

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанологии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

# «ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕЙ КРУГОВОРОТА БОФОРТА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ»

**Исполнитель:** Артамонова Анастасия Викторовна, студентка группы ПО-М17-1-8 **Научный руководитель:** д.г.н., профессор, Аверкиев Александр Сергеевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«\_\_\_»\_\_\_\_20\_г.

Санкт-Петербург

## Содержание

Список используемых сокращений	3
Введение	4
Глава 1. Особенности океанских вихрей, района исследования и	
используемых спутниковых сенсоров	6
1.1. Мезо- и субмезомасштабные вихри в океане	6
1.2 Физико-географическая характеристика объекта исследования	11
1.2 Технические характеристики используемых спутниковых сенсоров	16
Глава 2. Материалы и методы	19
2.1 Материалы, используемые в настоящей работе	19
2.2 Методика обработки данных РСА изображений	20
3. Характеристики вихрей в круговороте Бофорта по данным	
спутниковых радиолокационных измерений	24
3.1 Характеристики вихрей в круговороте Бофорта в 2007 и 2011 году по	
данным ASAR	24
3.2 Характеристики вихрей в круговороте Бофорта в 2016 году по данным	
Sentinel 1-A,B и PALSAR-2	33
3.3 Анализ характеристик вихрей в круговороте Бофорта по данным	
спутниковых радиолокационных измерений за 2007, 2011 и 2016	
ГГ	39
Заключение	55
Список используемой литературы	58

## Список используемых сокращений

- СЛО Северный Ледовитый Океан
- РСА- Радар с синтезированной апертурой
- РЛИ Радиолокационное изображение
- ASAR Advanced Synthetic Aperture Radar
- ESA(EKA) European Space Agency (Европейское космическое агентство)
- ALOS-2 Advanced Land Observing Satellite

JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency (Японское агентство аэрокосмических исследований)

ПЗЛ – Прикромочная зона льда

ВКС – Верхний квазиоднородный слой

#### Введение

На настоящий момент известно, что вихревые структуры в океане – важная составляющая его циркуляции. Вихри, генерирующиеся в Амеразийском секторе Северного Ледовитого океана (СЛО), способны переносить водные массы и соответствующие трассеры на значительные расстояния от мест их образования. Особый интерес представляет собой район антициклонического круговорота Бофорта, исследуемый в данной работе, в ядре которого наблюдается максимальная для акватории СЛО толщина слоя пресной воды, достигающая 22-25 м. Отмечено также, что большой запас доступной потенциальной энергии, вызванный характерным наклоном изопикн в этом районе, является одной из причин высокой встречаемости вихрей в контактных измерениях [1, 3].

Значительное очищение исследуемого района ото льда в летне-осенний период [5,6] позволяет эффективно использовать методы дистанционного зондирования для исследования мезо- и субмезомасштабных процессов в поверхностном слое СЛО в это время. Анализ поверхностных проявлений вихревых структур в изображениях РСА даёт возможность определить районы генерации вихрей, их диаметр, знак вращения, тип проявления и глубину места, соответствующую центру вихря, как для вихрей, наблюдаемых на участках чистой воды, так и для вихрей в прикромочной зоне льда и в полях разреженного льда.

В данной работе рассматриваются вихри мезо- и субмезомасштаба по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA), так как вихри этих масштабов малоизучены из-за сравнительно небольшой продолжительности жизни и, связанной с этим, немногочисленности их контактных измерений в исследуемом районе [1-3].

**Целью** данной работы является восполнение пробела в области исследования вихревой динамики в районе круговорота Бофорта на основе использования спутниковых радиолокационных измерений высокого пространственного разрешения. Для достижение поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Определить количество вихревых структур по данным PCA в исследуемом районе;

2. Определить характеристики (диаметр, знак вращения, тип проявления, глубину места) для каждого идентифицированного вихря;

3. Проанализировать полученные данные, включая сезонную и межгодовую пространственную изменчивость вышеуказанных характеристик, по возможности определив механизмы и места генерации вихрей.

Данная работа состоит из введения на 2 страницах, 3 глав на 48 страницах, заключения на 3 страницах, списка использованной литературы из 47 наименований, из них на русском языке – 17, на английском языке – 30.

# Глава 1. Особенности океанских вихрей, района исследования и используемых спутниковых сенсоров

### 1.1. Особенности океанских вихрей

Общая классификация вихрей.

В целом вихревые структуры в Океане можно классифицировать по двум составляющим: масштабу и механизму генерации.

По масштабу вихри, в основном, делят опираясь на радиус деформации Россби (L<sub>R</sub>), рассчитываемый по формуле:

$$L_{\rm R} = {\rm HN}/f,$$

где H – толщина слоя воды, N – частота Вяйсяля-Брента, f - параметр Кориолиса.

Таким образом вихри можно разделить на:

- Глобальные (L>> L<sub>R</sub>);
- Синоптические (L~ L<sub>R</sub>);
- Мезомасштабные ( $H < L < L_R$ );
- Мелкомасштабные (L<H)[6].

Однако на данный момент мезомасштабными вихрями привычно считать вихри с диаметрами от десятков до первых сотен километров (для вихрей открытого океана), а мелкомасштабными – с диаметрами в единицы километров. Разделяет их, характерная для исследуемой акватории, величина бароклинного радиуса Россби [7]. Являющиеся предметом данной работы субмезомасштабные вихри – это все вихри с диаметром меньше, чем характерный радиус деформации Россби. Таким образом за мелкомасштабные вихри считают только вихри с самыми малыми диаметрами порядка километра.

Радиус деформации Россби для района круговорота Бофорта, около 10-15 километров, поэтому большинство идентифицируемых в процессе исследования вихрей можно отнести к субмезомасштабу, однако присутствовали и вихри, относящиеся к мезомасштабу (порядка 100 километров).

По механизму генерации вихри можно разделить на:

- Фронтальные вихри и ринги;
- Топографические;
- Фрикционные и сдвиговые цепочки;
- Образованные за счёт изрезанности береговой линии;
- За островами;
- Следствие крупномасштабных атмосферных процессов;
- Диполи;
- Одиночные спирали или их плотные упаковки.

Фронтальные вихри возникают вследствие развития бароклиннобаротропной неустойчивости течений на океанических фронтах или на периферии более крупных вихрей (т.н. присоединенные вихри) и являются одними из самых распространенных [8, 9, 10, 11].

Топографические вихри формируются за счет неустойчивости течений в момент натекания на неровности рельефа дна (подводные хребты, неровности материковых склонов) [12, 13].

Фрикционные вихри образуются при воздействии на структуру течения бокового трения [12, 15, 16] и возникают, в основном, в прибрежной зоне или на стыке течений разной направленности. Цепочки сдвиговых вихрей возникают на резких фронтальных разделах при баротропной неустойчивости и являются неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца в горизонтальном варианте [10].

Неустойчивость течения может быть вызвана изрезанностью береговой линии, наличия в ней заливов либо мысов. Такая конфигурация берега и является причиной возникновения соответствующих вихрей [16].

Вихри за островами образуются за счет нестабильности сдвиговых течений воды, растекающихся по разным сторонам острова [10].

Вдольбереговые вихри образуются только при наличии устойчивого течения вдоль берега и влияния на него бароклинности и боковых границ [17].

Наиболее редкими считаются вихри, образованные крупномасштабными атмосферными возмущениями, такими как тропические циклоны или интенсивное охлаждение частей океана, проникающее вглубь за счёт конвективных потоков и создающие замкнутые циркуляции вихрей [11,12].

Диполи или грибовидные течения, как следует из названия, представляют из себя некоторое течение с вихрями разного знака вращения на конце. Такие вихри могут быть вызваны воздействием ветра на поверхность океана, разностью уровня моря, атмосферного давления, речным стоком, течениями в проливах, таяния льда, обтекания водой мысов или крупных объектов.

Классификация вихрей по механизмам проявления их на изображениях PCA.

Сравнительно высокое пространственное разрешение спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) позволяет получать большое количество информации о приповерхностном состоянии океана. В данном случае позволяет судить о типах вихревых структур исходя из некоторых механизмов их проявления на РЛИ.

Известно четыре механизма проявления вихрей на РЛИ:

- Сликовый (плёнки);
- Сдвигово-волновой;

- Термический;

- Ледовый [18,19].

Сдвигово-волновой механизм (рис. 1a) обусловлен взаимодействием гравитационно-капилярных волн и сдвиговых течений. Благодаря данному механизму имеется возможность регистрировать вихревые структуры на РЛИ при скоростях ветра до 12 м/с [20].

Сликовый механизм (рис. 1b) является наиболее распространенным и обуславливается подавлением гравитационно-капилярных волн поверхностными плёнками естественного происхождения, образующих нитевидные слики вихрей в результате конвергенции [20, 21]. Такой механизм происходит при скоростях ветра 3-5 м/с, в период, когда гравитационно-капилярные волны уже образованы, но поверхностные плёнки ещё не разрушены ветром [18].

Наиболее простым механизмом можно назвать ледовый (рис. 1с). Однако помимо льда трассером могут выступать и другие вещества, оказавшиеся на поверхности воды или вблизи её. Данный механизм доступен как для РЛИ, так и для изображений видимого диапазона излучения.



Рисунок 1 – Примеры проявлений вихревых структур на изображениях РСА и их идентификации: а) взаимодействие волн и течений, б) поверхностные плёнки в) ледовые трассеры в прикромочной зоне [22].

Термический механизм наблюдается при изменении характеристик границы океан-атмосфера в области гидрологического термического фронта и связанным с этим, изменении скорости ветра в данной области [18,19].

### 1.2. Особенности района исследования

Круговорот Бофорта (Beaufort gyre)

Круговорот Бофорта – океаническое течение, расположенное в полярной части СЛО к северу от Аляски, имеющее форму круговорота благодаря преобладающим Западным ветрам и являющееся одним из ключевых компонентов в формировании Арктического климата.

Круговорот накапливает в себе огромное количество пресной воды, образовавшейся при таянии льда, а также стока крупных северных рек, таких как, например, река МакКинли, Коллвил, Андерсон.

Помимо климата Арктики круговорот Бофорта также оказывает влияние и на весь климат в целом:

Во-первых, накопление пресных вод в круговороте приводит к дефициту их в Северной Атлантике, что создает условия для глубокой конвекции океанических вод и выделения тепла из океана в атмосферу в приполярных регионах, и также способствует интенсификации меридиональной циркуляции Атлантического океана.

Во-вторых, когда над Арктикой преобладают антициклоны, пресная вода, выделяемая из региона круговорота, тормозит процессы глубокой конвекции, снижает интенсивность меридиональной циркуляции и приводит к охлаждению климата. Такие периодические выбросы пресной воды из СЛО, происходившие в 1970-х, 1980-х и 1990-х годах, известны как «Великие аномалии солености» (Great Salinity Anomalies [23; 24]) [25]

## Море Бофорта

Море Бофорта – окраинное море СЛО, омывающее берега Аляски и Канады. Южная граница проходит по канадскому и Юконско-Аляскинскому арктическому шельфу, восточная вдоль Канадского архипелага, на севере море имеет условную границу, проходящую через мыс Барроу (Аляска) и Принц-Патрик (Канадский архипелаг) (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Карта приблизительных границ моря Бофорта.

Площадь моря Бофорта по различным источникам составляет около 476-481 тысяч квадратных километров. Средняя глубина около 1004 метров, а максимальна ~ 4680 метров. Объём составляет 739 кубических километров. [26]. Климат арктический, преимущественно зима (-28 – -30°С) и короткое сравнительно тёплое лето (6-8°С). Южная часть моря освобождается ото льда в летнее время на расстояние до 100 километров от берега.

Водную массу можно разделить по горизонтали на поверхностную, с летней температурой около -1,4°С и зимней -1,8°С; незначительно более тёплую подповерхностную, формирующуюся за счет поступления вод Тихого океана и Берингова моря через Берингов пролив; наиболее тёплую (0-1°С) глубинную, формируемую атлантическими водами; придонную (-0,4 – -0,8°С).

Направление поверхностных и подповерхностных течений в акватории моря Бофорта непосредственно связано с общей системой течений СЛО. Таким образом из-за влияния антициклонического круговорота Бофорта на севере большинство течений внутри моря направлены на юг или юго-запад, кроме узкого прибрежного течения в районе устья реки МакКензи, направленного на восток. (Рисунок 3). Также наблюдаются полусуточные приливы с высотами 0,3 – 0,5 метров.

Шельф моря Бофорта можно назвать самым узким в СЛО (не более 145 километров), наиболее узким местом считается район мыса Барроу, широким – район устья МакКензи. В целом шельф равномерно понижается в сторону севера, однако восточнее острова Хершел шельф пересекается с желобом МакКензи, где его глубина с 80 метров резко снижается до 3500 метров. Материковый склон пологий, с большим количеством расщелин в Западной части. Максимальные глубины наблюдаются в северной части моря, где располагается Канадская котловина и поднятие Бофорта с глубинами порядка 900 метров.



Рисунок 3 – Карта течений акватории моря Бофорта и восточной части Чукотского моря.

## Чукотское море

Чукотское море – окраинное море СЛО. Западная граница проходит через точку 76°с. ш. по 180 меридиану до острова Врангеля и дальше вдоль Восточно-Сибирского моря. Южная граница проходит по северной стороне Берингова пролива от бухты Шишмарева до мыса Уникан на Чукотском полуострове и далее до мыса Якан. Северная граница проходит через точку 72°с. ш. 156°з.д. до мыса Барроу и далее до бухты Шишмарева.



Рисунок 4 – Карта приблизительных границ Чукотского моря.

Площадь Чукотсткого моря составляет 595 тысяч квадратных километров. Средняя глубина около 71 метра, максимальная – 1256 метров. Объём составляет 42 тысячи кубических километров.

Береговая линия слабо изрезана на протяжение всей длины, а дно относительно ровное с впадинами не более 200 метров. Глубины вблизи берега 10 – 25 метров. В целом море достаточно мелководное.

В акватории Чукотского моря наблюдаются незначительные колебания температуры за год. В зимнее время на море оказывают влияние Сибирский,

Полярный антициклоны и Алеутский циклон, создавая неустойчивые по направлению системы ветров. Температуры февраля составляют -1,6 - -1,8 °C. Летом на акваторию оказывает влияние отрог Тихоокеанского максимума и приток тихоокеанских вод. Температура в летний период составляет 0,2 - 0,4°C Солёность восточной части Чукотского моря примерно 32‰, у кромки льдов 24‰, а у устьев рек -3 - 5‰. От поверхности ко дну солёность увеличивается, помимо зимы, когда она мало изменяется в толще.

Восточную часть Чукотского моря составляют тёплые и относительно солёные тихоокеанские воды, движущиеся через Берингов пролив и далее на восток, составляя Аляскинское прибрежное течение (Рисунок 3)

Чукотское море круглогодично покрыто льдом, неподвижным у берега и плавучим – вдали. Ширина припая не превышает 20 километров. При постоянных ветрах, сгоняющих лёд от материкового побережья Аляски, около него образуется так называемая стационарная Аляскинская полынья [27]

# 1.3 Технические характеристики используемых спутниковых сенсоров

Радиолокационные изображения являются основным методом исследования процессов на поверхности океана и в подповерхностном слое по нескольким причинам:

 Получение изображений с высоким пространственным разрешением и широкой полосой обзора;

 Независимость от времени суток благодаря активному зондированию;

 Независимость от погоды, так как для микроволнового диапазона радиолокации атмосфера практически прозрачна;

– Легкая интерпретация РЛИ из-за однородности диэлектрических свойств воды в микроволновом диапазоне (вариации рассеяния сигнала можно считать связанными только с параметрами возмущения) [28]

Активное зондирование поверхности океана со спутника основывается на измерении вариаций рассеянного излучения Радиолокационная картинка зависит от диапазона зондирования, поляризации и угла падения активного сигнала. Радиолокатор испускает электромагнитную волну имеющую стандартные характеристики, такие как длина, частота, где частота есть длина, деленная на скорость распространения электромагнитных волн в среде, волновой вектор, поляризация.

Вертикальная поляризация применяется для изучения процессов, проявляющихся посредством гравитационно-капилярного волнения; горизонтальная – менее чувствительна к мелкомасштабным проявлениям и используется для наблюдения, например, за морским льдом и отделения открытой воды.

#### Envisat ASAR

ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) – PCA, установленный на борту спутника Envisat (Environmental Satellite) Европейского космического агентства (ЕКА (англ. ESA)), запущенного на солнечно-синхронную орбиту Земли (средняя высота 790 метров, наклонением 98,55° и 35-дневным точным пролётом) 1 марта 2002 года. 8 апреля 2012 года спутник прекратил работу. Точные данные сенсора ASAR представлены в сравнительной таблице 1.

#### Sentinel 1A, -1B

Sentinel 1 – первые спутники в группе Sentinel европейской программы Copernicus. Sentinel 1A выведен на солнечно-синхронную орбиту (средняя высота 693 метра, наклонением 98,18° и 12-дневным точным пролётом) 3 апреля 2014 года, Sentinel 1B – 25 апреля 2016 года. Точные данные сенсора Sentinel -1 представлены в сравнительной таблице 1.

## ALOS-2 PALSAR-2

PALSAR-2 – PCA, установленный на борту спутника ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite) Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA), выведенного на солнечно-синхронную орбиту (средняя высота 636-639 метров, наклонением 97,92° и 97,33 минутным пролётом) 24 мая 2014 года. Точные данные сенсора PALSAR-2 представлены в сравнительной таблице 1.

## Таблица 1. Сведения об используемых РСА [29,30]

PCA	Envisat	Sentinel-1A,-B	AlOS-2
	ASAR		PALSAR-2
Диапазон	С	С	L
Частота сигнала,	5,7	5,405	1,27
ГГц			
Длина волны, см	5,66	5,55	23,62
Угол падения, °	15-45	20-45	8-70
Ширина полосы, км	56-400	20/80/250/400	350-490
Пространственное	25-150	5x5/5x20/25x80/20x40	60-100
разрешение, м			
Поляризация	гг/вв/вг/гв	гг/гв/вв/вг	вв/гг

### 2.1 Материалы, используемые в настоящей работе

В данной работе были проанализированы изображения РСА в С-диапазоне по данным Envisat ASAR за июнь-октябрь 2007 и 2011 года, а также данные Sentinel-1A, -В в С-диапазоне и ALOS-2 PALSAR-2 в L-диапазоне за июнь-октябрь 2016 года (Таблица 2).

Таблица 2. Информация о количестве данных всех PCA, использованных в анализе

Год	Сенсор	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Всего
2007	ASAR	11	23	57	38	18	147
2011	ASAR	83	59	32	34	17	225
2016	S-1 A,-B	30	58	52	27	17	184
2016	Palsar-2	-	-	8	17	11	36
Всего							592

Было проанализировано 372 изображения Envisat ASAR, из которых 147 изображений за 2007 и 225 изображений за 2011 год. Изображения Envisat ASAR в режиме широкой полосы (Wide Swath mode) с шириной полосы 400 × 400 км и пространственным разрешением 150 × 150 м были получены из архива Европейского космического агентства

Также проанализировано 184 изображения Sentinel, полученных из открытого архива Copernicus (https://scihub.copernicus.eu) в режиме широкой и

свехширокой полосы с пространственным разрешением 20 и 90 метров соответственно.

Также для расширения области покрытия было дополнительно проанализировано 36 изображений ALOS-2 PALSAR-2 за август-октябрь 2016 года в режимах сканирования scanSAR, fine и ultrafine с пространственным разрешением 50, 12,5 и 5 метров соответственно.

Всего в данном исследовании использовано 592 изображения РСА. Покрытие района исследования снимками всех использованных РСА приведено на рисунке 5.





#### 2.2 Методика обработки данных РСА изображений

Анализ данных ASAR был выполнен с использованием программного обеспечения Matlab, представленного в [31], тогда как анализ данных Sentinel-1 и PALSAR-2 был выполнен с использованием официального открытого программного обеспечения ESA SNAP (http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/),

однако процедура идентификации вихрей и предварительная обработка были одинаковыми для всех данных.

На этапе предварительной обработки каждое изображение в полном разрешении было визуально проверено с целью идентификации вихревых структур, описанных в первой главе и приведенных на рисунке 1.

На первом этапе изображения подвергаются низкочастотной фильтрации, тем самым исключаются пространственные вариации поля радиолокационного сигнала на масштабах, существенно больших чем длины этих структур.

На втором этапе проявления вихрей на снимках картируются в полуавтоматическом режиме (для изображений ASAR), и затем путем анализа границ вихрей, проявившихся одним из механизмов, описанных в первой главе, их местоположение, диаметр, знак вращения определяются вручную, как это было сделано, например, в [32,33,34,35] Все обнаруженные вихри затем были разделены на две основные группы – идентифицированные в открытой воде и в ПЗЛ. Значения батиметрии, соответствующей координатам вихрей, были получены из IBCAO версии 3.0 [36]

Пространственное распределение частоты встречаемости (ЧВ) вихрей определяется в виде отношения общего количества наблюдений вихрей в заданном районе моря к количеству РСА съемок данного района в период отсутствия льда.

Наложение масок льда выполнялось с использованием ежедневной карты концентрации морского льда AMSR-E и ее преемника AMSR-2, выпускаемыми университетом Бремена [37]

Мануальный метод идентификации содержать различные может отклонения, которые могут быть уменьшены при дальнейшей его автоматизации. Однако, насколько нам известно, такие методы не всегда доступны для анализа многоцелевых космических данных РСА.

На рисунке 6 показан пример вихрей, зарегистрированных в ПЗЛ в южной части моря Бофорта, образованных во время сезона таяния1 августа 2016 года по данным ALOS-2 Palsar-2. На рисунке можно видеть систему из двух вытянутых ледовых языков с большими вихревыми диполями в конце каждого. На рисунке 7 показана схематическая интерпретация идентифицированных вихревых структур, где линиями показаны границы льда. Довольно четко различаются 6 проявлений вихревых структур, большинство из них образуют вихревые диполи с диаметром антициклонического вихря, больше, чем у его циклонической пары. Это хорошо видно для пары 1-2, где диаметр вихря 1 составляет около 60 км, а диаметр соседнего циклона 2 составляет около 40 км. Примечательно, что приведенная система довольно крупных вихрей находится достаточно близко к берегу, однако ограничена от него 200-метровой изобатой.

Рисунок 6. Пример системы с крупными вихревыми диполями, наблюдаемыми на юге моря Бофорта. Фрагмент изображения ALOS-2 Palsar-2, полученного 1 августа 2016 года. схематическая интерпретация, показывающая вихревые образования, наблюдаемые в подвижных ледовых полях с цветными линиями, проведенными вдоль границ льда. Буквами AG обозначены отдельные вихри, наблюдаемые на изображении SAR. Наложены изобаты 200 м и 2000 м.

Рисунок 7. Схематическая интерпретация, показывающая вихревые образования, наблюдаемые в подвижных ледовых полях с цветными линиями, проведенными вдоль границ льда. Цифрами 1-6 обозначены отдельные вихри, идентифицируемые на данном изображении. Наложены изобаты 200 м и 2000 м.

# 3. Характеристики вихрей в круговороте Бофорта по данным спутниковых радиолокационных измерений

# 3.1. Характеристики вихрей в круговороте Бофорта в 2007 и 2011 году по данным ASAR

В таблице 3 приведены общие результаты анализа данных ASAR с июня по октябрь 2007 и 2011 года.

Всего идентифицировано 2724 вихря, из которых 1945 вихрей в 2007 году и 779 вихрей в 2011 году. 1429 всех обнаруженных вихрей были обнаружены в районах открытой воды и 1295 вихрей в ПЗЛ.

В ходе анализа стало известно, что в 2007 году наибольшее количество вихрей было зарегистрировано в августе, что составило 54%, тогда как в 2011 году 73% вихрей было зарегистрировано в сентябре. 1743 вихря из 2724 были циклоническими, что составляет более 60% как для вихрей открытой воды, так и для вихрей в ПЗЛ.

Таблица 3. Результаты наблюдений вихрей в круговороте Бофорта в июнеоктябре 2007 и 2011 гг по данным ASAR.

Год									
2007 2011									
	Количество РСА изображений / месяц								
Июнь Июль Авг. Сент. Окт. Июнь Июль Авг. Сен						Сент	. Окт.		
11(1)	23(17)	57(23)	38(20)	18(6)	83(1)	59(13)	32(7)	34(17	17(4)
	Количество идентифицированных вихрей								
18	18         405         1052         304         166         4         49         63         567         96							96	
		1945					779	•	
	Всего								
Месяц Июнь Июль					Авг.	вг. Сент. Окт. Вс		Всего	
Изображений 94(2) 8			82(30)	89(30)	72(37)	35(1	0) 37	72(109)	
Вихрей 27			27	431	1132	888	237 2724		2724

\* В скобках указано количество снимков с вихрями

На рисунках 8 и 9 представлено пространственное распределение вихрей за 2007 и за 2011 год соответственно.

Из рисунков видно, что вихри открытой воды (красные маркеры) в основном расположены на мелководном шельфе и континентальных склонах, в то время как вихри ПЗЛ (черные маркеры) локализованы преимущественно в глубоководных районах. Это характерно как для 2007 года, так и для 2011 года.

Рисунок 8. Пространственное распределение вихрей по данным ASAR за июнь-октябрь 2007 года Красным обозначены вихри в открытой воде, черным - вихри ПЗЛ. Используемая на рисунке батиметрия была взята из IBCAO v.3.0

Рисунок 9. Пространственное распределение вихрей по данным ASAR за июнь-октябрь 2011 года Красным обозначены вихри в открытой воде, черным - вихри ПЗЛ. Используемая на рисунке батиметрия была взята из IBCAO v.3.0

На рисунках 10 и 11 представлено пространственное распределение общего числа вихрей открытой воды (рисунок 10) и ПЗЛ (рисунок 11), определенных на квадрат сетки 20х25 км за 2007 и 2011.

Можно видеть, что наибольшее количество вихрей открытой воды идентифицированы над южной и центральной частями Чукотского моря, вдоль мелководного шельфа южной части моря Бофорта и в районе дельты реки Маккензи. Наибольшее количество вихрей в ПЗЛ же обнаружено к северу от Чукотского плато и над некоторыми частями круговорота Бофорта.

Рисунок 10. Пространственное распределение общего количества вихрей, определенных на квадрат сетки 20х25 для вихрей в открытой воде

Рисунок 11. Пространственное распределение общего количества вихрей, определенных на квадрат сетки 20х25 для вихрей в ПЗЛ

На рисунках 12 и 13 представлены гистограммы распределения глубин, над которыми были зарегистрированы вихри по данным ASAR.

Можно видеть, что вихри открытой воды (рисунок 12) наблюдались на глубинах от 20 до 3780 м, однако большинство из них (80%) из них были зарегистрированы на глубинах, не превышающих 200 метров. Вихри ПЗЛ (рисунок 13) распределены в том же диапазоне значений глубин, что и вихри открытой воды, однако большинство из них зарегистрированы над глубинами, более 1000 метров (в среднем 2000 метров).

Рисунок 14. Гистограммы распределения батиметрии для вихрей, зарегистрированных в открытой воде

Рисунок 15. Гистограммы распределения батиметрии для вихрей, зарегистрированных в ПЗЛ

На рисунках 16 и 17 представлены гистограммы распределения средних диаметров вихрей по данным ASAR.

Можно видеть, что диапазон диаметров вихрей открытой воды (рисунок 16) составил от 1 до 34 км, а для вихрей в ПЗЛ (рисунок 17) немного больше – от 1 до 78 км.

В среднем, значения диаметров большинства вихрей и открытой воды, и ПЗЛ не превышают 10 км, однако максимальные значения чаще фиксировались для вихрей в ПЗЛ.

Рисунок 16. Гистограммы распределения диаметров для вихрей, зарегистрированных в открытой воде

Рисунок 17. Гистограммы распределения диаметров для вихрей, зарегистрированных в ПЗЛ

# 3.2. Характеристики вихрей в круговороте Бофорта в 2016 году по данным Sentinel 1-A, -В и PALSAR-2

В таблице 4 приведены общие результаты по данным Sentinel 1-А, -В и PALSAR-2 за 2016 год.

Таблица 3. Результаты наблюдений вихрей в круговороте Бофорта в июнеоктябре 2016 года по данным ASAR.

Количество РСА изображений / месяц						
Июнь Июль Авг. Сент. Окт.						
30 58 60 44 28						
Количество идентифицированных						
вихрей						
36 21 1387 2092 1501						
5037						

Всего идентифицировано 5037 вихрей, из которых 2649 были обнаружены в открытой воде и 2388 в ПЗЛ.

В 2016 году наибольшее количество вихрей было зарегистрировано в сентябре. 3337 вихрей из 5037 были циклоническими, что составляет более 60% как для вихрей открытой воды, так и для вихрей в ПЗЛ.

Рисунок 18. Пространственное распределение вихрей по данным Sentinel 1-А, -В и PALSAR-2 за июнь-октябрь 2016 года. Красным обозначены вихри в открытой воде, черным - вихри в ПЗЛ. Используемая на рисунке батиметрия была взята из IBCAO v.3.0

Из рисунков видно, что вихри открытой воды (красные маркеры) в основном расположены на мелководном шельфе и континентальных склонах вблизи острова Бэнкс и на границе Аляскинского прибрежного течения и круговорота Бофорта на востоке Чукотского плато и отсутствуют на западе плато. Вихри ПЗЛ (черные маркеры) также локализуются у острова Бэнкс, присутствуют в западной части Чукотского плато, а также в центре и на северной периферии круговорота Бофорта. На рисунках 19 и 20 представлены гистограммы распределения глубин, над которыми были зарегистрированы вихри в 2016 году.

Можно видеть, что вихри открытой воды (рисунок 19) наблюдались на глубинах от 20 до 3780 м, однако наибольшее количество зарегистрировано на глубинах, не превышающих 200 метров. Вихри ПЗЛ (рисунок 20) распределены в том же диапазоне значений глубин, что и вихри открытой воды, и в отличие от вихрей открытой воды они имеют более сглаженное распределение, однако большое количество вихрей всё ещё расположено над глубинами до 200 метров.

Рисунок 19. Гистограммы распределения батиметрии для вихрей, зарегистрированных в открытой воде

# Рисунок 20. Гистограммы распределения батиметрии для вихрей, зарегистрированных в ПЗЛ

На рисунках 21 и 22 представлены гистограммы распределения средних диаметров вихрей по данным ASAR.

Можно видеть, что диапазон диаметров вихрей открытой воды (рисунок 21) составил от 1 до 28 км, а для вихрей в ПЗЛ (рисунок 22) немного больше – от 1 до 32км.

В среднем, значения диаметров большинства вихрей и открытой воды, и ПЗЛ не превышают 10 км, однако максимальные значения чаще фиксировались для вихрей в ПЗЛ.

Рисунок 21. Гистограммы распределения средних диаметров для вихрей, зарегистрированных в открытой воде

Рисунок 22. Гистограммы распределения среднего диаметра для вихрей, зарегистрированных в ПЗЛ

# 3.1 Анализ характеристик вихрей в круговороте Бофорта по данным спутниковых радиолокационных измерений за 2007, 2011 и 2016

В таблицах 4 и 5 приведена информация о результатах идентификации вихрей, полученных при обработке всех доступных изображений по данным всех перечисленных выше РСА. В общей сложности за 3 года в период с июня по октябрь идентифицировано 7749 вихрей, из них 4078 вихря, обнаружены в районах открытой воды (Таблица 4) и 3671 вихрями - в ПЗЛ и вблизи кромки льда (Таблица 5).

Таблица 4. Информация о количестве идентифицированных вихрей в открытой воде по данным РСА в Круговороте Бофорта в июне-октябре 2007, 2011 и 2016 гг.

Год	2007		2011		2016		Всего	
Месяц	Ц	АЦ	Ц	АЦ	Ц	AЦ	Ц	AЦ
Июнь	13	5	0	0	0	0	13	5
Июль	222	170	23	7	0	0	245	177
Август	489	231	33	7	476	160	998	398
Сентябрь	85	31	71	21	824	321	980	373
Октябрь	0	1	15	5	520	348	535	354
Всего	809	438	142	40	1820	829	2771	1307
	12	1247		182		2649		4078

\*Ц – циклонические вихри, АЦ – антициклонические вихри

Таблица 4. Информация о количестве идентифицированных вихрей в открытой воде по данным РСА в Круговороте Бофорта в июне-октябре 2007, 2011 и 2016 гг.

Год	2007		2011		2016		Всего	
Месяц	Ц	AЦ	Ц	AЦ	Ц	AЦ	Ц	AЦ
Июнь	0	0	2	2	0	0	2	2
Июль	9	4	10	9	36	21	55	34
Август	159	173	11	11	497	254	667	438
Сентябрь	121	67	295	170	603	344	1019	581
Октябрь	127	37	53	23	381	252	561	312
Всего	416	281	371	215	1517	871	2304	1367
	697		586		2388		3671	

\*Ц – циклонические вихри, АЦ – антициклонические вихри

Наиболее заметной особенностью полученных результатов является то, что циклонические вихри сильно доминируют над антициклоническими в среднем, в соотношении 70/30. Это верно и для вихрей открытой воды и для вихрей в ПЗЛ. Также, большая часть вихрей была зарегистрирована в виде грибовидных структур (диполей).

Большинство вихрей открытой воды были зарегистрированы в августе и сентябре, когда в район исследования наиболее освобожден от ледового покрова.

Тем не менее, в октябре 2016 года обнаружено сравнительно большое количество вихрей открытой воды, тогда как в 2007 и 2011 году в октябре их практически не было. Аналогичный результат получен за июль, когда в 2007 году в этом месяце было обнаружено большое количество вихрей, однако их почти или вообще не было в 2011 и 2016 годах. Наименьшее количество вихрей за все три года пришлось на июнь.

Согласно наблюдениям, вихри ПЗЛ также имеют отчетливый сезонный цикл, очень похожий на цикл вихрей открытой воды. Максимум их встречаемости зафиксирован в сентябре (44%), когда прикромочная зона хорошо развита, далее август (30%) и октябрь (24%).

Наибольшее количество вихрей открытой воды было идентифицировано в 2016 году, а именно 2649 вихрей, что вдвое выше, чем наблюдалось в 2007 и 2011 годах вместе взятых. В свою очередь, в 2011 году были зарегистрированы самые низкие значения - 182 вихрей открытой воды против 1247 вихрей, идентифицированных в 2007 году. Этот результат может быть частично вызван большим количеством данных РСА в течение пиковых месяцев обнаружения вихрей (август-октябрь) в 2016 году (132 изображения) по сравнению с 2007 годом (113 изображений) и 2011 годом (83 изображения). Что касается вихрей ПЗЛ, то наибольшее количество вихрей выявлено в 2016 году.

Вихри открытой воды преимущественно были зарегистрированы в южной и центральной частях исследуемого района, предположительно из-за более продолжительного и более устойчивого ледяного покрова на севере, многие из них обнаружены на мелководном шельфе и континентальном склоне. Однако около 13% (523 вихря) были зарегистрированы севернее 75 ° с.ш., вплоть до 80 ° с.ш. Примечательно также, что вихри открытой воды циклонического и антициклонического типа вращения часто встречаются в одном месте и в большинстве случаев представляют из себя диполи.

Места локализации вихрей хорошо передают основные течения вод из Тихого океана, пересекающих Чукотское море. Наиболее плотное скопление наблюдается вдоль Аляскинского прибрежного течения, идущего к Каньону Барроу, где оно расщепляется и продолжает двигаться на северо-запад до Чукотского моря и на восток вдоль всей области разлома шельфа в южной части моря Бофорта.

Большое количество вихрей также идентифицировано в районе дельты реки Маккензи, к западу от острова Бэнкс и в восточной части залива Амундсен.

Помимо областей шельфа, около половины всех вихрей открытой воды идентифицированы на более глубоких участках Чукотского плато и моря Бофорта, достигающих пика на глубинах 3000-4000 м. Несколько мест с

большим количеством вихрей наблюдается на южной периферии круговорота Бофорта.

Рисунок 23. Пространственное распределение вихрей, идентифицированных в открытой воде по данным РСА в июне-октябре 2007, 2011 и 2016 гг. Синие (красные) кружки обозначают циклонические (антициклонические) вихри. Размер маркера пропорционален вихревым диаметрам. Белая показывает границу области, к северу от которой отсутствуют свободные ото льда данные РСА. Наложены изобаты 200 м и 2000 м, взятые из IBCAO v.3.0.

Рисунок 24. Пространственное распределение общего количества вихрей, идентифицированных в открытой воде по данным РСА в июне-октябре 2007, 2011 и 2016 гг. Синие (красные) кружки обозначают циклонические (антициклонические) вихри. Размер маркера пропорционален вихревым диаметрам. Наложены изобаты 200 м и 2000 м, взятые из IBCAO v.3.0.

Как видно, одна из основных вихревых локализаций расположена севернее 75° с.ш., это вызвано освобождением данной области ото льда в течение нескольких недель в конце августа - начале сентября 2016 года, что позволило выявить сильную вихревую активность с более чем сотней вихрей.

На рисунке 25 - 27 представлена подробная информация о пространственном распределении вихрей ПЗЛ, идентифицированных в течение периода исследования. Как видно на рисунке 25, вихри в ПЗЛ более равномерно распределены по всей области исследования по сравнению с вихрями открытой воды, вероятно из-за сезонного развития и миграции ПЗЛ. Они распределены от

68,9 ° с.ш. до 84,4 ° с.ш., в то время как около 54% всех вихрей ПЗЛ находятся к западу от мыса Барроу (156,2 ° з.д.). Не смотря на сравнительно равномерное распределение, наблюдаются также и районы наибольшего скопления вихрей ПЗЛ. Многие из них были обнаружены на континентальном склоне на границе Чукотского моря и моря Бофорта, в восточной части моря Бофорта, и в разных местах между хребтом Менделеева и Чукотским плато, а также на северной периферии круговорота Бофорта. Можно также отметить, что, в общем, вихри ПЗЛ имеют несколько больший размер, чем вихри открытой воды.

Рисунок 25. Пространственное распределение вихрей, идентифицированных в ПЗЛ по данным РСА в июне-октябре 2007, 2011 и 2016 гг. Синие (красные) кружки обозначают циклонические (антициклонические) вихри. Размер маркера пропорционален вихревым диаметрам. Белая показывает границу области, к северу от которой отсутствуют свободные ото льда данные РСА. Наложены изобаты 200 м и 2000 м, взятые из IBCAO v.3.0.

Рисунок 26. Пространственное распределение общего количества вихрей, идентифицированных в ПЗЛ по данным РСА в июне-октябре 2007, 2011 и 2016 гг. Синие (красные) кружки обозначают циклонические (антициклонические) вихри. Размер маркера пропорционален вихревым диаметрам. Наложены изобаты 200 м и 2000 м, взятые из IBCAO v.3.0.

Относительно низкие значения количества вихрей в некоторых районах могут быть связаны с тем, что в этих районах вихри могут наблюдаться только при наличии там ПЗЛ. В связи с этим на рисунке 27 приводится сезонный ход широты вихрей ПЗЛ с июля по ноябрь. Как видно, вихри ПЗЛ наблюдаются в узкой полосе широт с центром в 71 ° с.ш. в начале сезона таяния льда в июле, одинаково для всех лет. В течение сезона широтная полоса расширяется и охватывает уже 5-7 градусов, достигая максимума в конце сентября при 81 ° с.ш. в 2016 году и при 84,4 ° с.ш. в 2007 и 2011 годах. Затем в течение октября наблюдается быстрое снижение широт до 70 ° с.ш.

Рисунок 27. Сезонные изменения в широтном положении вихрей ПЗЛ с июля по ноябрь. Красными (синими) крестиками отмечены места расположения вихрей, выявленных в 2007 и 2011 годах (2016 год).

Ha рисунках 28 И 29 приведены гистограммы батиметрии, соответствующей расположению вихрей в открытой воде (рисунок 28) и в ПЗЛ (рисунок 29). Можно видеть, что циклонические и антициклонические вихри открытой воды имеют два одинаковых пика в распределении по глубине - на глубинах 20-100 м (42% от всех вихрей открытой воды) и на глубинах 1500-4000 м (38%). Интересно отметить, что количество вихрей, обнаруженных на мелководном шельфе (<200 м) и глубоководье (200-4000 м), одинаково. Вихри ПЗЛ имеют аналогичный диапазон значений глубины, однако около 70% этих вихрей находятся на глубинах, превышающих 1000 м, со средней глубиной около 2000 м.

Рисунок 28. Гистограммы распределения батиметрии для вихрей, идентифицированных в открытой воде. Синий и красный цвета обозначают циклонические и антициклонические вихри соответственно

Рисунок 29. Гистограммы распределения батиметрии для вихрей, идентифицированных в ПЗЛ. Синий и красный цвета обозначают циклонические и антициклонические вихри соответственно

Гистограммы распределения диаметров вихрей для открытой воды и ПЗЛ показаны на рисунках 26 и 27. Диапазон диаметров для вихрей в открытой воде составляет от 0,5 км до 61 км. Однако значения диаметров около 94% вихрей открытой воды не превышают 10 км со средним значением 4,7 км. Для вихрей ПЗЛ диапазон диаметров шире, от 0,3 км до 106 км, и среднее значение также выше (6,8 км). Большие вихри ПЗЛ диаметром более 10 км наблюдались в 17% случаев (634 вихря). Как наблюдалось для вихрей открытой воды и ПЗЛ, средний диаметр антициклонов обычно немного больше, чем у циклонических вихрей.

Рисунок 30. Гистограммы распределения диаметров для вихрей, идентифицированных в открытой воде. Синий и красный цвета обозначают циклонические и антициклонические вихри соответственно.

Рисунок 31. Гистограммы распределения диаметров для вихрей, идентифицированных в ПЗЛ. Синий и красный цвета обозначают циклонические и антициклонические вихри соответственно

На рисунках 32 – 35 дополнительно показано пространственное распределение среднего и максимального диаметров вихрей открытой воды и ПЗЛ. Для вихрей открытой воды средние диаметры составляют около 5-6 км и преобладают как в районах шельфа, так и в глубоководье (рисунок 32). В средних значениях по ячейке сетки часто наблюдаются более крупные вихри диаметром 15-20 км над разломом шельфа и континентальным склоном, а также над глубоководьем к северо-востоку от Чукотского плато. Однако, если взглянуть на максимальное значение диаметра вихря, встречающегося в ячейке сетки (рисунок 33), преобладают диаметры 10 км, и гораздо большие вихри диаметром

20-40 км (до 60 км) наблюдаются вдоль южной части моря Бофорта, к северозападу от мыса Барроу и к югу от острова Бэнкс.

Рисунок 31. Пространственное распределение среднего диаметра для вихрей, идентифицированных в открытой воде на сетке 30 × 40.

Рисунок 32. Пространственное распределение максимального диаметра для вихрей, идентифицированных в открытой воде на сетке 30 × 40.

Для вихрей, идентифицированных в ПЗЛ преобладают средние значения 6-10 км. Средние диаметры (20-40 км) наблюдаются в центральной части и над северной периферией круговорота Бофорта, над границей Чукотского моря и моря Бофорта, а также между хребтом Менделеева и Чукотским плато.

Из распределения максимальных диаметров вихрей в ПЗЛ (рисунок 35) видно, что крупные вихри диаметром 20-40 км распространены, но зарегистрированы над глубинами, не превышающими 2000 м.

Рисунок 34. Пространственное распределение среднего диаметра для вихрей, идентифицированных в ПЗЛ на сетке 30 × 40.

Рисунок 35. Пространственное распределение максимального диаметра для вихрей, идентифицированных в ПЗЛ на сетке 30 × 40.

#### Заключение

Используя большой набор данных РСА по вихревым стуктурам в открытом океане и в ПЗЛ, проведена первая оценка характеристик мезо и субмезомасштабных вихрей в районе Амеразийского сектора Северного Ледовитого Океана.

В общей сложности идентифицировано 7749 проявлений вихрей на изображениях РСА с июня по октябрь в 2007, 2011 и 2016 годах, где 4078 вихрей, зарегистрированы в районах открытой воды, и 3671 вихрь - в ПЗЛ или вблизи кромки льда.

Наиболее заметной особенностью полученных результатов является то, что циклонические вихри значительно преобладают над антициклоническими: в среднем около 65-70% циклонических вихрей против 30-35% антициклонов. Большая часть вихрей также наблюдается в форме грибовидных структур (диполей), что согласуется с механизмом бароклинной нестабильности [38, 39).

Наибольшее количество вихрей в открытой воде обнаружено в августе и сентябре, когда регион имеет минимальную протяженность ледяного покрова. Данные результаты несколько отличаются от результатов, полученных для морей Евразийской Арктики, где наибольшее количество вихрей приходилось на июль [40]. Максимальное количество вихрей ПЗЛ зарегистрировано в сентябре, когда прикромочная зона льда хорошо развита и охватывает 5-7 градусов широты.

Диапазон вихревых диаметров в открытой воде распределён от 0,5 км до 61 км. Однако значения диаметров около 94% вихрей открытой воды не превышают 10 км со средним значением 4,7 км. Вихри ПЗЛ обычно больше по размеру со средним диаметром около 7 км и более широким диапазоном диаметров от 0,3 до 106 км. Можно сделать вывод, что средний диаметр

антициклонических вихрей обычно несколько больше, чем у циклонических, как для вихрей открытой воды, так и для вихрей в ПЗЛ.

Межгодовая изменчивость количества идентифицированных вихрей говорит о том, что наибольшее количество вихрей в открытой воде и в ПЗЛ зарегистрировано в 2016 году по сравнению с 2007 и 2011 годами. Данная межгодовая изменчивость согласуется с широкими изменениями содержания пресной воды в круговороте Бофорта в течение последнего десятилетия [25].

Известно, что вихри играют важную роль в накоплении и распространении пресной воды [41, 42], в связи с этим было выдвинуто предположение, что вихри способствуют уравновешиванию круговорота Бофорта и, следовательно, более энергичный круговорот с более высоким содержанием пресной воды должен интенсифицировать вихревое поле в данном районе [41]. Однако на данный момент набора данных исследования недостаточно для выявления связи между интенсификацией круговорота и количеством зарегистрированных вихревых структур.

Стоит отметить, что Мануальный метод идентификации может содержать различные отклонения, которые могут быть уменьшены при дальнейшей его автоматизации. Однако, насколько нам известно, такие методы не всегда доступны для анализа многоцелевых космических данных РСА.

Вихри часто наблюдаются вблизи батиметрических объектов, таких как континентальные шельфы, склоны и Чукотское плато, однако также они в достаточной мере присутствуют и в глубоководных частях исследуемой акватории. Вихри, зарегистрированные над глубоководьем, имеют несколько большие диаметры, что может означать, что они либо генерировались на границах течений и перемещались вглубь круговорота [43], либо генерировались посредством бароклинной нестабильности самого круговорота [41].

Настоящая работа одобрена и принята в печать рецензируемым журналом Journal of Geophysical Research: Oceans [22], а также представлена на ряде конференций [44,45,46,47] в том числе: *ESA Living Planet Symposium 2019* и *КИМО 2018 и 2019*, где была удостоена диплома за лучший стендовый доклад.

Автор выражает благодарность кандидату физико-математических наук Козлову Игорю Евгеньевичу за оказанную помощь и возможность участия в приведенном исследовании.

#### Список используемой литературы

1. Zhao, M. Characterizing the eddy field in the Arctic Ocean halocline /
 M. Zhao, M.-L. Timmermans, S. Cole, R. Krishfield, A. Proshutinsky, J. Toole //
 Journal of Geophysical Research Oceans. – 2014. – Vol. 119. – 12. – P. 8800–8817.

2. D'Asaro, E. Observations of small eddies in the Beaufort Sea // Journal of Geophysical Research. – 1988. – Vol. 93. – C6. – P. 6669–6684.

3. Timmermans, M.-L. Eddies in the Canada basin observed from icetethered prfilers / M.- L. Timmermans, J. Toole, A. Proshutinsky, R. Krishfield, A. Plueddemann // Journal of Physical Oceanography. – 2008. – Vol. 38. – 1. – P. 133– 145.

4. Ivanov V. V., Alexeev V. A., Repina I., Koldunov N. V., Smirnov A. Tracing Atlantic Water Signature in the Arctic Sea Ice Cover East of Svalbard // Advances in Meteorology. 2012. Vol. 2012(201818). 11 P.

5. Onarheim I. H., Smedsrud L. H., Ingvaldsen R. B., Nilsen F. (2014). Loss of sea ice during winter north of Svalbard // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2014. Vol. 66(23933).

6. Монин А.С. Гидродинамика атмосферы, океана и земных недр. СПб.:ГМИ, 1999. 524 С.

7. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2010. Т. 7. №1. С. 248-259.

Федоров К.Н., Кузьмина Н.П. Океанические фронты // Итоги науки и техники. Океанология. 1979. Т. 5. ВИНИТИ

9. Федоров, К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов // Гидрометеоиздат, 1983. 296 с.

10. Гинзбург, А.И. Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология. 1992. Т.32, Вып. 6. – С. 997–1004.

11. Лаврова, О. Ю. Слики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2, № 2. С. 118–123.

12. A.H., Блатов А.С., Иванов В.А., Косарев Тужилкин B.C. Среднемасштабные вихри В Мировом океане И географическое ИХ распространение// Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1983. №4. C. 28-36

13. Waters, G. E., Mysak L. A., Topographically induced baroclinic eddies near a coastline, with applications to the Northeast Pacific. J. Phys. Oceanogr. 1985. 15(11) 1470-1485

14. Бычкова И.А., Викторов С.В. Параметры вихревых структур и грибовидных течений в Балтийском море по спутниковым изображениям//Исследование Земли из космоса. 1988. №2. С. 29-35

 Гришин Г.А. Спутниковые и судовые наблюдения гидрологических фронтов Черного и Средиземного морей//Исследование Земли из космоса. 1993.
 №5. С. 76-88

16. Ivanov A.Yu., Ginzburg A.I. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Proceedings of the Indian Academy of Sciences. Earth and Planetary Sciences. 2002. 111(3), 281-295

17. С. С. Каримова, О. Ю. Лаврова, Д. М. Соловьев Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2011. № 5. С. 15–23.

18. Johannessen, J. A., Kudryavtsev, V., Akimov, D., Eldevik, T., Winther, N. & Chapron, B. (2005). On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2005. 110(C07017), pp-pp 1-14.

19. Dokken, S. T., Wahl, T. Observations of spiral eddies along the Norwegian coast in ERS SAR images // Norwegian Defence Research Establishment (NDRE). 1996. Rep. 96/01463, 29 pp.

20. Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D., and Knulst J.C. COASTWATCH '95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film on the ocean surface // J. Geophys. Res. 1998. 103, 24969-24982.

21. 4. Alpers W., Huhnerfuss H. The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophys. Res. 1989. 94, C5, 6251–6265

22. Kozlov I.E., Artamonova A.V., Manucharyan G.E., Kubryakov A.A. Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // Journal of Geophysical Research: Oceans (in press). 2019

Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S.-A., Lee, A.J., 1988. The great salinity anomaly in the Northern North Atlantic // Progress in Oceanography 1968–82.
 20, 103–151.

24. I. M. Belkin, Levitus S. Temporal variability of the Subarctic Front near the Charlie-Gibbs Fracture Zone // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 1996. 1012(C12):28317-28324

25. Proshutinsky, A., R. Krishfield. In a spin: New insights into the Beaufort Gyre // Eos, 100. 2019

26. Dunbar M. J., Carmack E. C., and Williams W. J. Beaufort Sea (англ.) // The Canadian Encyclopedia

27. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина, А. Г. Костяной. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. Москва: ИКИ РАН, 2016. – 335 с.

29. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования, Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э., Изд-во Радиотехника, 2010. 680 с

30. Сайт Японского агентства аэрокосмических исследований. Режим доступа: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm – свободный. Дата обращения 15 апреля 2019 года.

31. Kozlov, I. E., Kudryavtsev, V. N., Zubkova, E. V., Zimin, A. V., & Chapron, B. Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. 58(9), pp-pp 1073–1087.

32. Dokken, S. T., & Wahl, T. Observations of spiral eddies along the Norwegian coast in ERS SAR images. Norwegian Defence Research Establishment (NDRE), 1996. Rep. 96/01463, 29 pp.

33. Karimova, S. S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data// Advances in Space Research. 2012. 50(8), pp-pp 1107-1124.

34. Karimova, S. S., & Gade, M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery. International Journal of Remote Sensing. 2016. 37(10), pp-pp 2394-2414.

35. Atadzhanova, O. A., Zimin, A. V., Romanenkov, D. A., & Kozlov, I. E.(). Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas.Physical Oceanography. 2017. 2, pp-pp 75-83.

36. Jakobsson, M., Mayer, L., Coakley, B., Doткрытой водыdeswell, J. A., Forbes, B S., Fridman, et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0. Geophysical Research Letters. 2012. 39(12), pp-pp 1-6.

37. Spreen, G., Kaleschke, L., Heygster, G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2008. 113(C02S03), pp-pp 1-14.

38. Hogg, N. G., & Stommel, H. M. The heton, an elementary interaction between discrete baroclinic geostrophic vortices, and its implications concerning eddy heat-flow // Proceedings of the Royal Society of London. A Mathematical and Physical Sciences, 1985, 397(1812), pp-pp 1-20.

39. Manucharyan, G. E., & Timmermans, M.-L. (). Generation and separation of mesoscale eddies from surface ocean fronts // Journal of Physical Oceanography, 2014, 43(12), pp-pp 2545-2562.

40. Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений// Морской гидрофизический журнал. 2017. Т. 11. № 2. С. 338-345.

41. Manucharyan G.E., Spall M.A. Wind-driven freshwater buildup and release in the Beaufort Gyre constrained by mesoscale eddies // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43. P. 273–282.

42. Meneghello, G., Marshall, J., Cole, S. T., & Timmermans, M.-L. Observational inferences of lateral eddy diffusivity in the halocline of the Beaufort Gyre // Geophysical Research Letters. 2017. 44. 12,331–12,338

43. Spall, M., Pickart, R., Fratantoni, P., & Plueddemann, A. Western Arctic shelfbreak eddies: Formation and transport // Journal of Physical Oceanography. 2008.
38. pp-pp 1644–1668.

44. Артамонова А.В., Козлов И.Е. Характеристики вихрей в круговороте бофорта по данным спутниковых радиолокационных измерений // Комплексные исследования Мирового океана Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2019. С. 31-32.

45. Козлов И.Е., Артамонова А.В., Петренко Л.А., Кубряков А.А. Спутниковые наблюдения океанских вихрей в арктике // В сборнике: Морские исследования и рациональное природопользование Материалы молодежной научной конференции. 2018. С. 117-118.

46. Козлов И.Е., Артамонова А.В., Кубряков А.А. Характеристики вихрей в морях чукотском и бофорта по данным спутниковых радиолокационных измерений // Моря России: методы, средства и результаты исследований, 2018. С. 140.

47. Козлов И.Е., Артамонова А.В., Кубряков А.А. Характеристики вихрей в круговороте бофорта поданным спутниковых радиолокационных

измерений высокого и низкого пространственного разрешения // Процессы в геосредах. 2018. № 3 (17). С. 245-246.