



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии
и комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Вихревая динамика в прикромочной ледовой зоне

Исполнитель Благодатских Егор Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гордеева Светлана Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

Научный консультант доктор географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Зимин Алексей Вадимович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2024.

Санкт-Петербург

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Объект и предмет исследования.....	5
1.1. Географическая характеристика Карского моря	5
1.2 Особенности гидрологического режима Карского моря	6
1.3. Типизация льдов в Карском море.....	12
1.4. Прикромочная ледовая зона.....	14
1.5. Вихревые структуры.....	18
1.6. Обзор существующих методов регистрации проявлений субмезомасштабных вихрей.....	21
1.6.1. Контактные методы.	21
1.6.2. Дистанционные методы	24
2. Материалы и методы	30
2.1. Исходные данные	30
2.2. Методы исследования.....	32
2.2.1. Анализ положения ПЛЗ.....	32
2.2.2. Методы анализа спутниковых снимков.....	33
2.2.3. Анализ последовательных спутниковых снимков.....	37
2.2.4. Определение пространственных и физических характеристик вихрей по контактными данным.....	37
3. Пространственно-временная изменчивость характеристик вихревой динамики в прикромочной зоне	39
3.1 Анализ положения ПЛЗ.....	39
3.2 Спутниковые наблюдения.....	42
3.2.1 Статистический анализ.....	42
3.2.2 Пространственные особенности.....	47
3.2.3. Динамика вихревых образований	51
3.3 Контактные наблюдения	52
Заключение	58
Список литературы	60

ВВЕДЕНИЕ

Вихри повсеместно распространены в Мировом океане и способствуют переносу тепла, солей, питательных веществ, перемешиванию и т.д.[1,2]. Изучение свойств вихревых структур и причин их происхождения могут пролить свет на изменчивость пограничных слоев и фронтальных зон. Однако их исследование часто затруднено спонтанностью возникновения и достаточно ограниченным временем существования. Особенно сложно их изучать в суровых арктических условиях в районах прикромочной ледовой зоны, где работы затруднены из-за присутствия льдов.

Прикромочная ледовая зона (ПЛЗ) – это переходная область между сплошным морским льдом с концентрацией более 80% и открытым океаном с концентрацией льда менее 15%, отличающаяся высокой биологической активностью и изменчивостью физических параметров [3]. Мезомасштабные вихри в ПЛЗ имеют ряд особенностей, которые отличают их от вихрей в открытом океане. Они формируются под воздействием ледяного покрова, создающего дополнительные градиенты плотности, которые влияют на динамику вод в вихре. ПЛЗ ограничивает влияние волн и ветра, что повышает устойчивость, как самих динамических образований, так и их проявлений на поверхности. В результате мезомасштабные вихри в ПЛЗ могут существовать в течение более длительного времени и иметь более сложную форму и структуру, чем в открытом океане [4]. Вихревые структуры в области прикромочной ледовой зоны ранее активнее всего изучались на основе анализа данных спутникового дистанционного зондирования [5,6,7]. Так или иначе, спутниковые данные позволяют в основном определять горизонтальные и кинематические характеристики вихрей [8], а их вертикальная структура остается малоизученной. В последние годы для обнаружения вихрей на спутниковых началах активно применяются методы машинного обучения [9].

Изучение вихрей в ПЛЗ важно, так как они переносят значительные объемы водных масс, влияя на региональную циркуляцию вод. Это определяет

перераспределение тепла и солености, важных характеристик для полярных акваторий. Вихри усиливают теплообмен между океаном и атмосферой, содействуя таянию морского льда и изменению альбедо, что способствует быстрому росту температуры поверхностных вод. Они также транспортируют питательные вещества, поддерживая биологическую продуктивность, и влияют на углеродный цикл. Только изредка получается дополнить данные спутниковых наблюдений контактными измерениями.

В данной работе **объектом** исследования является гидрологический режим Карского моря. **Предметом** исследования являются характеристики вихревых структур в близи и области прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) Карского моря.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в количественной оценке пространственно-временная изменчивость характеристик вихревых структур в области и в близи ПЛЗ в Карском море летом 2023 года по спутниковым и контактными данным.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить литературный обзор сведений об особенностях вихревых структур и их проявлений в прикромочной ледовой зоне.
2. Оценить среднемноголетнее положение ПЛЗ в Карском море и ее особенности в летний сезон 2023 года
3. На основе собранной базы спутниковых радиолокационных изображений период с 01.07.2023 по 31.08.2023 детектировать проявления вихревых структур в Карском море .
4. Выполнить статистическую обработку полученных данных и выявить особенности пространственно-временной изменчивости проявлений вихревых структур
5. Проанализировать контактные данные и получить оценки тепла и пресной воды переносимыми малыми вихрями из области ПЛЗ.

1. Объект и предмет исследования

1.1. Географическая характеристика Карского моря

Карское море относится к окраинным морям Северного Ледовитого океана. Оно расположено между Западно-Сибирской равниной, островами Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля ($66\text{--}80^\circ$ с.ш., $54\text{--}103^\circ$ в.д.) (см. рис. К.1). Свое название море получило от реки Кара, впадающей в Байдарацкую губу. Площадь моря составляет около 883 тыс. км², объем вод — 112 тыс. км³. Максимальная длина моря с юго-запада на северо-восток достигает 1500 км, а ширина в северной части — до 800 км. Береговая линия сильно изрезана, образуя крупные заливы, такие как Енисейский, Пясинский, Таймырский, а также Байдарацкая, Обская и Тазовская губы. Основные реки, впадающие в море (Енисей, Обь, Пясина, Кара), обеспечивают годовой сток около 1300 км³ [10].

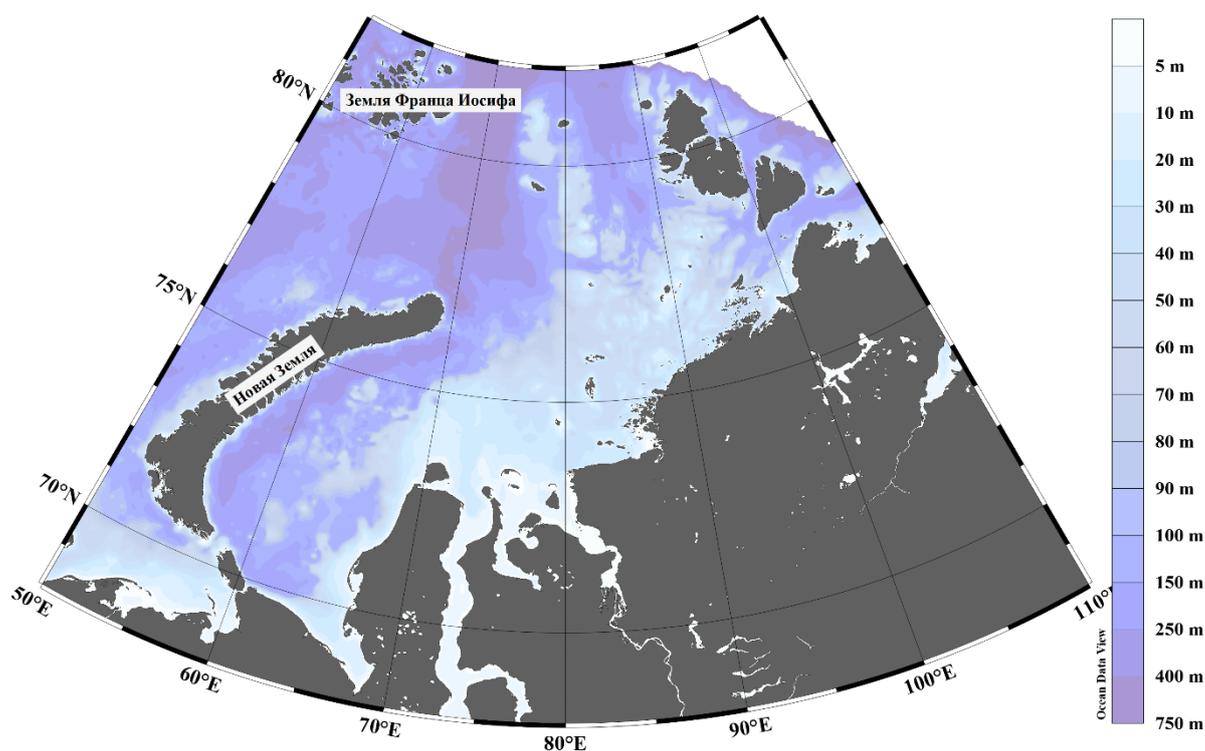


Рисунок 1. Карта Карского моря

Западная часть Карского моря включает глубоководные районы желоба Св. Анны и Новоземельской впадины. Глубины желоба варьируются от 300 до 500 м в южной части и достигают 1000 м на севере, у входа в Северный

Ледовитый океан [11]. Новоземельская впадина, расположенная вдоль архипелага Новая Земля, имеет глубины до 540 м [12].

1.2 Особенности гидрологического режима Карского моря

Климат. Климат Карского моря определяется его географическим положением: оно расположено к северу от полярного круга и находится под непосредственным влиянием Северного Ледовитого океана [13]. Карское море — одно из самых холодных морей России: средняя температура воздуха в январе колеблется от -20 до -28 °С, в июле — от $+1$ до $+6$ °С., температура воды поднимается выше 0 °С только вблизи устьев рек летом. Часто наблюдаются туманы и штормы, которые наиболее часты в западной части моря. Ветровой режим Карского моря имеет муссонный характер. В зимний период преобладают ветры с южной составляющей, летом — с северной. В переходные сезоны устойчивость потоков уменьшается, причем в сентябре заметно увеличивается повторяемость ветров, характерных для зимних условий, а в октябре ветры зимнего типа уже являются преобладающими. Число дней со штормами составляет около 65 – 90 за год. В среднем возможно 4 – 8 дней со штормом за месяц. В отдельные годы число дней со штормом может отклоняться от среднего в 1,5 – 2 раза. Скорости ветра во время штормов могут достигать 30 – 35 м/с. Особенности климата существенно влияют и на гидрологическую структуру Карского моря.

Водные массы. Водные массы Карского моря — это крупные объемы воды, формирующиеся в определенных районах-источниках и обладающие устойчивыми физическими, химическими и биологическими характеристиками. Они возникают преимущественно в верхних слоях при активном взаимодействии с атмосферой, обмениваясь теплом, влагой и импульсом. Каждая водная масса имеет уникальные свойства и распространяется как единое целое. В Карском море выделяются несколько типов водных масс, отличающихся происхождением и сезонными особенностями [14].

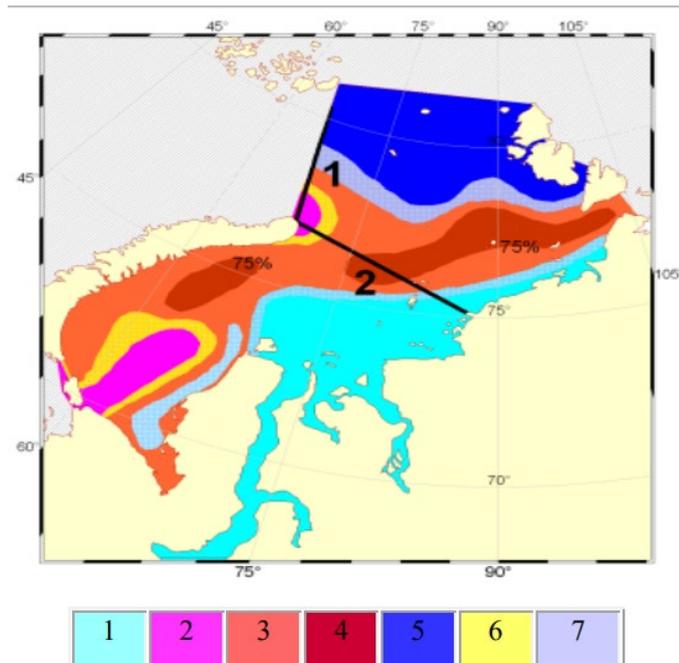


Рисунок 2. Расположение водных масс на поверхности акватории [14]
 1-речные воды; 2- баренцевоморские воды; 3- поверхностные воды арктических морей (концентрация 75%); 5- поверхностные воды Арктического бассейна; 6 и 7 - зоны смешения

На севере Карского моря присутствует поверхностная вода Арктического бассейна ($T=-1.7^{\circ}\text{C}$, $S=32$ PSU), поступающая из высоких широт Северного Ледовитого океана. Поверхностные воды арктических морей представлены зимней ($T=-1.3^{\circ}\text{C}$, $S=25$ PSU) и летней ($T=-1.2^{\circ}\text{C}$, $S=22$ PSU) модификациями с низкой соленостью, характерной для зон перехода между солеными и солоноватыми водами. Летом в южных и юго-западных районах формируется модифицированная вода ($T=7^{\circ}\text{C}$, $S=24.5$ PSU), существующая только в теплый период. Речные воды Оби и Енисея ($T=11.7^{\circ}\text{C}$, $S=0.5$ PSU), практически пресные, доминируют летом в прибрежных и центральных районах, способствуя разрушению льда и прогреву моря.

Баренцевоморские воды, поступающие через пролив Карские ворота и с севера, огибая мыс Желания, включают зимнюю ($T=-1.9^{\circ}\text{C}$, $S=35.6$ PSU) и летнюю ($T=10.5^{\circ}\text{C}$, $S=35.3$ PSU) разновидности. Эти воды отличаются высокой соленостью и относительно однородной температурой по вертикали.

Атлантические воды ($T=2.3^{\circ}\text{C}$, $S=35$ PSU), проникающие через глубоководные желоба Святой Анны и Воронина благодаря Западно-Шпицбергенскому течению, опускаются под менее плотные арктические воды и становятся придонными. Их положительная температура оказывает согревающее влияние на арктический климат.

В районе Новоземельской впадины фиксируется водообмен с Арктическим бассейном, о чем свидетельствует присутствие арктического планктона. Между желобом Святой Анны и впадиной существует возвышение дна, формирующее фронтальную зону, где сталкиваются течения, образуя мезомасштабные и субмезомасштабные вихри. Эти структуры способствуют перемещению вод и планктона, но ограничивают распространение опресненных поверхностных вод на север. Зимой образование льда вызывает конвекцию, увеличивая соленость и плотность вод, что усиливает вертикальное перемешивание. Все водные массы, кроме атлантических, в зимний период имеют температуру, близкую к точке замерзания.

Распределение температуры воды. Зимой температура поверхностных вод Карского моря близка к точке замерзания: от -1.8°C у северных границ до -1.3°C на Обско-Енисейском взморье, в зависимости от солености (-1.07°C при 20 PSU, -1.91°C при 35 PSU). Летом температура в северных и северо-восточных районах остается отрицательной, но на юго-западе, при отсутствии льда, достигает $4-6^{\circ}\text{C}$, а в прибрежных мелководьях временно до $+10-12^{\circ}\text{C}$. Приповерхностный слой положительных температур тонкий (менее 10–15 м), ниже температура падает до отрицательных значений. В глубинных слоях зимой температура ниже нуля, за исключением трогов Воронина и Св. Анны, где атлантические воды на глубине 100–200 м дают $+1-1.5^{\circ}\text{C}$. Адвекция баренцевоморской воды слабо влияет на прогрев из-за низкой температуры приходящих вод, лишь на десятые доли градуса превышающей местные значения [13].

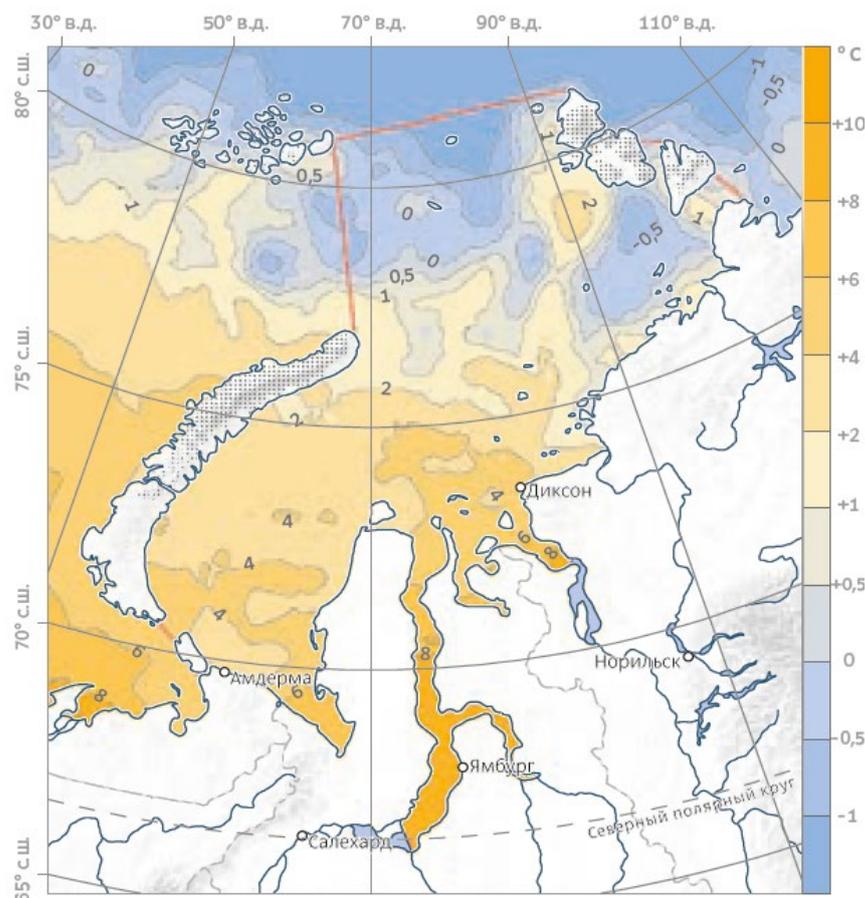


Рисунок 3. Температура приповерхностного слоя морской воды [13].

Сезонное распределение льдов, температура воды и воздуха, материковый сток, поступление теплых вод из Атлантического океана и Баренцева моря оказывают существенное влияние на температурный режим Карского моря.

Распределение солености воды. Соленость поверхностных вод варьирует от 3–5 PSU летом у о. Диксон и Обско-Енисейского мелководья до 33–34 PSU в центральных и северных районах. Среди тающих льдов летом соленость на 7–8 PSU ниже, чем в открытом море. На глубине 10–15 м соленость достигает 29–30 PSU, у дна – 33–34 PSU, с разницей между поверхностью и дном до 2–3 PSU в центральных и северных районах. Зимой осолонение поверхностного слоя происходит из-за вытеснения солей при льдообразовании, что вызывает плотностную конвекцию и перемешивание до 50–75 м, а в суровые зимы – до дна. Летом таяние льда создает тонкий распресненный слой, формируя устойчивую стратификацию, нарушаемую только штормами до глубины 5–10 м. Пресный сток с материка и обмен с Арктическим бассейном и Баренцевым

морем существенно влияют на соленость, особенно в прибрежных и северных районах [13].

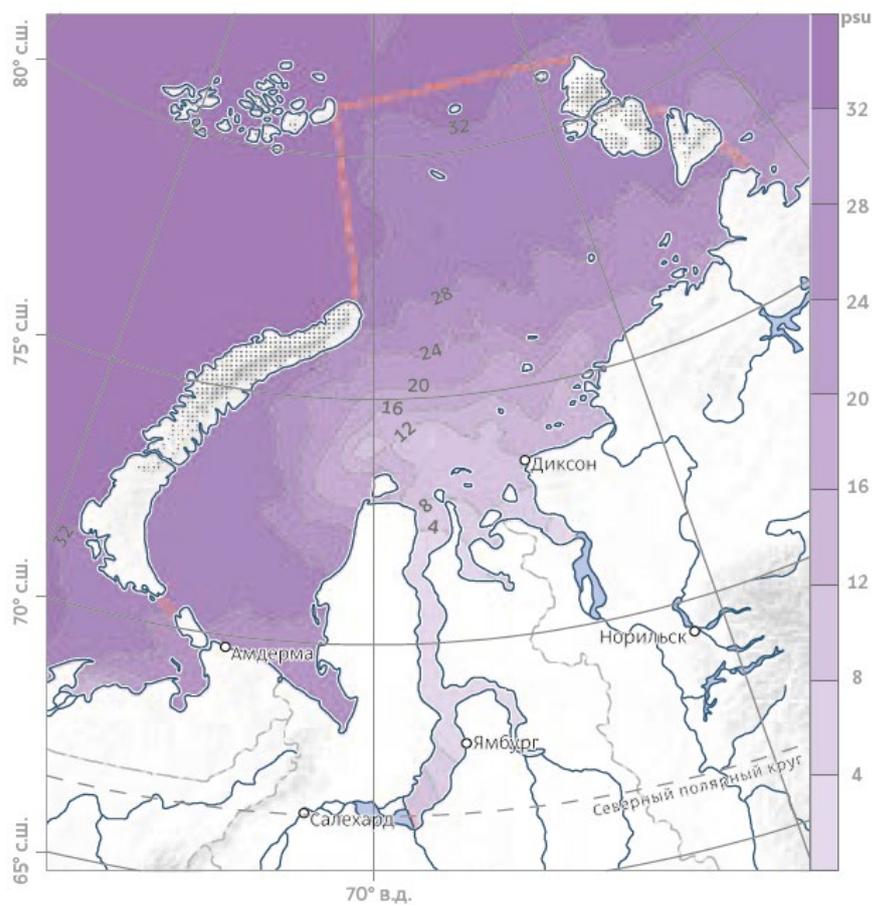


Рисунок 4. Соленость приповерхностного слоя морской воды [13].

разделяется на две ветви, из которых одна движется на северо-восток, а другая, под названием Новоземельского течения направляется к югу. У Карских Ворот от Новоземельского течения отделяется течение Литке, уходящее в Баренцево море, а основной поток поворачивает на восток и, сливаясь с течением из Баренцева моря, направляется к побережью Ямала, вдоль которого под названием Ямальского течения идет на север до встречи с западной ветвью Обь-Енисейского течения, замыкая тем самым круговорот поверхностных вод в юго-западной части моря.

1.3. Типизация льдов в Карском море

Карское море характеризуется сложными ледовыми условиями и большую часть года полностью покрыто льдом. Северо-восточная часть моря даже в летний период полностью не очищается ото льда. В юго-западной – ледовый покров сохраняется в течении 7-8 месяцев, с ноября по июнь-июль [16]. В среднем начало ледотаяния в Карском море приходится на конец мая. Юго-западная часть освобождается быстрее по сравнению с северо-восточной. Окончание разрушения льдов в центральной части моря происходит в конце июля – начале августа, а полное очищение от льда наблюдается в середине августа (Таблица 1). В летний период очищается до 3/4 акватории моря.

За 30-летний период с 1986 по 2015 годы в Карском море отмечается тенденция к снижению сплочённости льда: с 91% в 1986 году до 82% в 2015 году [16]. Площадь ледяного покрова за этот же период сократилась на 10–15%. Сроки наступления устойчивой ледовитости сдвинулись на 3–4 дня позже, что также отражает изменения климатических условий (Таблица 1).

Вероятность встречи с тяжёлыми льдами (сплочённость 9–10 баллов) в Карском море в августе составляет 50%, особенно в северо-восточной части моря. Ледовая акватория, занятая массивом льда, в июне составляет 34%, в июле – 4%, а в августе – 0%, но уже в сентябре возрастает до 14%. Эти данные

подчёркивают сезонные колебания ледового покрова и его влияние на морскую среду (Таблица 1).

Таблица 1. Данные по льду в Карском море (1986–2015 гг.) [16]

Параметр	Значение
Средняя сплочённость льда (август)	30–70%, в центральной части до 70–95%
Толщина льда (август)	До 50 см
Начало разрушения льда	Конец мая
Окончание разрушения льда	Конец июля – начало августа
Полное очищение от льда	Август
Изменение сплочённости (1986–2015)	С 91% до 82% (снижение на 9%)
Сокращение площади льда (1986–2015)	На 10–15%
Вероятность встречи с тяжёлыми льдами	50% (сплочённость 9–10 баллов, август)
Ледовая акватория, занятая массивом	Июнь: 34%, Июль: 4%, Август: 0%, Сентябрь: 14%

На картах концентрации льда (Рисунок 6 Рисунок 7) видно, что ледовая кромка в Карском море за последние 11 лет сместилась севернее по сравнению с кромкой, которая была в 2002-2013 гг.

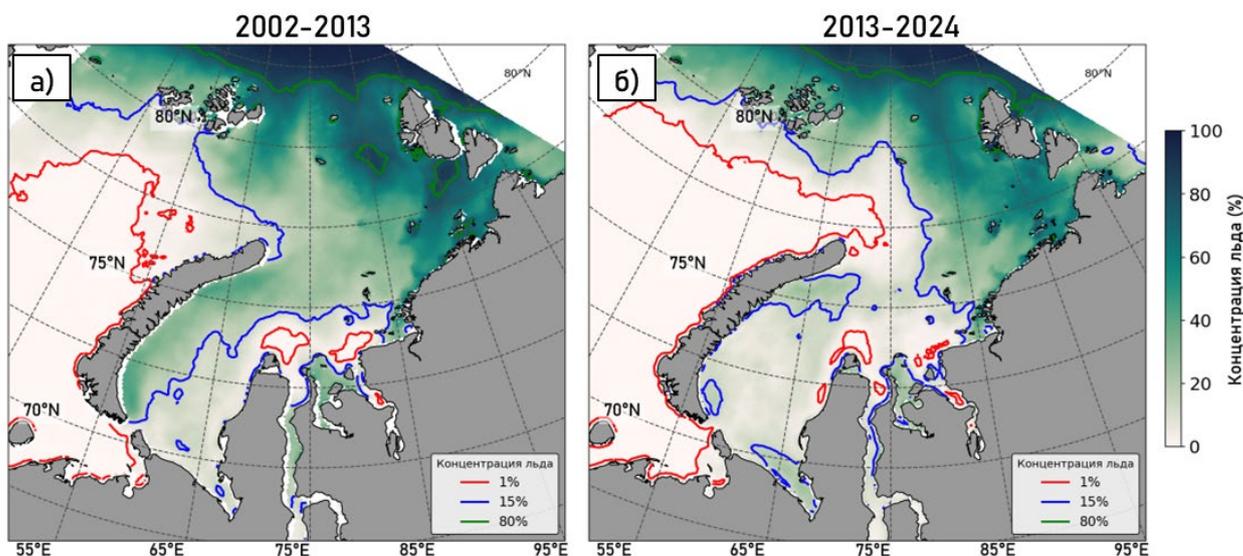


Рисунок 6. Осредненная концентрация ледового покрова в Карском море за июль в период с а) 2002 по 2013 гг. б) 2013 по 2024 гг. [17]

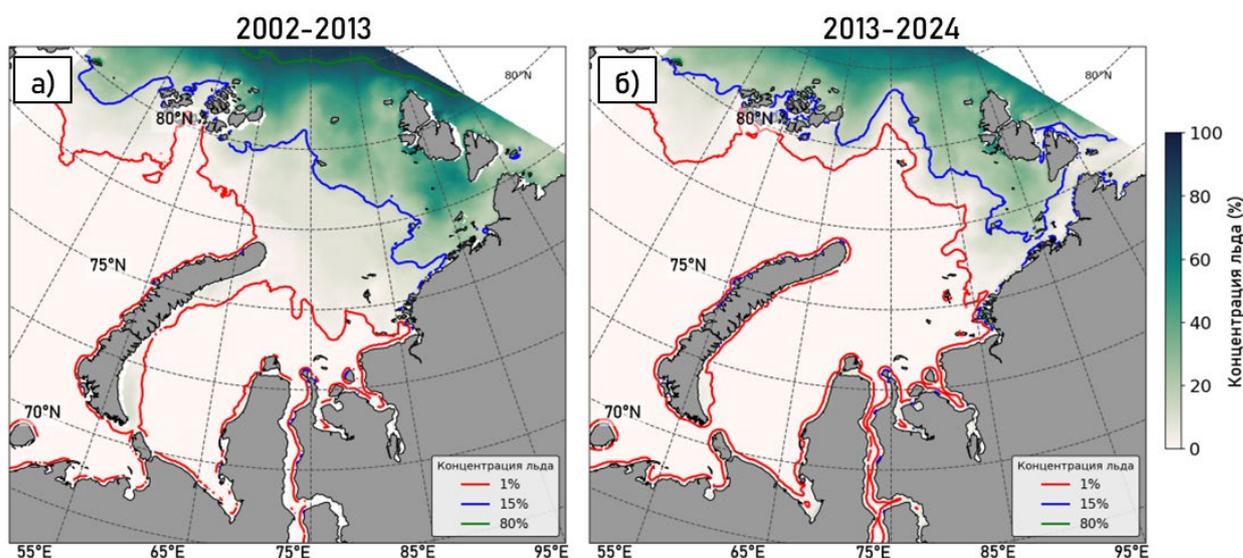


Рисунок 7. Осредненная концентрация ледового покрова в Карском море за август в период с а) 2002 по 2013 гг. б) 2013 по 2024 гг. [17]

1.4. Прикромочная ледовая зона

Прикромочная ледовая зона (ПЛЗ) характеризуется как переходная область между сплошным ледяным покровом и открытым океаном, где лед подвержен значительным динамическим изменениям под воздействием ветра, течений и мезомасштабных процессов. Эта зона отличается повышенной подвижностью льда, меньшей концентрацией и размером льдин по сравнению с

внутренним ледяным покровом, а также усиленным взаимодействием между льдом, океаном и атмосферой [18].

ПЛЗ характеризуется с нескольких точек зрения, каждая из которых подчеркивает уникальные аспекты этой зоны [3]. Эти подходы включают географический, физический, количественный, экологический и динамический:

1. Географически ПЛЗ определяется как область, где концентрация морского льда варьируется от 15% до 80%, что делает ее переходной зоной между открытым океаном и плотным ледяным покровом. Эта характеристика подчеркивает пространственное расположение ПЛЗ и ее изменчивость в зависимости от региона и сезона. Национальный центр данных по снегу и льду (NSIDC) отмечает, что ПЛЗ обычно простирается на 100–200 км от кромки льда вглубь ледяного покрова [19].
2. Физический подход, предложенный Всемирной метеорологической организацией (WMO), определяет ПЛЗ как область, где ледяной покров подвергается воздействию волн и зыби, проникающих из свободных ото льда частей океана [20]. Это приводит к повышенной подвижности льда и усиленному взаимодействию между льдом, океаном и атмосферой, что особенно важно для процессов теплообмена. Однако количественного определения не предоставлено.
3. Количественный подход фокусируется на измерении концентрации льда, обычно в диапазоне 15–80%, что позволяет использовать спутниковые данные для определения границ и ширины ПЛЗ [21]. Исследование Стронга и Ригора (2013) демонстрирует, как градиенты концентрации льда используются для анализа сезонной и региональной изменчивости ПЛЗ, подчеркивая ее динамическую природу.
4. С экологической точки зрения ПЛЗ является биологически активной зоной, поддерживающей уникальные экосистемы. Норвежский полярный институт (Norsk Polarinstitutt) подчеркивает, что ПЛЗ обеспечивает среду для фитопланктона и морских организмов, таких как тюлени и птицы, благодаря

высокой первичной продуктивности, обусловленной доступом света и питательных веществ [22].

5. Динамический подход акцентирует внимание на сложных взаимодействиях в ПЛЗ, включая турбулентные потоки и мезомасштабные вихри. Исследование Манучаряна и Томпсона (2022) показывает, что вихри в ПЛЗ переносят теплые подповерхностные воды к поверхности, усиливая таяние льда и влияя на энергетический баланс региона. Этот подход особенно важен для изучения вихревой динамики [23].

Прикромочная ледовая зона (ПЛЗ) представляет собой динамичную и биологически активную полосу морского льда, расположенную вблизи открытого океана, где концентрация льда варьируется от 15% до 80%. Она примыкает как к сплошному льду с концентрацией более 80%, так и к разреженному льду с концентрацией менее 15%, что делает её переходной областью между этими состояниями ледяного покрова. ПЛЗ выполняет роль буферной зоны, защищающей внутренний лед от воздействия волн, влияет на формирование атмосферного пограничного слоя и определяет ключевые пространственные масштабы для полярных экосистем и климата. В исследованиях, таких как работа Strong и Rigor [21] ширина ПЛЗ измеряется с использованием методов анализа спутниковых данных, основанных на градиентах концентрации льда, подчеркивая её изменчивость в зависимости от сезона и региона.

ПЛЗ представляет собой переходную область между открытыми морскими водами и плотным ледяным покровом, где лед сплочённостью от 15% до 80% взаимодействует с атмосферой и океаном. Эта зона играет ключевую роль в пространственной динамике арктических льдов и определяется сильной изменчивостью как погодных условий, так и гидрологических характеристик. ПЛЗ характеризуется сложной структурой, включающей участки льда и воды, которые подвергаются значительному воздействию ветра, температуры и солёности. Такие условия создают благоприятную среду для образования

турбулентных потоков и мезомасштабных вихрей, способствующих перемешиванию поверхностного слоя океана.

Среди ключевых процессов в ПЛЗ выделяются активный теплообмен, таяние льда и перемешивание водных масс. При ветровых условиях, направляющих дрейф льда в сторону открытой воды, наблюдается уменьшение его сплочённости, что усиливает теплообмен между океаном и атмосферой. Таяние льда происходит быстрее в зонах контакта с более тёплыми водами, которые дополнительно прогреваются солнечной радиацией. Напротив, при ветре, направленном с открытой воды на ледяной покров, происходит конвергенция льдин, их уплотнение и дробление, что также стимулирует образование вертикальных градиентов плотности и активизацию перемешивающих процессов.

Также границе ПЛЗ формируется Арктическая фронтальная зона (АФЗ) [24] которая характеризуется резкими контрастами температуры и солёности между распреснёнными холодными водами у кромки льда и более тёплыми водами открытого моря. Эти градиенты способствуют конвективным движениям, усиливающим вертикальное перемешивание водных масс. Пространственная динамика АФЗ подвержена влиянию сезонных изменений, ветровых режимов и положения ледяного покрова. В теплое время года АФЗ отличается высокими термохалинными контрастами, которые формируют сложные гидродинамические структуры, влияющие на процессы транспорта тепла и питательных веществ.

Обе зоны являются ключевыми элементами климатической системы Арктики, оказывая влияние на крупномасштабные атмосферные и океанические процессы. Исследование ПЛЗ и АФЗ имеет большое значение для понимания механизмов изменения арктического климата, а также для уточнения сезонной и многолетней изменчивости ледяного покрова. Современные методы дистанционного зондирования, такие как спутниковая радиолокация и использование радиометров высокого разрешения, позволяют получать важные

данные о пространственно-временной динамике этих зон, несмотря на сложности наблюдений в условиях Арктики. Однако необходимость систематизации этих данных и изучения долгосрочных трендов остаётся актуальной задачей для арктических исследований.

1.5. Вихревые структуры

Вихри, формирующиеся у кромки льда и в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ), являются общей динамической особенностью эволюции кромки льда при переменных ветрах и океанических течениях в полярных океанах. Известно, что они играют важную роль в деформации, горизонтальном переносе и таянии морского льда. Предыдущие исследования показывают, что вихри МИЗ широко распространены в полярных районах океана, таких как пролив Фрам, и обсуждают широкое разнообразие механизмов их образования на основе имеющихся натуральных, авиационных и спутниковых наблюдений [25,26,27].

Вихри классифицируются по размерам. Различают на крупномасштабные мезомасштабные, мелкомасштабные, на границе между мезо- и мелкомасштаба существует субмезомасштаб. Граница это порядка радиуса Россби. В работе мы будем рассматривать вихревые структуры структуры мезо- и субмезомасштаба.

Радиус деформации Россби (R_n) – это масштаб длины, имеющий фундаментальное значение в динамике атмосферы и океана. По существу, он является горизонтальным масштабом, на котором эффекты вращения становятся такими же важными, как и эффекты плавучести [29].

$$R_n = \frac{c_n}{f}, \quad (1)$$

$$c_n \approx \frac{1}{n\pi} \int_{-H}^0 N(z) dz, \quad (2)$$

где c_n – фазовая скорость n-ой моды волн Россби,

f – параметр Кориолиса,

H – толщина водного слоя,

N – средняя по глубине частота Вяйсяля-Брента.

В Северном Ледовитом океане радиус деформации Россби для первой бароклинной моды варьируется от ~5 км в бассейне Нансена до ~15 км в центральной части Канадского бассейна. На шельфовых морях (например, Карском море) значения радиуса деформации Россби составляют 1–7 км из-за слабой стратификации и малых глубин. Сезонные изменения заметно влияют на радиус деформации только на мелководных шельфах, где зимняя гомогенизация водной толщи может снижать его до менее 1 км [29].

В зависимости от направления вращения вихри могут быть циклоническими (против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном полушарии) или антициклоническими (по часовой стрелке в северном полушарии и против часовой стрелки в южном полушарии).

Мезо- и субмезомасштабные процессы в морях (вихревые структуры, внутренние волны, в том числе и нелинейные) в настоящее время являются менее изученными, хоть и вносят значительный вклад (более 50%) в спектры флуктуаций течений и температуры воды в диапазоне от нескольких месяцев до частоты Вяйсяля (N) в океанах, морях [30,31]. Они играют существенную роль в формировании химико-биологических полей, поэтому их исследование представляется актуальным для решения широкого круга экологических задач.

Имеющиеся вихревые наблюдения в Северном Ледовитом океане все еще очень скудны, поэтому для восполнения этих пробелов используются гидродинамические модели высокого разрешения [32,33]. Несмотря на то, что современные модели с разрешением 1 км и тоньше потенциально могут разрешать малые вихри в ПЛЗ и вокруг ледостава [34], реалистичное прогнозирование мезо- и субмезомасштабной динамики ПЛЗ остается сложной задачей и требует хорошей наблюдательной базы для улучшения и валидации моделей. Поэтому спутниковое дистанционное зондирование с использованием

космических радаров с синтезированной апертурой (SAR) является хорошим и эффективным источником информации для изучения и лучшего понимания вихревого поля в Северном Ледовитом океане, включая покрытые льдом регионы [5,7,8]. Особенно хорошо в SAR то, что он может отображать динамику ПЛЗ, включая вихревые движения, при самых разных скоростях ветра, включая сильный ветер [25, 26].

Согласно исследованиям, вихри в Карском море наиболее активны в тёплый сезон, когда формируется приповерхностный пикноклин [28]. В северной части моря, вблизи ПЛЗ, вихри чаще регистрируются в районах фронтальных зон, связанных с таянием льда. Спутниковые данные (Envisat ASAR, Radarsat-1, 2) показывают, что вихри имеют преимущественно циклонический тип вращения (около 85%) и диаметры от 2 до 4 км [28]. Антициклонические вихри, хотя и менее распространены, имеют диаметры на 20% больше, чем циклонические.

Внутренняя структура вихрей в ПЛЗ изучена слабо. Данные о вертикальном распределении температуры, солёности и скоростей течений практически отсутствуют, так как наблюдения ограничиваются спутниковыми снимками поверхности или редкими профилями [36]. Даже в научных программах типа MOSAiC, где использовались дрейфующие буи, число измерений было ограничено, а высокое вертикальное разрешение достигалось сложными и дорогостоящим оборудованием [36]. Это затрудняет определение трёхмерной структуры вихревых образований и их характеристик.

Жизненный цикл вихрей также остаётся малоизученным. Современные наблюдения фиксируют лишь моментальные «снимки» их положения и формы, не позволяя отследить развитие или распад [7]. Систематическое наблюдение за эволюцией вихревых структур, включая влияние ветра или других факторов, отсутствует, что делает неясными причины их затухания или продолжительности существования [7].

Зимой подлёдные вихри в ПЛЗ почти не изучены. Сплошной лёд подавляет поверхностные вихревые процессы, но в толще воды могут формироваться струйные или геострофические структуры [7]. Их активность и влияние на циркуляцию остаются неизвестными, так как спутники и буи не могут фиксировать данные сквозь лёд [7].

Вихревые структуры играют важную роль в переносе тепла, массы и питательных веществ. Модели показывают, что они обеспечивают вертикальный тепловой поток к поверхности порядка 100 Вт/м^2 и перемешивают водные массы между шельфом и глубоким бассейном [7,8]. Однако количественные оценки их вклада в эти процессы отсутствуют, так как данные основаны на идеализированных моделях, а полевые измерения редки [7].

1.6. Обзор существующих методов регистрации проявлений субмезомасштабных вихрей

Мы можем разделить методы и приборы, используемые при мезомасштабных измерениях, на две категории: контактные и дистанционные.

1.6.1. Контактные методы.

Контактные исследования можно проводить как с борта судна, так и автономными зондами. Наиболее передовыми из них являются использование дрейфующих буев и глайдеров.

Судовые наблюдения. Во время судовых измерений используется методика океанографических разрезов (Рисунок 8). Это последовательный ряд океанографических станций, расположенных через определенное расстояние друг от друга, и выполняющихся в кратчайшее возможное время [37]. Разрез пересекает всю исследуемую вихревую структуру. Планирование расположения и протяженности разрезов зависит от размеров исследуемого вихря, который, при возможности, определяется по спутниковым снимкам, полученным с берега. Расстояние между станциями варьируется от 1 до 5 морских миль в зависимости от изменчивости термохалинных характеристик, с повышенной плотностью

измерений в зонах гидрологических фронтов, где вихри наиболее активны, и меньшей — в однородных районах открытого моря. Метод позволяет оперативно собирать репрезентативные данные о гидрологических и гидрохимических параметрах, характеризующих динамику, трансформацию и условия формирования вихревых структур в исследуемой акватории. Так же если позволяют ресурсы, для изучения вихрей можно проводить полигонное исследование. Предполагаемое месторасположение вихря покрывается сетью станций, которые расположены так, чтобы охватить площадные и временные масштабы обнаруженной структуры. Вихрь идентифицируется на разрезе как куполообразный подъем или опускание изолиний температуры, солёности, или плотности.

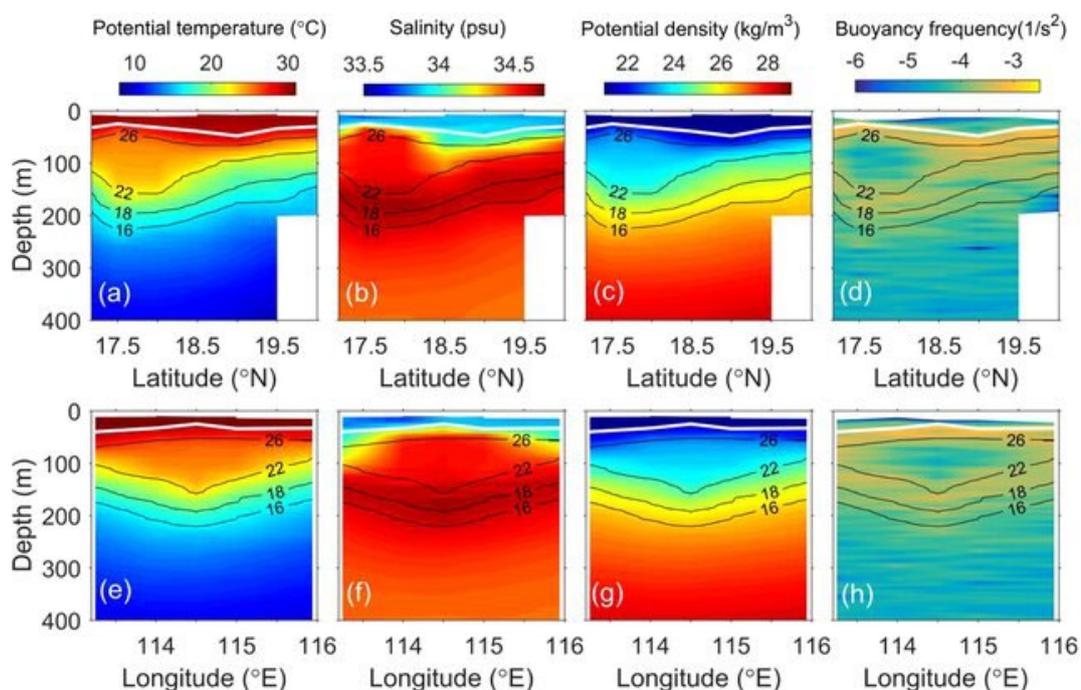


Рисунок 8. Распределения [38] термохалинных свойств на разрезах S1 (верхний ряд) и S2 (нижний ряд), включая (А, Е) потенциальную температуру, (В, F) солёность, (С, G) потенциальную плотность и (D, H) квадрат частоты плавучести (N^2). Серыми линиями обозначена глубина смешанного слоя (MLD). Указаны изотермы 26°C, 22°C, 18°C и 16°C.

Поверхностные дрейфтеры. Надводные дрейфтеры (Рисунок 9) представляют собой буи с парусом, который находится на глубине около 15

метров. Эти буи пассивно следуют за горизонтальным потоком на поверхности. Буй оснащен спутниковым передатчиком и электронными устройствами для измерения давления воздуха и температуры поверхности моря [28]. Использование дрейфтеров в арктических регионах осложнено наличием ледового покрова большую часть времени.

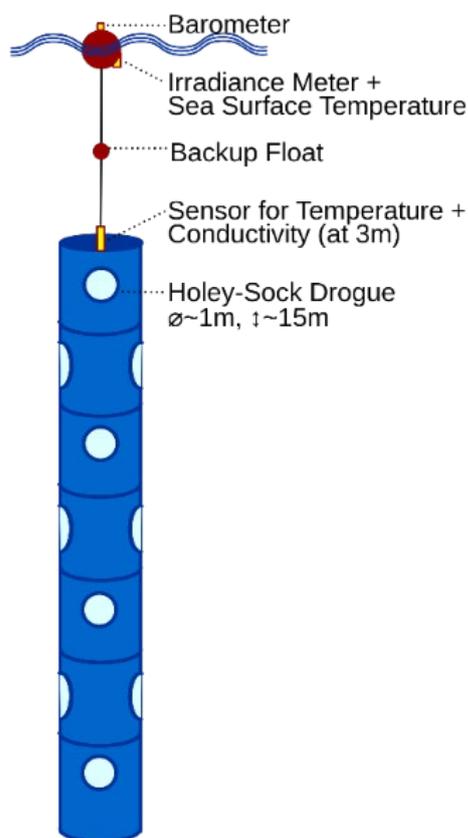


Рисунок 9. Поверхностный дрейфующий буй

Глайдеры и беспилотные подводные аппараты. Автономные подводные аппараты (Рисунок 10) — это самоходные устройства (приводимые в движение изменением плавучести и крыльями), которые перемещаются под водой с частыми подъемами и спусками. Они программируются перед выпуском для отбора проб по определенному пути, а также могут приводиться в действие удаленно с помощью спутниковой связи во время подъема на поверхность. Планеры оснащены датчиками CTD (проводимости, температуры и давления), а также биогеохимическими и оптическими датчиками. Пояснения к рисунку 10 : 1–Телеметрия осуществляется с помощью спутниковой связи; 2–GPS используется для определения местоположения во время всплытия; 3–Находясь

под водой, автомобиль ориентируется с помощью 3–осевого компаса, датчика давления и высотомера; 4–Глайдер погружается на максимальную глубину 1000 метров, собирая различные океанские данные; 5–После погружения данные передаются обратно на базовую станцию и загружаются новые инструкции

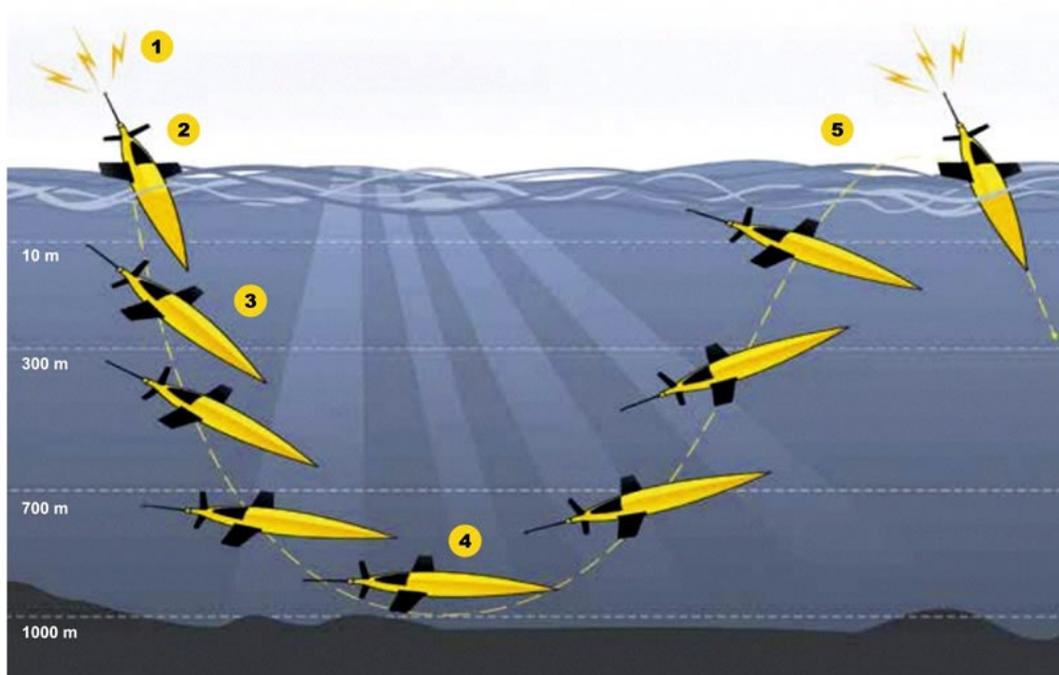


Рисунок 10. Траектория движения глайдера, автономного подводного аппарата

1.6.2. Дистанционные методы

Спутниковые наблюдения. Данные спутниковых наблюдений в различных диапазонах в последние несколько десятилетий являются основным способом изучения субмезомасштабных вихрей в различных районах Мирового океана [31, 39].

Оптический и ИК диапазон. Пассивные методы спутниковой океанологии основаны на регистрации сигнала, излучаемого или отраженного объектом либо прилегающей территорией. Отраженный солнечный свет — наиболее часто используемый источник излучения, регистрируемый пассивными сенсорами. Примерами пассивного дистанционного зондирования являются цифровая и пленочная фотография, применение инфракрасных (ИК) приборов и радиометров.

Проявления вихревых структур в видимом оптическом диапазоне (Рисунок 11) реализуются за счет трассеров, например, поверхностных пленок, так как «сигнал, регистрируемый датчиками в оптическом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отраженным от поверхности солнечным излучением (наиболее сильно проявляющимися в зоне солнечного блика).



Рисунок 11. Проявление вихревых структур в видимом диапазоне по цветению фитопланктона вблизи Новой Зеландии

Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений благодаря которым вихри могут проявляться как спиралевидные структуры либо пятна вод разной контрастности. Рисунок 11 она обведена красным кружком.

В данных инфракрасного (ИК) диапазона, в которых находит свое отражение температура поверхности моря (ТПМ), вихревые структуры имеют свои проявления преимущественно в виде пятен более холодных или теплых вод

по сравнению с окружающей жидкостью (Рисунок 12). Столбцы представляют три класса. Антициклонический вихри (AE), циклонический вихри (CE) или отсутствие вихревой сигнатуры (NE).

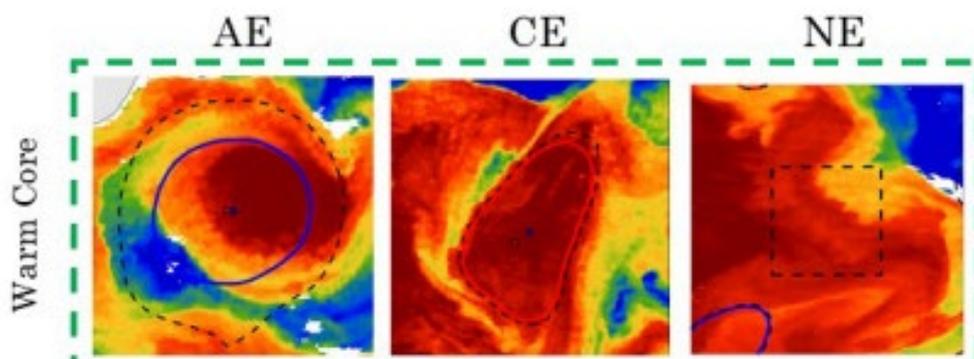


Рисунок 12. Образцы изображений SST [41], нанесенных вместе с контурами AMEDA (Алгоритм обнаружения и отслеживания вихревого момента импульса)

Радиолокационный диапазон. Радар с синтезированной апертурой (Synthetic-aperture radar, далее – SAR) часто используется для обнаружения особенностей поверхности океана в условиях слабого ветра [43]. Основными преимуществами изображений SAR являются: (1) съемка ведется днем и ночью при любых погодных условиях, (2) обладает высокой чувствительностью к мелкомасштабной изменчивости водной поверхности и (3) обеспечивает высокое разрешение изображений. Закономерности, наблюдаемые на изображениях SAR, обусловлены изменением шероховатости водной поверхности, на которую влияют взаимодействия волн и течений, естественные поверхностные пленки и пространственные вариации поля локального ветра. Вихревые структуры на радиолокационных снимках проявляются в виде структур, сформированными тонкими темными или ярко светлыми полосами на морской поверхности, которые формируют спирали или дуги. Существует несколько механизмов проявления вихревых структур на SAR.

Вихри в безледный период года проявляются на снимках SAR благодаря двум основным механизмам, а именно накоплению поверхностно-активных веществ и взаимодействию волны и течения [40]. При низких или умеренных скоростях ветра (3-5 м/с) первый является основным механизмом, и на снимках

SAR обычно появляются вихри из-за наличия естественных пленок на поверхности моря [44]. Поверхностно-активные вещества гасят мелкомасштабные поверхностные волны, тем самым уменьшая обратное рассеяние радара от поверхности моря [45], и они часто накапливаются вдоль линий сдвига и зон конвергенции, которые, в свою очередь, связаны со спиральным течением [33]. Таким образом, вихри становятся видимыми на снимках SAR. Поскольку этот эффект приводит к тому, что вихри обозначаются как темные, для краткости вихри, визуализируемые из-за пятен, далее называются “черными” вихрями (Рисунок 13).

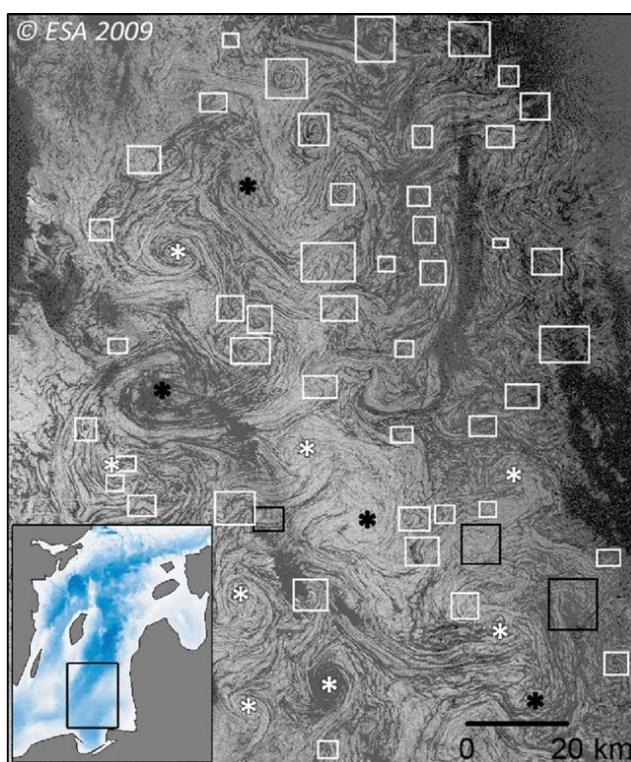


Рисунок 13. Примеры проявлений "черных" вихрей на изображении юго-восточной части Балтийского моря, полученном Envisat ASAR WS 13 апреля 2009 года в 20:13 UTC. Белые прямоугольники и звездочки обозначают циклонические вихри, в то время как черные обозначают антициклонические вихри [47].

При скоростях ветра от 6 до 12 м/с срабатывает сдвигово-волновой механизм проявления вихря на SAR. Он обусловлен взаимодействием сдвиговых течений и гравитационно-капиллярных волн, на снимках данных механизм

выгляди как закрученные в спирали или дуги области повышенного рассеяния сигнала, из-за этого такие вихри называют «белыми» [25] (Рисунок 14). Иногда подобные проявления можно спутать с атмосферными явлениями, например такими как сдвиги в поле скоростей приповерхностного ветра

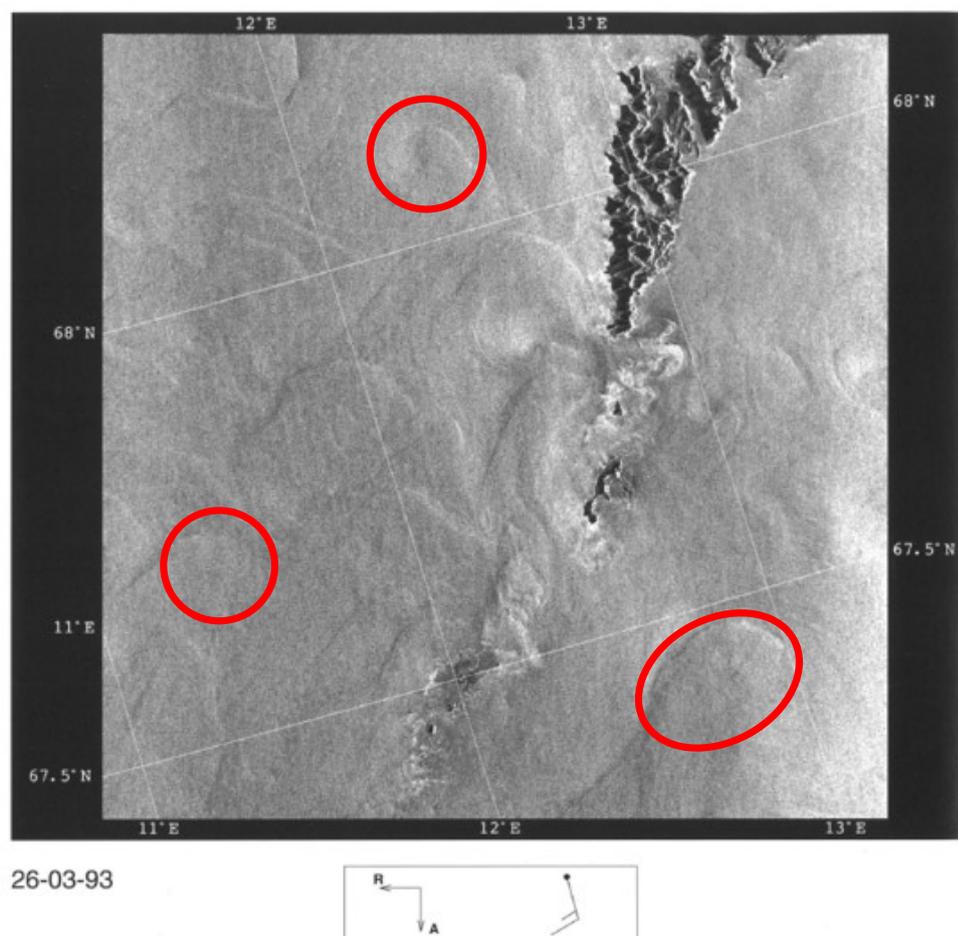


Рисунок 14. Снимок ERS-I SAR, сделанный 26 марта 1993 года, является примером проявления сдвигово-волнового механизма [43].

В ПЛЗ вихри особенно заметны на SAR и менее зависят от скорости ветра. Их видимость определяется геометрическими свойствами льда, такими как толщина и шероховатость (Рисунок 15). Тонкий и относительно гладкий лед (например, недавно сформировавшийся или тающий) отображается как темные области с низким радиолокационным отражением, тогда как толстый и шероховатый лед выглядит как яркие области с высоким отражением [54].

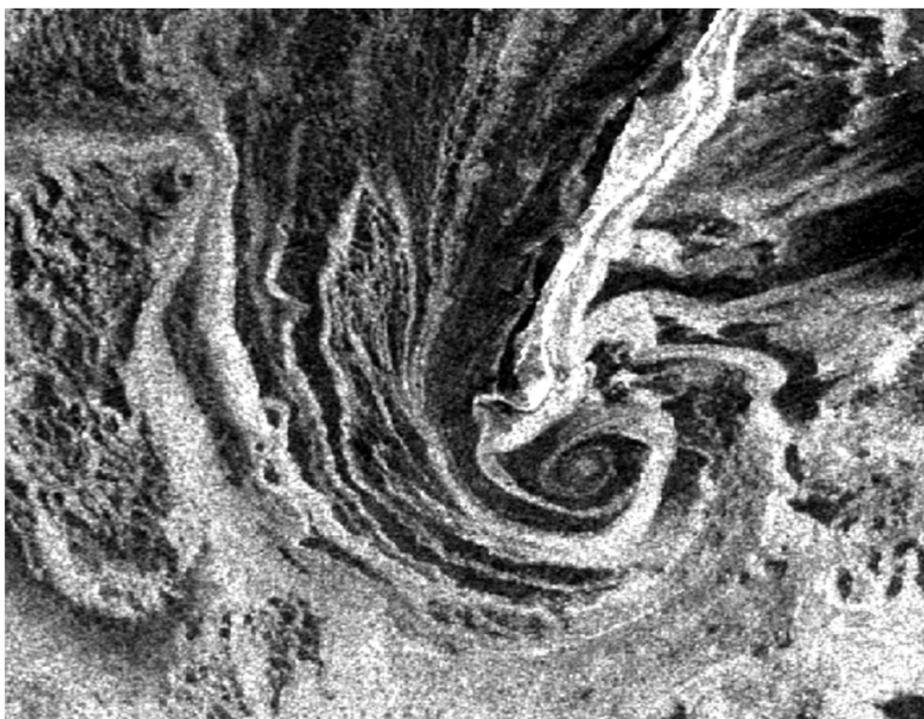


Рисунок 15. Пример ледового вихря на снимке радиолокационном изображении Sentinel-1 03.04.2018 05:33 UTC [54].

Каждый из методов направлен на увеличение объема знаний о вихрях в океане: их пространственное распределение, времени жизни, вертикальной структуре и переносимых элементах. Но по отдельности получаемая информация фрагментарна, поэтому при изучении вихрей следует придерживаться комплексного подхода, совмещая методы исследования. Например, выполняя подспутниковый эксперимент. По оперативным спутниковым снимкам получать данные о расположении вихревых структур, и в кратчайшие сроки выполнить через них серию океанографических станций. На них будет измеряться вертикальное распределение температуры и солёности, для понимания вертикальной структуре таких процессов.

2. Материалы и методы

2.1. Исходные данные

Для описания положение ПЛЗ использовалась электронная база многолетних данных по концентрации льда в Северном Ледовитом океане, собранная исследовательской группой дистанционного зондирования полярных регионов Бременского университета. База содержит данные временные ряды ежедневных значений концентрации льда для всего СЛО за период 2002-2024 гг [17]. Дискретность данных по широте и долготе 6.25 км.

Дистанционные данные были собраны за период июля-августа 2023 года. Всего было отобрано 195 спутниковых радиолокационных изображений со спутника Sentinel-1A. . Снимки были получены из базы данных Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения: 27 декабря 2023 г.)) и обработаны с использованием ПО ESA SNAP и Mathworks ©MatLab. На карте (Рисунок 16) суммарного покрытия (июль-август 2023 г.) района исследования спутниковой радиолокационной съёмкой выделена область с наибольшей плотностью покрытия (50 РЛИ) зафиксирована в районах, расположенных к востоку от архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) в северной части Карского моря, а также вблизи архипелага Новая Земля.

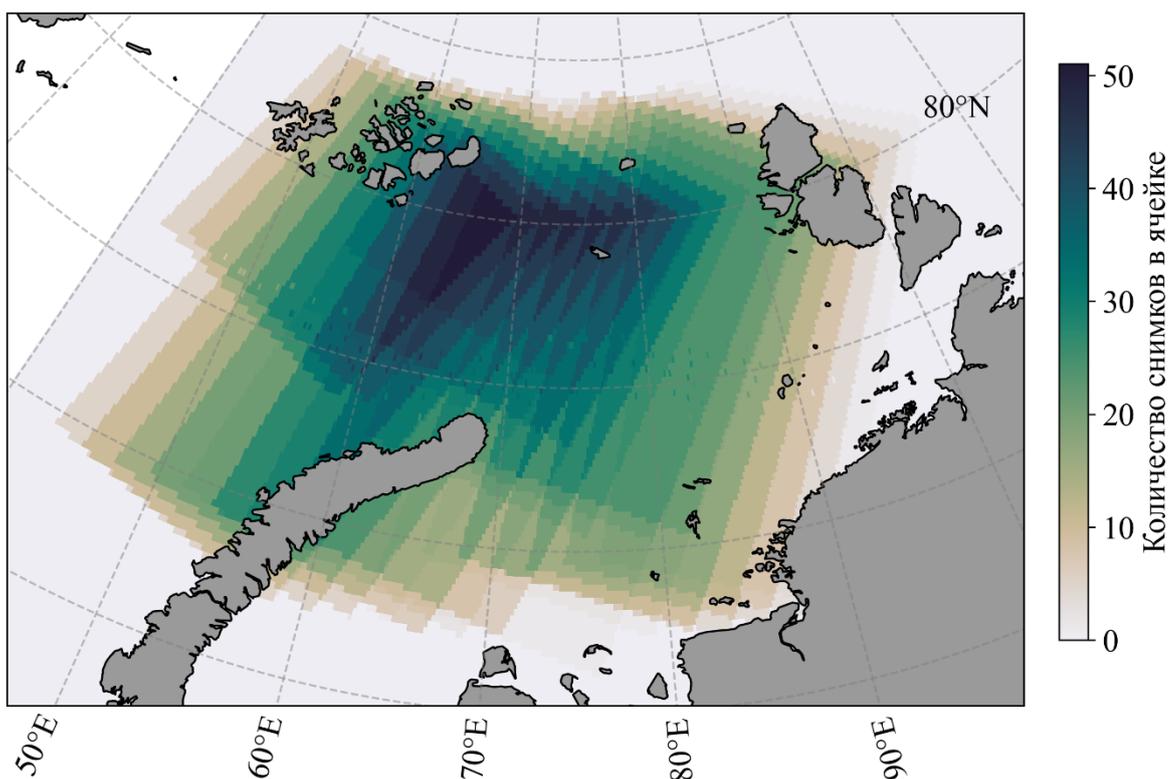


Рисунок 16. Суммарная карта покрытия спутниковыми РЛИ акватории Карского моря за июль-август 2023 г.

Дополнительно привлечены спутниковые снимки (Sentinel-2,-3) в оптическом диапазоне из базы данных Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения: 17 февраля 2025 г.)).

Контактные данные были получены в ходе экспедиции НИС «Дальние Зеленцы» по программе «Плавучий университет-2023» МФТИ в июле 2023 года. Работы вблизи и внутри вихревых структуры были выполнены в северо-восточной части Баренцева моря (Рисунок 17). Профили вертикального распределения температуры и солености морской воды по глубине были получены на основе измерений CTD-зонда CTD48M (Sea&Sun Technology, Германия).

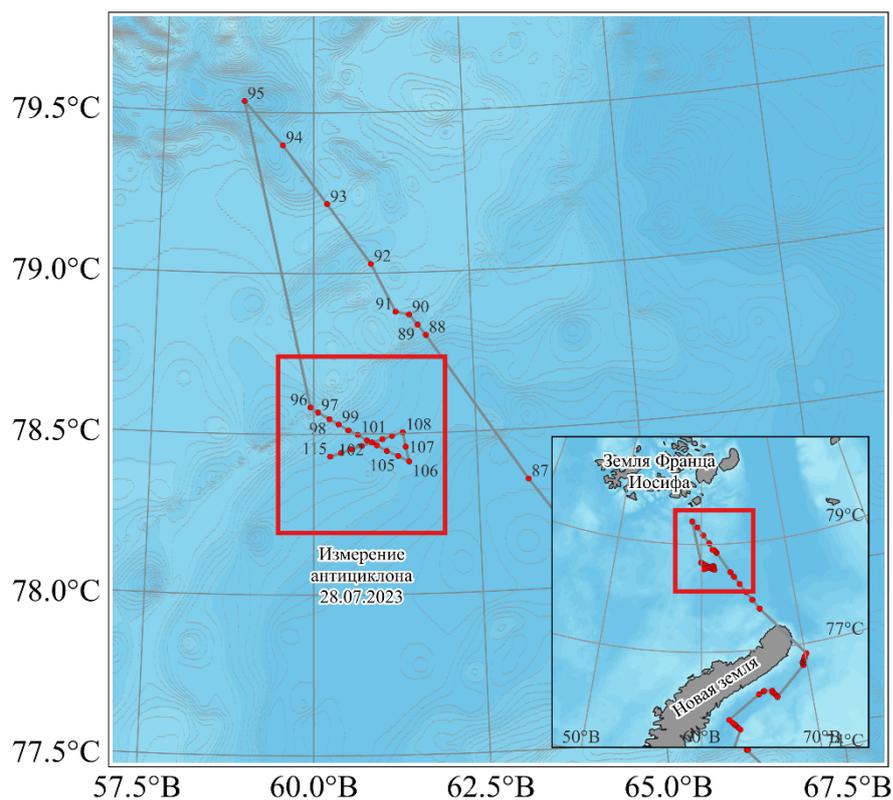


Рисунок 17. Карта выполнения работ НИС «Дальние Зеленцы» в северо-восточной части Баренцева моря

Среднемесячные и ежедневные данные по течениям за июль и август 2023 в Карском море взяты из открытого продукта Arctic Ocean Physics Analysis and Forecast (ID: ARCTIC_ANALYSISFORECAST_PHY_002_001, DOI: 10.48670/moi-00001) Copernicus Marine Service, основанного на модели HYCOM с ассимиляцией EnKF. Разрешение по широте и долготе 6.25 км, по глубине взяты верхние 20 м.

2.2. Методы исследования

2.2.1. Анализ положения ПЛЗ

В качестве определения ПЛЗ выбран подход, где зона выделяется по концентрации льда 15-80%. Расчёт аномалий площади ПЛЗ в Карском море выполнен в период наличия данных с 2002 по 2024 гг. Ежедневные данные о концентрации льда были усреднены в ежемесячные данные, отфильтрованы по концентрации 15-80% и переведены в км². Для характеристики ежемесячной

аномальности ледовых условий применялась методика количественной классификации [48]. В качестве объективного критерия использовалась величина стандартного отклонения ледовитости от нормы σ . Среднемесячные аномалии ледовитости сравнивались с определенными величинами стандартного отклонения ледовитости от нормы, уровень аномалий оценивался по пяти градациям (Таблица 2).

Таблица 2. Характеристика аномалии площади ПЛЗ в Карском море

Тип аномалии	Условные обозначения	Градация аномалии (доля σ)
Положительная		
Очень крупная	+ ОКР	$\Delta S > 1.2\sigma$
Крупная	+ КР	$0.4\sigma < \Delta S \leq 1.2\sigma$
Около нормы (малая положительная и отрицательная)	Н	$\pm \Delta S \leq 0.4\sigma$
Отрицательная		
Крупная	- КР	$0.4\sigma < -\Delta S \leq 1.2\sigma$
Очень крупная	- ОКР	$-\Delta S > 1.2\sigma$

Для визуального анализа положения кромки ПЛЗ с концентрацией льда 15% данные за июль и август 2023 года сравниваются с осредненными данными за 2002–2024 годы для соответствующего месяца. На основе данных о концентрации льда создаются карты в стереографической проекции, где средняя концентрация отображается цветовой заливкой, а изолинии 15% для среднего значения и 2023 года выделяются разными цветами и стилями линий.

2.2.2. Методы анализа спутниковых снимков

Метод оценки характеристик вихревых структур по данным РЛИ. Метод обнаружения вихрей на снимках РЛИ Sentinel-1 основан на визуальной идентификации, методика «экспертной оценки» [49], их поверхностных проявлениях с использованием программного обеспечения ESA SNAP Software с открытым исходным кодом [SNAP - ESA Sentinel Application Platform v12, <http://step.esa.int>].

Для улучшения интерпретации вихревых структур в SNAP Software выполняется настройка контрастности изображения. Это позволяет выделить характерные признаки вихрей, такие как спиралевидные линии или дуги, которые формируются за счет модуляции шероховатости морской поверхности вихревыми течениями, накопления природных пленок (сликов) в зонах конвергенции или изменений приповерхностного ветра. Настройка контрастности особенно важна при слабых и умеренных ветровых условиях,

Каждое изображение анализируется вручную на полном разрешении для поиска структур, проявляющихся в виде линий, закрученных в спирали или дуги. Структура считается вихрем, если её можно вписать в эллипс, что соответствует типичным геометрическим характеристикам вихревых образований. Этот этап требует повышенного внимания, так как визуальная идентификация может быть затруднена из-за изменчивых океанических и атмосферных условий или наличия шумов. Для подтверждения наличия вихря учитываются дополнительные признаки, такие как яркие полосы повышенного обратного рассеяния при умеренных ветрах или темные спирали при слабых ветрах [50].

Проводится классификация вихревых структур в зависимости от их направление закрученности и условий проявления: циклоны (против часовой) и антициклоны (по часовой). открытой воды, обозначаются как «С» и «А», которые формируются в свободных ото льда акваториях и выявляются по скоплению природных пленок или модуляции шероховатости поверхности. И вихри в прикромочной зоне, обозначаемые как «IC» (ледовый циклон) и «IA» (ледовый антициклон), которые проявляются в виде структур, трассируемых дрейфующими льдинами вблизи ПЛЗ. Важно иметь виду что из-за особенностей отображения в ESA SNAP вихри на РЛИ выглядят закрученными наоборот: по часовой стрелке — это циклонические, против — антициклонические. Это происходит из-за особенностей съёмки спутника (орбита, угол обзора) и

обработки изображений (повороты, калибровка), которые меняют ориентацию картинки, а программа не корректирует направление автоматически.

Для каждого идентифицированного вихря проводятся два перпендикулярных трансекта (сечения) через центр вихря, от одной границы до другой, соответствующие наиболее удаленным спиральным линиям. Эти трансекты фиксируют диаметр вихря и сохраняются в текстовом формате (.txt) с указанием: направления завихренности (С – циклонический, А – антициклонический), порядкового номера вихря на снимке и номера трансекта для данного вихря. Трансекты позволяют количественно описать геометрию вихря, включая его диаметр и радиус, который рассчитывается как половина среднего диаметра, полученного из двух сечений. (Рисунок 18)

После обработки изображений и сохранения трансект, с помощью программного обеспечения на базе MATLAB рассчитываются координаты центров вихрей и их диаметры.

Каждое изображение SAR было визуально проверено на наличие отчетливых признаков проявления вихрей и идентификации их границ. После определения границ вихрей вручную определялось их местоположение и знак завихренности (циклон/антициклон). Среднее значение двух квазиперпендикулярных участков поперек центра вихря было принято за средний диаметр вихря.

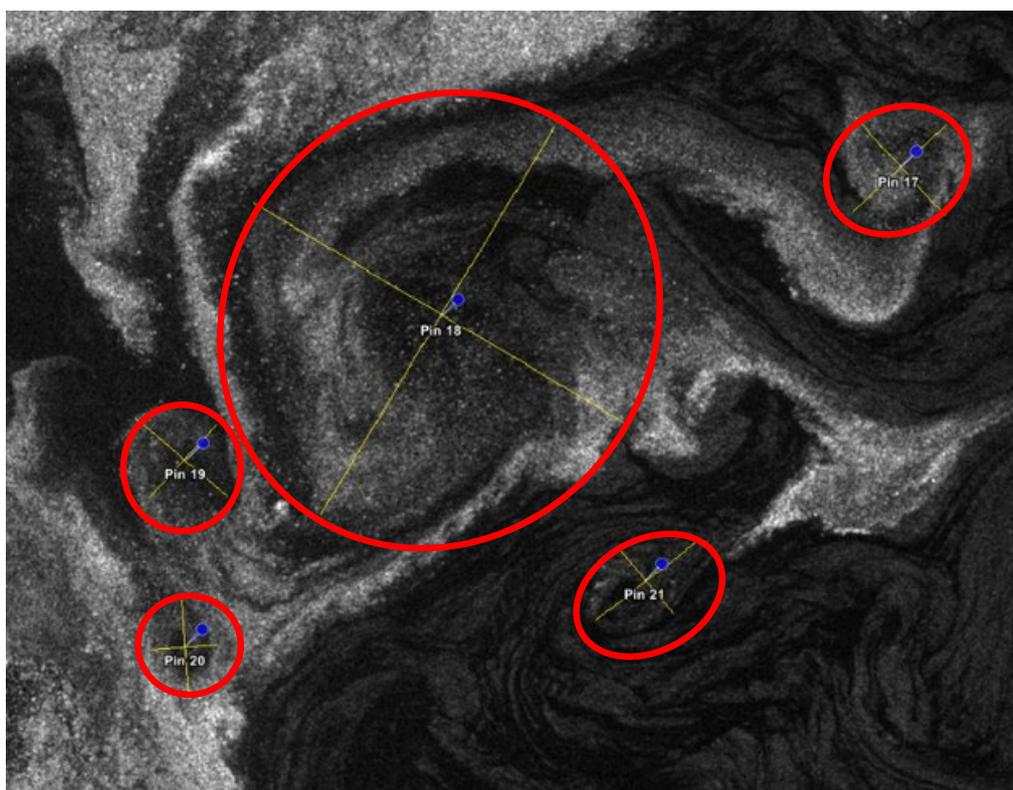


Рисунок 18. Пример проявления вихря на РЛИ

Анализ данных SAR проводился с использованием программного обеспечения на базе MATLAB, рассчитывалось покрытие района снимками, количество вихрей циклонического и антициклонического типа, их размеры, карта частоты встречаемости вихрей. По этим данным отрисованы пространственные карты распределения вихрей в исследуемом районе отдельно для каждого из месяцев. Карты распределения диаметров вихревых структур в км, разбита на сетку 15*30, площадь одной ячейки сетки $\sim 2512.86 \text{ км}^2$. Все диаметры вихрей, которые попадали в эту ячейку усреднялись.

По полученным данным рассчитываются первичные статистики – средние, минимальные и максимальные значения диаметров вихрей, частота возникновения вихрей определенных диаметров. Также проводится сравнение характеристик асимметрии и эксцесса рядов, что позволяет понять форму распределений, выявить их смещение и степень концентрации вихрей конкретных диаметров.

2.2.3. Анализ последовательных спутниковых снимков

Методика прослеживания жизни вихря в Карском море в период с 23 по 28 июля 2023 года основана на анализе дистанционных данных, полученных в радиолокационном (SAR, Sentinel-1) и оптическом (Sentinel-2, Sentinel-3) диапазонах из базы данных Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>, дата обращения: 17 февраля 2025 г.). Данные обработаны с использованием Python и библиотек netCDF4, numpy, matplotlib, cartopy и scipy. Для каждого снимка извлекались координаты положения вихря, которые сопоставлялись с траекторией, построенной по данным о местоположении центра структуры (широта, долгота) и времени снимка. Каждый снимок настраивался для контрастного отображения вихревой структуры. Визуализация выполнена в проекции NorthPolarStereo с наложением векторов средних течений, рассчитанных по данным CMEMS, и отметок станций (для снимка от 28 июля). Траектория вихря отображена с цветовой дифференциацией по дням, что позволило проследить динамику его перемещения и эволюцию структуры на основе последовательных снимков.

2.2.4. Определение пространственных и физическских характеристик вихрей по контактным данным

В ходе работы был выполнен анализ спутниковых изображений и данных вертикальных CTD зондирований, полученных вдоль поперечных разрезов через ледовый вихрь. Оценивалось расположения вихря по спутниковым наблюдениям, с последующим уточнением его местоположения и границ на основе спутниковых и in-situ измерений CTD-зондом.

Вихрь идентифицируется на разрезе как куполообразный подъем или опускание изолиний температуры, солености, или плотности, с замыканием ее края у поверхности.

Для полученного разреза проводился расчет теплосодержания АТ (Дж) и объема распресненной воды V_{fresh} (m^3), для этого использовался подход, предложенный в работе Chaigneau et al. (2011) [51]

Теплосодержание разреза

$$AT = \rho_{background} \cdot C_p \cdot \Sigma(T' \cdot dV), \quad (3)$$

$$T' = T - T_{background} \quad (4)$$

Где:

$\rho_{background}$ — фоновая плотность воды (кг/м³),

$C_p = 4200$ — удельная теплоемкость воды (Дж/(кг·°C)),

T' — аномалия температуры (°C),

$T_{background} = -0.149$ °C — средняя фоновая температура для слоя с плотностью ≥ 25.2 кг/м³

Объем пресной воды в разрезе

$$V_{fresh} = \Sigma \left(\max \left(\frac{S_{background} - S}{S_{background}}, 0 \right) \cdot dV \right) \quad (5)$$

Где:

$S_{background} = 33.55$ PSU — средняя фоновая соленость для слоя с плотностью ≥ 25.2 кг/м³,

S — соленость в ячейке (PSU),

Суммирование выполняется по ячейкам, где плотность ≤ 25.2 кг/м³

После расчета теплосодержания и объема распресненной воды внутри разреза, рассчитывалось их доля на единицу объема. По данным реанализа определялось направление движение вихрей по потоку и находилась зона выноса вихрей из ПЛЗ. Далее параметры масштабировались на ледовые вихревые структуры, выявленные на РЛИ в этой зоне.

3. Пространственно-временная изменчивость характеристик вихревой динамики в прикромочной зоне

3.1 Анализ положения ПЛЗ

По средним концентрациям льда в июле и в августе рассчитаны площади льда в км, которые в анализируемом регионе занимает ПЛЗ (15-80%).

На Рисунок 19 временная изменчивость площади ПЛЗ за все июли с 2002 по 2024 годы. Площади варьируются в диапазоне 260-750 км², года 2004, 2003, 2008, 2010, 2013, 2015, 2019 относятся к норме. К крупным аномалиям относятся 10 лет, к положительной – 2009, 2014, 2017, 2018, к отрицательной – 2006, 2007, 2020-2023. К очень крупным - 2003,2004, 2011, 2012 гг. Наименьшая июльская площадь ПЛЗ наблюдалась в 2016 г, а наибольшая в 2024 г. Можно заметить некоторую цикличность в изменении площади, примерно, каждые 5 лет. Анализируемый июль 2023 относится к крупной отрицательной аномалии.

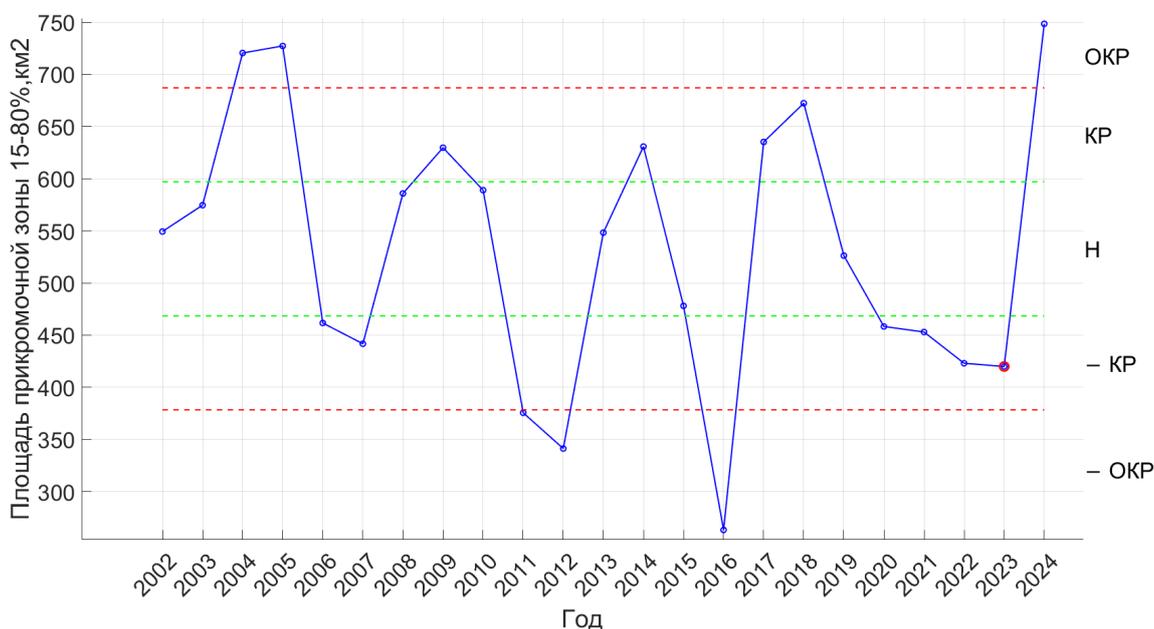


Рисунок 19. Площадь ПЛЗ 15-80% в июле с 2002 по 2024 гг.

На карте положения кромки ПЛЗ (Рисунок 20) видно, что в июле 2023 года она занимает меньшую площадь по сравнению со средним положением ПЛЗ за весь период. Это указывает на то, что июль 2023 года характеризуется значительной отрицательной аномалией. В среднем за июль ледовый массив у

острова Новая Земля соединяется с северо-восточным ледовым массивом, где лед более концентрирован, и не содержит полыньи у острова Северная Земля. В июле 2023 года у Новой Земли наблюдается лишь небольшое ледовое поле. Над Енисейским заливом площадь распространения льда в июле 2023 года превышает средние значения для этого месяца.

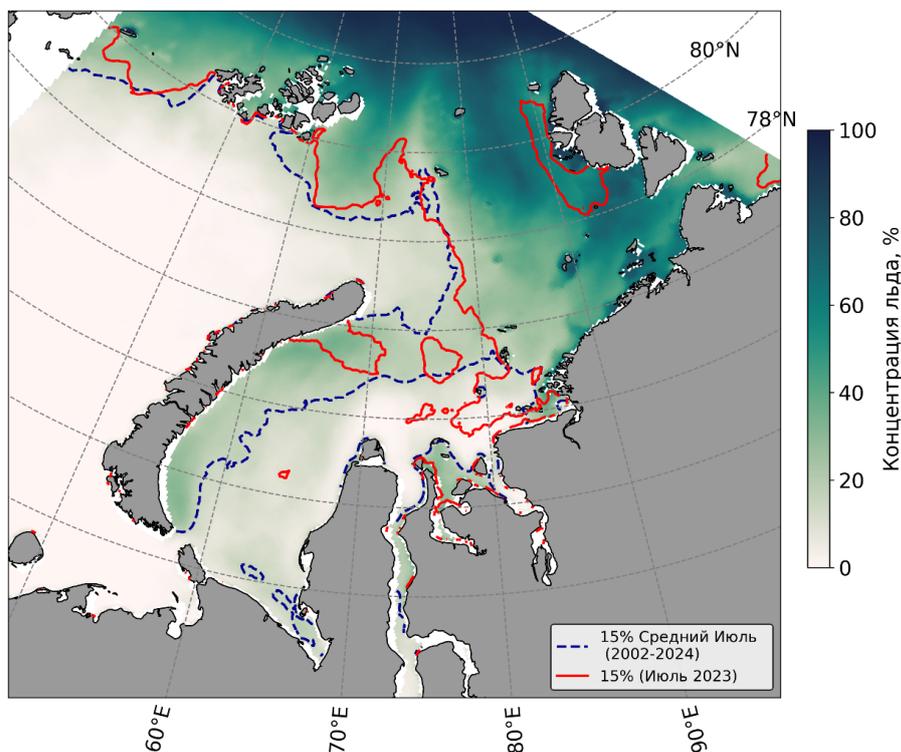


Рисунок 20. Среднее за положение кромки ПЛЗ (15%) за все июли 2002–2024 гг. и в июле 2023 г.

На Рисунок 21 временная изменчивость площади ПЛЗ за август-с 2002 по 2024 годы. Площади варьируются в диапазоне 170-420 км², большинство случаев относится к норме. К крупным аномалиям относятся 5 лет (2006, 2008, 2011, 2012, 2015), для них, в большинстве случаев, предыдущий и последующий год относится к норме. К очень крупным аномалиям относятся 6 лет (2013, 2014, 2017, 2018, 2021), наименьшая площадь в 2018 г, наибольшая – 2014 г. В период 2002-2011 гг. присутствуют почти не значительные колебания в пределах нормы, после 2012 изменения площади ПЛЗ достаточно большие. Анализируемый август 2023 относится к норме.

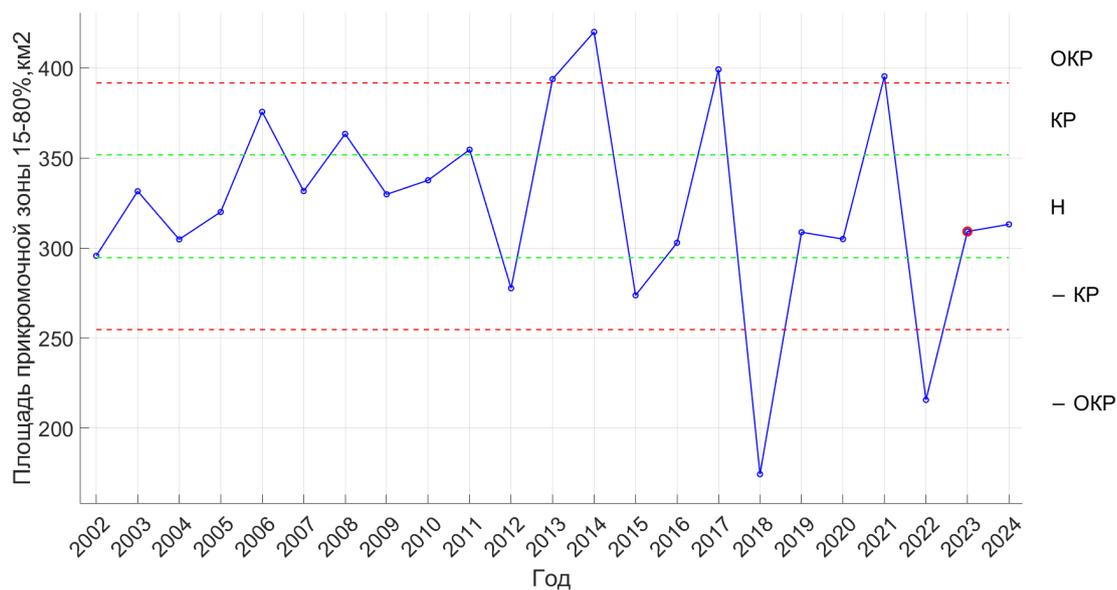


Рисунок 21. Площадь ПЛЗ 15-80% в августе с 2002 по 2024 гг.

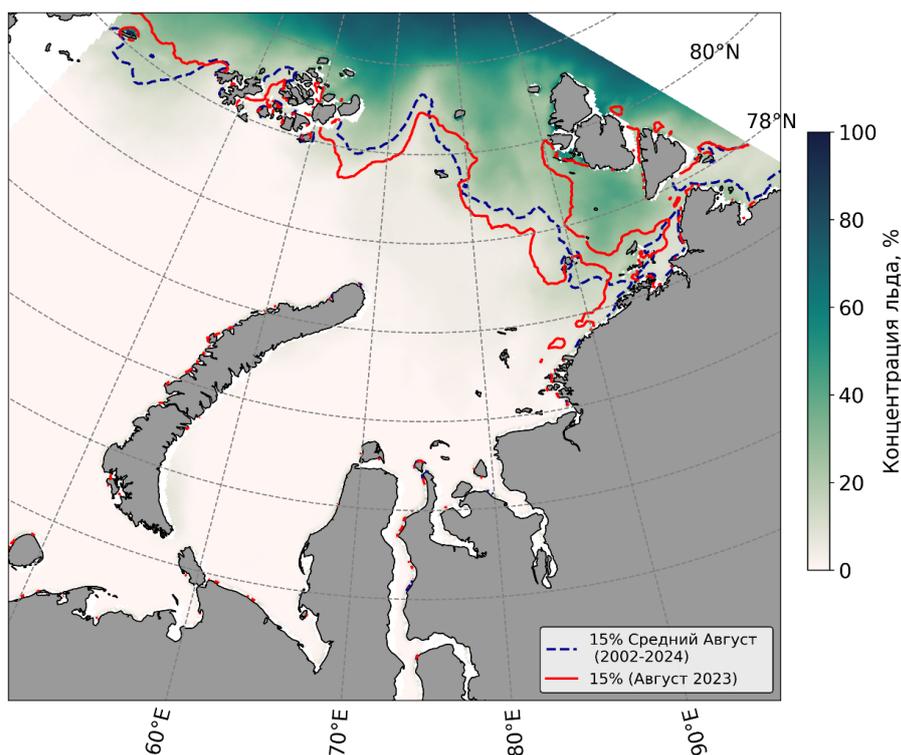


Рисунок 22. Среднее за положение кромки ПЛЗ (15%) за все августы 2002–2024 гг. и в августе 2023 г.

На карте положения кромки ПЛЗ Рисунок 22 видно, что южная кромка с концентрацией 15% в августе 2023 года расположена южнее своего среднего положения за все августы. Также отмечается значительная полынья в районе

Северной Земли и пролива Вилькицкого. Географическое положение кромки ПЛЗ в августе 2023 года соответствует динамике изменения ее площади и почти совпадает со средним положением ПЛЗ за август.

3.2 Спутниковые наблюдения

3.2.1 Статистический анализ

За двухмесячный период в исследуемом регионе суммарно зарегистрировано 961 поверхностных проявлений вихревых структур, из которых 312 трассируемых льдом. Больше проявлений вихрей встречалось в июле – 64% . Преимущественно это вихри циклонического типа. Преобладают вихри с диаметрами от 2 до 6 км. Распределения преобладающих диаметров по месяцам представлены на гистограммах (Рисунок 23).

Преобладающее количество вихрей открытой воды в июле имеет диаметры от 2 до 5 км, что согласуется с ранее полученными результатами в Карском море [26]. Максимальное количество случаев (82) зарегистрировано с диаметром 4 км. Антициклонов, по сравнению с циклонами, зарегистрировано меньше, преобладающие размеры приходятся на 3 и 6 км. Также фиксировалось несколько случаев больше 15 км. Ледовые циклонические структуры представляют более равномерное распределение, всего зафиксировано 145, из них 63 вихря с диаметрами 3-5 км. Ледовые антициклоны отмечены в общем количестве 63 проявлениями, диаметры равномерно распределены с 3 до 10 км, в среднем по 5 случаев на каждый размер. Наибольшее количество (12 случаев) приходится на диаметры свыше 15 км.

В августе общее число циклонических вихрей открытой воды снижается с 365 до 220 проявлений, с максимумом 43 случая на 2 и 4 км, для каждого из диаметров. Циклоны сохраняют тенденцию к мелким вихрям, но с меньшей интенсивностью. Количество антициклонов также, как и в июле, мало, наибольшее количество (5 случаев) приходится на 6 км. Активность ледовых циклонов снижается до 63 случаев, преобладают диаметры 3-6 км, с максимумом

вихрей (16) на 5 км. Число случаев ледовых антициклонов сокращается до 41, с максимум количества случаев(8) относится диаметрам 8 и свыше 15 км, сохраняя, но уменьшая долю крупных вихрей по сравнению с июлем.

Вихри открытой воды, особенно с циклоническим направлением, преобладают с малых диаметрах (1–5 км) с высоким числом случаев (63% в июле, 62% в августе), тогда как ледовые вихри, включая как циклоническое, так и антициклоническое направления, показывают более равномерное распределение и большую долю крупных диаметров (например, 9% случаев в июле свыше 15 км). Это различие подчёркивает, что открытая вода способствует формированию мелких вихрей, а ледовые условия — более крупных.

Июль характеризуется более высокой общей активностью вихрей как в открытой воде (66% случаев для обоих типов в июле), так и в ледовых условиях (145 и 63 проявления для циклонов и антициклонов соответственно), с заметным присутствием крупных вихрей. В августе наблюдается общее снижение числа случаев (220 для циклонических структур открытой воды, 63 и 41 для ледовых вихрей), с уменьшением количества структур крупных диаметров, что может быть связано с сезонными изменениями условий к концу лета.

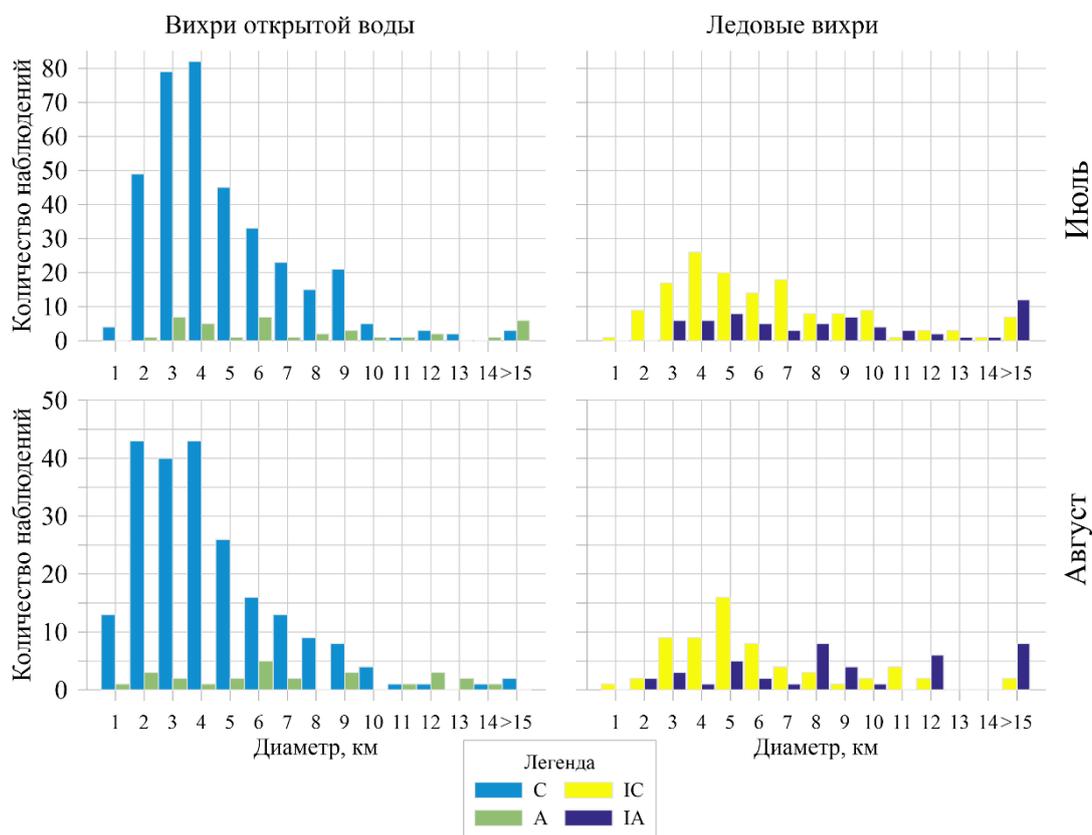


Рисунок 23. Гистограмма распределения диаметров вихревых структур в июле и августе 2023 года. С/А – циклоны/антициклоны открытой воды, IC/IA – ледовые циклоны/антициклоны.

В июле для циклонов открытой воды асимметрия составляет 1.17, указывая на правостороннюю асимметрию, а эксцесс 0.28 говорит о слегка выраженном пике и распределении, где чаще встречаются значительные отклонения от среднего. У антициклонов открытой воды асимметрия 0.98 отражает правостороннее смещение, а эксцесс -0.57 указывает на более сглаженное распределение по сравнению с нормальным. Таким образом, распределение циклонов имеет более выраженную асимметрию, в то время как распределение антициклонов менее острое. Для ледовых циклонов асимметрия 0.69 показывает умеренное правостороннее смещение, а эксцесс -0.39 указывает на более сглаженное распределение. Для ледовых антициклонов асимметрия 0.76 говорит о правостороннем смещении, а эксцесс 0.62 — о слегка выраженном пике. Ледовые циклоны демонстрируют более сглаженное распределение, тогда как антициклоны имеют более острый пик с правым смещением.

В августе у циклонов открытой воды асимметрия 1.01 указывает на правостороннее смещение, а эксцесс -0.43 — на более сглаженное распределение. Для антициклонов асимметрия 0.74 отражает правостороннее смещение, а эксцесс 0.68 — слегка выраженный пик. Циклонические структуры имеют более сглаженное распределение, тогда как антициклонические показывают умеренную остроту пика. Для ледовых циклонов асимметрия 1.56 свидетельствует о правосторонней асимметрии, а эксцесс 2.32 — о выраженном пике и распределении, где часто встречаются значительные отклонения от среднего. У ледовых антициклонов асимметрия 0.87 указывает на правостороннее смещение, а эксцесс -0.51 — на более сглаженное распределение. Ледовые циклоны выделяются высокой остротой пика, тогда как ледовые антициклоны демонстрируют более плоское распределение.

Таблица 3. Статистические характеристики распределения вихрей по диаметрам. *C/A* – циклоны/антициклоны открытой воды, *IC/IA* – ледовые циклоны/антициклоны

Месяц	Июль				Август			
	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>IC</i>	<i>IA</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>IC</i>	<i>IA</i>
Тип вихря								
Количество	365	38	145	63	220	26	63	41
Эксцесс	0.28	-0.57	-0.39	0.62	-0.43	0.68	2.32	-0.51
Асимметричность	1.17	0.98	0.69	0.76	1.01	0.74	1.56	0.87

Сравнивая июль и август, можно отметить изменения в асимметрии и эксцессе. Для циклонов открытой воды асимметрия снижается с 1.17 до 1.01, а эксцесс меняется с 0.28 до -0.43, что указывает на уменьшение правостороннего смещения и сглаживание распределения. Для антициклонов открытой воды асимметрия уменьшается с 0.98 до 0.74, а эксцесс возрастает с -0.57 до 0.68, отражая переход к более острому пику. Для ледовых циклонов асимметрия возрастает с 0.69 до 1.56, а эксцесс резко увеличивается с -0.39 до 2.32, указывая на усиление правостороннего смещения и остроты пика. Для ледовых

антициклонов асимметрия увеличивается с 0.76 до 0.87, а эксцесс меняется с 0.62 до -0.51, что говорит о сглаживании распределения.

Для средней оценки характеристик вихрей в исследуемом регионе за июль и август 2023 года составлена таблица (Таблица 4), отражающая их количественную изменчивость по типу вихря, средние диаметры и диапазоны размеров.

Таблица 4. Характеристики проявлений вихрей в исследуемом регионе в июле-августе 2023 года по данным РЛИ

Тип	Количество			Диаметр		Min-Max	
	Июль	Август	Σ	Июль	Август	Июль	Август
С	365	220	585	5.17	4.79	1.78 - 17.99	1.23 - 24.38
IC	145	63	208	6.83	6.41	1.46 - 16.83	1.92 - 22.75
А	38	26	64	10.11	7.43	2.54 - 14.37	1.7 - 39.36
IA	63	41	104	10.01	10.29	3.03 - 26.92	2.13 - 34.28
Σ	611	350	961				

Анализ данных показывает, что вихри открытой воды с циклонным направлением демонстрируют наибольшее количество проявлений: в июле зафиксировано 365 случаев со средним диаметром 5.17 км, тогда как в августе их число сократилось до 220 случаев со средним диаметром 4.79 км. Общее количество проявлений составило 585, с диапазоном диаметров от 1.78 до 24.38 км. В отличие от этого, антициклоны в открытой воде проявляются значительно реже — 38 случаев в июле и 26 в августе (суммарно 64), с более крупными средними диаметрами (10.11 км в июле и 7.43 км в августе) и широким диапазоном от 1.7 до 39.36 км, что свидетельствует о большей вариабельности их размеров.

Ледовые циклонические вихри демонстрируют меньшую общую активность по сравнению с вихрями открытой воды: 145 случаев в июле и 63 в августе, что в сумме составляет 208 проявлений. Средний диаметр варьируется от 6.83 км в июле до 6.41 км в августе, с диапазоном от 1.46 до 22.75 км. Ледовые

антициклоны также имеют ограниченное число случаев — 63 в июле и 41 в августе (суммарно 104), но характеризуются большими средними диаметрами (10.01 км в июле и 10.29 км в августе) и широким диапазоном от 2.13 до 34.28 км, подчёркивая тенденцию к формированию более крупных вихрей в ледовых условиях.

Сравнительный анализ выявляет существенные различия между вихрями открытой воды и ледовыми вихрями. Циклонические вихри открытой воды несмотря на их высокую частоту (585 случаев), имеют меньшие средние диаметры (4.79–5.17 км) по сравнению с ледовыми вихрями (6.41–6.83 км для циклонов и 10.01–10.29 км для антициклонов), что указывает на преобладание мелкомасштабных структур в открытой воде. Напротив, ледовые вихри, особенно антициклоны, демонстрируют большую долю крупных диаметров, достигающих 34.28 км, что может быть связано с влиянием ледовых условий на динамику вихрей. Это различие подчёркивает различную природу формирования вихрей в зависимости от среды.

Общее сравнение июля и августа выявляет снижение активности вихрей к концу лета: общее число случаев сокращается с 611 в июле до 350 в августе. Средний диаметр вихрей также уменьшается с 8.03 км в июле до 7.23 км в августе, однако диапазон диаметров расширяется с 2.2–19.03 км в июле до 1.75–30.19 км в августе, что указывает на большую изменчивость размеров во второй половине периода.

3.2.2 Пространственные особенности

В июле вихри открытой воды преимущественно наблюдались за ледовой кромкой с минимальной концентрацией льда (1%) и были равномерно распределены по ее периферии (Рисунок 24). Основным очаг их формирования отмечался в северо-западной части Карского моря, а также на востоке от Новой Земли, на границе Баренцева и Карского морей, где фиксировалось значительное количество циклонических вихревых структур (60% от общего числа).

Ледовые вихри, в свою очередь, преимущественно фиксировались в зоне с концентрацией льда 15% или за ее пределами. Они составляли 24% циклонических и 10% антициклонических вихрей от общего числа. Ледовые вихри равномерно распределялись по периферии ледовой кромки, а их значительный очаг формирования также наблюдался в северо-западной части Карского моря. В районе Северной Земли отмечались случаи возникновения ледовых вихрей внутри ледовых полыней. Антициклонические вихри (ледовые и открытой воды) составляли 6% от общего числа.

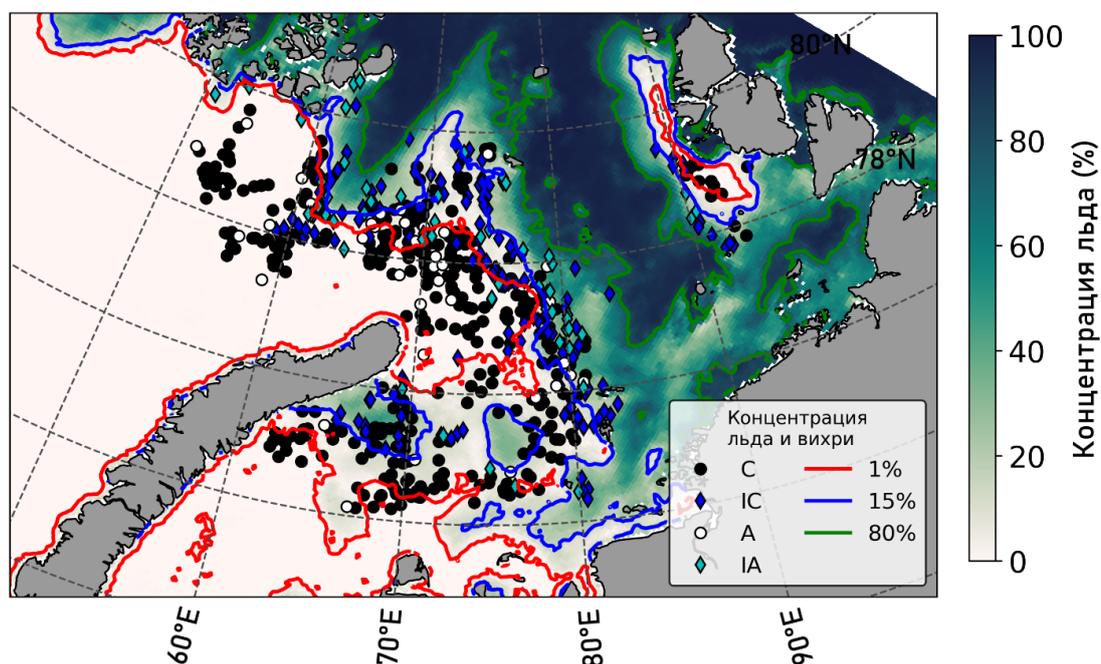


Рисунок 24. Карта распределения вихревых структур в июле 2023 года.

В августе, с уменьшением площади, покрытой льдом, зарегистрировано меньше вихрей. Их положение следует за ледовой кромкой с концентрацией льда 1–15% (Рисунок 25). Отдельно отмечается зона с восточной стороны Новой земли, также заметно преобладание обычных (220 шт.) и ледовых циклонических (63 шт.) вихрей, что составляет 83 % от количества зарегистрированных в этом месяце структур.

В августе количество регистрируемых структур значительно сократилось, при этом вихри сместились севернее по сравнению с их положением в июле, следуя за ледовой кромкой. Вихри открытой воды преимущественно

сохранились в остаточном льду к востоку от Новой Земли, где их плотное скопление отмечено в районе 60°–70° восточной долготы и 74°–76° северной широты. Ледовые вихри, переместились в более северные районы, в зону с концентрацией льда 1–15% в районе Земли Франца-Иосифа и на 80° восточной долготы в ПЛЗ со льдом 15–80%. Центральная часть района, южнее 75° северной широты, практически освободилась от вихрей.

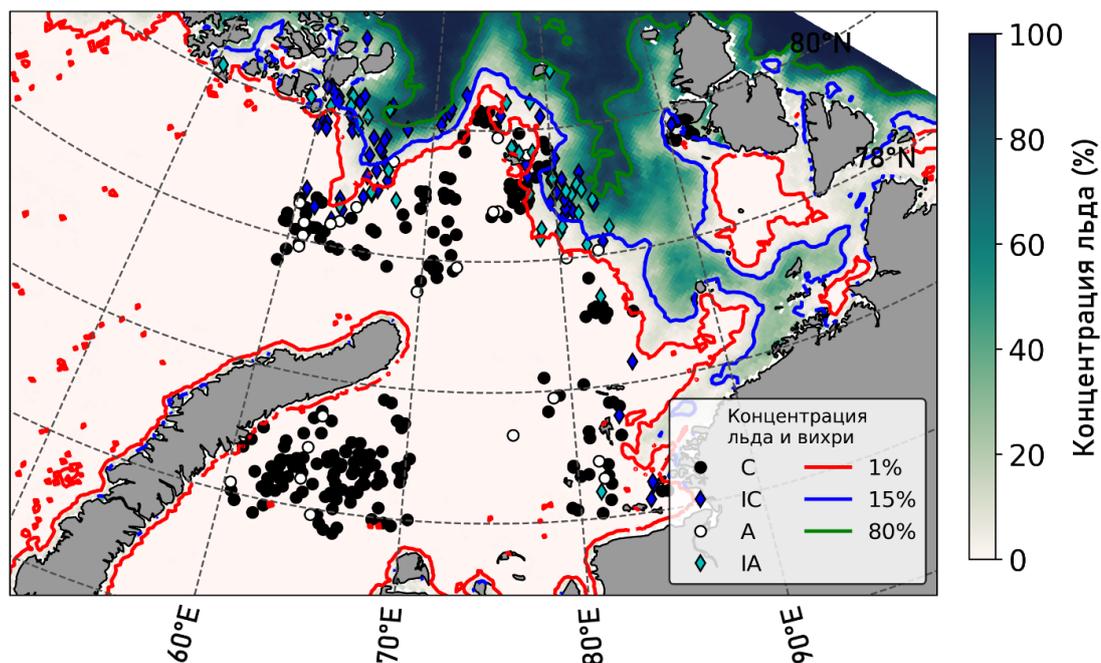


Рисунок 25. Карта распределения вихревых структур в августе 2023 года.

Для каждого месяца сделаны карты распределения диаметров вихревых структур на единицу сетки $\sim 2512.86 \text{ км}^2$. (Рисунок 26 и Рисунок 27). В июле наибольшие диаметры ($>10 \text{ км}$) наблюдаются в зоне плавающих льдов, где концентрация льда была 1-15%. При удалении от кромки льда 15%, диаметры вихревых структур уменьшаются до 3-6 км. В августе в пределах льда диаметры не превышают 7 км, и в основном находятся в диапазоне 2-6 км. Вихри сохранившиеся в остаточном льду к востоку от Новой Земли, обладают диаметрами 8-12 км.

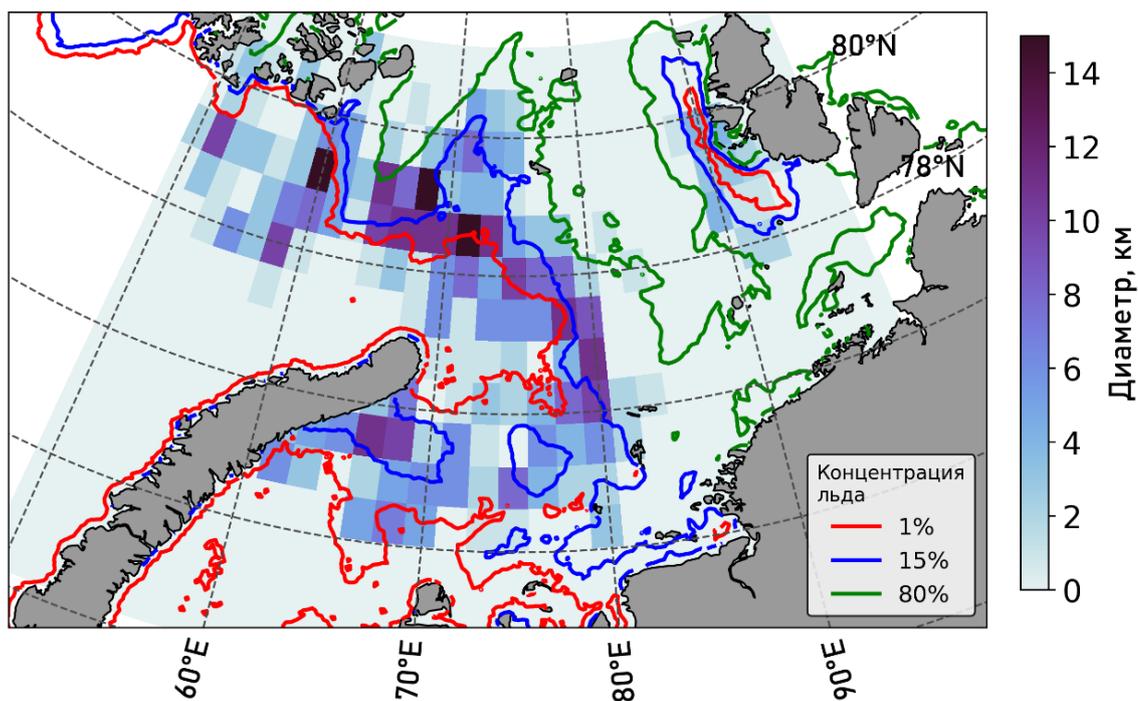


Рисунок 26. Карта распределения диаметров вихревых структур в км, осредненных на единицу сетки ($\sim 2512.86 \text{ км}^2$) в июле 2023 года.

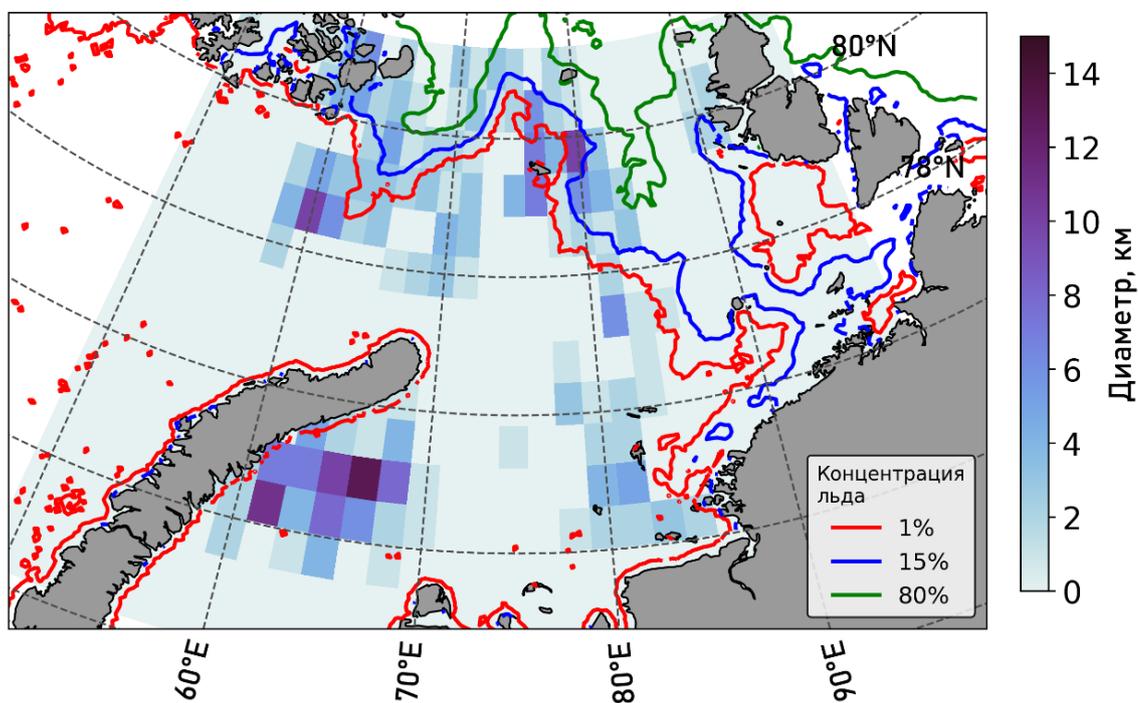


Рисунок 27. Карта распределения диаметров вихревых структур в км, осредненных на единицу сетки ($\sim 2512.86 \text{ км}^2$) в августе 2023 года.

3.2.3. Динамика вихревых образований

Анализ последовательных спутниковых снимков позволил выявить ледовый вихрь в районе между Землёй Франца-Иосифа и Новой Землёй, расположенный на границе Карского и Баренцева морей. Антициклонический вихрь был зафиксирован на радиолокационных изображениях с 23 июля 2023 года, однако к началу полевых работ на разрезах 28 июля его структура начала терять чёткие очертания, приближаясь к стадии затухания (Рисунок 29). Обнаруженный вихрь проявлялся на спутниковых изображениях в виде закрученного ледяного скопления большого диаметра характерного для мезомасштабных процессов [52].

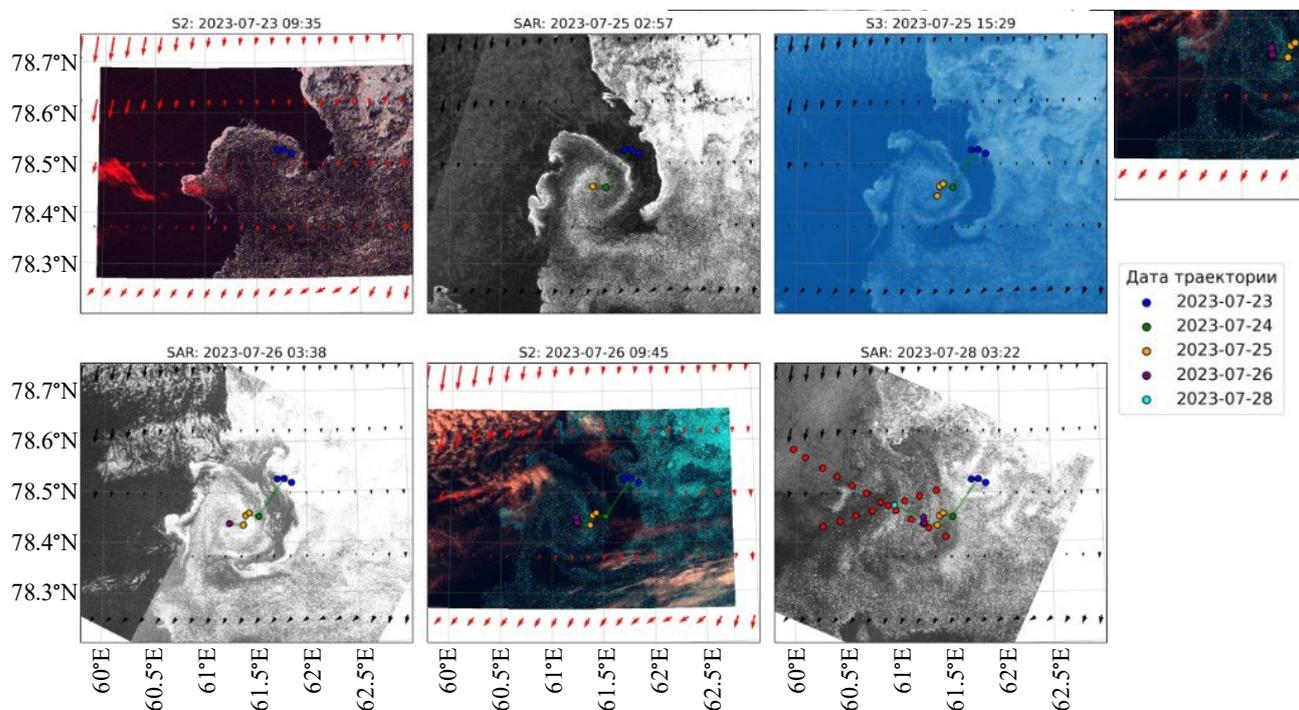


Рисунок 28. Проявления исследуемых вихревых структур на радиолокационных изображениях с Sentinel-1A с нанесенными станциями антициклонический вихрь в Баренцевом море (28 июля 2023 г 03:22 UTC)

Красным цветом обозначены выполненные станции разрезов

По данным спутниковых снимков установлено, что вихрь не является стационарным и перемещается из прикромочной зоны. Это наблюдение послужило основанием для проведения подспутникового эксперимента,

направленного на оценку внутренних характеристик вихря с использованием STD-зондирований.

3.3 Контактные наблюдения

В рамках экспедиции были выполнены несколько подспутниковых экспериментов. По оперативно полученным спутниковым изображениям выделялись вихревые структуры и планировался маршрут с целью прохождения сквозь них серией океанографических станций. В Таблица 5таблице 1представлены полученные диапазоны изменчивости характеристик антициклонического вихря зарегистрированного у о-в Земли Франца Иосифа (ЗФИ).

Таблица 5. Характеристики вихря у ЗФИ

Вихрь	Тип вихря	Длина разреза, км	Ст.№	T, °C	S, PSU
ЗФИ (Разрез 1)	Ac	39	96-106	-1.8 – 3.8	30.3 – 34.8
ЗФИ (Разрез 2)		26	108-115	-1.8 – 2.8	30.8 – 34.7

Таблица 6. Характеристики вихревых структур по данным дистанционных и контактных измерений.

Тип закрутки	Диаметр по спутнику продольный/поперечный, км	Дата регистрации по ДДЗ/ по STD	Максимальный градиент T/S у поверхности, °C/PSU	Максимальные течения, см/с	Вертикальный размер вихревой структуры, м
Антициклон.	24/25	24.07/ 29.07	5.0/2.3	10-17	25
		24.07/ 29.07	4.2/2.2	6	20

Исследование характеристик эталонного ледового вихря проводилось на основе STD-зондирований вдоль поперечного разреза, расположенного с северо-

запада на юго-восток в Баренцевом море, между островами Земли Франца-Иосифа и Новой Земли (Рисунок 30). Ледовый покров наблюдался на всех станциях разреза, с наибольшей концентрацией к его юго-восточной части. На станциях 96–103 в приповерхностном слое до глубины 15–20 м температура воды варьировала от 3.8 до 1.2 °С, тогда как на станциях 104–106 поверхностные горизонты (до 20 м) характеризовались температурами от 0.4 до –0.4 °С. На глубинах ниже 30 м фиксировался более холодный слой с температурой около –1.5 °С. Соленость в верхнем 10-метровом слое снижалась до 31 PSU под влиянием талого льда, а на глубинах до дна оставалась стабильной на уровне 34 PSU. В качестве нижней границы вихря была выбрана изопикна плотности 25.2 кг/м³, по которой вихрь распространяется до глубины 7 м и имеет горизонтальную протяженность около 29 км. Объем вихря составил 3.93*10⁹ м³, теплосодержание — 4.7*10¹⁴ Дж, а объем пресной воды — 4.43*10⁷ м³. Эти параметры свидетельствуют о том, что вихрь представляет собой холодную и распресненную область по сравнению с окружающими водами, что подтверждается отрицательным теплосодержанием и значительным содержанием пресной воды, связанным с таянием льда.

Дальнейший анализ данных разреза показал, что теплосодержание составляет –2.69*10¹³ Дж, а объем пресной воды — 2.53*10⁶ м³ при общем объеме разреза 2.25*10⁸ м³. Отрицательное теплосодержание указывает на теплопотери, вероятно, связанные с таянием льда, что подтверждается поступлением талой воды в верхний слой океана.

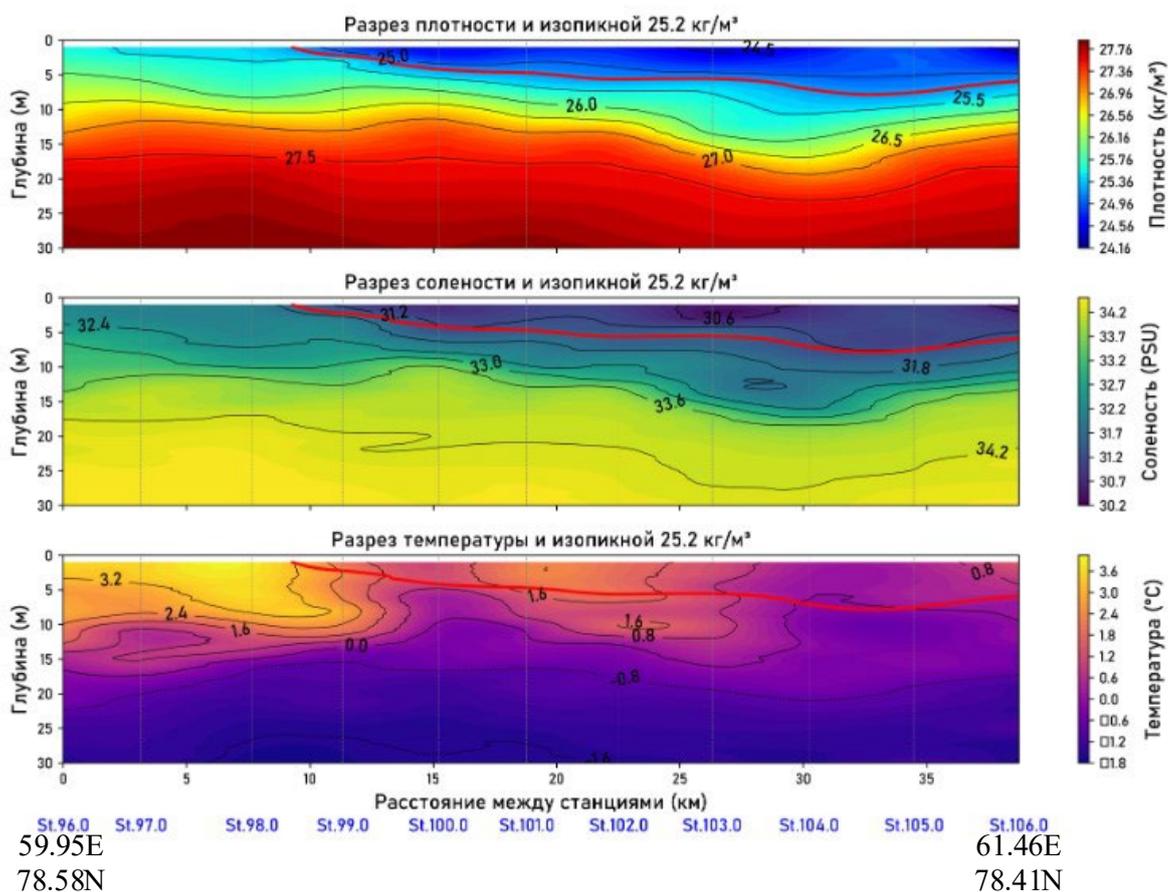


Рисунок 29. Вертикальные профили распределения характеристик на станциях № 96 - 106

Далее для количества детектированных структур, трассируемых льдом, рассчитаны объемы в зависимости от их объемов вихрей.

В качестве примера возьмём зону, где были получены контактные данные (Рисунок 31), в которой наблюдаются устойчивые течения в сторону выноса из ПЛЗ. Направление определялось по данным реанализа как движение вихрей по потоку. Далее параметры масштабировались на ледовые вихревые структуры, выявленные на РЛИ в этой зоне.

Эти характеристики масштабировались на совокупность ледовых вихрей в выбранном районе выноса [56°–70° в.д., 76.5°–80° с.ш.]. В июле 2023 года было зафиксировано 54 вихря (31 типа IC и 23 типа IA) с суммарной площадью $3.45 \cdot 10^{10}$ м². Их общее теплосодержание составило $-4.13 \cdot 10^{15}$ Дж, объем пресной воды — $3.9 \cdot 10^8$ м³, накопление тепла — $-1.2 \cdot 10^5$ Дж/м² (-0.12 МДж/м²),

а средний тепловой поток за 31 день — $-4.47 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². В августе количество вихрей сократилось до 31 (24 IC и 7 IA) с суммарной площадью $1.2 \cdot 10^{10}$ м². Теплосодержание составило $-1.43 \cdot 10^{15}$ Дж, объем пресной воды — $1.35 \cdot 10^8$ м³, накопление тепла — -0.12 МДж/м², а тепловой поток за 30 дней — $-4.62 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². Уменьшение числа вихрей и их площади в августе может быть связано с сезонным сокращением ледового покрова и снижением вихревой активности.

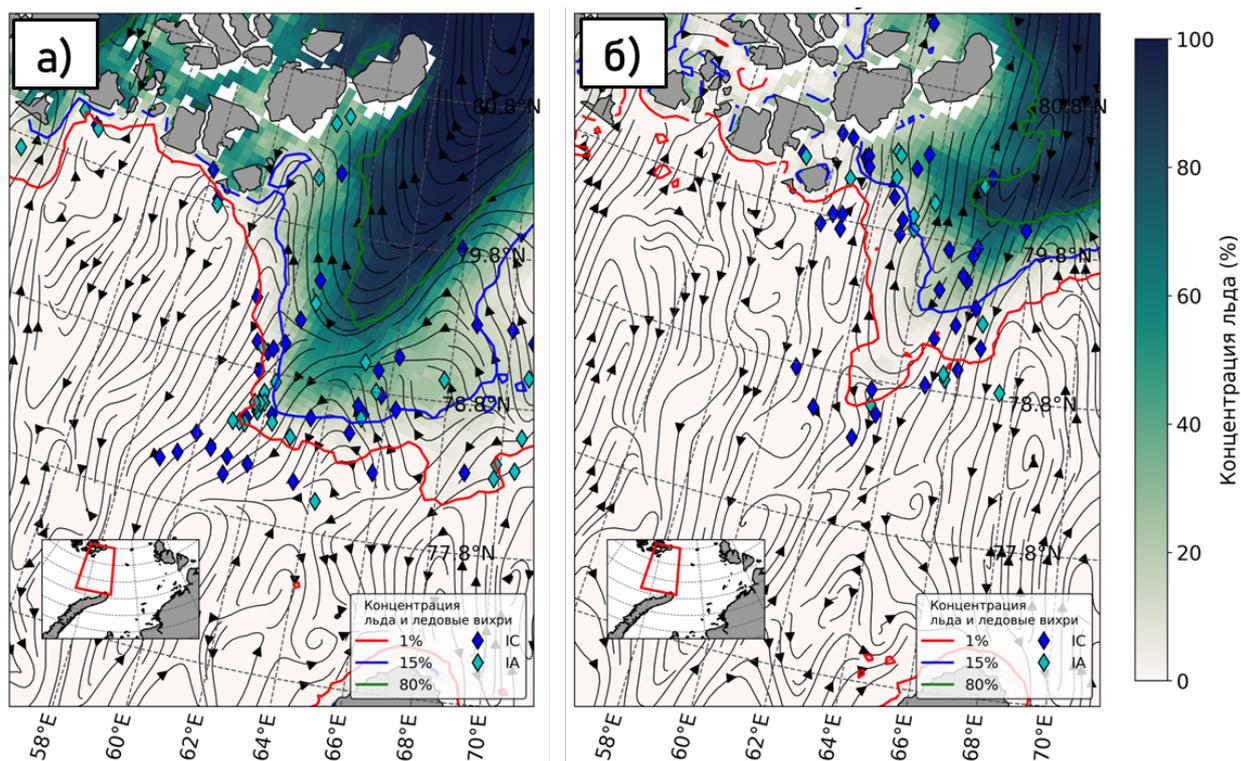


Рисунок 30. Ледовые вихри в зоне выноса

а) июль б) август 2023

Таблица 7. Рассчитанные теплосодержание и содержание распресненной воды переносимое ледовыми вихрями в июле и августе в зоне выноса 2023 г.

	Кол-во	Теплосодержание, Дж	Объем распрес. воды, м ³
Июль	54	$-4.13 \cdot 10^{15}$	$3.9 \cdot 10^8$
Август	31	$-1.43 \cdot 10^{15}$	$1.35 \cdot 10^8$

Ранее исследования ледовых вихрей в Арктике, особенно их роли в переносе тепла и пресной воды в прикромочной зоне (MIZ), проводились ограниченно, что делает наши оценки уникальными и пока трудно сопоставимыми с другими данными. Традиционно считалось, что таяние льда происходит преимущественно в местах его локализации, однако полученные результаты свидетельствуют о значимости вихревого переноса как механизма транспортировки тающего льда. Этот процесс охватывает как перемещение льда из сплошных ледяных полей в районы с более высокой температурой воды, так и его распределение внутри самих ледяных массивов, способствуя усилению теплообмена и изменению стратификации верхнего слоя океана.

Наиболее близким к нашему исследованию является работа Gallaher et al. (2016) [59], однако сравнение выявляет существенные различия в масштабах теплообмена. В их работе накопление тепла в верхнем слое океана Канадского бассейна за 19 дней достигало 39 МДж/м^2 , что существенно превышает наши оценки (-0.12 МДж/м^2 для июля и августа). Турбулентные тепловые потоки в ПЛЗ, описанные в работе, составляли $100\text{--}200 \text{ Вт/м}^2$, тогда как наши средние потоки за месяц были на уровне $-4.47 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2$ для июля и $-4.62 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2$ для августа. Эти расхождения могут быть обусловлены несколькими факторами. Во-первых, исследование Gallaher et al. охватывало крупномасштабные процессы теплообмена, включая радиационные и турбулентные потоки, тогда как наше исследование сосредоточено на локальном вкладе ледовых вихрей. Во-вторых, усреднение тепловых потоков по большой площади вихрей и за месячный период может занижать локальные значения, которые в активных зонах вихрей могут быть выше. Кроме того, различия в географическом контексте (Канадский бассейн и Баренцево море) и временных рамках (2014 и. 2023) также влияют на результаты.

Полученные данные подчеркивают ограниченный вклад ледовых вихрей в общий теплообмен в ПЛЗ по сравнению с крупномасштабными процессами,

описанными в Gallaher et al. Тем не менее, вихри играют важную роль в локальном турбулентном смешении и перераспределении пресной воды, способствуя таянию льда и усилению стратификации верхнего слоя океана. Для более точного сравнения с Gallaher et al. необходимы дальнейшие исследования, включая измерения локальных тепловых потоков в активных фазах вихрей и анализ их траекторий выноса, чтобы оценить их пространственно-временную динамику в Баренцевом море.

Для углубления понимания этих процессов необходимы дополнительные наблюдения, направленные на изучение вертикального распределения физических характеристик, таких как температура, соленость и плотность, внутри ледовых вихрей. Это позволит более точно описать их внутреннюю структуру и динамику. Кроме того, требуется разработка и применение численных моделей с высоким пространственным и временным разрешением, которые смогут воспроизвести сложные турбулентные процессы, связанные с вихревым переносом. Такие исследования помогут уточнить вклад ледовых вихрей в региональные и глобальные изменения ледового покрова и океанической циркуляции, а также улучшить прогнозы сезонной эволюции арктической экосистемы.

Заключение

В результате проведенного исследования была выполнена количественная оценка пространственно-временной изменчивости характеристик вихревых структур вблизи и в области прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) Карского моря летом 2023 года на основе спутниковых и контактных данных.

1. Проведен литературный обзор, который выявил особенности вихревых структур в ПЛЗ, включая их устойчивость, сложную форму и влияние ледового покрова на их динамику, отличающую их от вихрей открытого океана.

2. Оценено среднемноголетнее положение ПЛЗ в Карском море и ее особенности в летний сезон 2023 года. Установлено, что в июле 2023 года ПЛЗ характеризовалась значительной отрицательной аномалией площади (260–750 км²), тогда как в августе площадь соответствовала норме (170–420 км²). Кромка льда в июле была смещена севернее, а в августе почти совпадала со средним положением.

3. На основе спутниковых радиолокационных изображений за период с 01.07.2023 по 31.08.2023 детектировано 961 проявление вихревых структур, из которых 312 трассировались льдом. Преобладали циклонические вихри открытой воды с диаметрами 2–6 км, особенно в июле (64% случаев). Ледовые вихри имели более равномерное распределение диаметров, с большей долей крупных структур (до 34.28 км).

4. Статистическая обработка данных показала снижение вихревой активности к августу (с 611 до 350 случаев) и уменьшение средних диаметров вихрей (с 8.03 до 7.23 км). Вихри открытой воды чаще имели малые диаметры (1–5 км), тогда как ледовые вихри, особенно антициклоны, характеризовались крупными размерами. Пространственно вихри концентрировались у ледовой кромки, с очагами в северо-западной части Карского моря и восточнее Новой Земли.

5. Анализ контактных данных позволил оценить перенос тепла и пресной воды малыми вихрями из ПЛЗ. Для ледового антициклонического вихря у Земли Франца-Иосифа определены объем ($3.93 \times 10^9 \text{ м}^3$), теплосодержание (-4.7×10^{14} Дж) и объем пресной воды ($4.43 \times 10^7 \text{ м}^3$). В зоне выноса в июле 54 вихря обеспечили теплосодержание -4.13×10^{15} Дж и объем пресной воды $3.9 \times 10^8 \text{ м}^3$, в августе — 31 вихрь с -1.43×10^{15} Дж и $1.35 \times 10^8 \text{ м}^3$ соответственно. Это подтверждает значимость вихрей в локальном турбулентном смешении и перераспределении пресной воды.

Проведенное исследование позволило количественно оценить пространственно-временную изменчивость характеристик вихревых структур вблизи и в области ПЛЗ Карского моря летом 2023 года. Установлены особенности положения ПЛЗ, выявлены закономерности распределения и динамики вихрей, а также их роль в переносе тепла и пресной воды. Полученные результаты подчеркивают значимость вихрей в локальном турбулентном смешении и перераспределении водных масс, что важно для понимания гидрологического режима Карского моря и его влияния на арктическую экосистему. Для углубления знаний необходимы дальнейшие исследования вертикальной структуры вихрей и разработка численных моделей с высоким разрешением.

Список литературы

1. Flor J.B. (ed.). Fronts, waves and vortices in geophysical flows. Berlin: Springer, 2010. 192 с. (Lecture Notes in Physics, Vol. 805).
2. Mathis J., Pickart R., Hansell D., Kadko D., Bates N. Eddy transport of organic carbon and nutrients from the Chukchi Shelf: Impact on the upper halocline of the western Arctic Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 2007. Vol. 112. P. C05011. DOI 10.1029/2006JC003899.
3. Dumont D. Marginal ice zone dynamics: history, definitions and research perspectives // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2022. Vol. 380, No. 20210253. DOI 10.1098/rsta.2021.0253.
4. Mahadevan A., Tandon A. An analysis of mechanisms for submesoscale vertical motion at ocean fronts // *Ocean Modelling*. 2006. Vol. 14, No. 3-4. P. 241–256. DOI 10.1016/j.ocemod.2006.05.006.
5. Атаджанова О.А., Зимин А.В. Анализ характеристик субмезомасштабных вихревых проявлений в Баренцевом, Карском и Белом морях с использованием спутниковых данных // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 3. С. 36–45.
6. Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 134. DOI 10.3390/rs14010134.
7. 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*. 2019. Vol. 124, No. 9. P. 6601–6616. DOI 10.1029/2019JC015113.
8. Kozlov I.E., Plotnikov E.V., Manucharyan G.E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from

- sequential synthetic aperture radar observations // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14. P. 2941–2947. DOI 10.5194/tc-14-2941-2020.
9. Khachatrian E., Sandalyuk N., Lozou P. Eddy Detection in the Marginal Ice Zone with Sentinel-1 Data Using YOLOv5 // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 9. P. 2244. DOI 10.3390/rs15092244.
 10. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. *Моря СССР*. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с.
 11. *Ecosystem Barents Sea* / Ed. E. Sakshaug, G.H. Johnsen, K.M. Kovacs. Trondheim: Tapir Academic, 2009. 471 p.
 12. Мирошников А.Ю., Бадюков Д.Д., Флинт М.В., Репкина Т.Ю., Асадулин Э.Э., Шарапов А.М., Комаров В.Б., Усачева А.А. Рельеф дна Карского моря и сорбционные свойства осадков как факторы аккумуляции загрязнений // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 5. С. 809–821. DOI 10.31857/S0030157421050087.
 13. *Карское море. Экологический Атлас* / ООО «Арктический Научный Центр». Москва: АО «Арктический Научный Центр», 2016. 272 с. (Серия: Атласы морей Российской Арктики). ISBN 978-5-9908796-0-7.
 14. Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т., Демидов А.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 683–697.
 15. Зацепин А.Г., Поярков С.Г., Кременецкий В.В., Недоспасов А.А., Щука С.А., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О. Гидрофизические характеристики глубоководных желобов западной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 4. С. 526–539. DOI 10.7868/S0030157415040164.

16. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И.М. Ашика. Санкт-Петербург: ААНИИ, 2021. 360 с. ISBN 978-5-98364-104-4.
17. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, No. C02S03. P. 1–14. DOI 10.1029/2005JC003384.
18. Johannessen J.A., Johannessen O.M., Sandven S. Oceanographic Conditions in the Marginal Ice Zone North of Svalbard in Early Fall 1979 With an Emphasis on Mesoscale Processes // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1983. Vol. 88, No. C3. P. 1844–1852.
19. Marginal Ice Zone // National Snow and Ice Data Center. URL: <https://nsidc.org/learn/cryosphere-glossary/marginal-ice-zone> (дата обращения: 20.04.2025).
20. WMO Sea-Ice Nomenclature = Номенклатура ВМО по морскому льду: WMO-No. 259 / World Meteorological Organization (WMO). Женева: ВМО, 2014. 121 с. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/41953> (дата обращения: 20.04.2025).
21. Strong C., Rigor I.G. Arctic marginal ice zone trending wider in summer and narrower in winter // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, No. 18. P. 4864–4868. DOI 10.1002/grl.50928.
22. The Marginal Ice Zone // Norwegian Polar Institute. URL: <https://npolar.no/en/themes/the-marginal-ice-zone/> (дата обращения: 20.04.2025).
23. Manucharyan G.E., Thompson A.F. Heavy footprints of upper-ocean eddies on weakened Arctic sea ice in marginal ice zones // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, No. 2147. DOI 10.1038/s41467-022-29663-0.

24. Кони́к А.А., Зими́н А.В. Пространственно-временная изменчивость характеристик Арктической фронтальной зоны в Баренцевом и Карском морях в летний период в первые два десятилетия XXI века // Морской гидрофизический журнал. 2022. № 6 (228). С. 29–40. DOI 10.33278/2306-7675-2022-38-6-29-40.
25. Каримова С.С. О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 152–160.
26. Атаджанова О.А., Зими́н 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. № 2 (194). С. 80–90. DOI 10.22449/0233-7584-2017-2-80-90.
27. Петренко Л.А., Козлов И.Е. Изменчивость прикромочной ледовой зоны и вихреобразования в проливе Фрама и у архипелага Шпицберген по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летний период // Морской гидрофизический журнал. 2023. № 5 (233). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenchivost-prikromochnoy-ledovoy-zony-i-vihreobrazovaniya-v-prolive-frama-i-u-arhipelaga-shpitsbergen-po-dannym-sputnikovyh> (дата обращения: 12.05.2025).
28. Mensa J.A., Timmermans M.-L., Kozlov I.E., Williams W.J. Surface Drifter Observations from the Arctic Ocean’s Beaufort Sea: Evidence for Submesoscale Dynamics // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. Vol. 123, No. 4. P. 2635–2645. DOI 10.1002/2017JC013728.
29. Gill A.E. Atmosphere-Ocean Dynamics. Orlando: Academic Press, 1982. 662 p.

30. Nurser A.J.G., Bacon S. The Rossby radius in the Arctic Ocean // *Ocean Science*. 2014. Vol. 10. P. 967–975. DOI 10.5194/os-10-967-2014. URL: <https://www.ocean-sci.net/10/967/2014/> (дата обращения: 20.04.2025).
31. Кошляков М.Н., Белокопытов В.Н. Синоптические вихри открытого океана: обзор экспериментальных исследований // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 6. С. 613–627. DOI 10.22449/0233-7584-2020-6-613-627.
32. *Eddies in Marine Science* / Ed. A.R. Robinson. Berlin; Heidelberg: Springer, 1983. 609 p. DOI 10.1007/978-3-642-69003-7.
33. Eldevik T., Dysthe K.B. Spiral Eddies // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32, No. 3. P. 851–869. DOI 10.1175/1520-0485(2002)032<0851:se>2.0.co;2.
34. Hecht M.W., Hasumi H. (ed.). *Ocean modeling in an eddying regime*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2013. 409 p. (Geophysical Monograph Series, Vol. 177).
35. Sandalyuk N., Khachatryan E., Budyansky M. Assessing the potential of Eddy detection in MIZ using SAR and Lagrangian modeling: A test case on Fram Strait // *Journal of Sea Research*. 2024. Vol. 201. P. 102531. DOI 10.1016/j.seares.2024.102531.
36. Hoppmann M., Kuznetsov I., Fang Y.-C., Rabe B. Mesoscale observations of temperature and salinity in the Arctic Transpolar Drift: a high-resolution dataset from the MOSAiC Distributed Network // *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14. P. 4901–4921. DOI 10.5194/essd-14-4901-2022.
37. Коровин В.П. *Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря: учебное пособие*. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2007. 433 с. ISBN 978-5-86813-189-9.

38. Qi Y., Mao H., Du Y., Li X., Yang Z., Xu K., Yang Y., Zhong W., Zhong F., Yu L., Xing H. A lens-shaped, cold-core anticyclonic surface eddy in the northern South China Sea // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. P. 976273. DOI 10.3389/fmars.2022.976273.
39. Блатов А.С., Тужилкин В.С. Среднемасштабные вихри и синоптическая изменчивость в Мировом океане // *Итоги науки и техники. Сер. Океанология*. Москва: ВИНТИ, 1990. Т. 8. 248 с.
40. Karimova S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 50, No. 8. P. 1107–1124. DOI 10.1016/j.asr.2011.10.027.
41. Le Vu B., Stegner A., Arsouze T. Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and Its Application to Coastal Eddy Formation // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2018. Vol. 35. P. 739–762. DOI 10.1175/JTECH-D-17-0010.1.
42. Moschos E., Schwander O., Stegner A., Gallinari P. Deep-SST-Eddies: A Deep Learning Framework to Detect Oceanic Eddies in Sea Surface Temperature Images // *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2020. P. 9053909. DOI 10.1109/ICASSP40776.2020.9053909.
43. Johannessen J.A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O.M., Samuel P., Browne D., Vachon P. SAR Ocean Feature Catalogue. Noordwijk: ESTEC, 1994. 200 с.
44. Espedal H., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E.B., Lyzenga D., Knulst J. COASTWATCH'95: ERS 1/2 SAR detection of natural film on the ocean surface // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, No. C11. P. 24969–24982. DOI 10.1029/98JC01660.
45. Gade M., Alpers W., Ermakov S., Lange P. Wind wave tank measurements of bound and free propagating short gravity-capillary

- waves // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, No. C10. P. 21697–21709. DOI 10.1029/98JC02118.
46. Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L. Slicks as indicators for marine processes // *Oceanography*. 2013. Vol. 26, No. 2. P. 138–149. DOI 10.5670/oceanog.2013.39.
47. Karimova S., Gade M. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, No. 10. P. 2394–2414. DOI 10.1080/01431161.2016.1145367.
48. Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2015. № 1 (20). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-mezhgodovyh-i-sezonnyh-anomaliy-ledovitosti-barentseva-i-karskogo-morey> (дата обращения: 20.04.2025).
49. Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А., Козлов И.Е. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 129–135.
50. Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J.A. Quad-polarization SAR features of ocean currents // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014. Vol. 119, No. 9. P. 6046–6065. DOI 10.1002/2014JC010173.
51. Chaigneau A., Le Texier M., Eldin G., Grados C., Pizarro O. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, No. C11025. DOI 10.1029/2011JC007134.

52. Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Изменчивость Мирового океана. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1974. 262 с.
53. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. Москва: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
54. Atadzhanova O.A., Kozlov I.E., Konik A.A. Eddies over Spitsbergen Bank in the Barents Sea from Year-Round Sentinel-1 SAR Observations // Preprints. 2024. P. 2024050235. DOI 10.20944/preprints202405.0235.v1.
55. Sandalyuk N., Khachatrian E. Automatic eddy detection in the MIZ based on YOLO algorithm and SAR images // Science of Remote Sensing. 2025. Vol. 11. P. 100228. DOI 10.1016/j.srs.2025.100228.
56. Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Mesoscale and submesoscale eddies in the marginal ice zone of the Arctic Ocean: Satellite observations and physical mechanisms // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2022. Vol. 127, No. 8. P. e2022JC018624. DOI 10.1029/2022JC018624.
57. Zi Y., Wang Y., Zhao J. Deep learning for eddy detection in the Arctic Ocean by spaceborne SAR // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 315. P. 114413. DOI 10.1016/j.rse.2024.114413.
58. Shorten C., Khoshgoftaar T.M. A survey on image data augmentation for deep learning // Journal of Big Data. 2019. Vol. 6. P. 60. DOI 10.1186/s40537-019-0197-0.
59. Gallaher S.G., Stanton T.P., Shaw W.J., Cole S.T., Toole J.M., Wilkinson J.P., Maksym T., Hwang B. Evolution of a Canada Basin ice-ocean boundary layer and mixed layer across a developing thermodynamically forced marginal ice zone // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016. Vol. 121, No. 8. P. 6223–6250. DOI 10.1002/2016JC011778.