XIV международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА“
9 – 13 ноября 2026 г.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СЕЗОННЫЙ ХОД ПАРАМЕТРОВ МЕЗО- И СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ НОРВЕЖСКОЙ И ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИН ПО ДАННЫМ SENTINEL-3

Гневашев Ф.А. (СПбГУ)
Башмачников И.Л. (СПбГУ, Нансен-центр)

E-mail: st069512@student.spbu.ru

Цель и задачи исследования

Цель: детекция и статистический анализ мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей по данным видимого диапазона

Задачи:

- Отбор и обработка снимков Sentinel-3 OLCI
- Детекция вихрей, определение их знака завихренности, геометрических параметров
- Пространственно-временной статистический анализ

Актуальность исследования

- **Фундаментальная роль вихрей:** ключевой фактор мезо- и субмезомасштабного перемешивания, определяющий трансфер тепла, солей и биогенов в фотическую зону океана.

- **Дополнение альтиметрии:** стандартные продукты AVISO (~25 км) физически неспособны детектировать малые структуры из-за редкой сетки орбитальных треков.

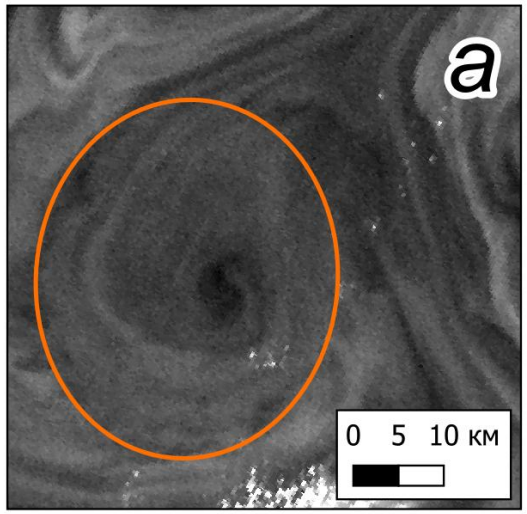
- **Преимущество оптического зондирования:** пространственное разрешение 300 м прибора Sentinel-3 OLCI обеспечивает возможность регистрации субмезомасштабных структур по полям концентрации хлорофилла-а.

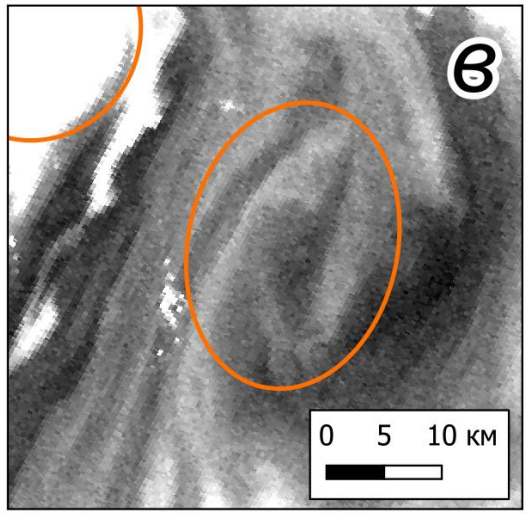
Методика обработки данных

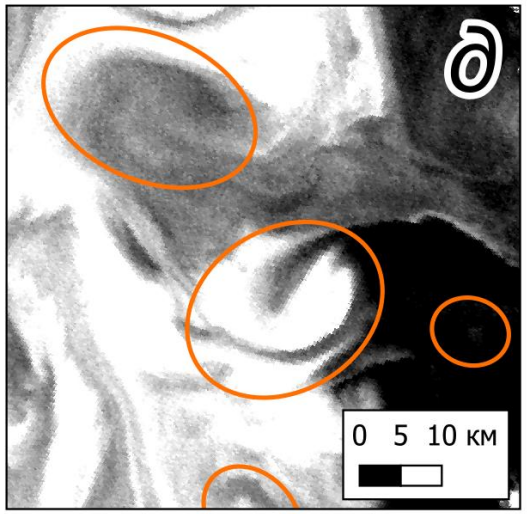


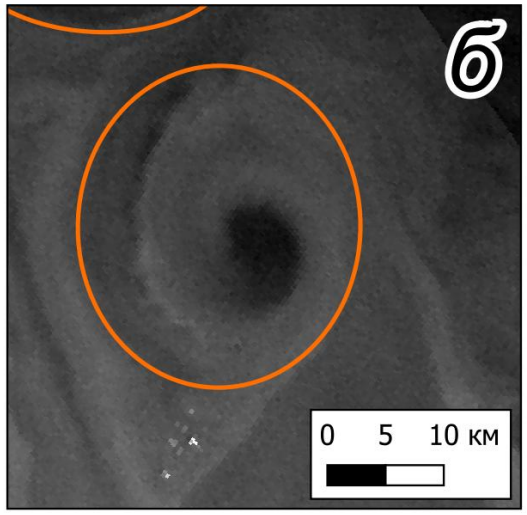
- **ESA Snap** – выделение целевых каналов из общего набора данных OLCI L2 WFR: канала 510 нм, который соответствует максимуму отражения хлорофилла, а также канала, содержащего значения концентрации хлорофилла, рассчитанные по алгоритму OC4ME. Также в данном ПО выполнялся экспорт в формат GeoTIFF удобный для дальнейшей работы.
- **QGIS** – локальное выравнивание контрастов для идентификации менее заметных вихревых структур, ручная векторизация внешних замкнутых контуров вихрей. Вихри аннотировались эллипсами, как одной из наиболее удобных форм для их аппроксимации.
- **QGIS, Python, GDAL** – расчет геометрический параметров (радиус, площадь, сжатие, удаление от побережья, анализ и визуализация)

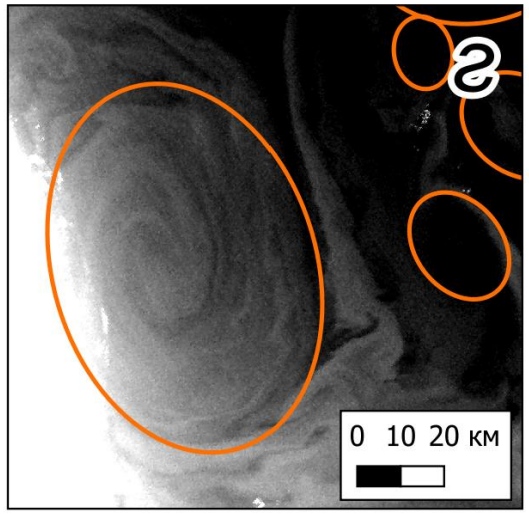
Визуальные признаки вихря в поле хлорофилла (Sentinel-3 OLCI)

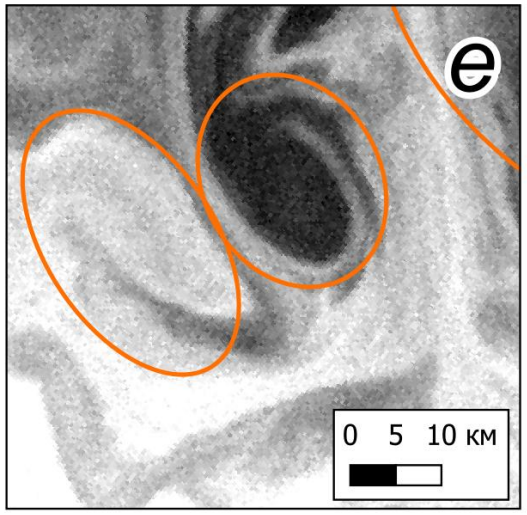












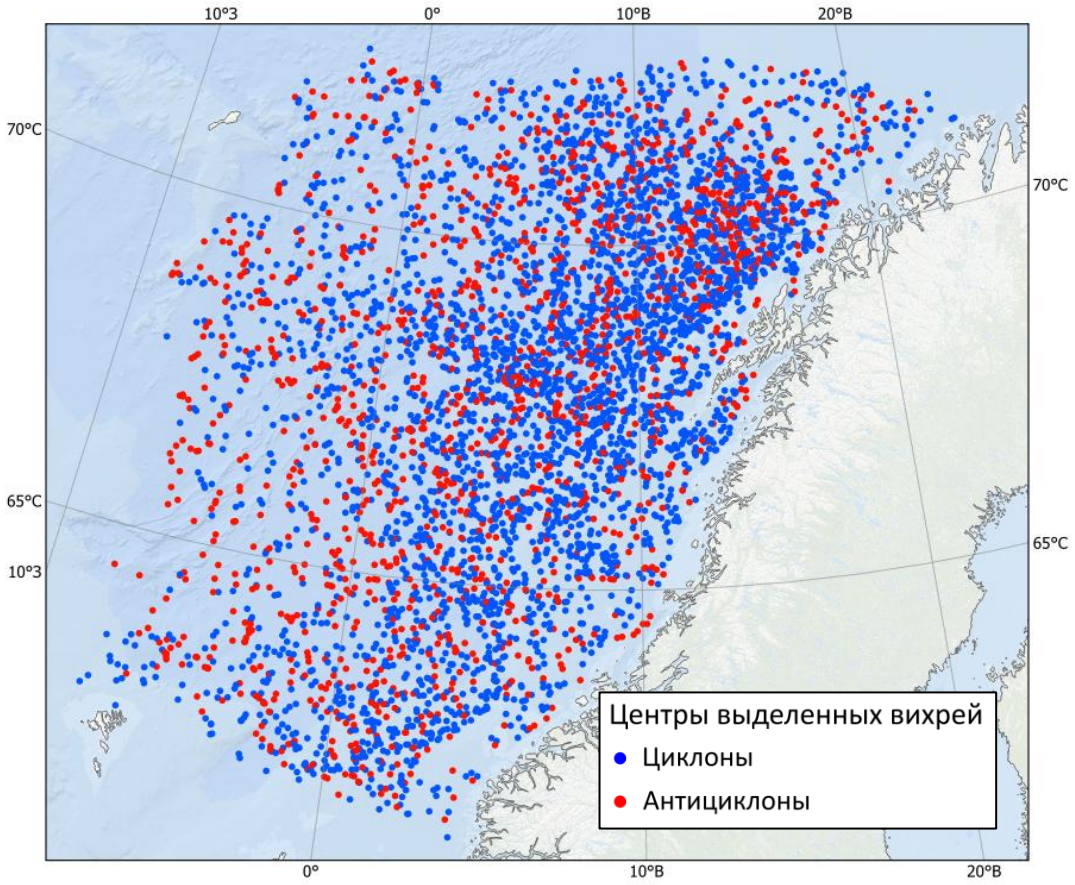
- а,б – циклоны
- в,г – антициклоны
- д,е – дипольные структуры

Вихри распознавались по наличию округлой замкнутой формы и контрастных спиралевидных полос повышенных и пониженных концентрации хлорофилла.

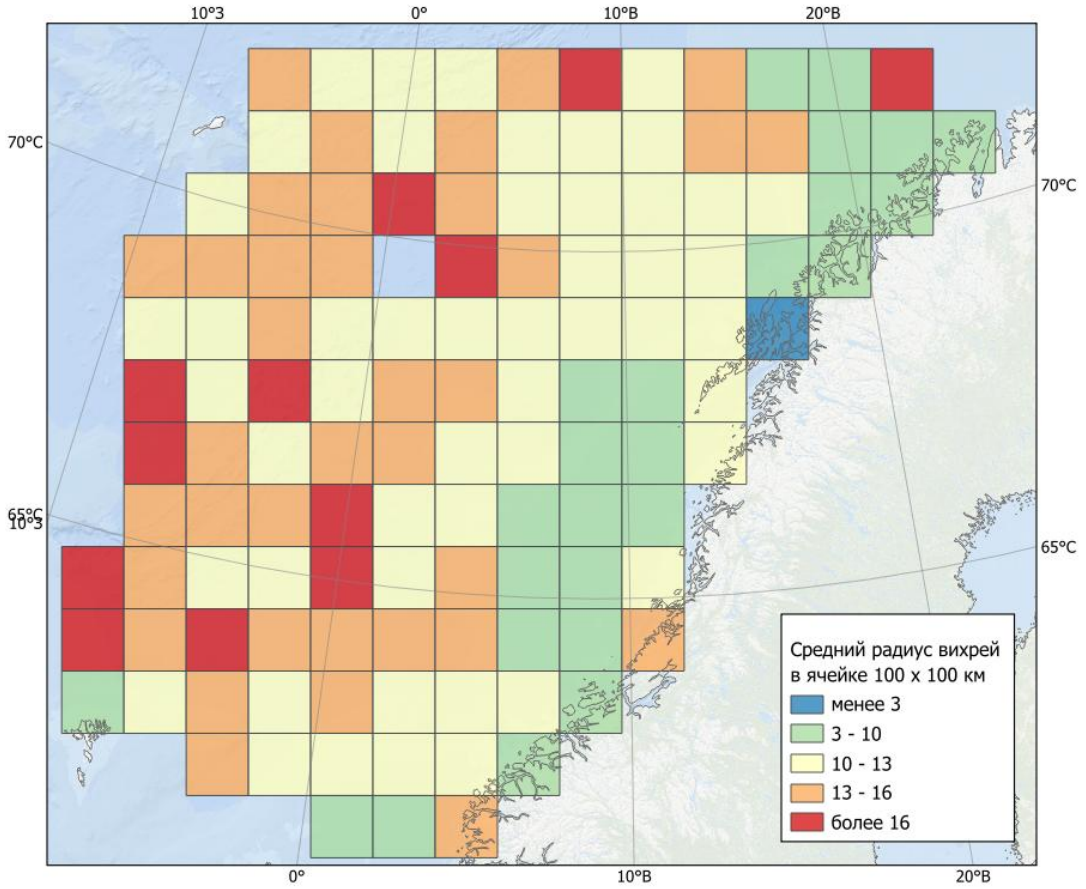
Знак завихренности (циклон/антициклон) определялся по геометрическому направлению закрутки спиральных полос хлорофилла-а пассивной примеси

Характеристики массива детектированных вихрей

Центры выделенных вихрей

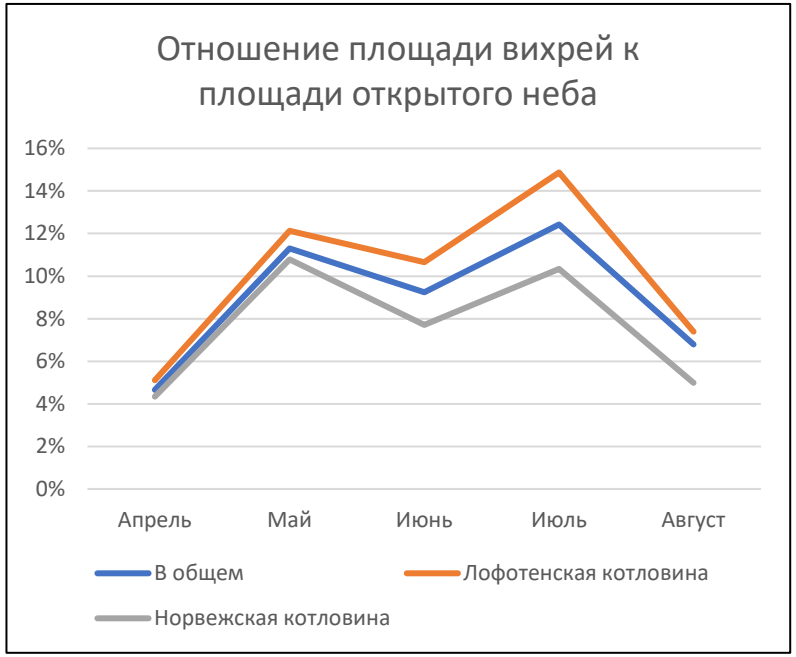


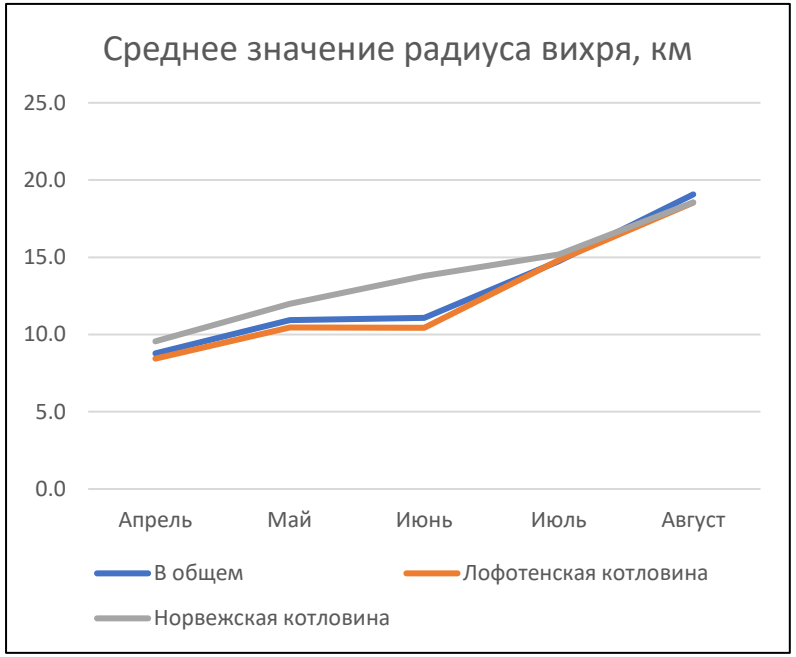
Средний радиус вихрей, рассчитанный по ячейкам сетки 100 х 100 км

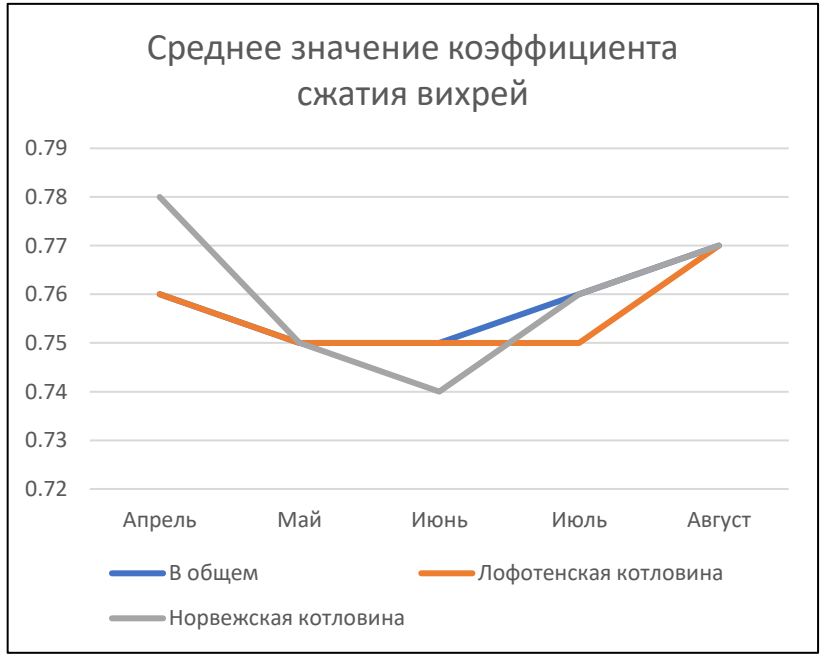


Всего за период 2018-2026 гг. было выделено 5535 вихрей. Для исключения влияния неравномерной облачности из анализа исключены подрайоны с низкой повторяемостью безоблачного неба. Итоговый массив в анализируемой зоне составил 5055 вихрей, из которых 3489 - циклоны и 1566 - антициклоны. Значительное преобладание циклонов полученное при анализе может объясняться тем, что в циклонах интенсивная дивергенция (расхождение) и апвеллинг обостряют градиенты концентрации фитопланктона в первом оптическом слое, создавая четкие спирали. В антициклонах конвергенция (схождение) и опускание вод формируют однородные темные ядра с размытыми границами, что снижает их выявляемость в поле хлорофилла.

Сезонная изменчивость геометрических параметров







Площадь открытого неба - условная безразмерная величина, определяющая общую безоблачную акваторию моря, доступную для пассивного датчика OLCI на конкретную дату.

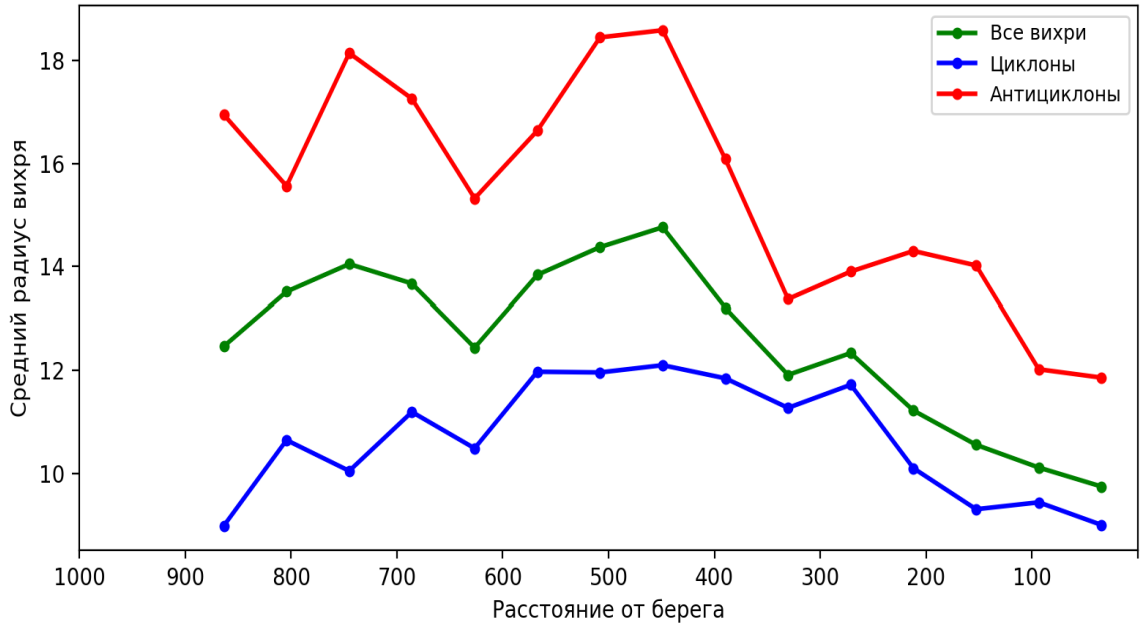
Демонстрирует выраженный двухвершинный сезонный ход с локальным максимумом в мае (11,3%) и абсолютным пиком в июле, достигающим 14,8% для Лофотенской котловины и 12,4% в среднем по всему региону».

Среднее значение радиуса вихря обнаруживает монотонный рост в весенне-летний период: от минимальных значений в апреле (~8,4-9,5 км) до 14,8-15,1 км в июле. В августе, по ограниченной выборке, радиус равен 18,5-21,3 км.

Среднее значение коэффициента сжатия представляет собой отношение малой полуоси аппроксимирующего эллипса к большой (b/a). Демонстрирует стабильность на уровне 0,74 - 0,78 для всех месяцев и подрайонов.

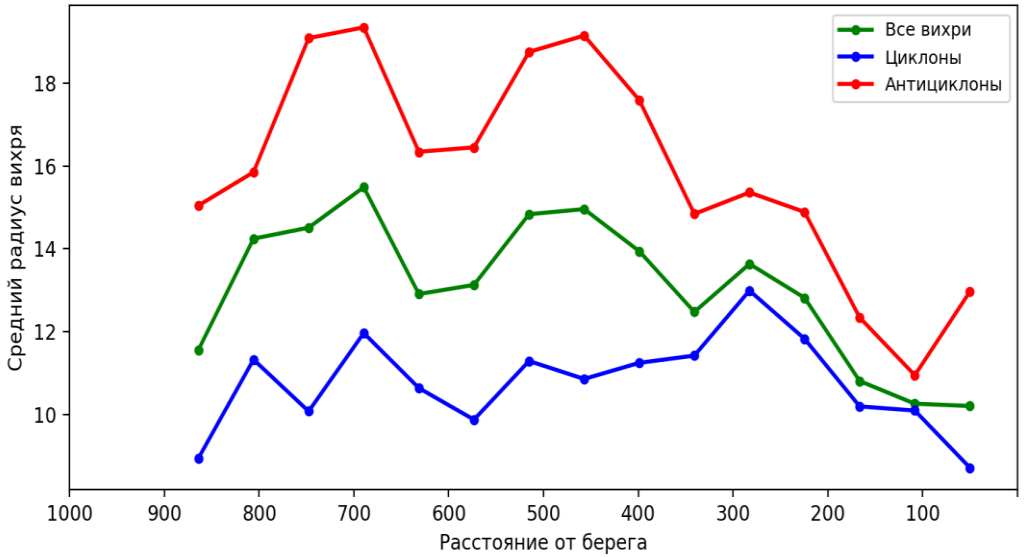
Изменение радиуса при удалении от побережья

Изменение радиуса при удалении от берега
(все вихри, км)

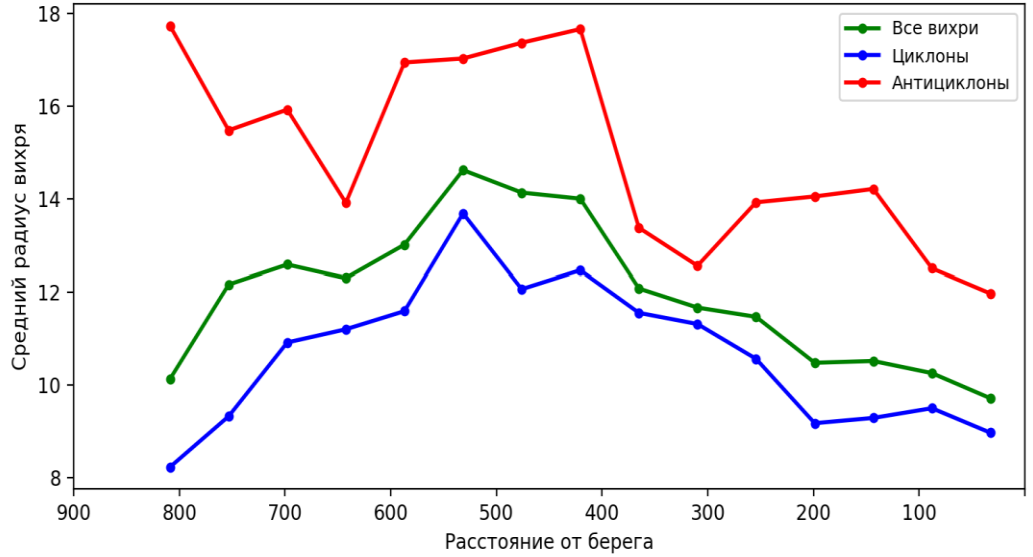


В прибрежных зонах (0 - 150 км) характеризуются минимальными средними радиусами вихрей обоих знаков вращения (в пределах 7 - 9 км). В глубоководных районы котловин (400 - 600 км) средний радиус монотонно возрастает, достигая значений в 15 - 20 км в открытом море. Устойчивый рост радиусов при одновременном падении числа вихрей служит доказательством процесса слияния малых вихрей по мере их движения от фронтальных зон генерации в глубоководную часть котловин и открытое море.

Изменение радиуса при удалении от берега
(Норвежская котловина, км)

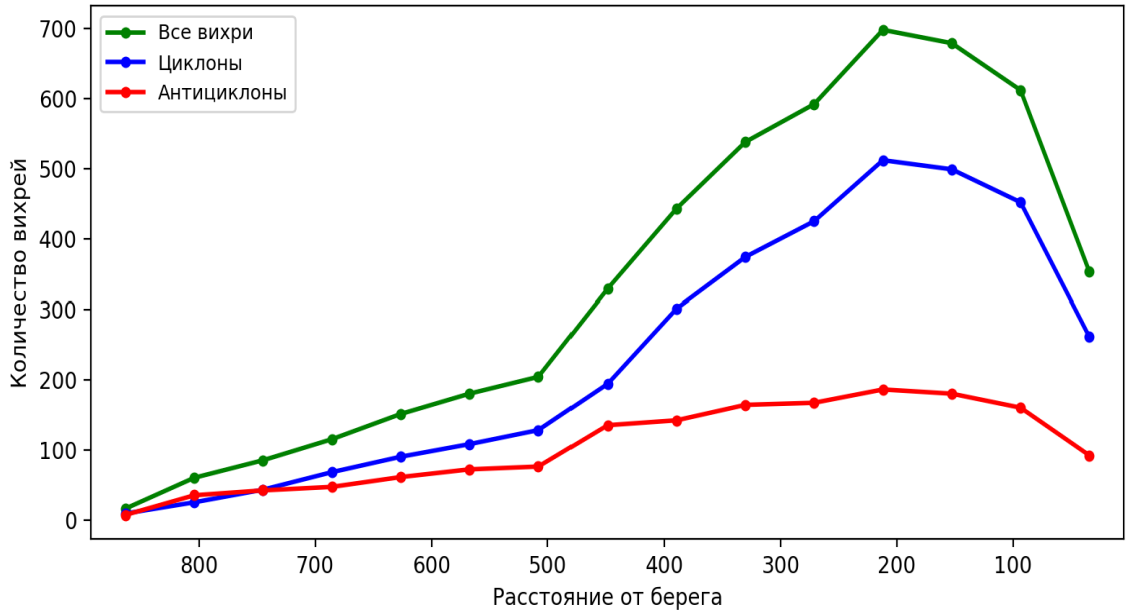


Изменение радиуса при удалении от берега
(Лофотенская котловина, км)



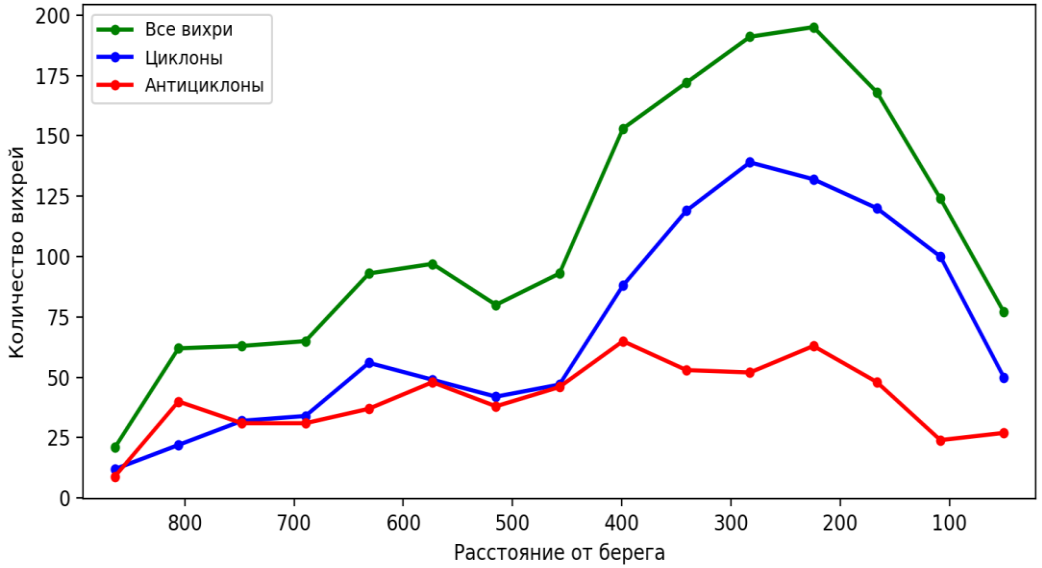
Изменение количества вихрей при удалении от побережья

Изменение кол-ва вихрей при удалении от берега
(все вихри, км)

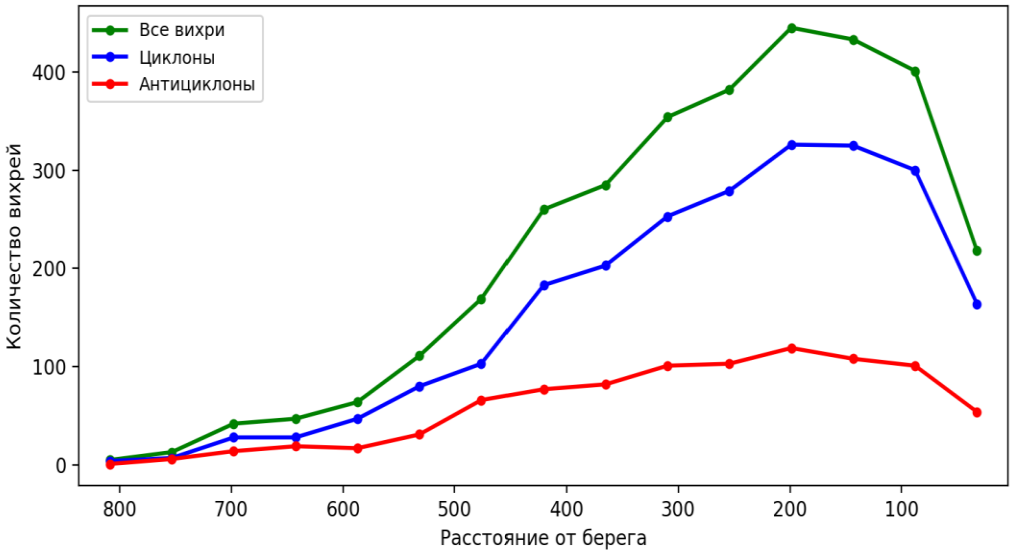


В 100 - 200 км от берега фиксируется резкий численный пик количества вихрей как в Норвежской, так и в Лофотенской котловинах. На удалении около 400 км от побережья начинается значительный спад количества вихрей, причем в данном случае в Лофотенской котловине численный спад идет интенсивнее, чем в Норвежской.

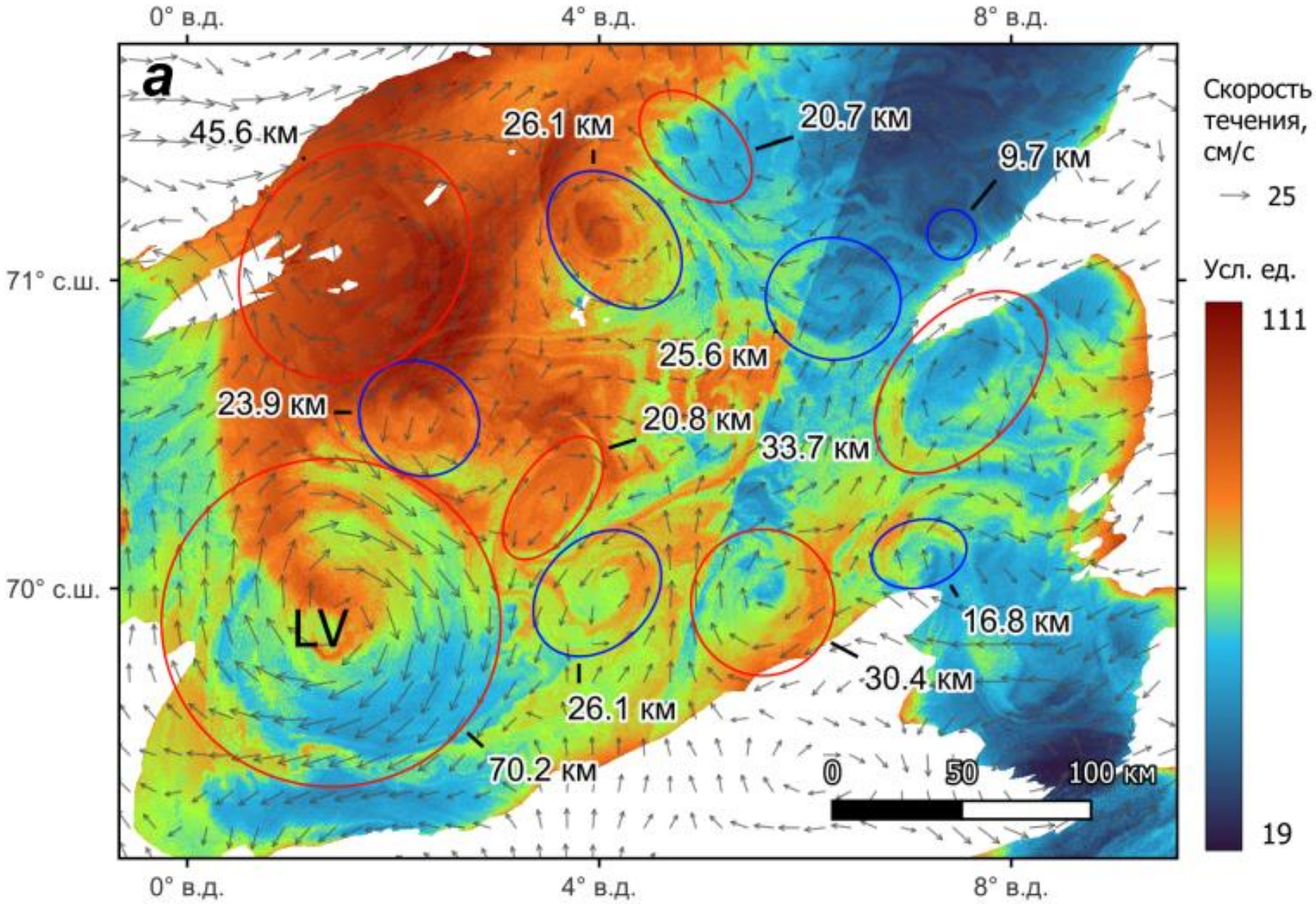
Изменение кол-ва вихрей при удалении от берега
(Норвежская котловина, км)



Изменение кол-ва вихрей при удалении от берега
(Лофотенская котловина, км)



Сравнение с данными альтиметрии

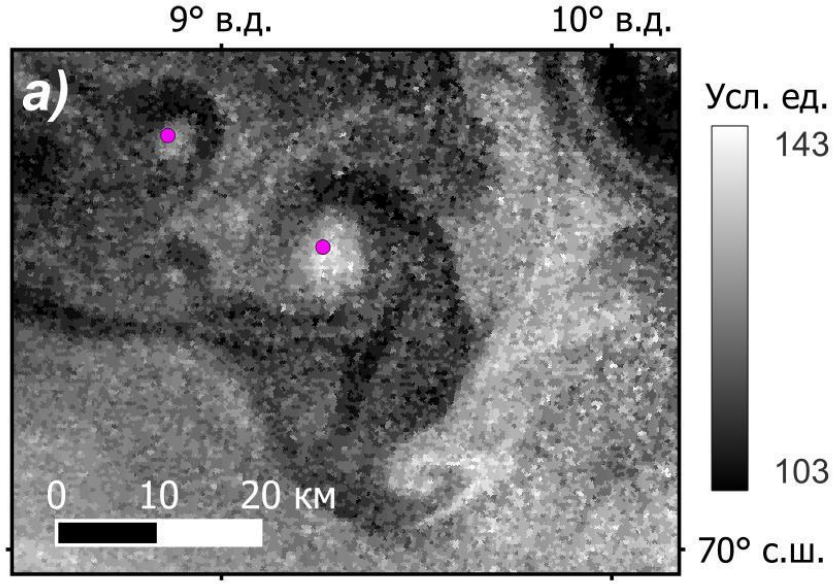


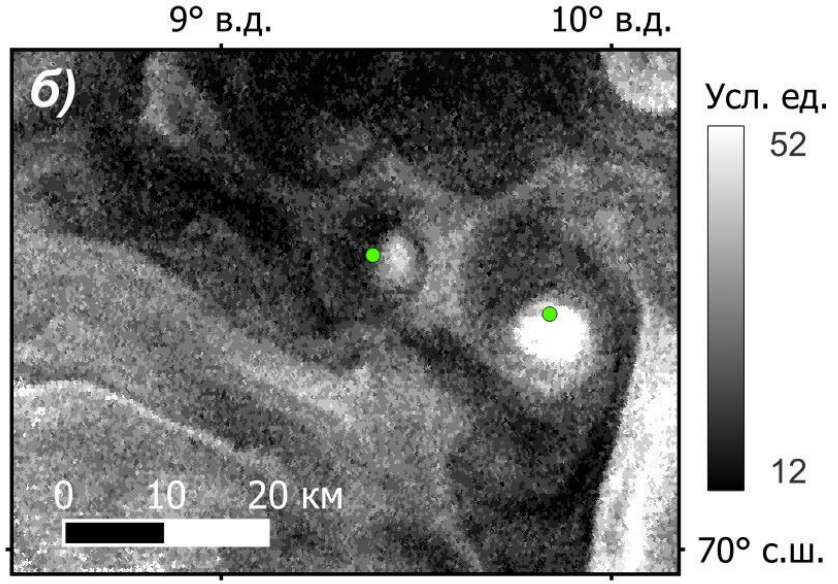
Верификация выделения вихрей в поле хлорофилла выполнялась путем сопоставления результатов со спутниковой альтиметрией AVISO.

Так крупные мезомасштабные вихри (R>40) км): демонстрируют практически полное пространственное согласие между полем геострофических течений и контурами вихрей выделенных по хлорофиллу-а.

Вихри среднего масштаба (R=20-40) км): не полностью фиксируются альтиметрией. Из-за относительно низкой плотности треков, карты AVISO снижают количество таких структур, а также могут завышать их радиусы. В связи с этим часть этих вихрей может быть хорошо видна по видимому диапазону, но не проявляться в альтиметрии.

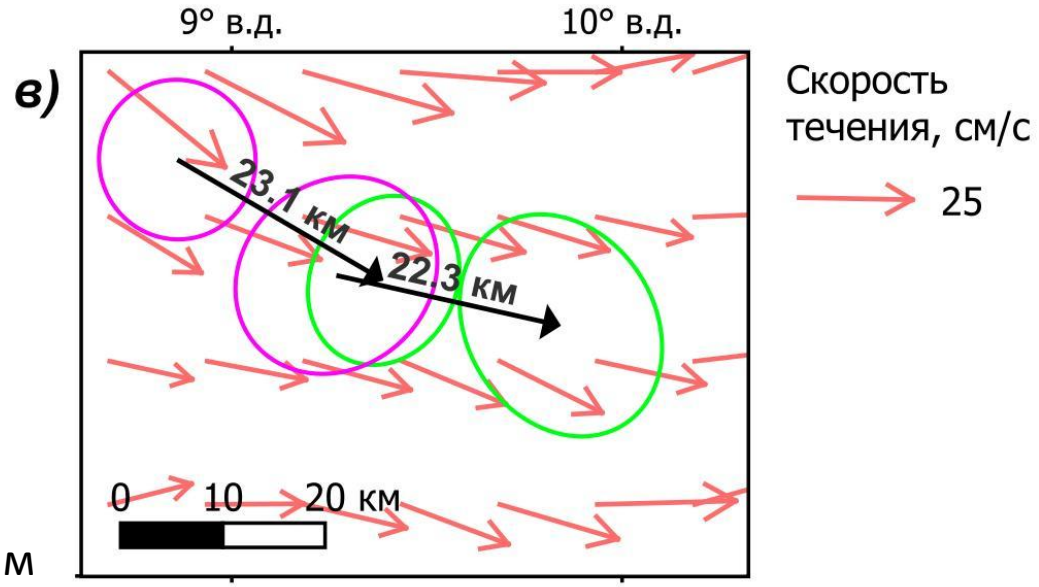
Суточное смещение пары вихрей





По последовательным снимкам (12-13 апреля 2017 г.) была замечена пара вихрей, которые за сутки сдвинулись значительно больше, нежели остальные вихри на этих снимках для которых медианная суточная скорость составила 10 см/с.

- **а** – диполь на 12.04.2017
- **б** – диполь на 13.04.2017
- **в** – схема перемещения диполя за сутки и скорости поверхностного течения по данным альтиметрии



Для рассматриваемой пары вихрей суточное смещение составило 23 км, что соответствует скорости 26 см/с. Данное значение примерно соответствует локальной скорости течения по данным альтиметрии (23 см/с) и может указывать на доминирование пассивного переноса для малых структур.

Выводы

- Спутниковый продукт Sentinel-3 OLCI (300 м) выступает эффективным инструментом детекции субмезомасштабных океанических вихрей, позволяя закрывать информационные пробелы альтиметрии AVISO, с поправкой на ограничение ежедневного покрытия данными облачностью исследуемого района.
- На основе анализа каталога из 5055 выделенных вихрей подтверждена базовая океанологическая гипотеза укрупнения радиусов при удалении от шельфового склона в открытое море, что подтверждает преобладание процессов слияния вихрей при дрейфе от зоны активной генерации.
- Выявлен выраженный внутригодовой ход параметров с достижением максимумов геометрических размеров вихревых полей (14,7 - 14,8 км) и плотности упаковки в июле, вероятно связанный с сезонным усилением вертикальной стратификации пикноклина и вегетацией фитопланктона.

Перспективы исследования

- Использование имеющегося массива для автоматизации выделения вихрей (обучение нейронных сетей)
- Последующее масштабирование исследования как по временному, так и по географическому охвату