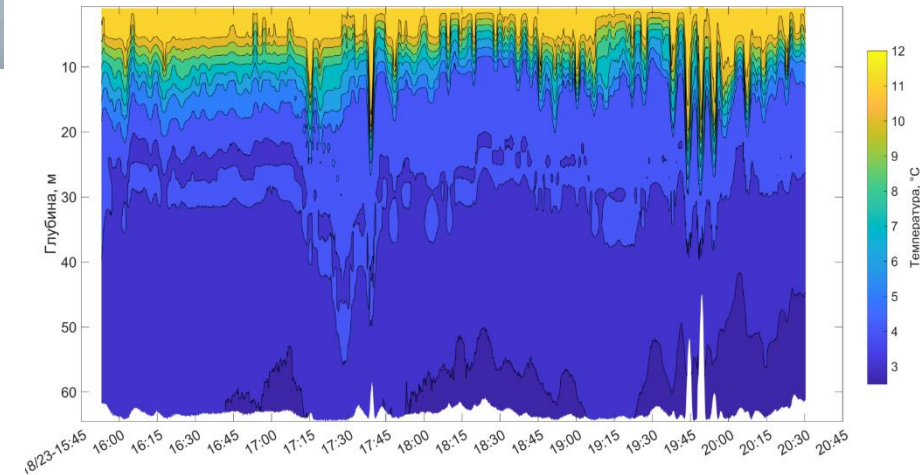
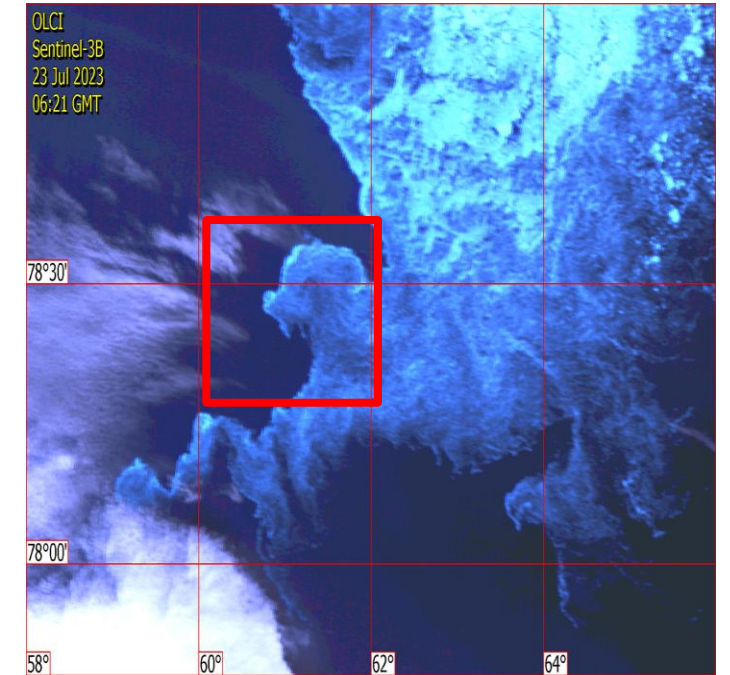
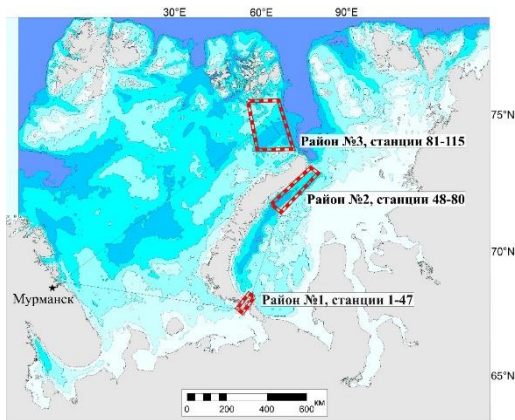
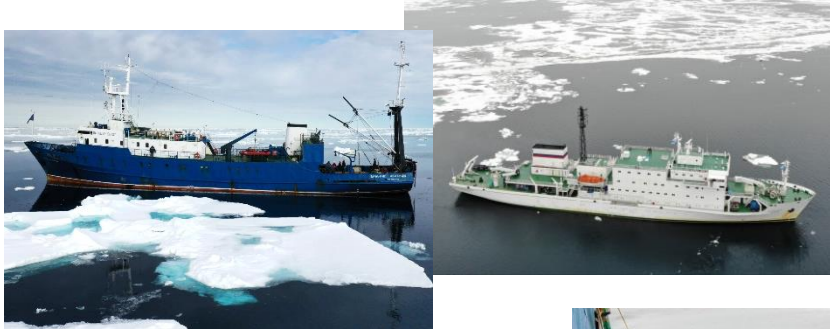


depth = 1.027 [m], time_centered = 2022-12-31T...



Данные и методы. Экспедиционные исследования

- Регулярные экспедиции в арктические моря
- Специальное оборудование (БПЛА, термокосты, CTD/MSS зонды)
- Фокус на исследование высокочастотных и быстропротекающих процессов в безледных районах и ПЛЗ



Данные и методы. Оценка скорости дрейфа льда по БПЛА-съемке

- Создана методика оценки скорости дрейфа льда по видео- и фотосъемке БПЛА

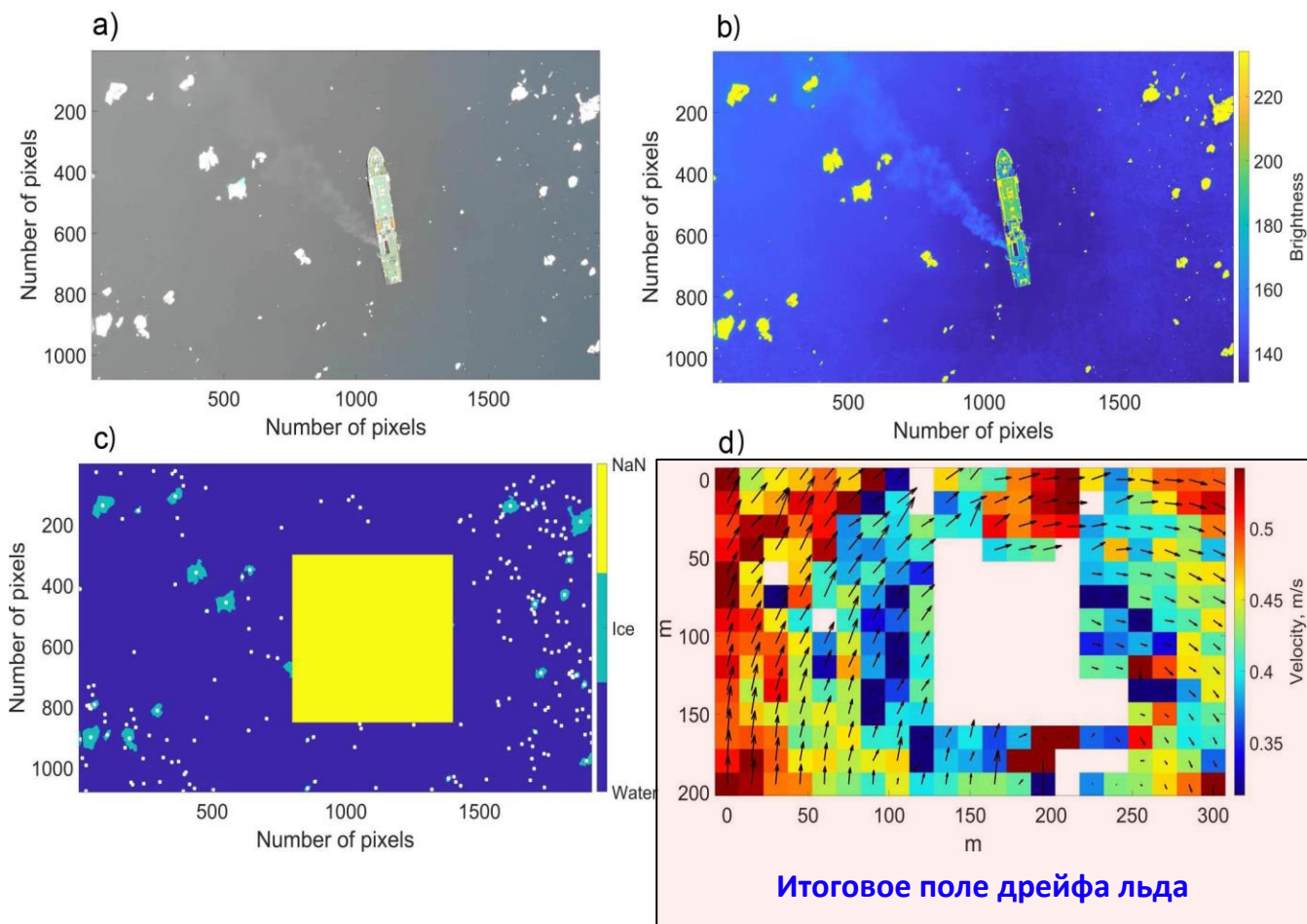


Север Карского моря, август 2021 г.

Фрагмент видеозаписи БПЛА DJI Mavic 2 Pro



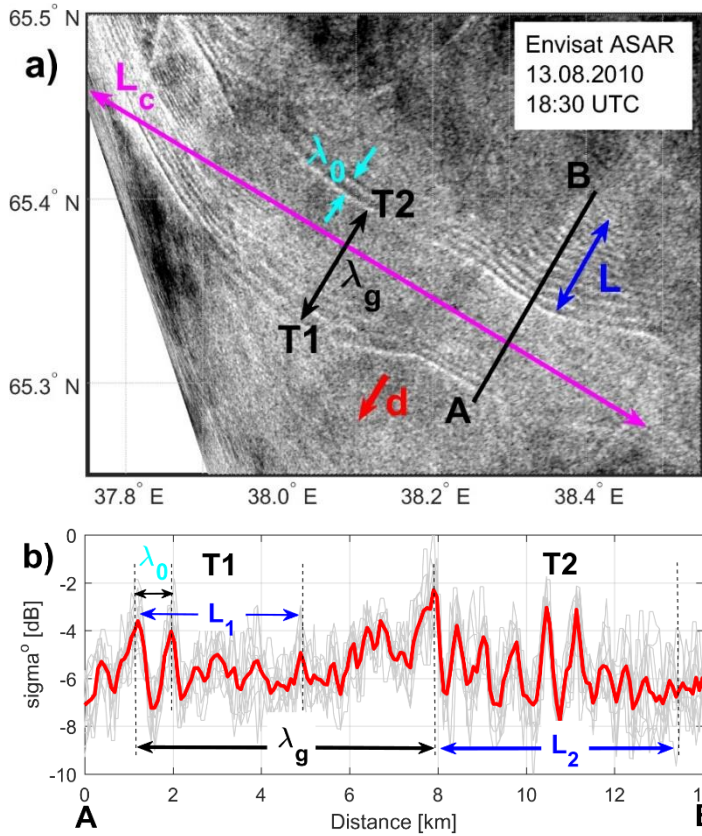
Процедура восстановления линейной горизонтальной скорости перемещения объектов в кадре



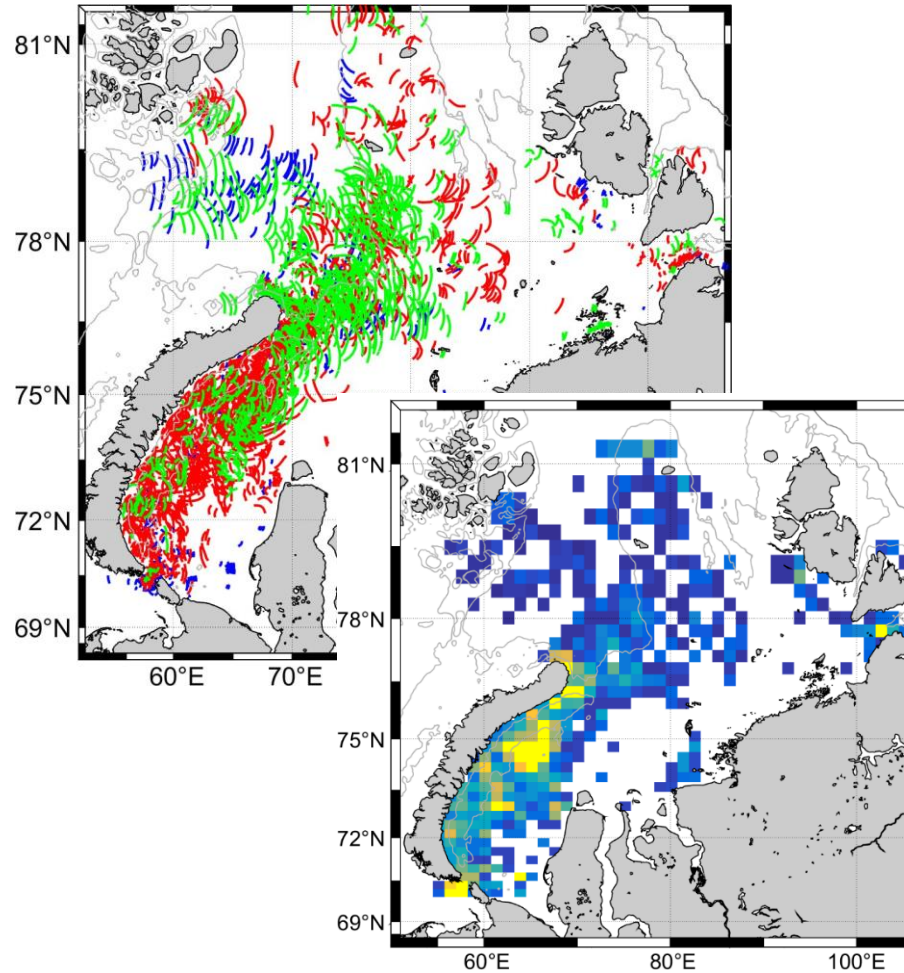
Результаты спутниковых наблюдений. Внутренние волны.

2971 проявлений ВВ зарегистрировано в июле-сентябре 2022 г.

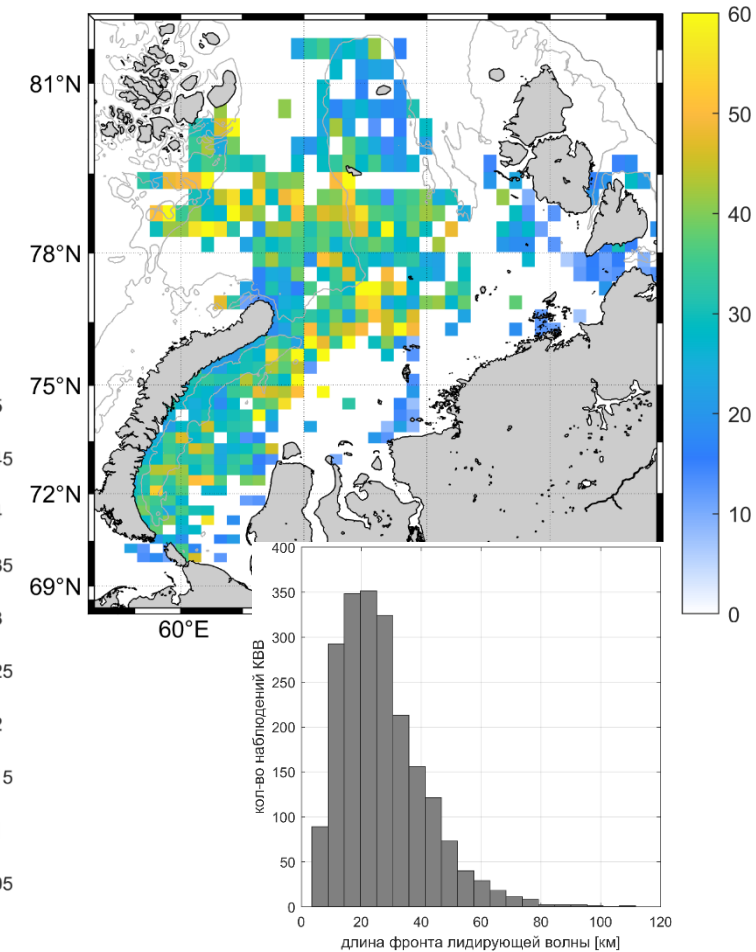
1) Идентификация внутренних волн в спутниковых данных и определение их параметров



2) Районы генерации ВВ

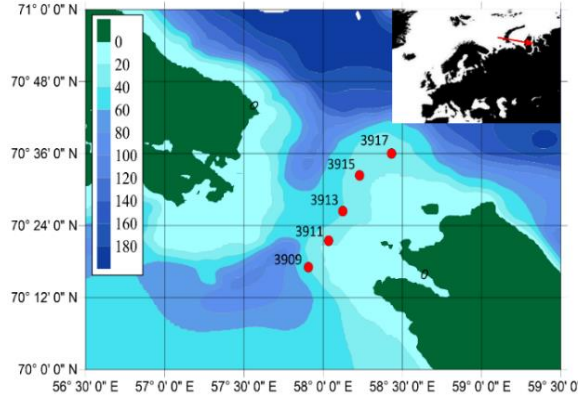


3) Параметры ВВ – Длина волнового фронта [км]



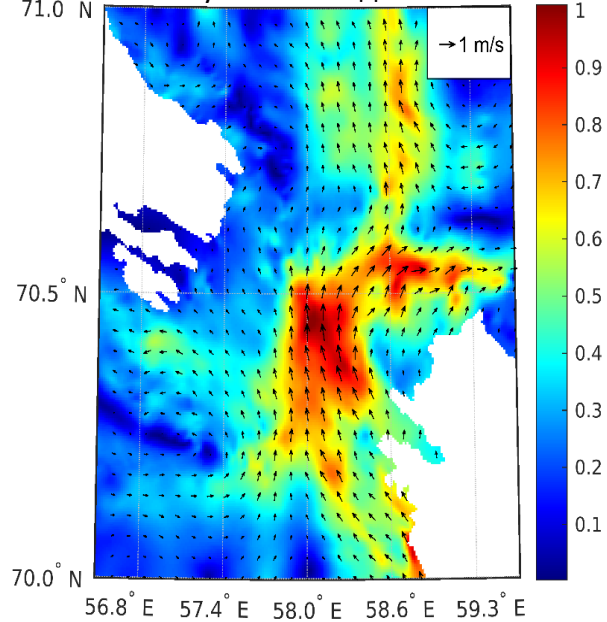
Натурные измерения интенсивных внутренних волн в Карском море

Работы в проливе Карские Ворота в августе 2021 г.

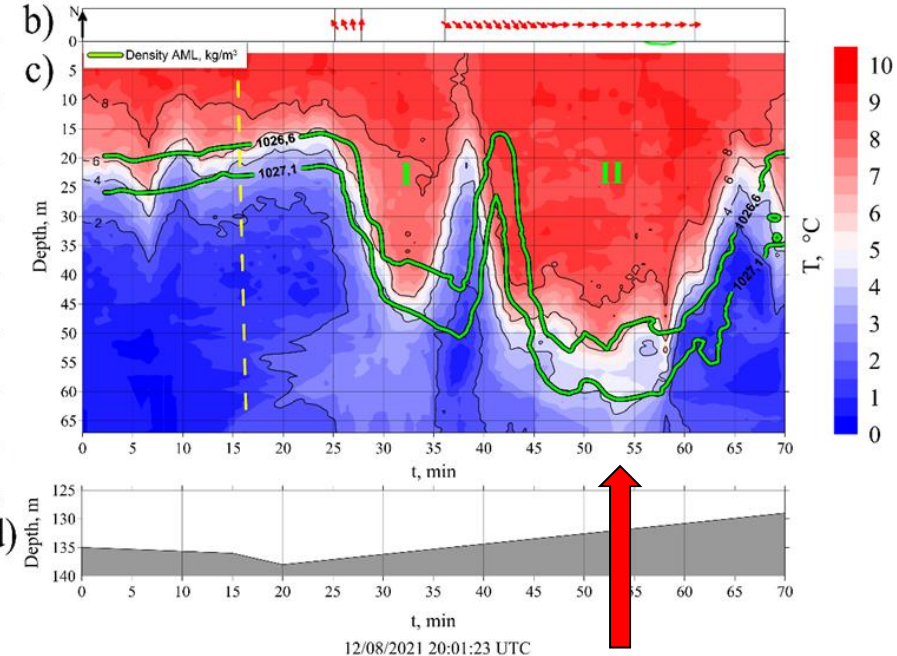
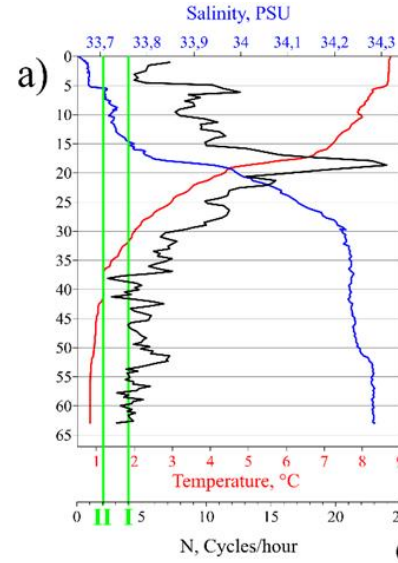
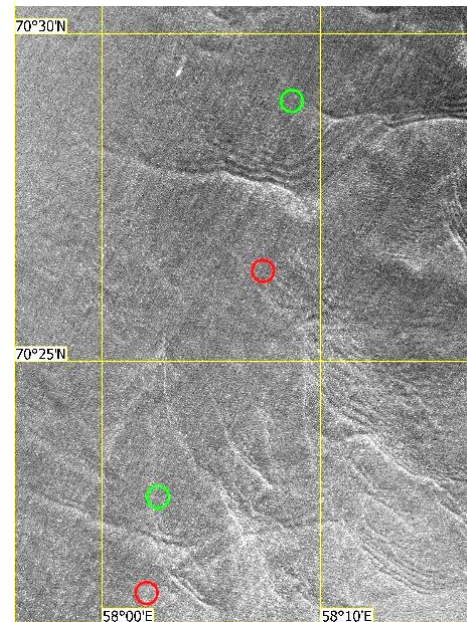


Измерения термопрофилемером TPArctic

Поле поверхностных течений по спутниковым данным



Поверхностные проявления ВВ в данных Sentinel-2

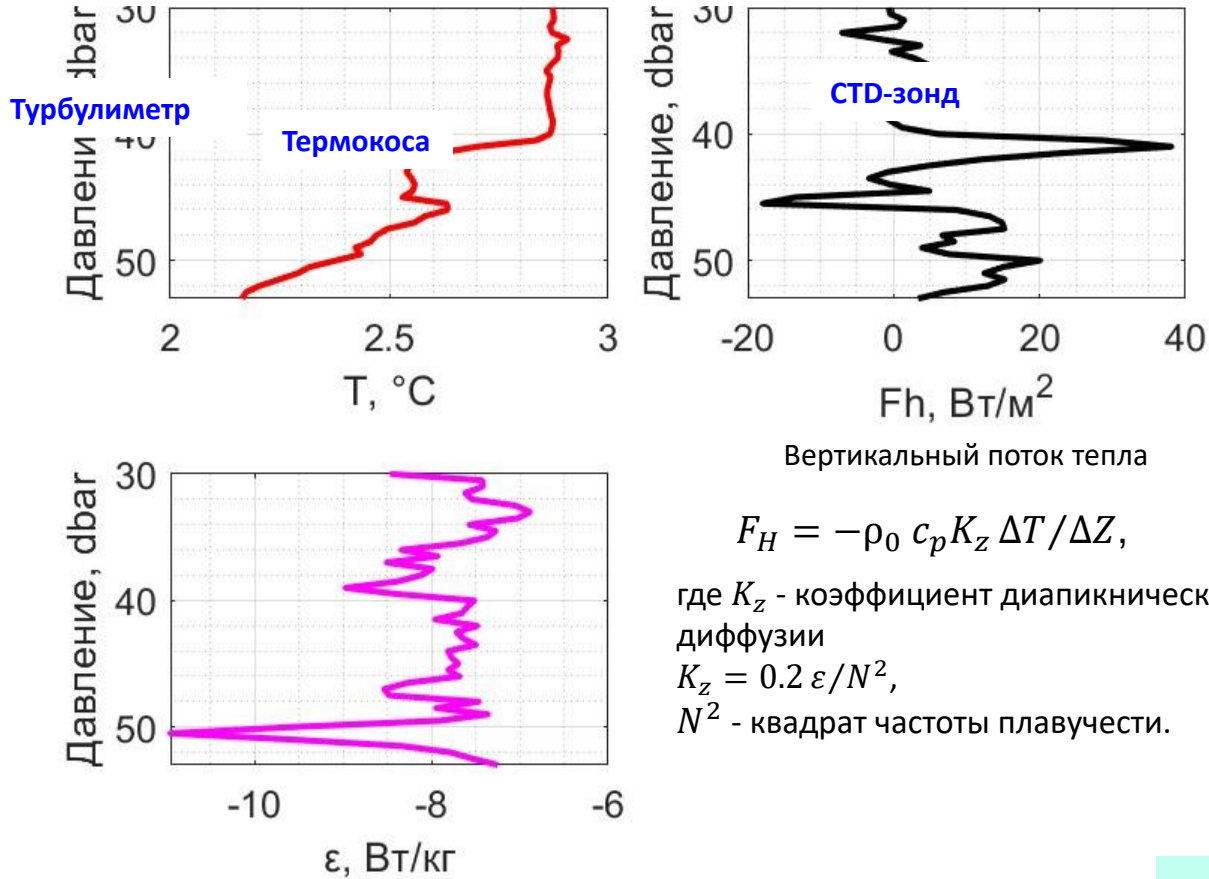


Прохождение интенсивных ВВ высотой до 40 м в слое 10-70 м

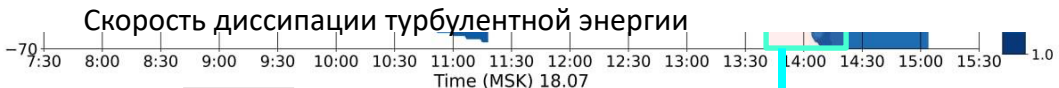
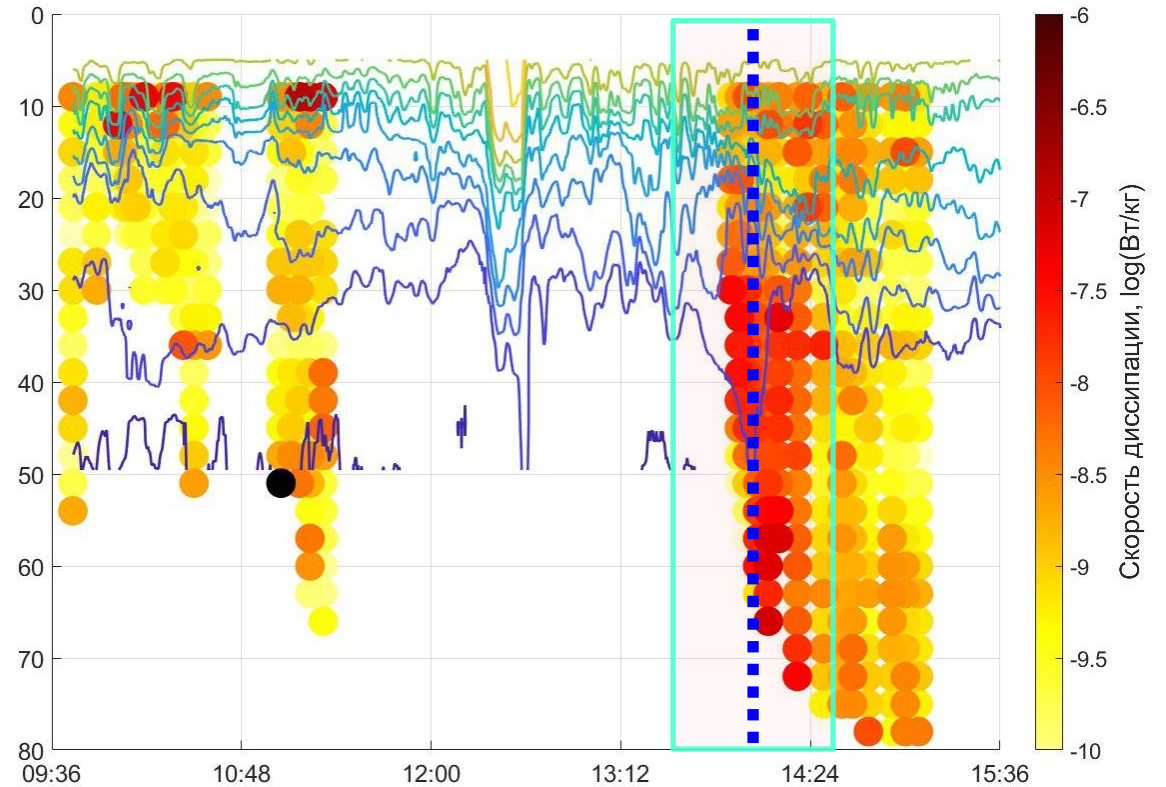
Влияние интенсивных внутренних волн на вертикальное перемешивание

Микроструктурные измерения в проливе Карские Ворота в августе 2023 г.

Непрерывные синхронные измерения в трех точках судна



Колебания изотерм и скорость диссипации ТЭ



$$\varepsilon = 7.5\nu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$$

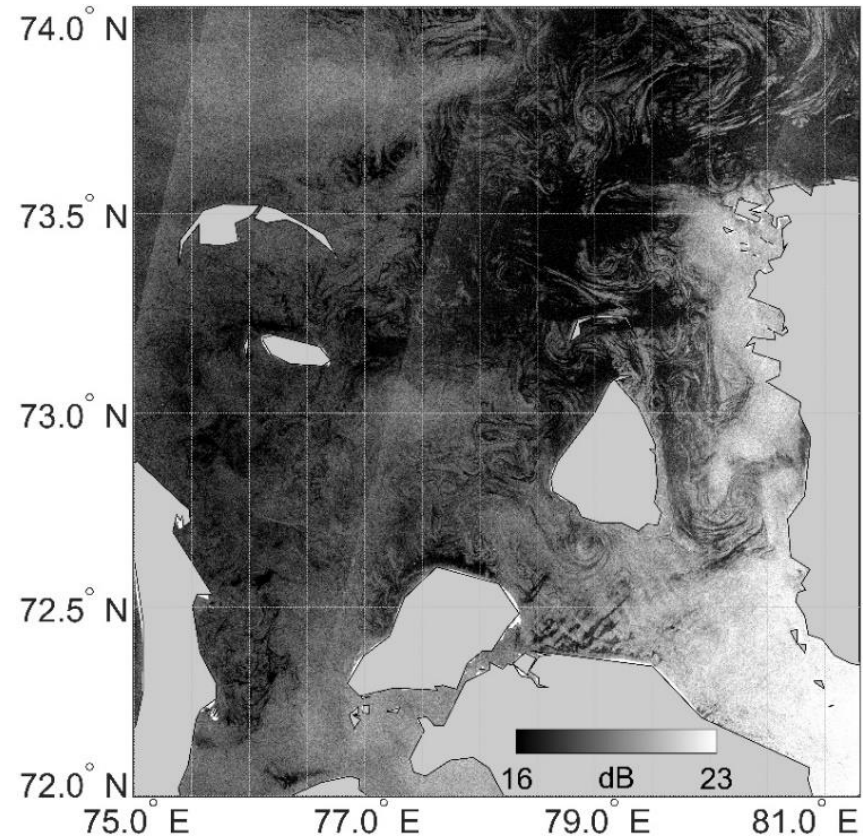
ν - кинематическая вязкость морской воды,
 $\frac{\partial u}{\partial z}$ - вертикальный градиент скорости.

Высота колебаний 20-30 м!

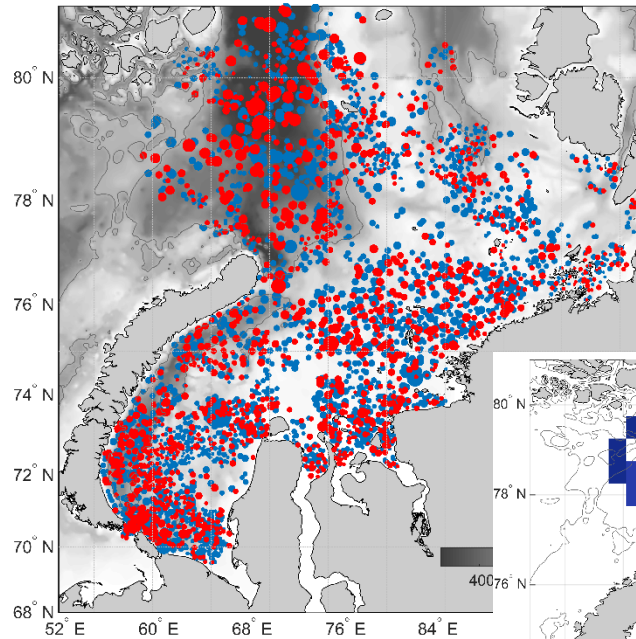
- В момент прохождения интенсивных ВВ значения скорости диссипации турбулентной энергии на **2-3 порядка выше** фоновых значений.
- В этот момент турбулентные потоки тепла достигали **50 Вт/м²**

Результаты спутниковых наблюдений. Вихревые структуры.

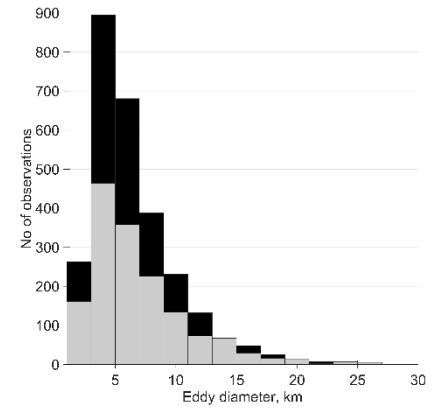
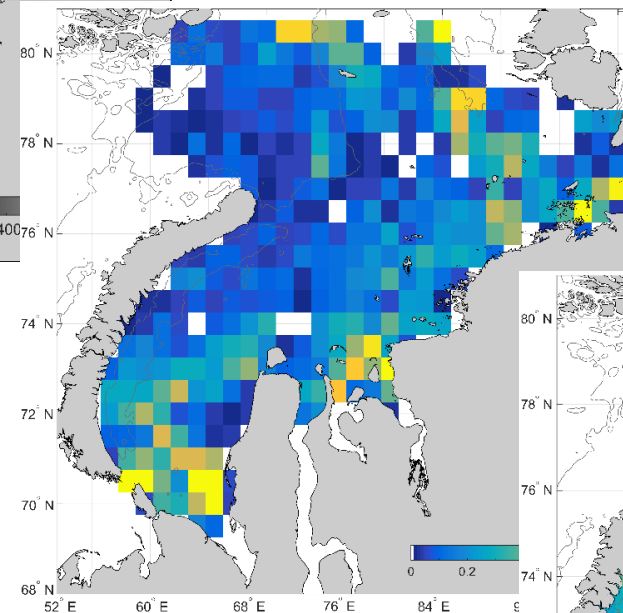
1) Идентификация вихрей на РЛИ



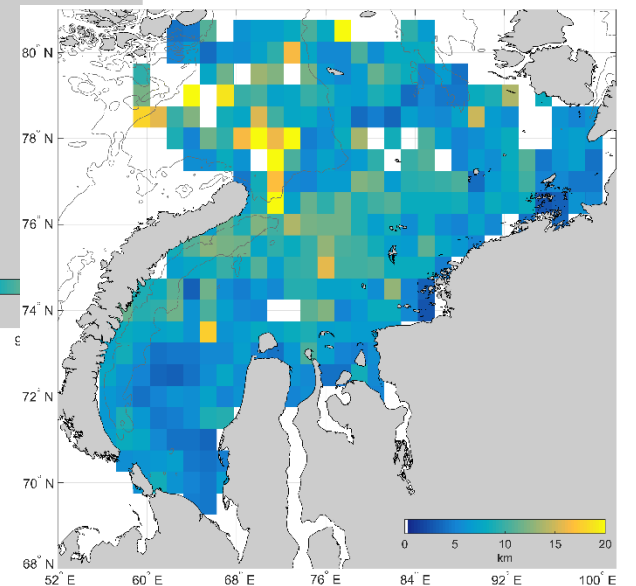
2) Районы вихреобразования



3) Повторяемость



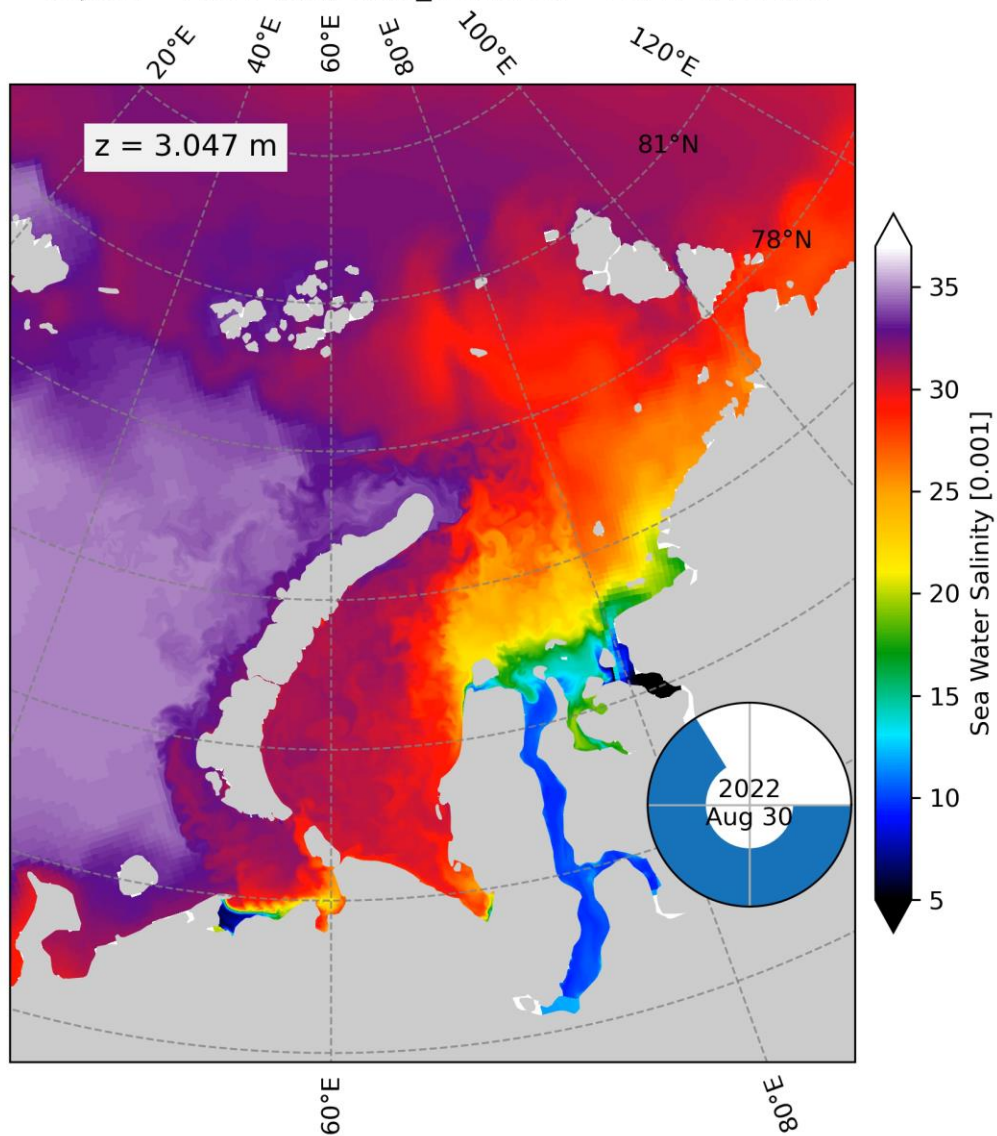
4) Диаметры вихрей



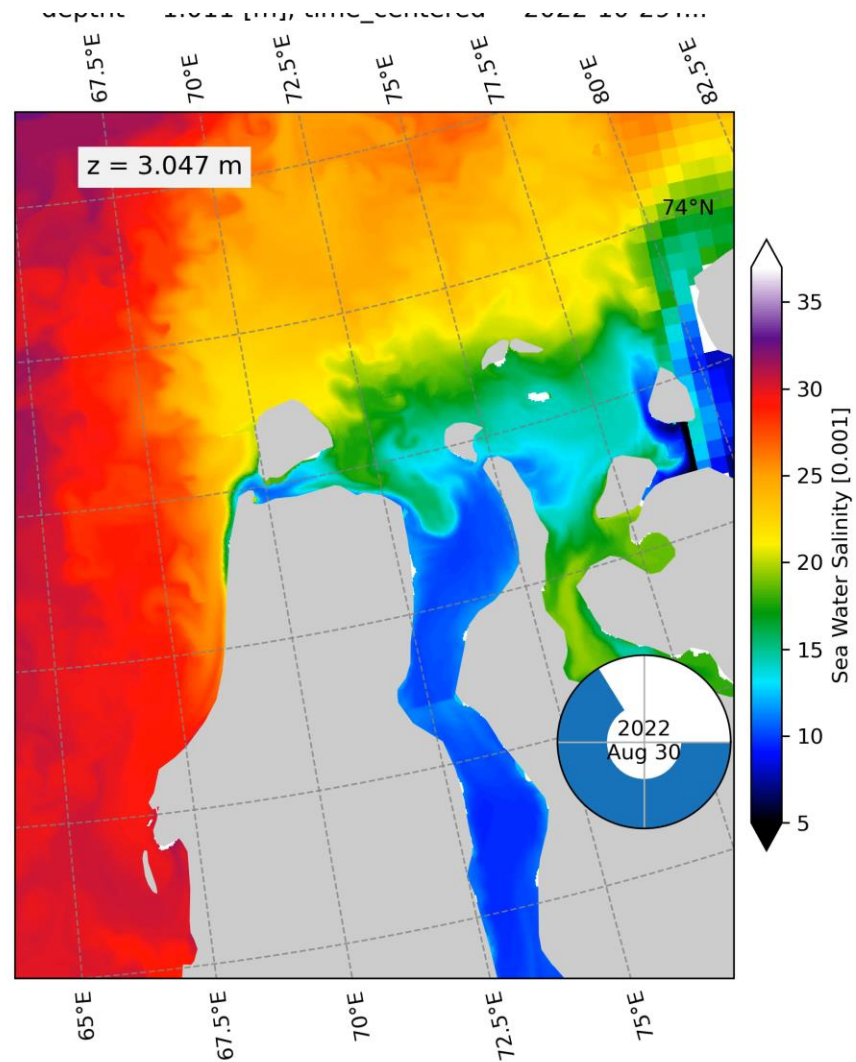
2460 проявлений вихрей
зарегистрировано в августе-
сентябре 2022 г.

Примеры модельных расчетов за август-декабрь 2022 г.

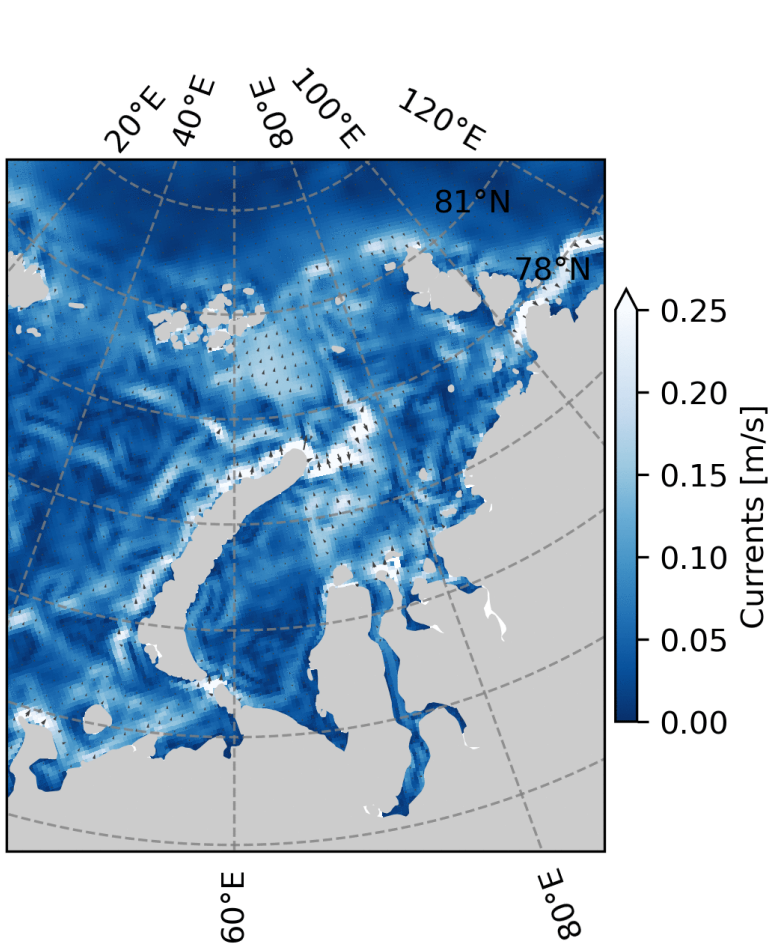
deptht = 1.027 [m], time_centered = 2022-12-31T...



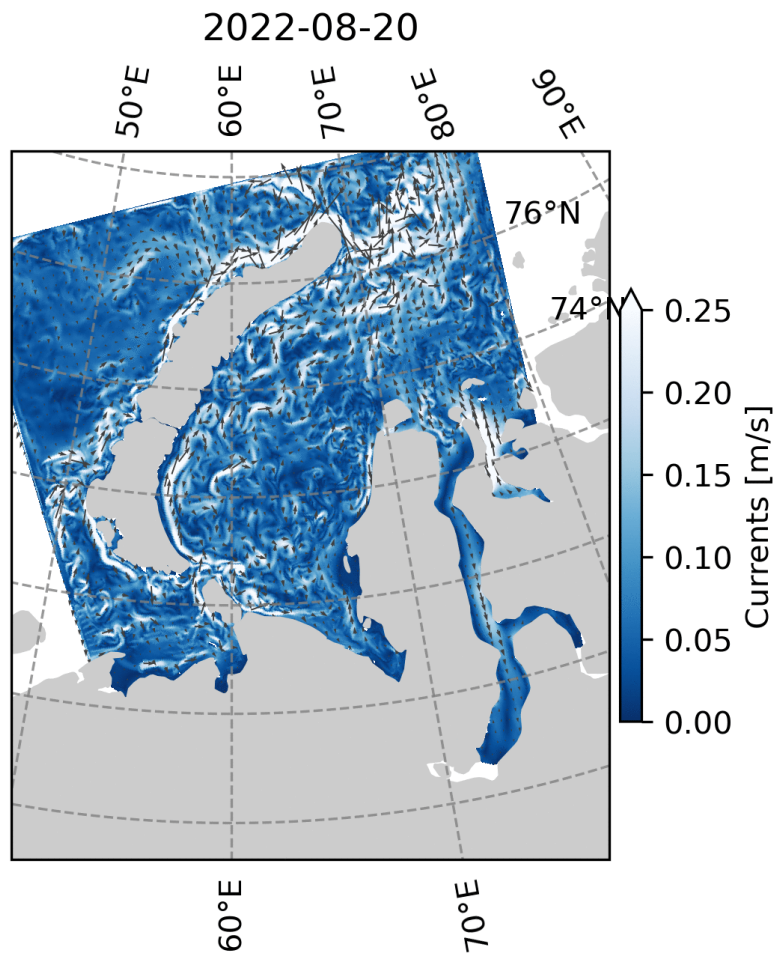
Детализация для Енисейского
устьевоего региона



Результаты модельных расчетов за август-октябрь 2022 г.

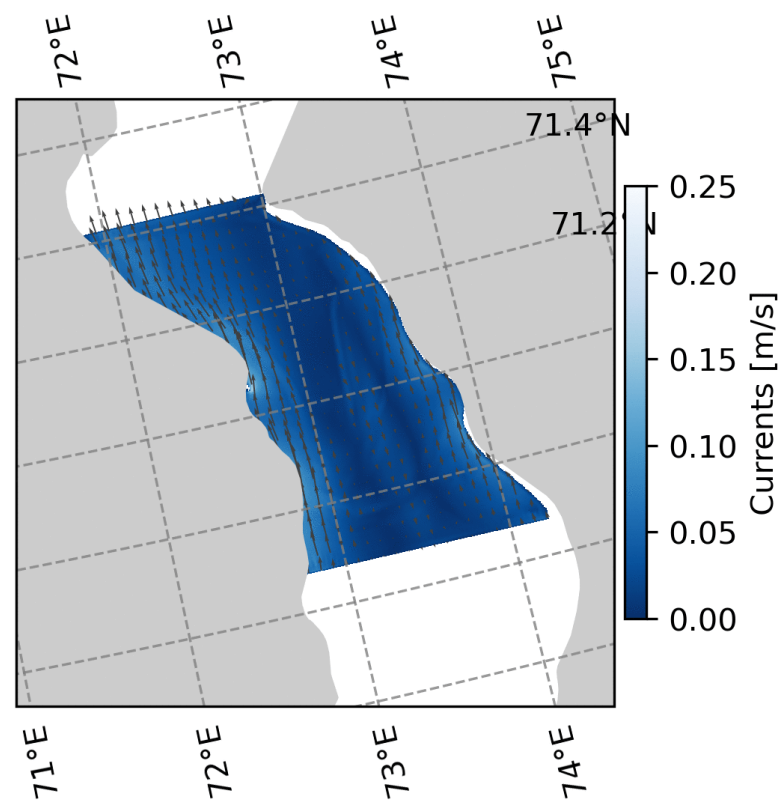


Разрешение 10 км



Разрешение 2 км

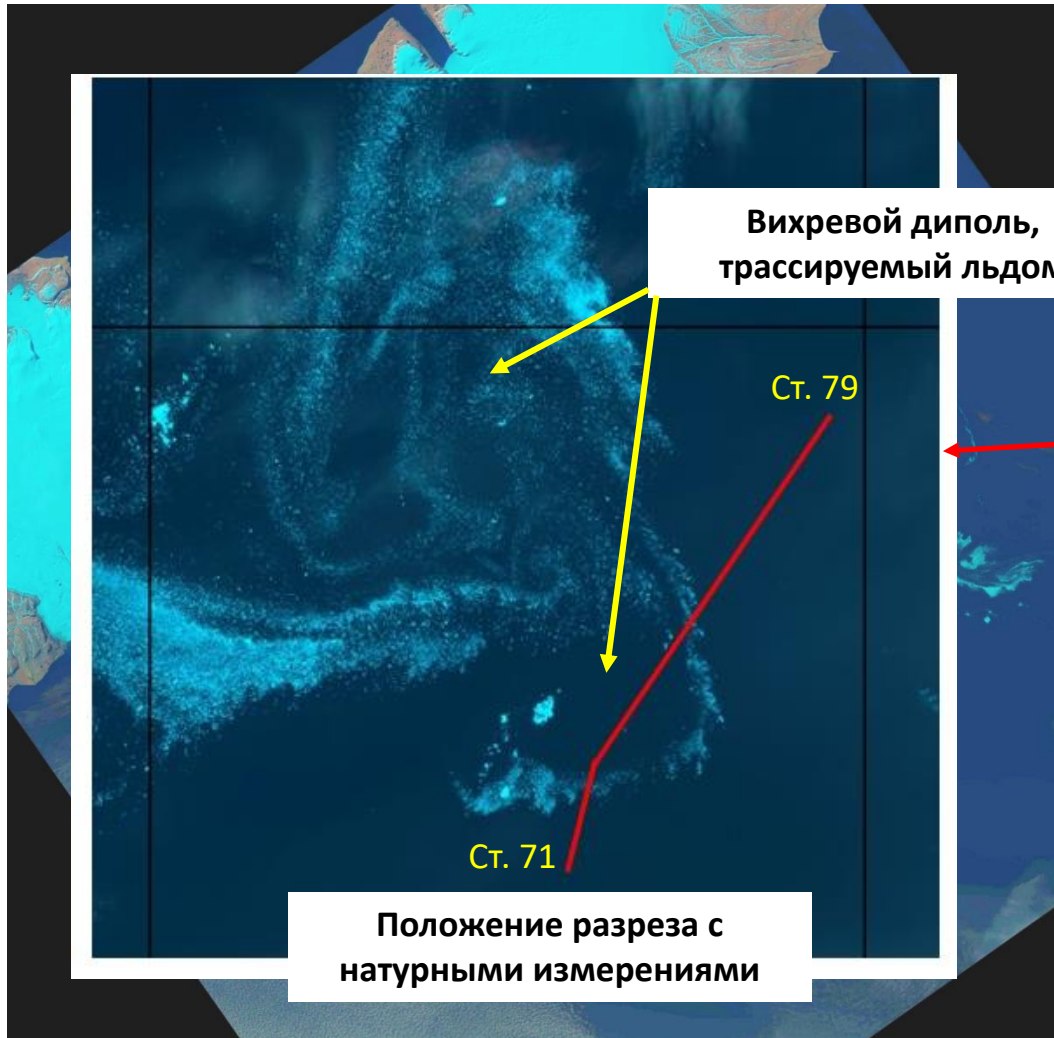
Детализация для района терминала
Утренний



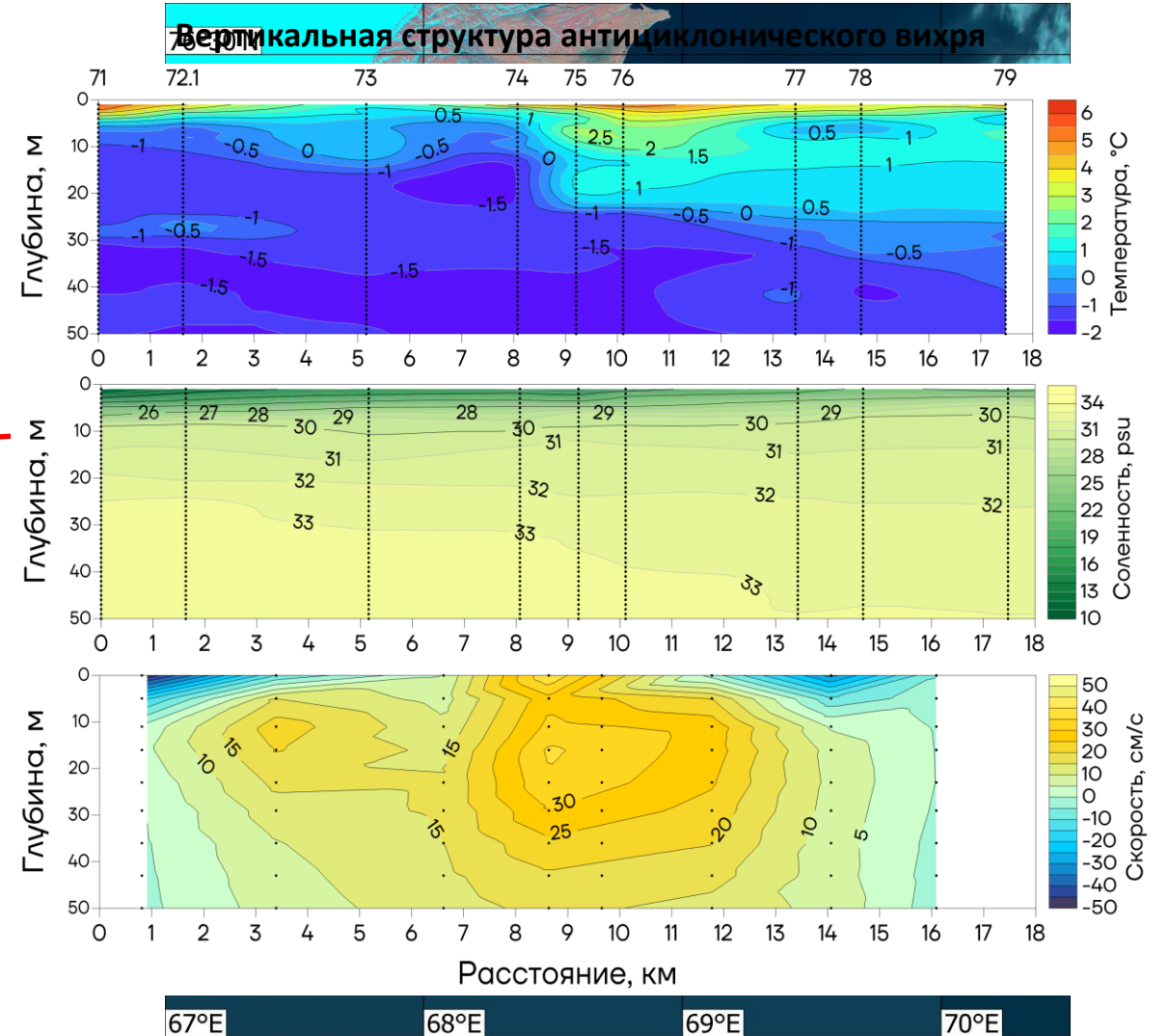
Разрешение 1 км

Натурные измерения в вихревых структурах Карского моря в июле 2023 г.

Снимок Landsat-8 за 23.07.2023

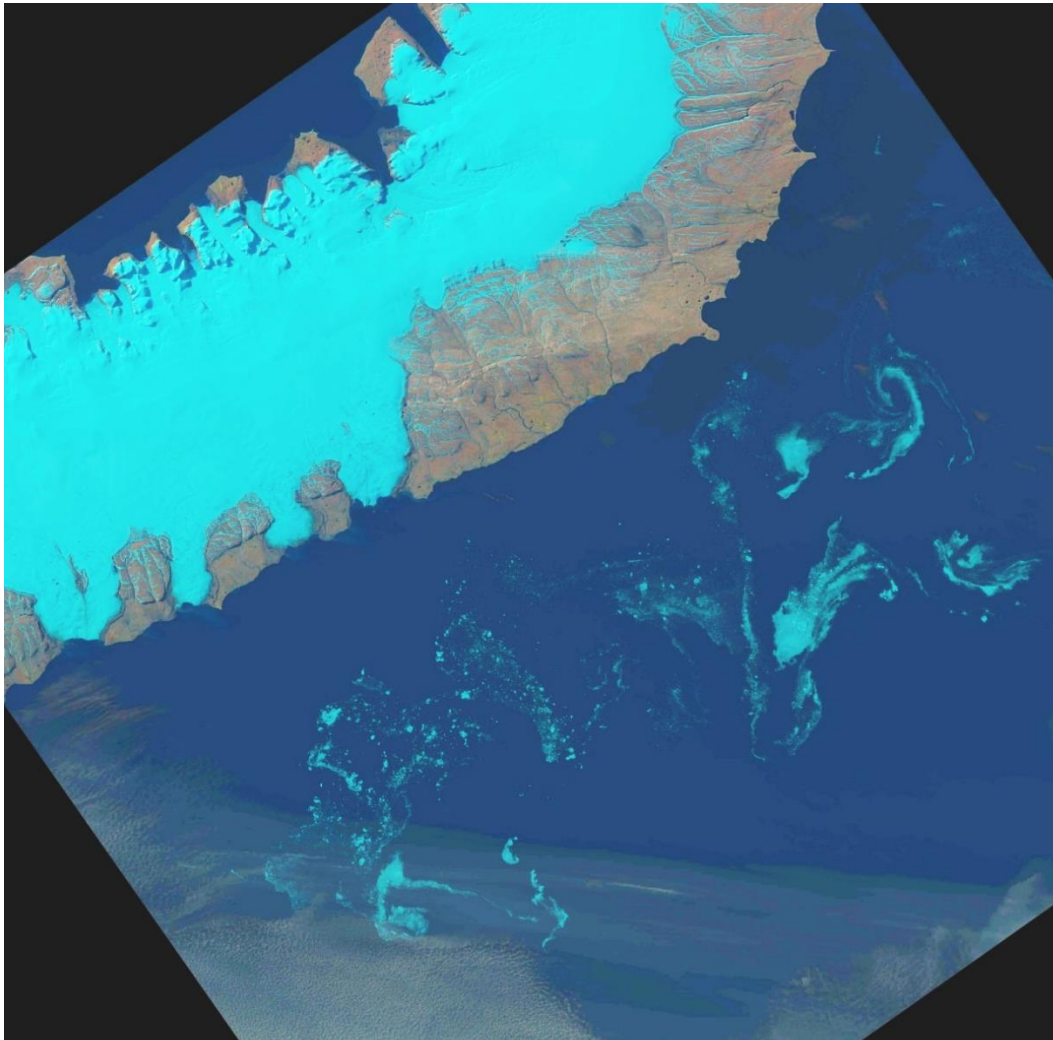


Снимок Sentinel-2B за 24.07.2023

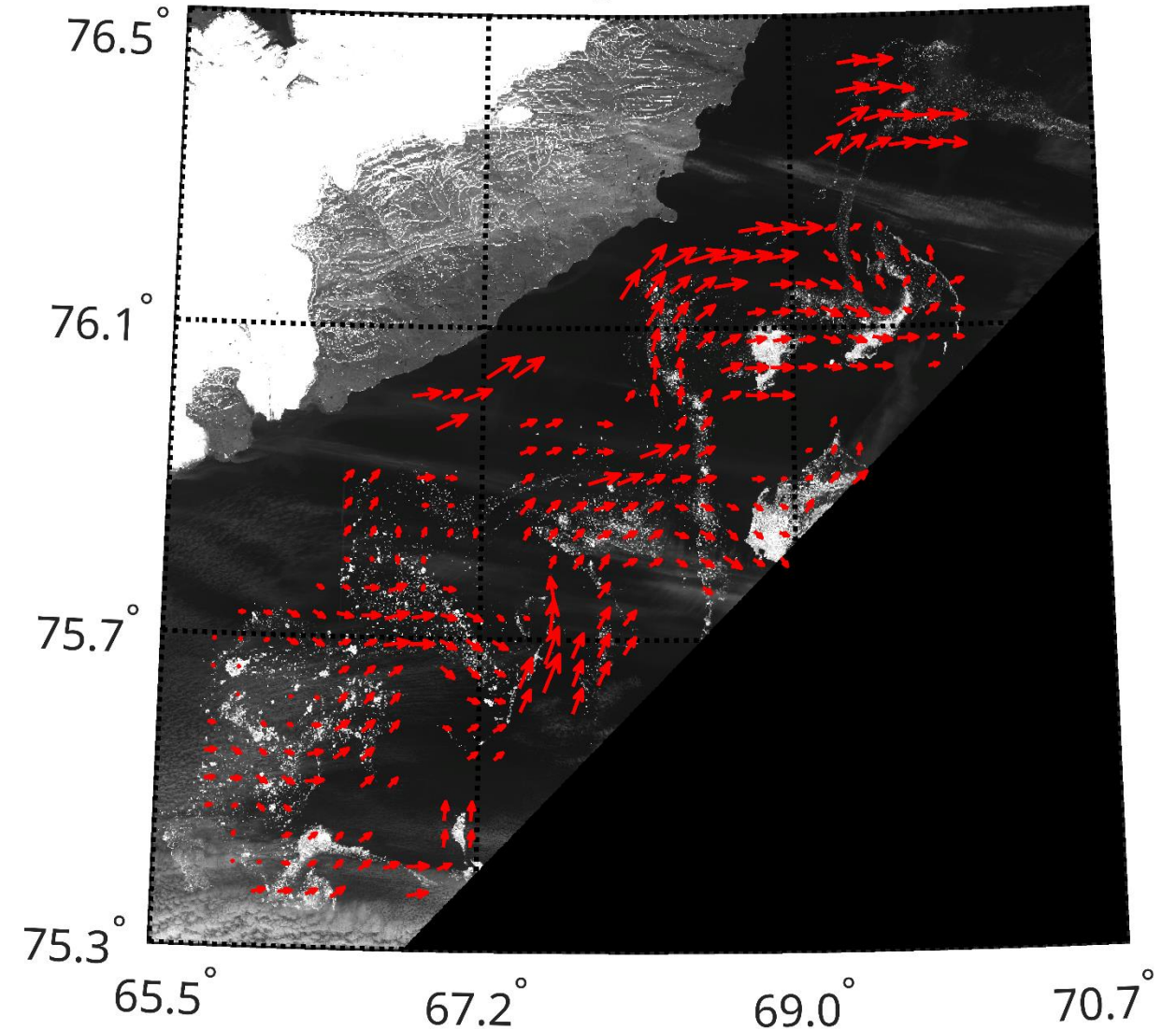


Оценки скорости дрейфа льда под влиянием вихрей по спутниковым данным высокого разрешения

Снимок Landsat-9 за 23.07.2023, 16:59 UTC

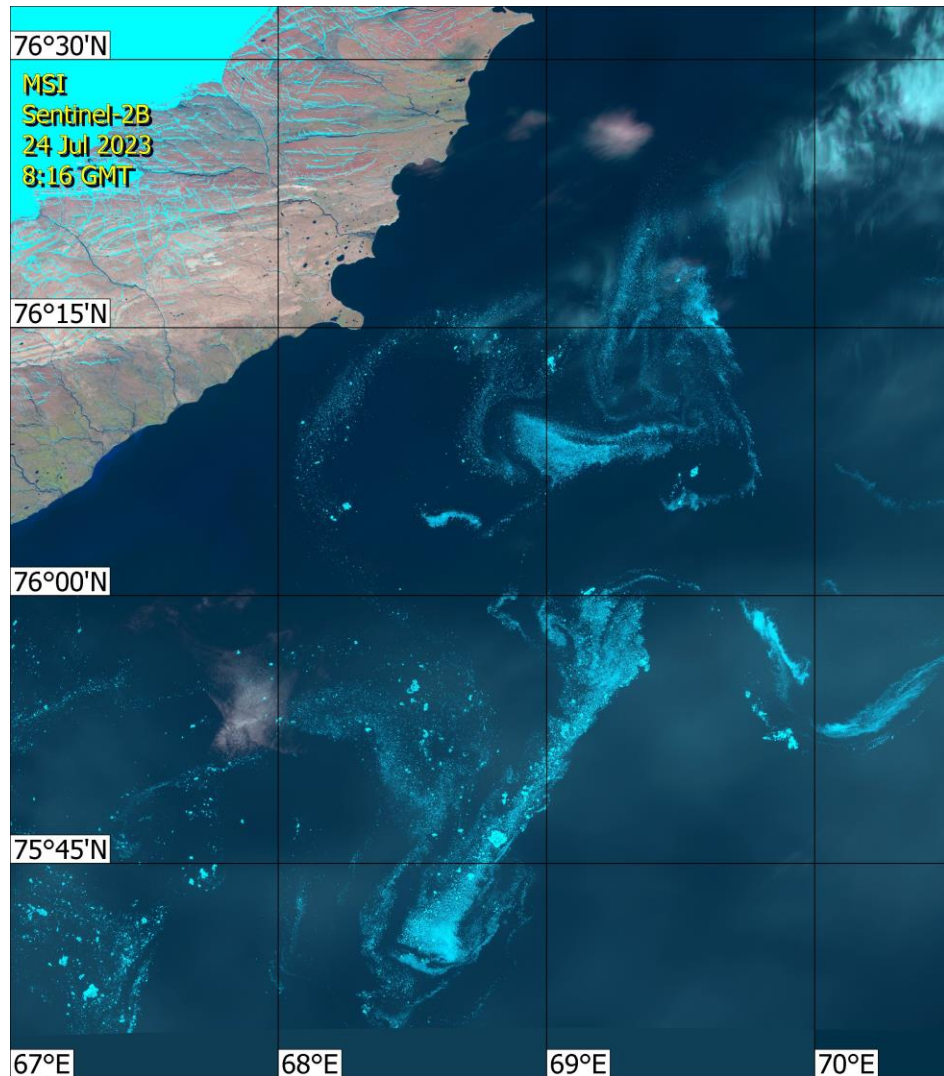


Sentinel-2 23-Jul-2023 08:46:09

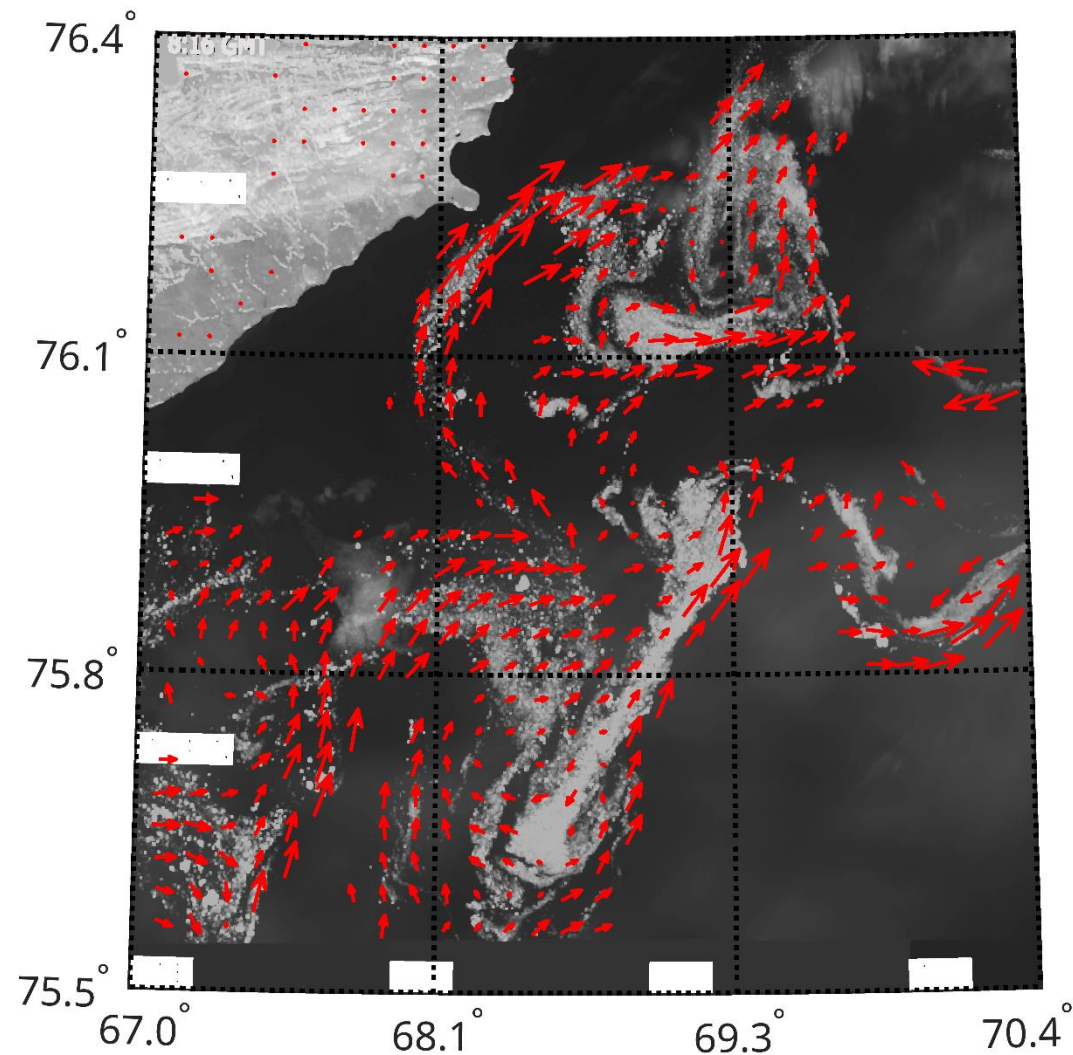


Оценки скорости дрейфа льда под влиянием вихрей

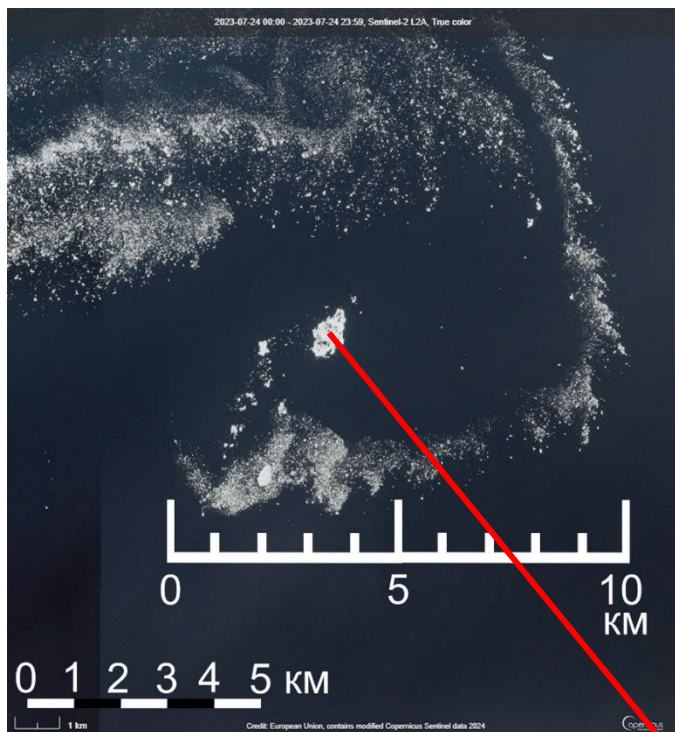
Снимок Sentinel-2B за 24.07.2023



Поле скорости дрейфа льда по квазисинхронным данным Landsat-8 и Sentinel-2B за 24.07.2023

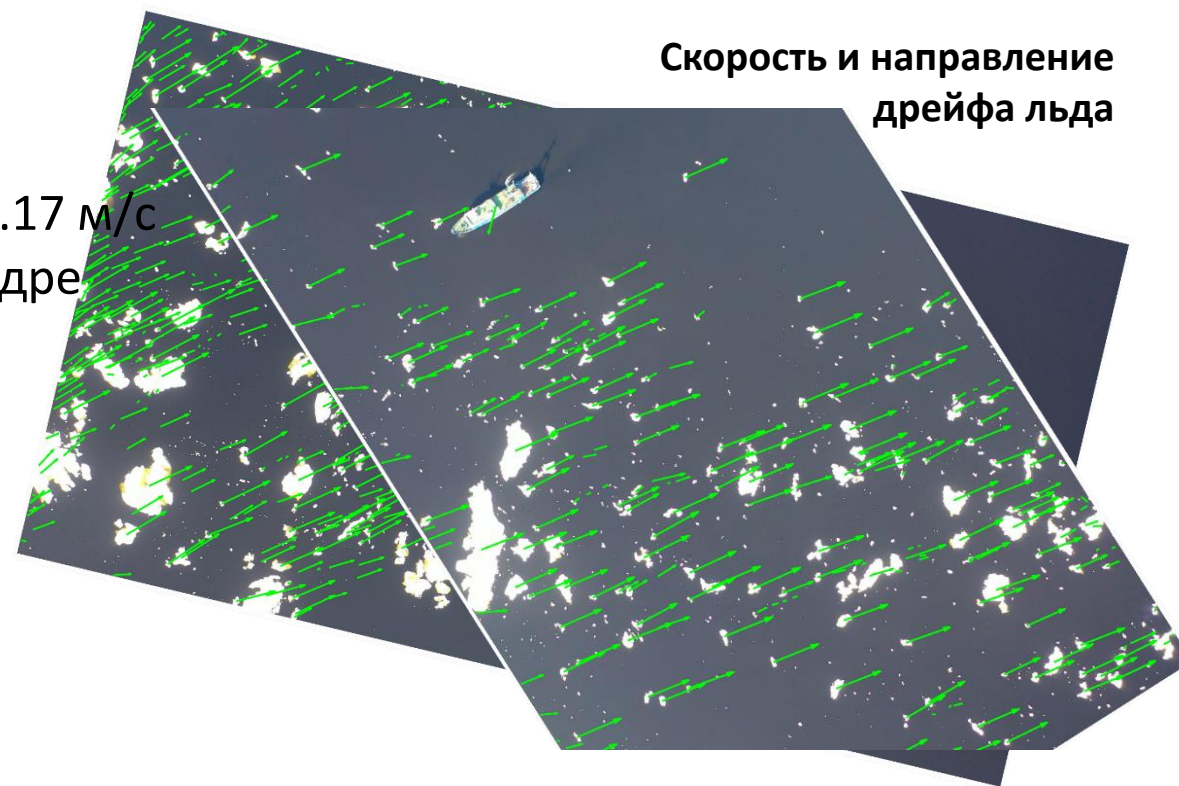


Оценки скорости дрейфа льда под влиянием вихрей на основе БПЛА



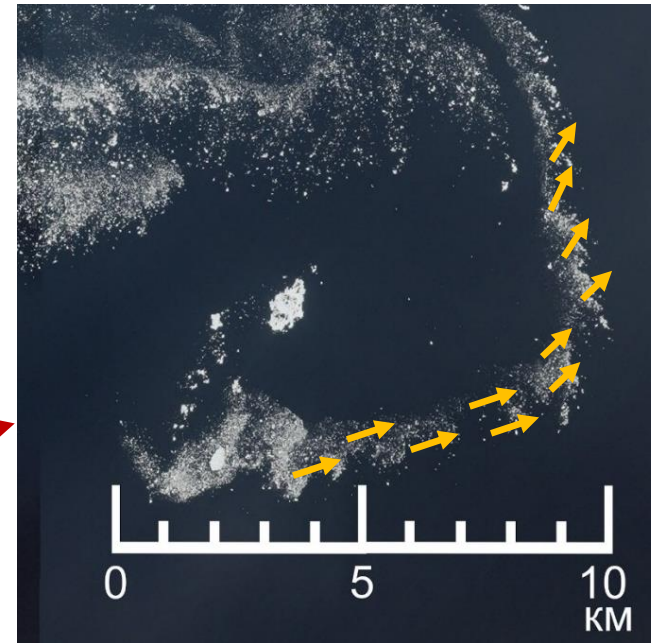
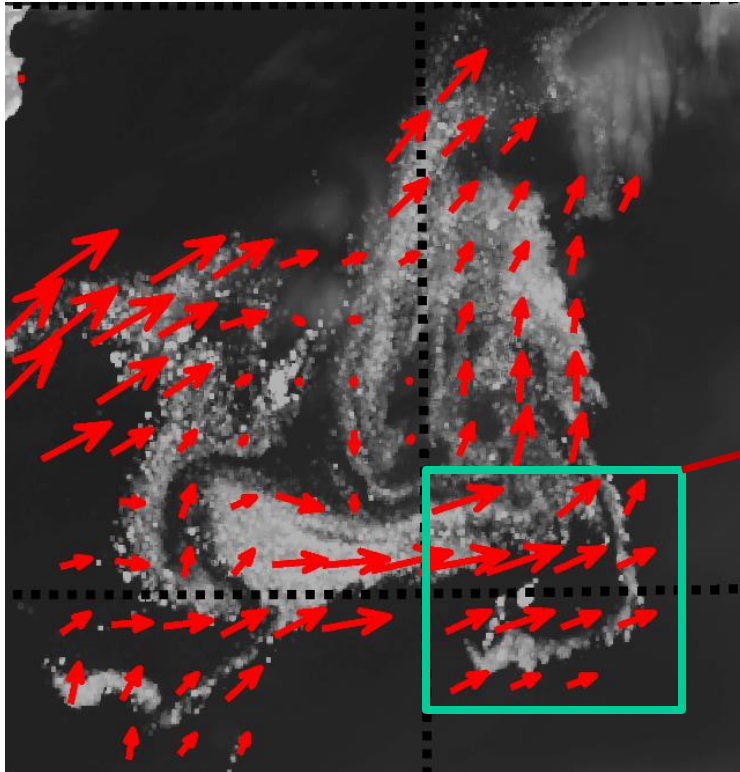
Тонна №51

- Средняя скорость 0.17 м/с
- Максимальная скорость в кадре 40168 м/с
- Направление дрейфа ВСВ кадре 8%
- Направление ВСВ



Оценки скорости дрейфа льда по спутниковым и БПЛА-измерениям

Спутниковые данные



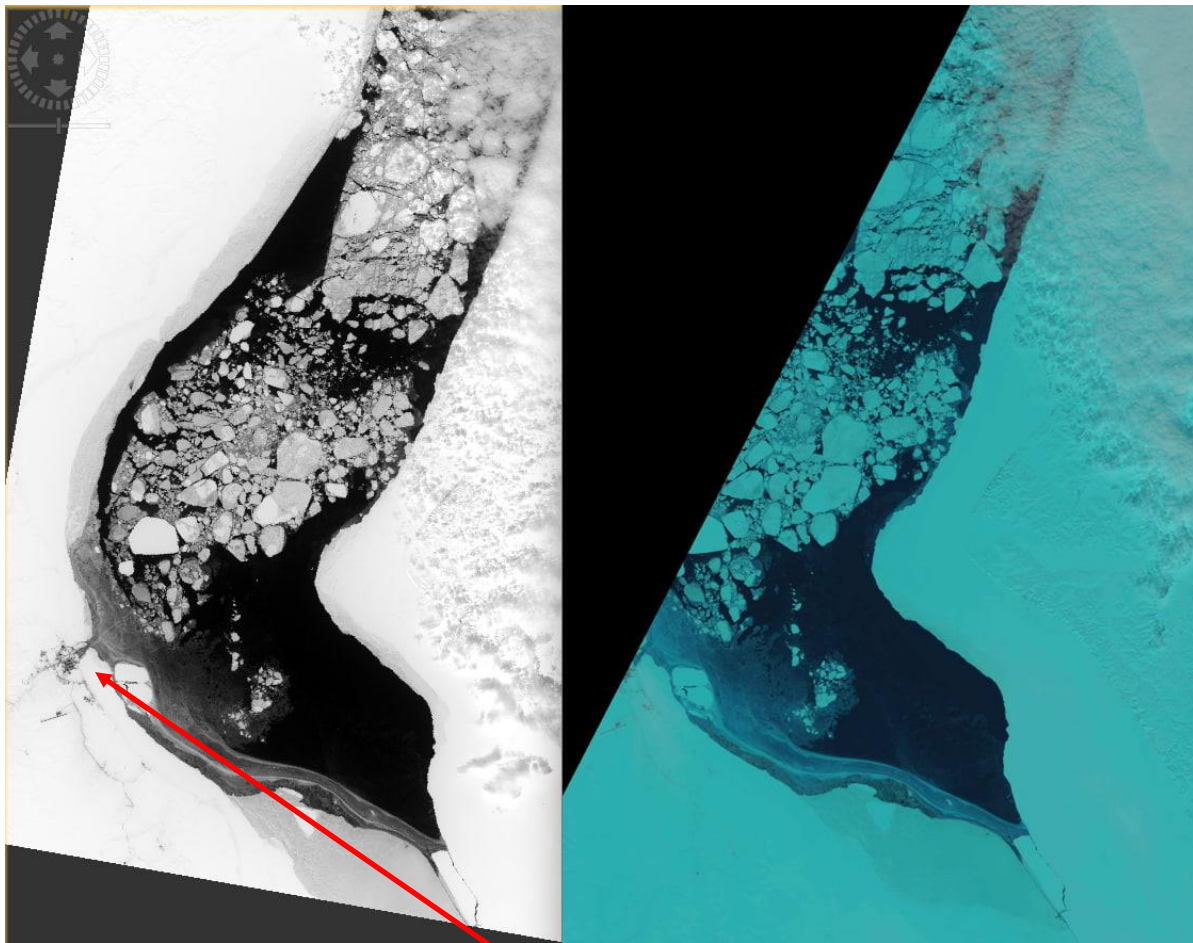
БПЛА



- Несмотря на антициклоническую «форму» вихря в момент наблюдений имело места сильная горизонтальная адвекция дрейфующего льда восточного направления
- Направление дрейфа льда по спутниковым данным и БПЛА фактически полностью совпадает

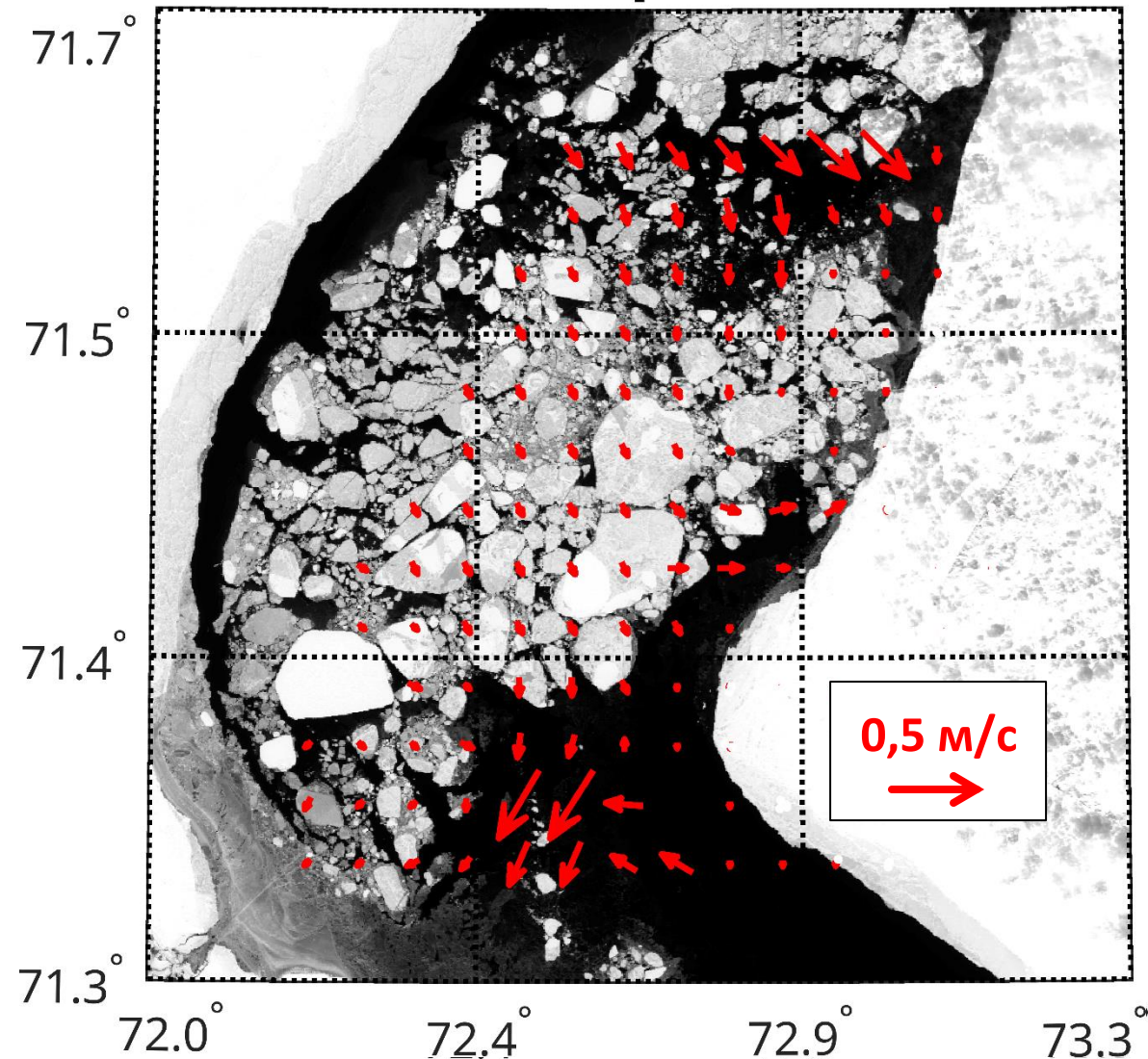
Оценка скорости дрейфа вблизи порта Сабетто

Квазисинхронные измерения
Sentinel-2 и Landsat-8 за 30.04.2023



Порт Сабетто

Sentinel-2 30-Apr-2023 07:26:19



Заключение

- Продемонстрированы результаты применения комплексного подхода по анализу быстропотекающих и высокочастотных процессов в морской среде на основе методов, алгоритмов и моделей, разработанных в МГИ РАН.
- Разработанный комплекс инструментов может быть использован для оперативного прогноза и мониторинга гидрофизических условий, ледовой обстановки и распространения загрязнений в Карском море и Обь-Енисейском устьевом регионе, включая районы добычи и транспортировки углеводородов, а также районы интенсивного судоходства по трассе Северного морского пути.



Лаборатория морских полярных исследований
Морской гидрофизический институт РАН
ik@mhi-ras.ru



<https://polar-space.ru>

Спасибо за внимание!