Структура и динамика антициклонического вихря в прикромочной ледовой зоне Карского моря

Владимир Андреевич Добродий

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* Контакт: Добродий Владимир Андреевич, dobrodii.v@mhi-ras.ru

Северо-восток Карского моря

Антициклонический вихрь

Мультисенсорные спутниковые данные

25 июля - 6 августа 2024 г.

Введение: роль океанических вихрей в Арктике

Влияние вихрей на морской лед

- **Механическое воздействие** на ледовую кромку
- **Горизонтальная адвекция** льда
- **Вертикальный перенос тепла** из глубинных слоев

Manucharyan & Thompson, 2017; Horvat & Tziperman, 2018

Накопление и таяние льда

- Антициклоны: аккумуляция льда в **центре**
- Циклоны: аккумуляция льда на **периферии**

Kozlov & Atadzhanova, 2022

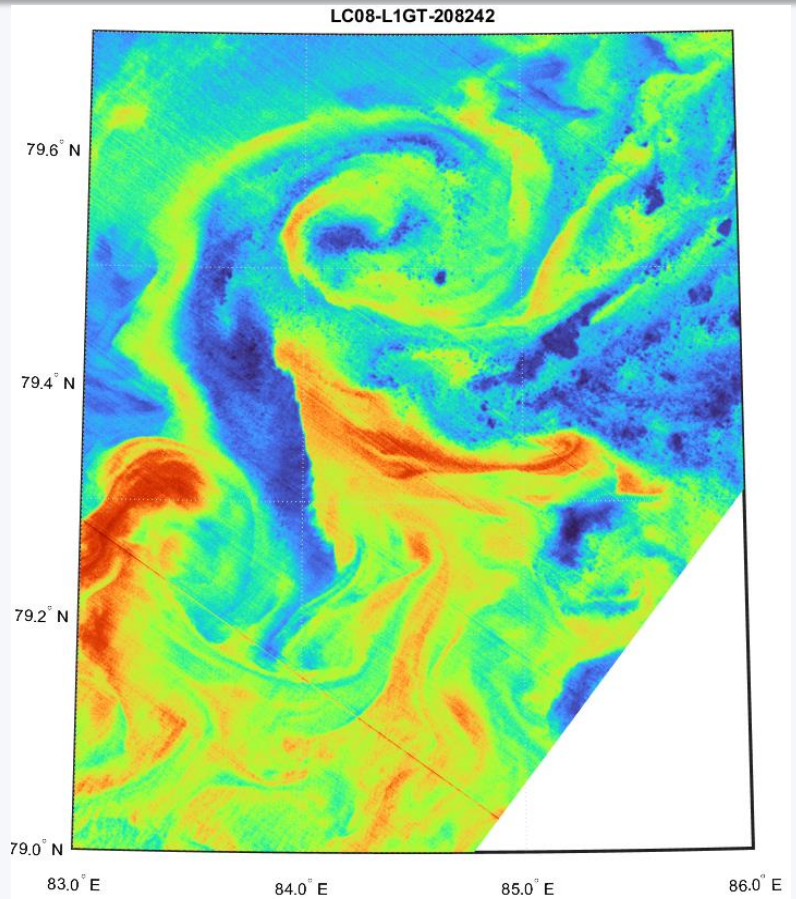
Проблемы моделирования

- Процессы вихреобразования в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ) **не учитываются** в климатических моделях

Manucharyan & Thompson, 2022

Характерные масштабы вихрей в ПЛЗ: от единиц до десятков километров, время жизни — от нескольких суток до нескольких недель

Johannessen et al., 1987; Bondevik, 2007; Mensa et al., 2018



Масштабы: **1-50 км**

Время жизни: **сутки-недели**

Введение: особенности вихрей в прикромочной ледовой зоне

Целью настоящей работы является использование потенциала различных современных спутниковых сенсоров для анализа пространственно-временной изменчивости и динамических характеристик вихрей в области ПЛЗ Карского моря на примере отдельно взятого антициклона, наблюдавшегося в остаточных формах льда в районе желоба Воронина в период с 25 июля по 6 августа 2024 года. В этот период в данном районе проводились контактные измерения в рамках программы «Плавучий университет-2024» на борту НИС «Профессор Молчанов», результаты которых будут представлены в будущих публикациях. Настоящая же работа в своей основе целиком построена на анализе мультисенсорных спутниковых данных, обладающих естественным преимуществом широкого пространственного покрытия района исследований.

Мелкомасштабная структура

- Интенсивные **вертикальные течения**
- Интенсивные **горизонтальные течения**
- Интенсивный **турбулентный обмен**

von Appen et al., 2018; Kozlov et al., 2020; Fine et al., 2018

Источники данных

- **Спутниковые измерения** — основной источник информации
- **Беспилотные летательные аппараты** — с недавнего времени

Atadzhanova et al., 2017; Artamonova, Kozlov, 2025; Жук и др., 2022

Типы вихрей

- Доминирование **субмезомасштабных циклонов**
- Частое наблюдение **вихревых диполей**

Kozlov et al., 2019; Kozlov & Atadzhanova, 2022; Petrenko, Kozlov, 2023

Контактные измерения структуры вихрей в ПЛЗ Карского моря **практически отсутствуют**

Данные и методы: исследуемый район

Географическое положение

- **Северо-восточный сектор** Карского моря
- Между островами **Ушакова и Визе** на западе
- Остров **Пионер** на севере
- Архипелаг **Северная Земля** на востоке

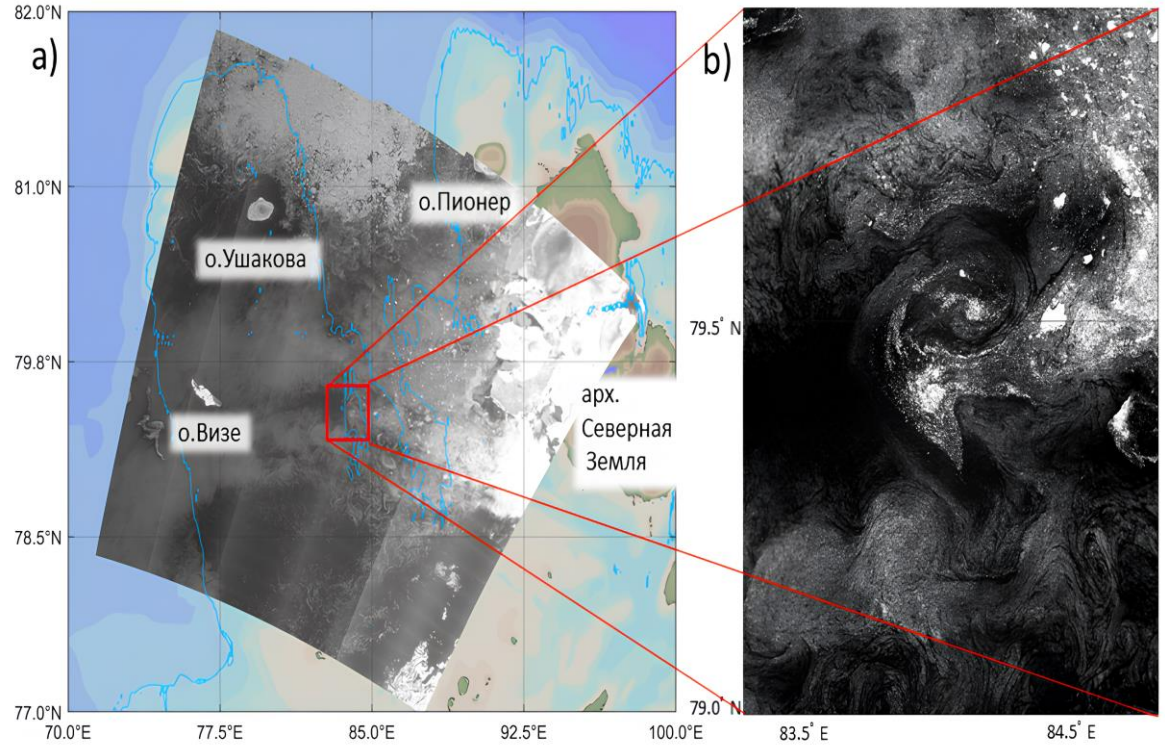
Координаты: 77°-82° с.ш. и 85°-100° в.д.

Желоб Воронина

- Расположен в **центре** исследуемого района
- Глубины до **400 метров**
- Область формирования **антициклонического вихря**

Период наблюдений: **25.07 - 06.08.2024**

Экспедиция: **"Плавучий университет-2024"**



Северо-восточная часть Карского моря с островами Ушакова, Визе и архипелагом Северная Земля

- Комбинированное влияние **ветра, течений и таяния льда**
- Активное **вихреобразование** на периферии ПЛЗ

В работе используется анализ мультисенсорных спутниковых данных, обладающих естественным преимуществом широкого пространственного покрытия района исследований.

Данные и методы: спутниковые данные

Sentinel-1A

- Режим: **Extra Wide**
- Ширина полосы обзора: **400 км**
- Пространственное разрешение: **40×40 м**

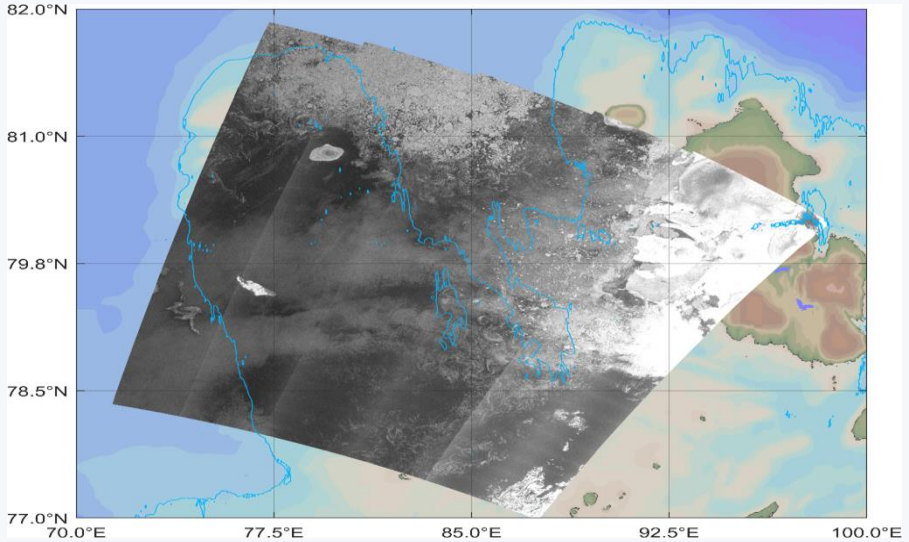
Sentinel-2 A/B

- Ширина полосы обзора: **290 км**
- Пространственное разрешение: **10×10 м**

Landsat-8/9 OLI-1/2

- Ширина полосы обзора: **185×180 км**
- Пространственное разрешение: **30×30 м**

Всего обработано: **25 спутниковых изображений**



Пример спутникового радиолокационного изображения района исследований

Методы анализа

- Идентификация вихрей на основе **визуального анализа** в программе SNAP 10.0
- Расчет **температуры поверхности моря** по данным Landsat-8/9 в ИК-диапазоне
- Оценка скорости дрейфа льда методом **максимальной кросс-корреляции**
- Определение диаметра вихря как размер **эллипса**, описывающего спиралевидные полосы

Наиболее четкие границы вихря: **29-30.07, 01-02.08, 06.08.2024**

Результаты: сравнение данных Sentinel-1 и AMSR-2

Sentinel-1

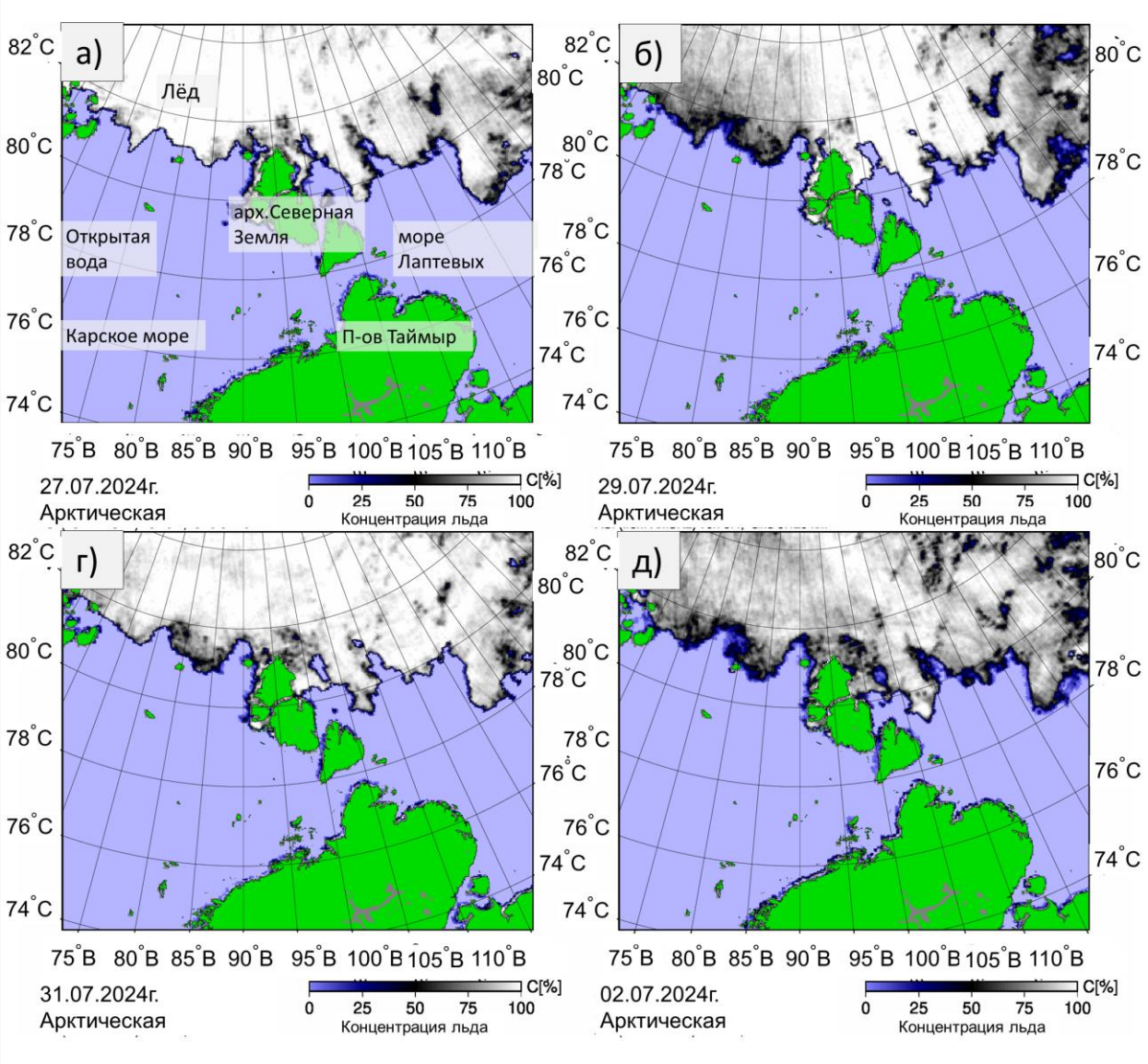
- Разрешение: **40×40 м**
- Четкое обнаружение **мелкомасштабных структур**
- Визуализация **вихревых образований**
- Детализация **дрейфующего льда**

AMSR-2

- Разрешение: **~3 км**
- **Не обнаруживает** мелкомасштабные структуры
- **Пропускает** вихревые образования
- Неточности при **активном таянии льда**

Основные выводы

- AMSR-2 **непригоден** для мониторинга ПЛЗ на масштабах < 5-10 км
- Sentinel-1 **эффективен** для анализа динамики ПЛЗ



Результаты: фоновые гидрометеорологические условия

Эволюция ветровой обстановки

25.07 Ветер **южный, юго-западный** со скоростью **2-5 м/с**

27.07 Резкая смена: ветер **северный** со скоростью **5-10 м/с**

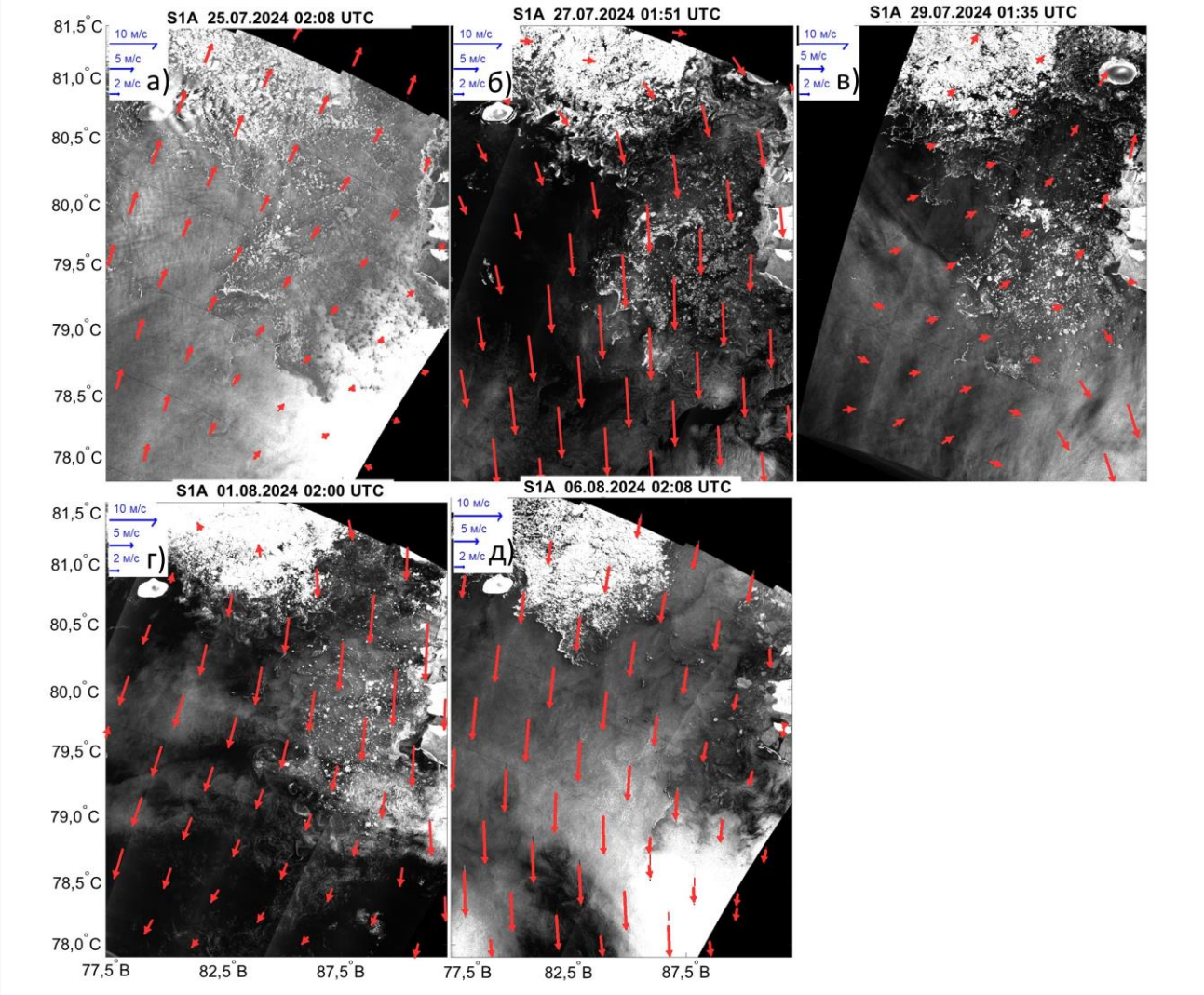
29.07 Ветер **западный** со скоростью **2-5 м/с**

01.08 Ветер усиливается до **3-7 м/с**, направление **северное**

06.08 Усиление северного ветра до **10 м/с**

Сокращение площади льда: **значительное**

Смещение границы льдов: **на север**



Результаты: термическая структура вод на границе ПЛЗ

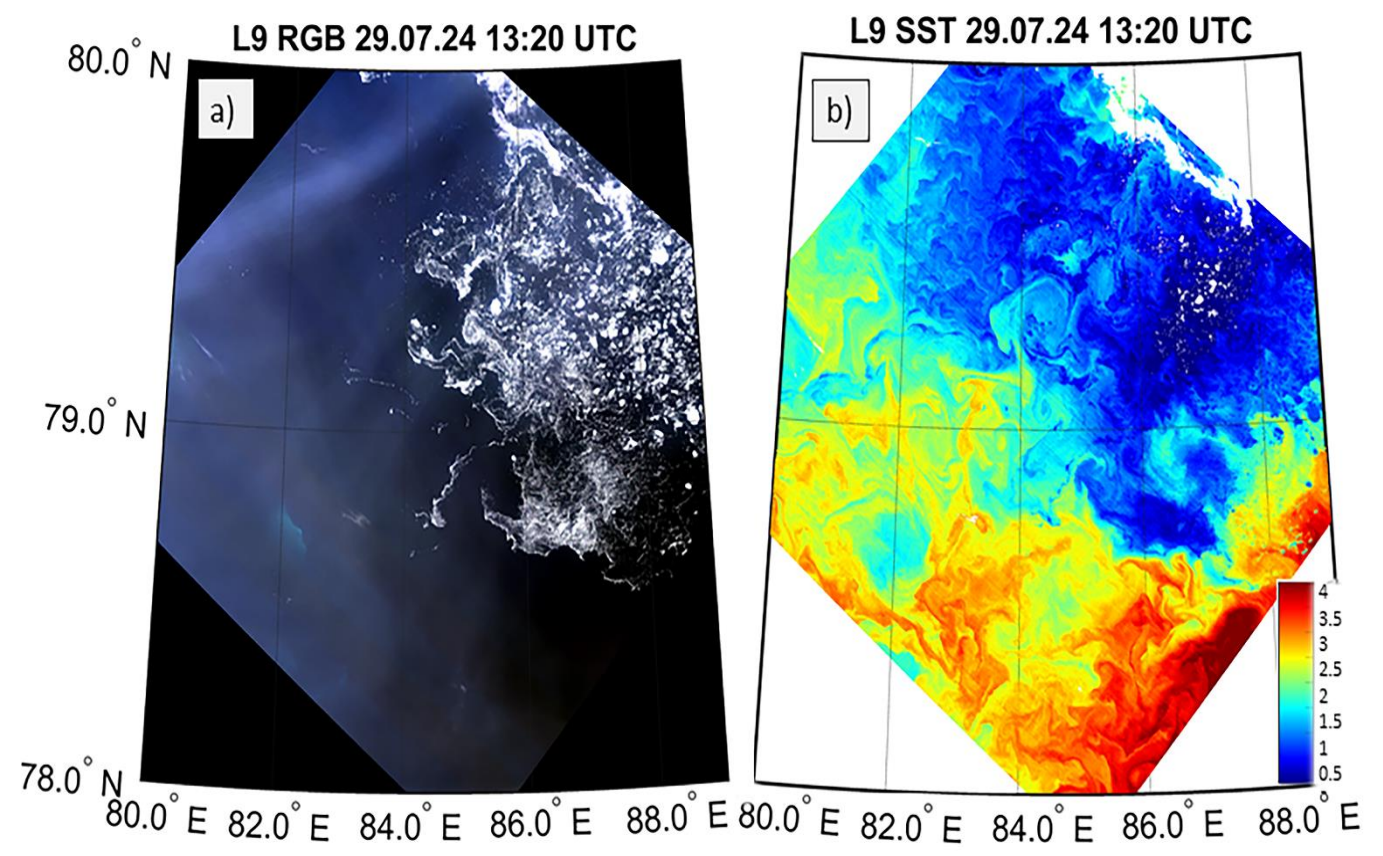
Температурные характеристики

- Талые воды на периферии ледяного массива: **0° до +1° С**
- Фоновая область к югу и западу: **около 2,5° С**
- Максимальный перепад ТПМ: **4° С**
- Горизонтальный градиент: **1°С/км**

ТПМ: +2,5° Фоновая область | +1° Талые воды | ПЛЗ 0°

Резкие градиенты плотности на границе ПЛЗ

Мелкомасштабные неоднородности и вихревые структуры

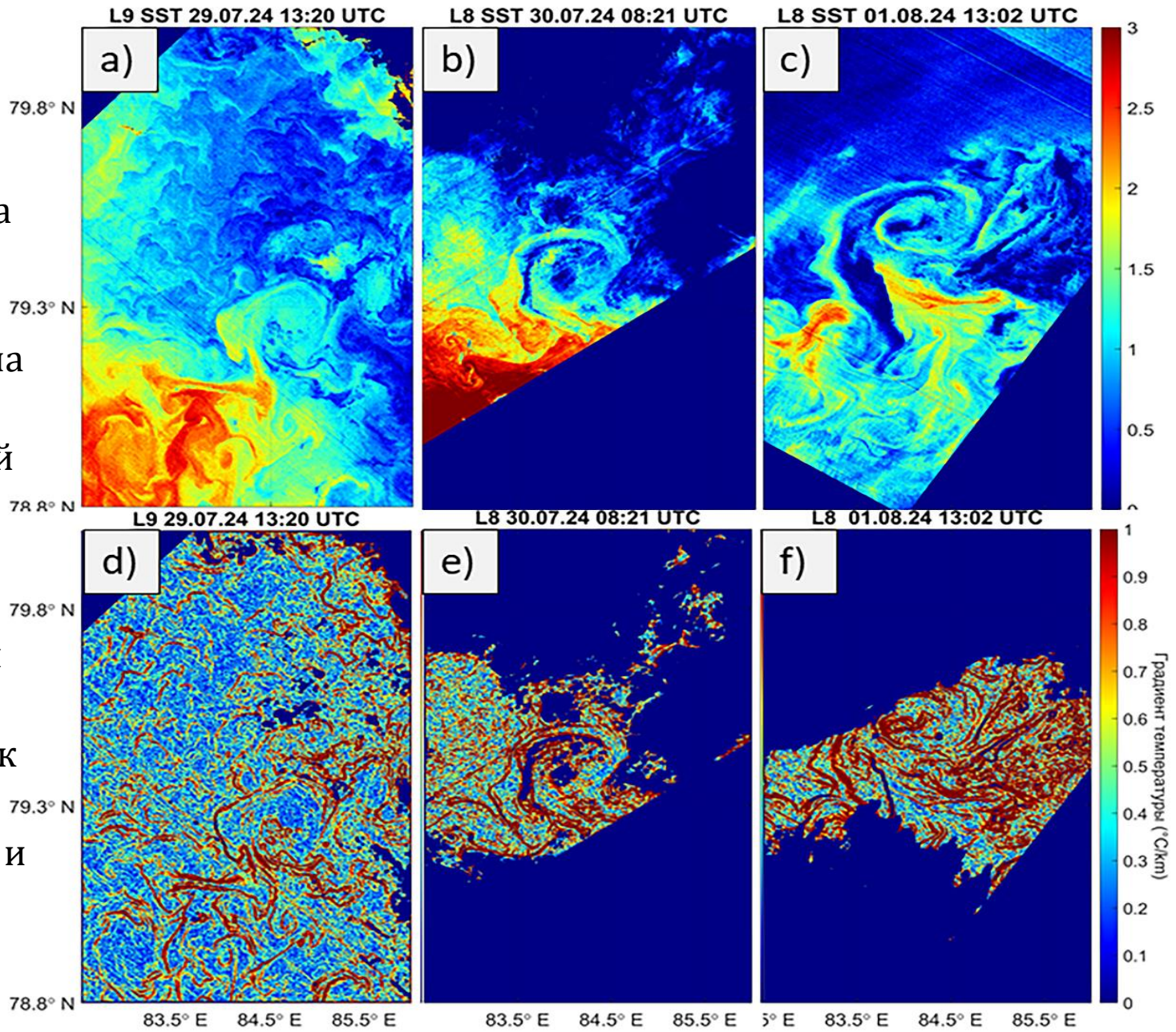


Температура поверхности моря по данным Landsat-8/9 в инфракрасном диапазоне

Роль температуры в формировании вихрей

- Вовлечение теплых вод в **вихревые структуры**
- Мелкобитый лед как **поверхностный трассер** динамики
- Быстрое таяние льда на границе температурных фронтов

Более детально термическая структура вихря в процессе его эволюции прослеживается на рис. , где показаны три изображения Landsat-8/9 за 29 и 30 июля, а также 1 августа 2024 г. Из рисунка отчетливо видно постепенное увеличение размера антициклона и его продвижение на север. Однако наиболее интересным представляется возможность качественной оценки количества льда, вовлекаемого в вихревое движение. На начальном этапе фрагменты дрейфующего льда наблюдаются только на южной периферии вихря (рис. a). Спустя неполные сутки 30 июля лед уже виден как в центре вихря, так и в его западной и северной частях (темно синий цвет на рис. b). К 1 августа западная и северные части вихря, а также его центр заполнены льдом (рис. c).



Поля температуры поверхности моря по данным Landsat-8/9 за 29 и 30 июля, а также 1 августа 2024 г. в районе наблюдения антициклонического вихря.

Результаты: эволюция антициклонического вихря

Основные этапы эволюции

Формирование

27-29.07
Появление грибовидных структур

Развитие

30.07-01.08
Традиционный вид антициклона

Трансформация

02.08-06.08
Изменение формы

Ключевые изменения параметров

Диаметр: **24 → 28 км**

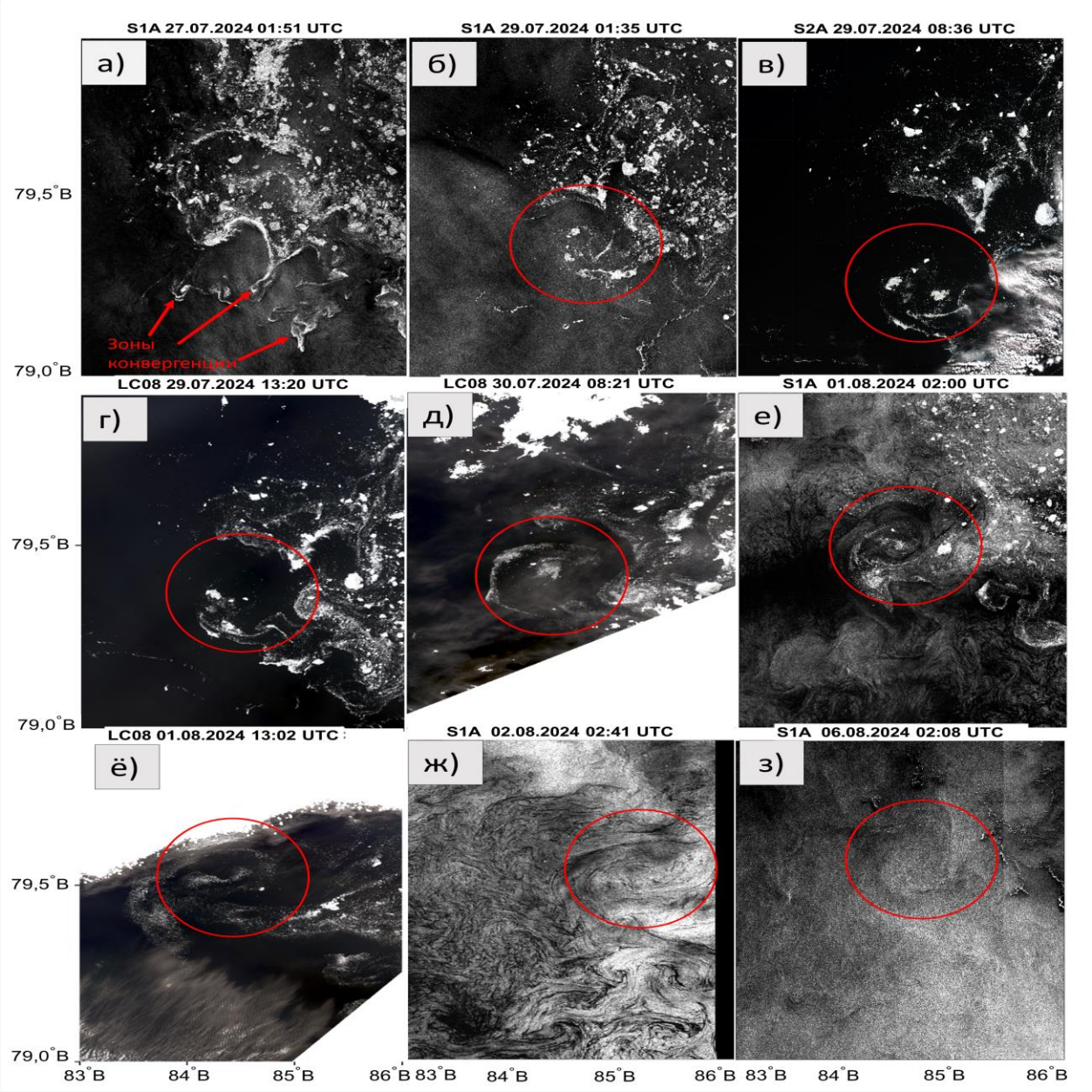
Форма: **круглая → эллиптическая → симметричная**

Динамика перемещения

- **27.07-01.08:** движение на север, скорость 5,6 км/сутки
- **02.08-06.08:** движение на восток, скорость 3 км/сутки
- **Общая траектория:** 33 км за 11 дней

Выводы по эволюции

Антициклонический вихрь в ПЛЗ Карского моря демонстрирует сложную эволюцию, включающую изменение размеров и формы. Процесс сопровождается активным вовлечением и таянием морского льда.



Результаты: скорость дрейфа льда

Характеристики дрейфа льда

Фоновая скорость	Орбитальная скорость (центр)	Орбитальная скорость (периферия)
0,5 м/с	**0,1-0,2** м/с	**0,3-0,4** м/с

Направление дрейфа

- Преимущественно **северное направление** дрейфа льда
- Вихри стимулируют **западный и юго-западный** перенос льда
- Максимальное расстояние выноса льда: **до 40 км**

Вынос льда в **более теплые воды**

Ускоренное таяние льда в вихревых структурах

Особенности дрейфа

Некорреляция направления дрейфа с направлением ветра

Влияние морских течений на дрейф льда

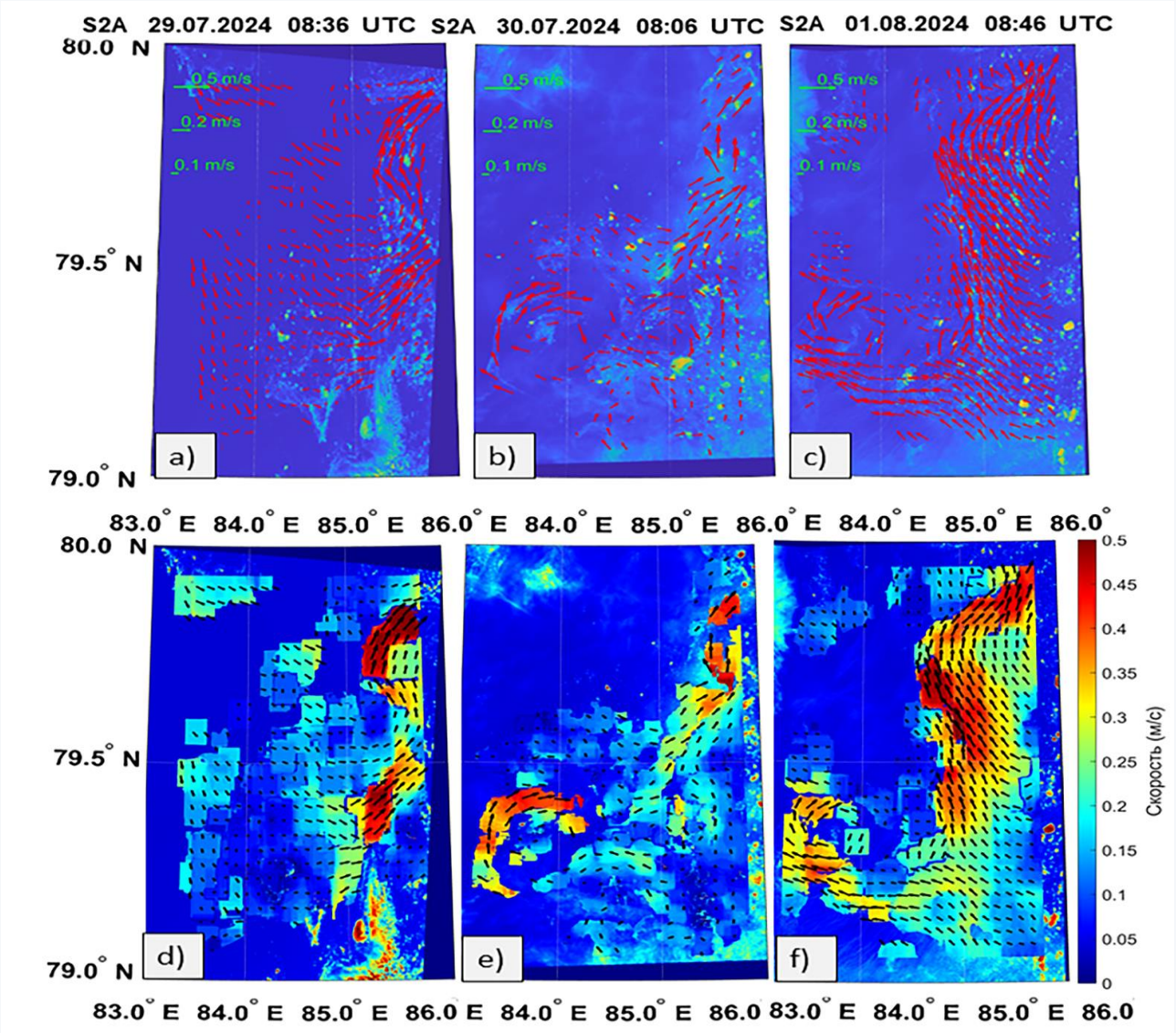


Схема дрейфа морского льда в прикромочной ледовой зоне Карского моря

Заключение: основные выводы исследования

Ключевые результаты

В районе желоба Воронина над глубинами более 150 м происходит образование **антициклонического вихря** диаметром 24-28 км

Средняя скорость перемещения вихря — **4,3 км/сутки**, орбитальная скорость вращения — 0,1-0,4 м/с

Горизонтальный градиент температуры между ПЛЗ и открытой водой достигает **1°C/км (4°C)**

Влияние на морской лед

Вынос льда на **запад и юго-запад** на расстояние до 40 км

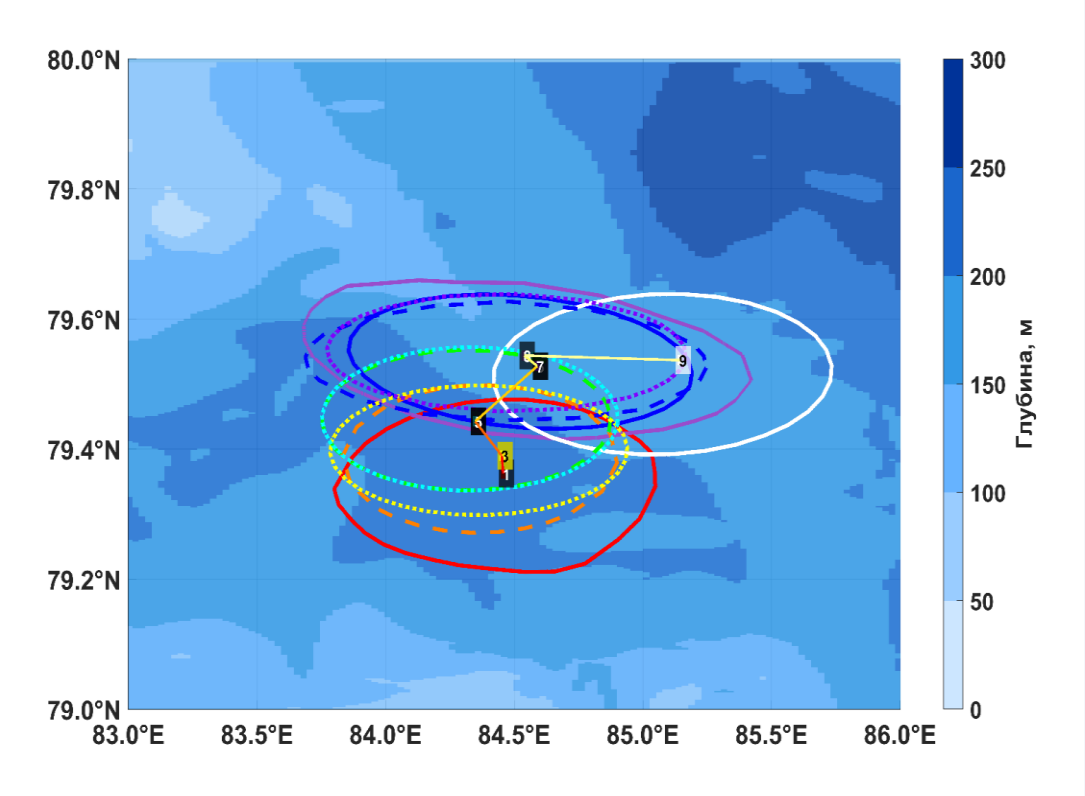
Ускоренное таяние льда в вихревых структурах

Значение для климатических моделей

Улучшение прогностических моделей

Верификация существующих моделей

Учет вихреобразования в ПЛЗ



Сравнение спутниковых данных

- Данные **AMSR-2** непригодны для мониторинга ПЛЗ на масштабах < 5-10 км
- **Sentinel-1/2, Landsat-8/9** эффективны для анализа динамики ПЛЗ

Благодарности и контактная информация

Финансирование

Грант РНФ **№ 25-17-00309** (анализ структуры и динамики вихрей в прикромочной зоне)

Государственное задание ФГБУН ФИЦ МГИ по теме **FNNN-2024-0017** (анализ фоновых гидрометеорологических условий)

Авторы исследования

ВД **В. А. Добродий***
Контактное лицо

ИК **И. Е. Козлов**
Исследователь

ЕП **Е. В. Плотников**
Исследователь

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Контактная информация

Добродий Владимир Андреевич

dobrodii.v@mhi-ras.ru

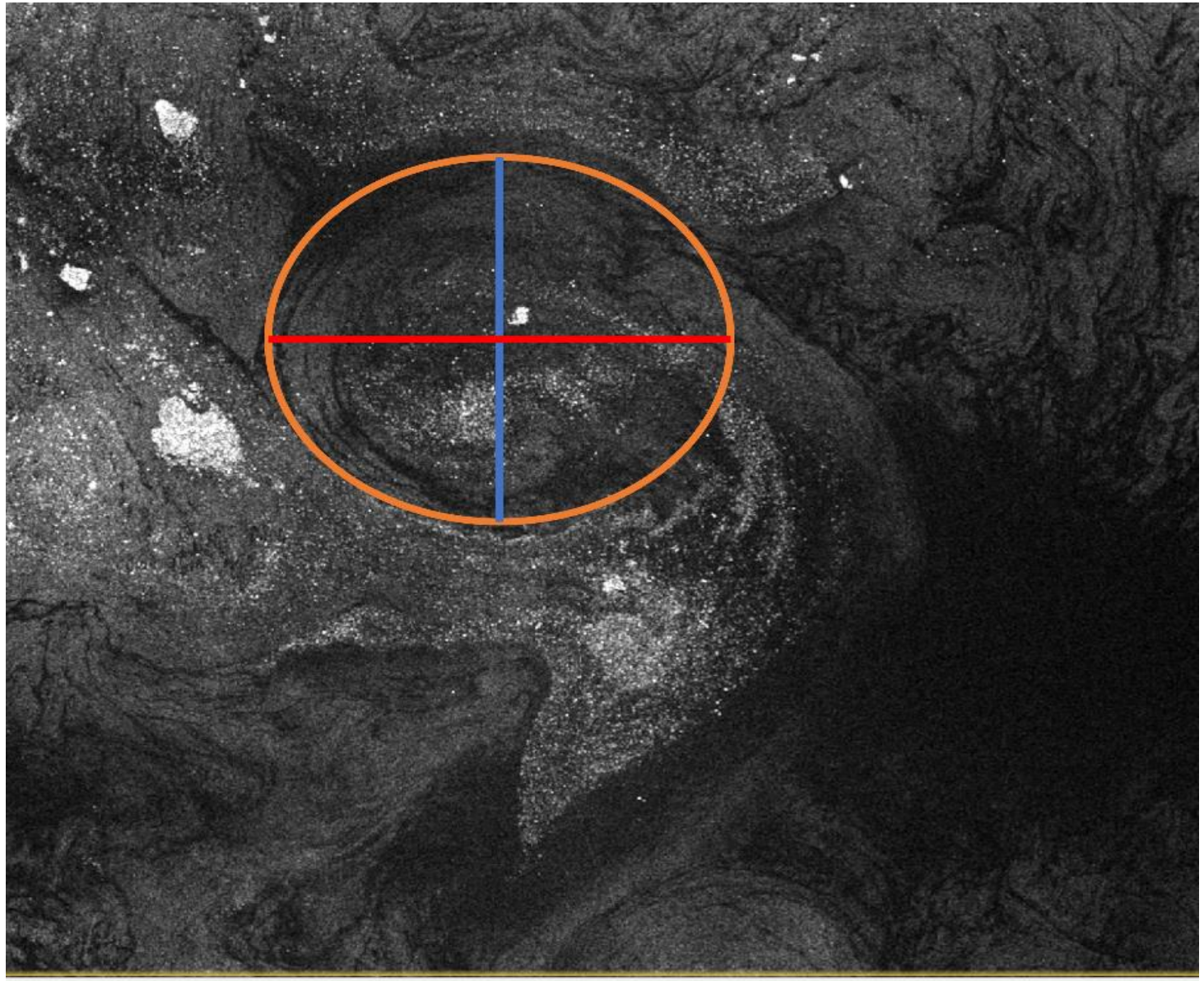
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Благодарности и контактная информация

Спасибо за внимание!

Благодарим всех участников за интерес к исследованию и обсуждению результатов

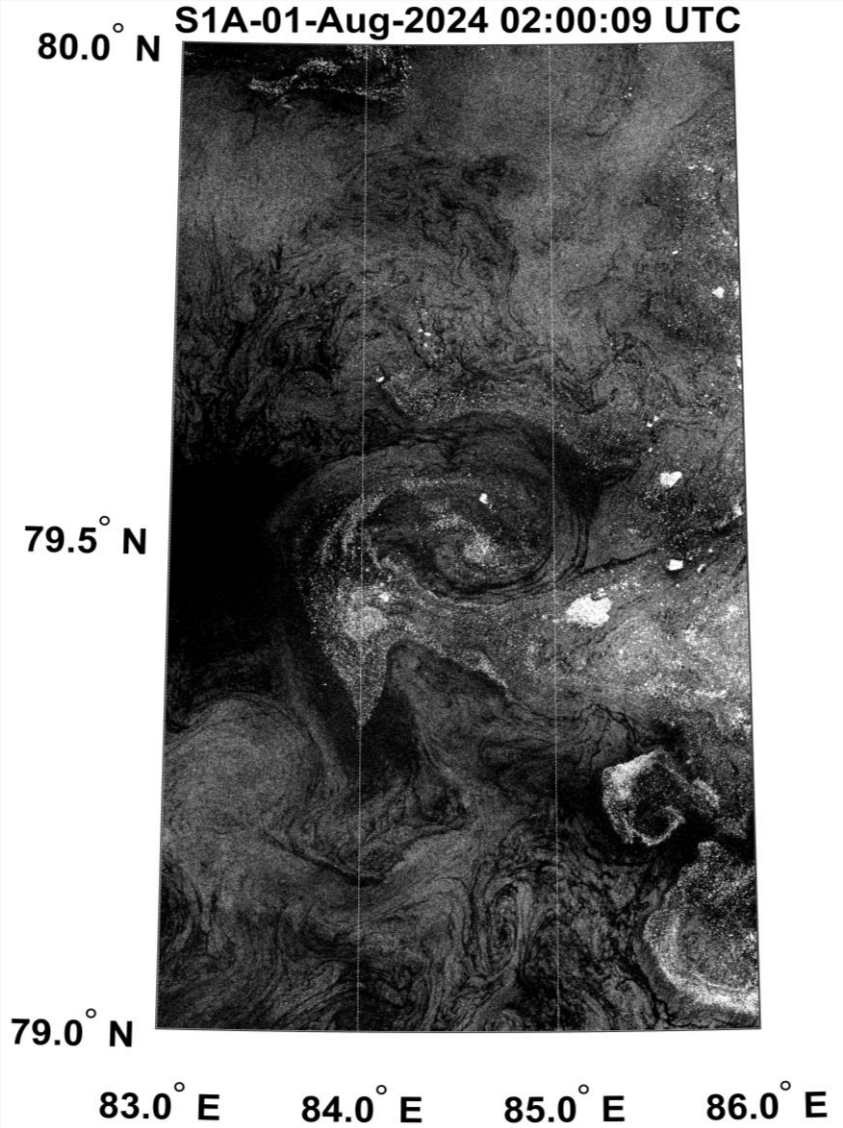
dobrodii.v@mhi-ras.ru



Аннотация

Результаты наблюдений **антициклонического вихря** в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ) на северо-востоке Карского моря. Анализ мультисенсорных спутниковых данных **Sentinel-1/-2, Landsat-8/-9** (25 июля - 6 августа 2024) показал образование антициклонического вихря диаметром **24-28 км** над глубинами более 150 м. Горизонтальный градиент температуры между ПЛЗ и открытой водой достигает **1°C/км**. Длина траектории вихря - около 33 км, средняя скорость - **4,3 км/сутки**.

Градиент ТПМ: **1°C/км (4°C)**

Орбитальная скорость: **0,1-0,4 м/с**

Вихри стимулируют западный и юго-западный перенос морского льда на расстояние до 40 км в сторону более теплых вод, где он быстро тает.