

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

*На правах рукописи*



АТАДЖАНОВА ОКСАНА АЛИШЕРОВНА

**ОСОБЕННОСТИ СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ВИХРЕВОЙ ДИНАМИКИ  
БАРЕНЦЕВА, КАРСКОГО И БЕЛОГО МОРЕЙ ПО ДАННЫМ  
СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Специальность 25.00.28 – океанология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:  
доктор географических наук, доцент  
Зимин Алексей Вадимович

Санкт-Петербург – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВЕДЕНИЕ .....  | 4  |
| ГЛАВА 1. ПРЕДМЕТ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ .....   | 22 |
| 1.1. Субмезомасштабные вихри как предмет исследования .....  | 22 |
| 1.1.1. Субмезомасштабные вихри и классификация масштабов неоднородностей гидрофизических полей .....       | 22 |
| 1.1.2. Методы исследования субмезомасштабных вихрей .....  | 26 |
| 1.2. Характеристика объектов исследования: Баренцева, Карского и Белого морей .....                        | 32 |
| Выводы к главе 1 .....   | 43 |
| ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В БЕЛОМ МОРЕ .....                                | 44 |
| 2.1. Проявления субмезомасштабных вихревых структур в разных типах данных .....                            | 44 |
| 2.2. Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур ..... | 49 |
| 2.3. Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны .....                                 | 55 |
| Выводы к главе 2 .....   | 60 |
| ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ .....                           | 62 |
| 3.1. Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур ..... | 62 |
| 3.2. Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны .....                                 | 73 |
| 3.3. Вихревые структуры над неровностями дна и приливные процессы .....                                    | 87 |
| Выводы к главе 3 .....   | 89 |
| ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В КАРСКОМ МОРЕ .....                              | 91 |
| 4.1. Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур ..... | 91 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2. Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны ..... | 101 |
| 4.3. Вихревые структуры над неровностями дна и приливные процессы .....    | 109 |
| Выводы к главе 4 .....   | 111 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 113 |
| СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....   | 117 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 118 |

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Многообразные процессы в Мировом океане приводят к формированию неоднородностей физических и динамических характеристик морской воды [Каменкович и др., 1987]. Неоднородности с пространственным масштабом порядка единиц километров и временем жизни от нескольких часов до суток связывают с процессами и явлениями субмезомасштаба. Процессы такого масштаба являются переходным звеном (в энергетическом аспекте) от мезомасштабных процессов к мелкомасштабным, и, следовательно, не принадлежат в полной мере к трехмерным явлениям, и в тоже время не относятся к гидростатически сбалансированным процессам, в которых важны эффекты вращения Земли [Thomas et al., 2008].

К элементам субмезомасштабной вихревой динамики относят малые вихри и фронтальные структуры различного происхождения. Как указано в монографии [Каменкович и др., 1987], именно вихри в большей степени, чем любое другое океаническое явление, определяют наблюдаемые в океане распределения скоростей, температуры, солености и концентрации примесей. При этом субмезомасштабные вихревые структуры, как и вихри более крупных масштабов, играют важную роль в интенсификации перемешивания, горизонтальном и вертикальном переносе тепла и вещества. Поэтому их исследование важно для понимания механизмов перераспределения тепла и биогеохимических параметров на локальных акваториях.

Из-за недостаточной изученности вихреобразования в Арктике в субмезомасштабном интервале, влияние субмезомасштабных (малых) вихрей не учитывается в прикладных расчетах и прогнозах изменчивости характеристик вод акваторий, важных для решения прикладных задач, имеющих значительное оборонное и хозяйственное значение [Государственная..., 2014]. Понимание вихревой активности на отдельных акваториях является значимым при прогнозировании распространения загрязнений различной природы [Калашникова и др., 2013; Лаврова и др., 2015], они могут концентрировать загрязнения на своей периферии и обеспе-

чивать их быстрый транспорт как по горизонтали, так и по вертикали [Зацепин и др., 2016; Вяли и др., 2018]. Кроме того, за счет значительных вертикальных скоростей вихри играют роль небольших локальных апвеллингов, которые могут поднимать питательные вещества из нижележащих слоев к поверхности [Зацепин и др., 2013; Алескерова и др., 2015]. Также существование вихревых структур создает дополнительные помехи при распространении звука, что важно при усовершенствовании методов подводной акустики [Родионов и др., 2016].

Развитие представлений пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей в субмезомасштабном интервале на фоне процессов большего масштаба в настоящее время является фундаментальной задачей и остается актуальным для арктических морей, так как к настоящему времени не сформированы достаточно полные представления о характеристиках субмезомасштабных вихрей в Арктике, т.е. отсутствуют сведения о периодах времени и районах интенсивной вихревой активности, где должны наблюдаться значительные вертикальные скорости, и усилен турбулентный обмен.

### **Степень разработанности темы исследования**

Субмезомасштабные вихревые структуры являются неотъемлемой частью циркуляции океанов и морей, при этом их вклад в формирование гидрофизических полей может быть сопоставим с вкладом мезомасштабных вихрей [Митягина, Лаврова 2008, 2009; Thomas et al., 2008]. Однако, из-за малых пространственного масштаба и времени существования они представляют собой наименее изученную часть океанических вихревых структур.

В настоящее время большое количество публикаций посвящено исследованиям субмезомасштабных вихревых структур в различных районах Мирового океана. При этом главное внимание исследователей было направлено на понимание механизмов формирования субмезомасштабных вихрей и их влияния на гидрофизические поля [Mahadevan, Tandon, 2006; Thomas et al., 2008; Thomas, Ferrari, 2008; Capet et al., 2008a, 2008b; Klein, Lapeyre, 2009; Зацепин, 2011; Zhong, Bracco, 2013; Timmermans, Winsor, 2013]. In-situ наблюдения и моделирование позволили оценить роль субмезомасштабных вихрей в интенсификации перемешивания

между верхним квазиоднородным слоем и нижележащим слоем через пикноклин в основном в эпизодических экспериментах и на отдельных локальных акваториях [Zhao et al., 2014; Зимин, 2016, 2018; Hattermann et al., 2016; Manucharyan, Thompson, 2017; Mensa et al., 2018].

Использование спутниковых данных высокого разрешения позволило получить значительное количество информации о данных структурах в различных районах Мирового океана на больших акваториях [Гинзбург, 1992; DiGiacomo, Holt, 2001; Лаврова, Митягина, 2009; Костяной и др., 2010; Mityagina et al., 2010; Каримова, 2010, 2012; Рогачев, 2010, 2012; Зацепин, 2011; Лаврова и др., 2011; Каримова и др., 2011; Nakamura, et al., 2012; Gurova, Chubarenko, 2012; Дубина и др., 2013; Karimova, Gade, 2014, 2016]. В том числе были проведены комплексные изучения субмезомасштабных вихревых структур на основе многолетних архивов радиолокационных изображений (РЛИ). Такие работы позволили выявить, как субмезомасштабные вихри проявляются на РЛИ, какой диаметр они имеют, а также где и когда они чаще всего регистрируются, так как предполагается, что районы частой встречаемости вихрей должны характеризоваться интенсивным вертикальным и горизонтальным обменом. Подобные комплексные широкомасштабные исследования до настоящего времени не затрагивали моря российской Арктики.

Баренцево, Карское и Белое моря – это моря Северного Ледовитого океана. В целом они представляют собой преимущественно шельфовые акватории со значительными изменениями рельефа дна. Большое влияние на их режим оказывает взаимодействие вод Северного Ледовитого и Атлантического океанов, изменчивость ледового покрова и речной сток. По этим причинам в этих морях формируются различные по своим характеристикам водные массы, между которыми возникают фронтальные зоны (ФЗ) и фронтальные разделы. Как известно, меандрирование фронтов в верхнем слое может приводить к образованию вихревых структур разных масштабов [Каменкович и др., 1987; Жабин, Корчуганов, 2003; Никитин, 2017].

В Баренцевом море выделяют до семи фронтальных зон [Родионов, Костяной, 1998]. Основными из них являются Полярная фронтальная зона, расположенная в центральной части моря, и Прикромочная ФЗ в северной части акватории. В ряде работ по *in-situ* наблюдениям иногда отмечается наличие вихревых структур внутри или вблизи этих фронтальных зон. В северной части моря (в области Прикромочной фронтальной зоны в том числе) неоднократно регистрировались вихревые структуры с диаметром от единиц до десятков километров [Федоров, Гинзбург, 1988; Косолапов, Лебедев, 1989; Лебедев, 1992]. Также по натурным измерениям мезомасштабные и субмезомасштабные вихри отмечались в разных частях Полярной фронтальной зоны на границе с Норвежским морем [Johannssen, Foster, 1978; Голенко и др., 1987; Vage et al., 2014]. Кроме этого антициклонические и циклонические меандры около фронтальной зоны наблюдались и по спутниковым данным [Костяной и др., 1992].

Сведения о положении фронтальных зон и фронтов в Карском море в большей степени опираются на *in-situ* измерения и иногда оцениваются по распределению характеристик речного стока [Зацепин и др., 2010а, б; Кубряков и др., 2013; Флинт и др., 2015; Сергеева и др., 2015; Завьялов и др., 2015; Kubryakov et al., 2016]. В северной части моря прослеживается фронтальная зона, связанная с таянием льда [Сергеева и др., 2015]. В южной части моря выделяется Стоковая фронтальная зона, связанная с влиянием речного стока Оби и Енисея [Pavlov et al., 1996; Кубряков и др., 2013]. Конфигурация Стоковой фронтальной зоны отличается значительной изменчивостью в разные годы и зависит от особенностей речного стока и преобладающих направлений ветра. В районе данной фронтальной зоны по данным отрывочных контактных измерений фиксировались вихри и меандры [Щука и др., 2015].

В Белом море выделяют в теплый сезон пять фронтальных зон. Одна из них находится на границе с Баренцевым морем, четыре других – внутри моря. Их названия связаны с географическим положением Горловская; Соловецкая; Двинская; Онежская [Филатов, Тержевик, 2007; Романенков и др., 2016]. В работе [Гидрометеорология., 1991] упоминаются вихревые структуры с масштабами по-

рядка единиц километров и временем жизни несколько часов, которые отмечались в районе Горловского фронта на основе данным ИК-радиометра. Океанологические in-situ наблюдения последних лет в Белом море позволили выявить некоторые особенности распределения характеристик вихрей с размерами порядка единиц километров [Зимин и др., 2014; Зимин и др.2016]. Было показано, что формирование вихрей над неровностями дна связано с приливной динамикой [Родионов и др., 2014], а районы частой регистрации вихрей характеризуются усилением вертикального и горизонтального обмена в 1,5–2 раза [Зимин, 2016].

В последние почти два десятилетия отмечается тенденция уменьшения площади льда в Арктическом регионе. В связи с этим появилось больше районов, свободных ото льда в теплый сезон, и, как следствие, стал шире охват областей, доступных для исследования поверхностных проявлений субмезомасштабных структур дистанционными спутниковыми методами, которые, в свою очередь, являются наиболее перспективными для оценки как встречаемости вихревых структур, так и их характеристик (координаты центра, диаметр, тип закрутки и т.д.). Под встречаемостью в данной работе понимается количественный показатель (в шт.), описывающий как часто регистрируются вихри на конкретной площади акватории или за конкретный период.

**Цель работы:** установить закономерности пространственно-временной субмезомасштабной вихревой активности на фоне процессов большего масштаба в Баренцевом, Карском и Белом морях.

**Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:**

1. Провести оценку встречаемости субмезомасштабных вихревых структур для акваторий Баренцева, Карского и Белого морей;
2. Выявить особенности пространственно-временной изменчивости характеристик проявлений субмезомасштабных вихрей в Баренцевом, Карском и Белом морях;
3. Исследовать мезомасштабную и синоптическую изменчивость положений термических фронтов на поверхности и оценить ее роль в распределении субмезомасштабных вихрей в Баренцевом и Карском морях;



4. Проанализировать связь встречаемости вихрей в районах неровностей дна и приливной динамикой;

5. Вывести закономерности субмезомасштабной вихревой динамики на основе выявленных особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик проявлений вихрей на акватории Баренцева, Карского и Белого морей.

**Область исследования:** исследование выполнено в области, соответствующей шифру специальности 25.00.28 – океанология: раздел 3 – Динамические процессы (волны, вихри, течения, пограничные слои) в океане.

**Методология и методы исследования** основаны на комплексном физико-географическом подходе к исследованию приливных Арктических морей с применением картографирования, статистического анализа, комплексирования и сравнительного анализа характеристик проявлений субмезомасштабных вихревых структур и фронтальных зон.

В качестве исходных данных для регистрации характеристик проявлений вихрей использовались радиолокационные изображения Envisat ASAR, Radarsat-1, 2. Для выделения фронтальных зон применялись данные по температуре поверхности моря продукта OSTIA. Дополнительно привлекались данные подспутникового эксперимента, архивы положения фронтов в Белом море и данные баротропного прилива.

На основе обобщения разнородных данных производилась оценка пространственно-временной изменчивости проявления вихревых структур и определяющих ее факторов.

**Научная новизна работы** заключается в том, что впервые:

1. Показано, что субмезомасштабные вихревые структуры – распространенное явление на акватории Баренцева, Карского и Белого морей в теплый сезон;

2. Выявлены физико-географические закономерности пространственно-временной изменчивости проявлений субмезомасштабных (малых) вихревых структур для акватории Баренцева, Карского и Белого морей: получены характерные размеры вихрей; установлены периоды и районы их наибольшей встречаемо-

сти; показана связь с сезонной изменчивостью пикноклина, фронтальной динамикой, а также интенсивностью приливных процессов в районах неровностей дна.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что созданные базы данных характеристик проявлений субмезомасштабных вихрей для Баренцева, Карского и Белого морей могут быть применены в задачах оперативной океанологии, в интересах подводной акустики и навигации, рыбного промысла и аквакультуры. Полученные закономерности субмезомасштабной вихревой динамики следует учитывать при планировании и проведении морских гидрологических и экологических изысканий, также они могут быть использованы при моделировании динамики вод и учете влияния вихрей на процессы вертикального и горизонтального перемешивания в Арктических морях.

**Теоретическая значимость работы** заключается в расширении представлений о распространенности на акватории Арктических морей субмезомасштабных вихрей, как наименее изученного типа океанических вихревых структур, в выявлении физико-географических закономерностей проявлений вихрей под влиянием процессов большего масштаба, что может быть использовано для совершенствования понимания механизмов перераспределения тепла и биогеохимических параметров на локальных акваториях.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Поверхностные проявления субмезомасштабных вихревых структур с размерами преимущественно от 2 до 4 км (до 55 %) в теплый сезон постоянно присутствуют на акватории Баренцева, Карского и Белого морей, имеют в основном циклонический тип вращения (~ 85 %), а средние оценки диаметра антициклонических вихрей больше циклонических на 20 %;

2. Субмезомасштабная вихревая активность в Баренцевом, Карском и Белом морях наиболее интенсивна (~ 60 % проявлений вихрей) в период формирования приповерхностного пикноклина (в начале теплого сезона);

3. Районы частой встречаемости субмезомасштабных вихрей в Баренцевом, Карском и Белом морях связаны с областями динамики фронтов (где отмечается

~ 50 % структур) и неровностями дна (где вихри присутствуют в течение всего теплого сезона, а их количество связано с интенсивностью приливных процессов).

**Степень достоверности** определяется тем, что научные выводы, сделанные в диссертации, получены с использованием широко апробированной методики на обширном массиве наблюдений. Также применялись методы количественной оценки, не требующие априорных ограничений и, таким образом, исключающие фактор субъективности. Достоверность и новизна научных результатов подтверждаются публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах и получением авторского свидетельства на базу данных.

### **Апробация результатов**

Основные результаты, изложенные в диссертации, были представлены на 19 международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: XII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 27–29 мая 2014 г.), XII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 10–14 ноября 2014 г.), Шестая международная Школа-конференция «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 2–6 марта 2015 г.), Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях» (Светогорск, 23–26 июня 2015 г.), IV конференция молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 14–16 октября 2015 г.), VIII Всероссийская конференция с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод» (Санкт-Петербург, 8–12 сентября 2015 г.), XIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 16–20 ноября 2015 г.), Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (Севастополь, 25–29 апреля 2016 г.), XIII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 24–26 мая 2016 г.), XIV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 14–18 ноября 2016 г.), II Всерос-

сийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, 10–15 апреля 2017 г.), V конференция молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 10–17 сентября 2017 г.), IX Всероссийская конференция с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод» (Санкт-Петербург, 20–22 сентября 2017 г.), I Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы» (Санкт-Петербург, 19–20 декабря 2017 г.), XV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 13–17 ноября 2017 г.), III Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Санкт-Петербург, 21–25 мая 2018 г.), XIV Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г.), Международный симпозиум «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере» (Москва, 30 октября – 2 ноября 2018 г.), II Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы» (Санкт-Петербург, 19–20 декабря 2018 г.).

**Связь с научными программами, планами, темами.** Работа выполнялась в соответствии с научными планами и программами исследований в рамках следующих проектов:

– государственное задание Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натурных экспериментальных работ», №0149-2018-0014 (2018 г.), исполнитель;

– проект РФФИ «Явления и процессы приливного арктического моря в субмезомасштабном интервале изменчивости», № 15-05-04639 а (2015–2017 гг.), исполнитель;

– проект РНФ «Оценка по спутниковым данным количественных характеристик цветений массовых видов фитопланктона в европейских морях России, их

взаимосвязи с климатическими факторами и влияния на экологическую ситуацию», № 14-17-00800 (2015–2016 гг.), исполнитель;

– Мегагрант Правительства РФ, договор №11.G34.31.0078 (2013–2015гг.), исполнитель;

– проект «Акватория» ФПИ (2015–2018 гг.), исполнитель.

**Личный вклад автора** заключался в постановке задач исследования и их реализации, в обработке и анализе спутниковых радиолокационных изображений, данных по температуре поверхности моря и концентрации хлорофилла, создании базы данных по характеристикам поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей, в постановке цели, задач и обработке данных подспутникового эксперимента, в комплексном анализе разнородных данных.

**Публикации по теме диссертации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 37 научных работах, из них 8 статей в рецензируемых научных журналах, 12 статей в рецензируемых сборниках научных трудов и 16 тезисов докладов на Всероссийских и Международных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России по специальности 25.00.28 – океанология (географические науки) удовлетворяют 7 работ в рецензируемых российских научных изданиях. В их числе 3 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и SCOPUS, и 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

#### Статьи в рецензируемых журналах

1. **Атаджанова, О. А.** Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Е. И. Свергун, А. А. Коник // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34., №3. – С. 237–246.

2. Зимин, А. В. Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Баренцева моря / А. В. Зимин, А. А. Коник, **О. А. Атаджанова** // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 51. – С. 99–108.

3. Свергун, Е. И. Изменчивость фронтальных разделов и короткопериодные внутренние волны в Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых наблюдений за теплый период 2007 года / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова**, А. А. Коник, Е. В. Зубкова, И. Е. Козлов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 181–188.

4. **Атаджанова, О. А.** Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Морской гидрофизический журнал. – 2017. – №2 (194). – С. 80–90.

5. **Атаджанова, О. А.** Малые вихри в Онежском заливе Белого моря и их влияние на распределение хлорофилла / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 6. – С. 110–118.

6. Зимин, А. В. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений / А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова**, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов, Б. Шапрон // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 1–2. – С. 129–135.

7. Романенков, Д. А. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря / Д. А. Романенков, А. В. Зимин, А. А. Родионов, **О. А. Атаджанова**, И. Е. Козлов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2016. – Т. 9, № 1. – С. 59–72.

8. Зимин, А. В. Опыт разработки системы мониторинга короткопериодных процессов и субмезомасштабных структур в Белом море и результаты ее апробации летом 2014 г. / А. В. Зимин, Д. А. Романенков, **О. А. Атаджанова**, А. А. Родионов, А. В. Моисеев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2015. – № 41. – С. 116–125.

#### Статьи в сборниках научных трудов

9. **Атаджанова, О. А.** Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Белого моря по радиолокационным изображениям / О. А. Атаджанова, А. В.

Зимин, И. Е. Козлов // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестор-История, 2014. – С. 215—217.

10. **Атаджанова, О. А.** Исследование влияния субмезомасштабных вихрей на распределение фитопланктона в поверхностном слое Белого моря по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, И. В. Салинг // Труды VIII Международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб.: ИО РАН, 2015 – С. 146–149

11. **Атаджанова, О. А.** Исследование короткопериодных внутренних волн и малых вихревых структур на акватории Белого моря по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Труды IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2015 – С. 225–228.

12. **Атаджанова, О. А.** Статистический анализ малых вихревых структур в Карском и Баренцевом море по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестор-История, 2016. – С. 167–169.

13. Родионов, А. А. Оценка влияния субмезомасштабных вихревых структур на распространение акустических сигналов в Белом море / А. А. Родионов, Д. А. Никитин, А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова**, К. Б. Филин // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестор-История, 2016. – С. 220–222.

14. Зимин, А. В. Проявления субмезомасштабных вихрей в дистанционных и контактных наблюдениях в Белом море / А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова** // Труды IX Международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб.: ИО РАН, 2017. С. 106–110.

15. Зимин, А. В. Структура и изменчивость основных фронтальных зон в Белом море в теплый сезон / А. В. Зимин, Д. А. Романенков, **О. А. Атаджанова** // Труды Всероссийской конференции к 70-летию со дня рождения заслуженного де-

ятеля науки, доктора физико-математических наук, профессора Л. Н. Карлина «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы». – СПб.: Аграф+, 2017. – С. 218–220.

16. Свергун, Е. И. Малые вихри, внутренние волны и фронтальные зоны в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным, полученным за безлёдный период 2007 и 2011 годов / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, А. А. Коник, **О. А. Атаджанова**, Е. В. Зубкова, И. Е. Козлов // Труды Всероссийской конференции к 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, доктора физико-математических наук, профессора Л. Н. Карлина «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы». – СПб.: Аграф+, 2017. – С.421–424.

17. **Атаджанова, О. А.** Малые вихри в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным и роль фронтальной динамики в их образовании / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, А. А. Коник, Д. А. Романенков // Труды V научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – СПб., 2017. – С.266–269.

18. Зимин, А. В. Субмезомасштабные процессы и явления в приливных арктических морях (Белом, Баренцевом и Карском) / А. В. Зимин, Д. А. Романенков, **О. А. Атаджанова**, Е. И. Свергун, А. А. Коник // Сборник трудов Международного симпозиума «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере» (МСП-2018), посвященного 90-летию проф. К.Н. Федорова. – М.: ИО РАН, 2018. – С. 147–150.

19. **Атаджанова, О.А.** Особенности поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей Баренцева, Карского и Белого морей по данным спутниковых наблюдений / О.А. Атаджанова, А.В. Зимин, А.А. Коник, Е.И. Свергун, Д.А. Романенков // Труды Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы». – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2018. – С.58–62.

20. Зимин, А. В. Субмезомасштабные процессы и явления в приливных арктических морях / А. В. Зимин, А. А. Родионов, Д. А. Романенков, **О. А. Атад-**



**жанова**, Е. И. Свергун, А. А. Коник // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2018. – С.32–35.

Тезисы докладов на Всероссийских и международных конференциях

21. **Атаджанова, О. А.** Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика (малые вихри и короткопериодные волны) / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов, Б. Шапрон // Сборник тезисов докладов. XII всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 10–14 ноября 2014 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С.233. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4578](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4578), свободный.

22. **Atadzhanova, O. A.** Submesoscale structures of the White sea: small eddies and short-period internal waves / O. A. Atadzhanova, A. V. Zimin, D. A. Romanenkov, I. E. Kozlov, B. Chapron // Сборник материалов Международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях». – М.: МАКСПресс, 2015. – С. 26–29.

23. **Атаджанова, О. А.** Исследование влияния субмезомасштабных вихрей на распределение фитопланктона в поверхностном слое Белого моря по спутниковым данным / О. А. Атаджанова // Материалы Шестой международной Школы-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», ИКИ, Таруса, 2–6 марта 2015 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/tarusa2015.html](http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2015.html), свободный.

24. Зимин, А. В. Динамика гидрологических фронтов и короткопериодные явления в Белом море / А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова**, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов. XIII всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16–20 ноября 2015 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С. 263. – Режим доступа:

[http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5144](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5144), свободный

25. Зимин, А. В. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Баренцева моря по радиолокационным изображениям / А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова**, Д. А. Романенков, А. В. Артамонова, А. В. Березина, А. А. Коник, Е. К. Сантьева, К. А. Сафонова, Е. И. Свергун, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов. XIII всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16–20 ноября 2015 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С.261. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5178](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5178), свободный

26. Зимин, А. В. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Карского моря по радиолокационным изображениям / А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова**, Д. А. Романенков, А. В. Артамонова, А. В. Березина, А. А. Коник, Е. К. Сантьева, К. А. Сафонова, Е. И. Свергун, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов. XIII всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16–20 ноября 2015 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С. 262. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5179](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5179), свободный

27. **Атаджанова, О.А.** Исследование субмезомасштабных вихрей Белого, Баренцева и Карского морей по данным спутниковых наблюдений / О.А. Атаджанова, А.В. Зимин, Д.А. Романенков, И.Е. Козлов // Сборник материалов молодежной научной конференции «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования», г. Севастополь, 25–29 апреля 2016 г. [Электронный ресурс]. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2016. – С. 40–44. – Режим доступа: [http://mhi-ras.ru/news/news\\_201605201055.html](http://mhi-ras.ru/news/news_201605201055.html), свободный.

28. Зимин, А. В. Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Белом, Баренцевом и Карском морях / А. В. Зимин, **О. А. Атаджанова**, Д. А. Романенков // Сборник тезисов докладов. XIV всероссийской открытой еже-

годной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 14–18 ноября 2016 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С. 242. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5720](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5720), свободный

29. **Атаджанова, О. А.** Поверхностные проявления фронтов и малых вихрей в Баренцевом и Карском морях в теплый период года / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, А. А. Коник, Е. И. Свергун, К. А. Мартын, И. Е. Козлов // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10–14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН, 2017. – С. 31–33. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30062755>, свободный.

30. **Атаджанова, О. А.** Межгодовая и внутрисезонная изменчивость характеристик малых вихрей в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, А. А. Коник, Е. И. Свергун, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов. XV всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 13–17 ноября 2017 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С. 234. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6173](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6173), свободный.

31. Коник, А. А. Изменчивость характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Карского моря за 2007 и 2011 года / А. А. Коник, **О. А. Атаджанова**, А. В. Зимин // Сборник тезисов докладов. XV всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 13–17 ноября 2017 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С. 261. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6052](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6052), свободный.

32. Коник, А. А. Количественные оценки изменчивости основных фронтальных зон Баренцева моря в 2007 и 2011 годах по данным температуры поверх-

ности моря / А. А. Коник, **О. А. Атаджанова**, А. В. Зимин // Сборник тезисов докладов. XV всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 13–17 ноября 2017 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С.262. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6051](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6051), свободный.

33. Свергун, Е. И. Внутренние волны и фронтальные зоны в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным, полученным за безлёдный период 2007 года / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, А. А. Коник, **О. А. Атаджанова**, Е. В. Зубкова, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов. XV всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 13–17 ноября 2017 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С.290. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6054](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6054), свободный.

34. Свергун, Е. И. Малые вихри и фронтальные зоны в Баренцевом и Карском морях за безлёдный период 2007 и 2011 годов / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, А. А. Коник, **О. А. Атаджанова** // Сборник тезисов докладов. XV всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 13–17 ноября 2017 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С.291. – Режим доступа: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6053](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6053), свободный.

35. **Атаджанова, О. А.** Особенности субмезомасштабной вихревой динамики Баренцева, Карского и Белого морей по данным спутниковых наблюдений / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, А. А. Коник, Е. И. Свергун, Д. А. Романенков // Процессы в геосредах. – № 3(17). – 2018. – С. 191–192.

36. Коник, А. А. Фронтальные зоны Баренцева и Карского морей / А. А. Коник, **О. А. Атаджанова**, А. В. Зимин // Процессы в геосредах. – № 3(17). – 2018. – С. 239–240.

## Свидетельство о государственной регистрации базы данных

37. Зимин А. В., Козлов И. Е., Атаджанова О. А. Субмезомасштабные вихри данным спутниковых наблюдений в Белом море – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620713 от 20.05.2014.

### **Благодарности**

Автор выражает свою признательность научному руководителю Зимину Алексею Вадимовичу, д. г. н., за безграничное терпение и помощь на всех этапах выполнения диссертации, Романенкову Дмитрию Анатольевичу, к. г. н., за полезные советы и обсуждения в ходе работы. Автор благодарен за поддержку в работе Родионову А. А., д. т. н., Родионову М. А., к. ф. - м. н., Свергуну Е. И. и Конику А. А. Также автор выражает благодарность коллективу Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ за обеспечение спутниковыми радиолокационными изображениями, Козлову И. Е., к. ф. - м. н., и Морозову Е. А., к. ф. - м. н., за консультации при обработке спутниковых данных. Отдельная благодарность Копелевичу О.В., д. ф.-м. н., за советы при планировании и проведении подспутникового эксперимента.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка условных сокращений и списка литературы из 139 наименований. В ней содержится 135 страниц, 13 таблиц и 43 рисунка.

## ГЛАВА 1. ПРЕДМЕТ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Субмезомасштабные вихри как предмет исследования

#### 1.1.1. Субмезомасштабные вихри и классификация масштабов неоднородностей гидрофизических полей

Все процессы и явления в океане подразделяются в зависимости от пространственного и временного масштабов вызываемых ими неоднородностей гидрофизических полей. При этом в спектре пространственно-временных масштабов выделяются характерные максимумы, соответствующие определенным явлениям. Рассмотрим принятую в России классификацию неоднородностей гидрофизических полей [Каменкович и др., 1987]:

– мелкомасштабные неоднородности гидрофизических полей. Пространственный масштаб от долей миллиметра до десятков и сотен метров, временной масштаб от долей секунд до десятков минут (иногда нескольких часов). Процессы, вызывающие неоднородности данного масштаба, обуславливаются мелкомасштабной турбулентностью, конвекцией и двойной диффузией. Данные неоднородности присущи квазиизотропной мелкомасштабной турбулентности, вертикальной слоистой микроструктуре, акустическим волнам, капиллярным и гравитационным поверхностным волнам, внутренним гравитационным волнам;

– мезомасштабные неоднородности. Пространственный масштаб от сотен метров до десятков километров, временной масштаб от нескольких часов до нескольких суток. Основные формирующие факторы – стратификация и вращение Земли, также у поверхности – солнечная энергия и воздействие ветра, у дна – обтекание топографических неровностей. Такие неоднородности присущи внутренним волнам, инерционным колебаниям (имеющим горизонтальный масштаб когерентности порядка километров и иногда даже первых десятков километров), приливным колебаниям на мелководьях (тогда как в глубоком океане приливам свойственны масштабы океана в целом);

– синоптические неоднородности. Пространственный масштаб от десятков километров до первых сотен километров, временной масштаб от нескольких суток до нескольких месяцев. Основные формирующие факторы - внутренняя бароклинная неустойчивость, топографические эффекты и атмосферное воздействие. Такие неоднородности присущи фронтам, фронтальным и свободным океанским вихрям или волнам Россби;

– глобальные неоднородности. Пространственный масштаб от тысячи километров до десятков тысяч километров (размеры океана), временной масштаб от лет до сотен лет. Главные структурообразующие факторы – вращение Земли и ее сферичность. Такие неоднородности присущи сезонным колебаниям, охватывающим океаны в целом, главным океанским течениям, проявлениям широтной зональности климата.

В некоторых классификациях мезо- и синоптический масштабы, описанные выше, по пространственным и временным масштабам объединяют в одну группу [Озмидов, 1956; Корчагин, Монин, 2004], в зарубежной литературе ее называют *mesoscale* [Stewart, 2008]. Кроме того, в иностранной литературе, а последние десятилетия и в отечественной, в *mesoscale* выделяют короткопериодную часть и называют ее *submesoscale*, т.е. субмезомасштаб, который имеет пространственный масштаб порядка единиц километров, а время жизни от нескольких часов до суток [Thomas et al., 2008]. В данной работе будут рассматриваться процессы с горизонтальным масштабом порядка единиц километров, которые так же будут называться субмезомасштабными.

Для динамических процессов субмезомасштаба характерны безразмерные числа Россби и Ричардсона порядка единицы. А также такие процессы не могут быть описаны соответствующим традиционным приложением квазигеострофической теории, которая применяется к мезомасштабным процессам. При этом они не относятся в полной мере к негидростатическим, мелкомасштабным процессам, но имеют неизбежно решающее значение для передачи энергии от мезомасштабных процессов к процессам меньших масштабов [Thomas et al., 2008]. При этом результаты некоторых экспериментальных исследований показывают, что эти про-

цессы играют важную роль в интенсификации перемешивания, горизонтальном и вертикальном переносе тепла в Арктике [Zhao et al., 2014; Hattermann et al., 2016; Manucharyan, Thompson, 2017; Mensa et al., 2018].

Верхней пространственной границей субмезомасштаба является внутренний бароклинный радиус деформации Россби  $R$ . Величина бароклиного радиуса Россби зависит от широты, стратификации плотности и глубины, изменяется от нескольких сотен километров в низких широтах до нескольких километров в высоких широтах [Chelton et al., 1998]. В частности, среднегодовое климатическое значение радиуса Россби в целом по Арктике может изменяться от нескольких сотен метров до 16 км [Nurser, Bacon, 2014]. Бароклинный радиус Россби рассчитывается как (Nurser, Bacon, 2014; Белоненко, Кубряков, 2014):

$$R = \frac{\bar{N}H}{f\pi}, \quad (1.1)$$

где  $\bar{N}$  – средняя частота Вэйсяля-Брента в слое,

$H$  – толщина водного слоя,

$f$  – параметр Кориолиса.

Из выражения (1.1) видно, что в зависимости от распределения стратификации оценки радиуса Россби могут варьироваться от года к году и от места к месту.

К субмезомасштабным структурам относят малые вихри, которые имеют характерные диаметры от сотен метров до десятка километров. Вихри данного масштаба в настоящее время активно исследуются во всех районах океана [Mahadevan, Tandon, 2006; Thomas et al., 2008; Thomas, Ferrari, 2008; Capet et al., 2008a, b; Klein, Lapeyre, 2009; Зацепин, 2011; Zhong, Bracco, 2013; Дубина и др., 2013; Karimova, Gade, 2014, 2016; Mensa et al., 2018].

Они обладают значительными вертикальными скоростями порядка  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  м/с, влияют на локальную изменчивость гидрофизических полей [Thomas et al., 2008; Зацепин и др., 2013] и не зависимо от типа вращения структуры могут приводить как к подъему вод по вертикали, так и к опусканию [Зацепин и др., 2013].



Вихревые структуры, регистрируемые в морях и океанах, можно разделить по типам в зависимости от причин генерации [Гинзбург, 1992]. Наиболее часто встречаемый тип вихрей – это фронтальные вихри, возникающие при различных видах неустойчивости фронтальных течений на самых различных масштабах [Федоров, 1983; Каменкович и др., 1987]. При этом о возможном влиянии бароклинной неустойчивости можно судить по выполнению необходимого условия для бароклинной неустойчивости (1.2) [Каменкович и др., 1987]:

$$\left( R/L \right)^2 \ll 1, \quad (1.2)$$

где  $R$  – масштаб бароклинного радиуса Россби,

$L$  – масштаб возмущений.

Квадрат соотношения масштаба бароклинного радиуса Россби  $R$  к масштабу возмущений  $L$  (вихревой структуры) должен быть меньше или порядка единицы. Из этого следует, что для вихревых структур с пространственным масштабом (диаметром) порядка или более масштаба бароклинного радиуса Россби одной из причин образования может быть бароклинная неустойчивость, которая обычно отмечается в районах фронтальных зон.

Топографические вихри [Гинзбург, Федоров, 1984] генерируются при неустойчивости течений при натекании на возмущения донной топографии (подводные горы, впадины и т.д.). Фрикционные вихри, которые часто проявляются в виде цепочек сдвиговых вихрей, возникают при наличии сдвига скоростей в струйных течениях. Вихри за островами образуются при неустойчивости сдвиговых слоев, развивающихся по обе стороны от острова при обтекании него потоком. Также вихри могут возникать под воздействием крупномасштабных атмосферных возмущений, например, тропические циклоны, приводящие к мощным возмущениям структуры и динамики вод. Вихри в грибовидных течениях возникают при кратковременном приложении импульса к приповерхностному слою за счет локальных источников кинетической энергии различной природы (воздействие на поверхность океана воздушных струйных потоков, разностью уровня

моря или атмосферного давления, стоком рек и т.д.) и представляют из себя пару вихрей с разными знаками завихренности на конце узкой струи [Гинзбург, 1992].

Стоит подчеркнуть, что главными сложностями при изучении субмезомасштабных вихревых структур являются непродолжительное время жизни, малый масштаб и неперIODичность возникновения.

### 1.1.2. Методы исследования субмезомасштабных вихрей

In-situ измерения. Основными характеристиками, описывающими вихревую структуру, являются: горизонтальные и вертикальные скорости; направление вращения вихря; время жизни; пространственный масштаб.

В качестве вихря или вихревого движения понимается движение жидкости, при котором их малые элементы (частицы) перемещаются не только поступательно, но и вращаются около некоторой мгновенной оси [Физический..., 1983], что находит свое отражение в полях гидрофизических характеристик: в температуре; солености; концентрации хлорофилла; скорости и направлениях течений и т. д. Значения этих характеристик могут быть получены с использованием различных гидрологических приборов, зондирующих водную толщу, например, STD-зондов, оснащенных различными датчиками, акустических доплеровских профилографов течений и т. д. Методика их применения для изучения вихревых структур может быть различна: длительные измерения в точке; работы на гидрологических разрезах; выполнение полигонных съемок; постановка буйковых станций; использование дрейфтеров [Зацепин и др, 2010a; Зимин и др., 2016; Mensa et al., 2018].

В полях скалярных характеристик (например, температуры, солености и концентрации хлорофилла) при полигонных съемках вихрь проявляется в виде нескольких горизонтально замкнутых изолиний, прослеживаемых на всех горизонтах существования вихря, при этом значения характеристики воды в центре вихря ниже или выше значений характеристик окружающих вод. На гидрологических разрезах и при длительных измерениях в точке вихрь проявляется в виде куполообразных подъема или опускания изолиний. Такие измерения позволяют оценить горизонтальный и вертикальный масштабы вихря, определить, что имен-

но (подъем или опускание вод) происходит в центре структуры. В поле векторных величин, например, в скорости, вихрь может проявляться в виде направленных по кругу (спирали) течений (Рисунок 1.1, а) [Зацепин и др., 2011; Зацепин и др., 2013].

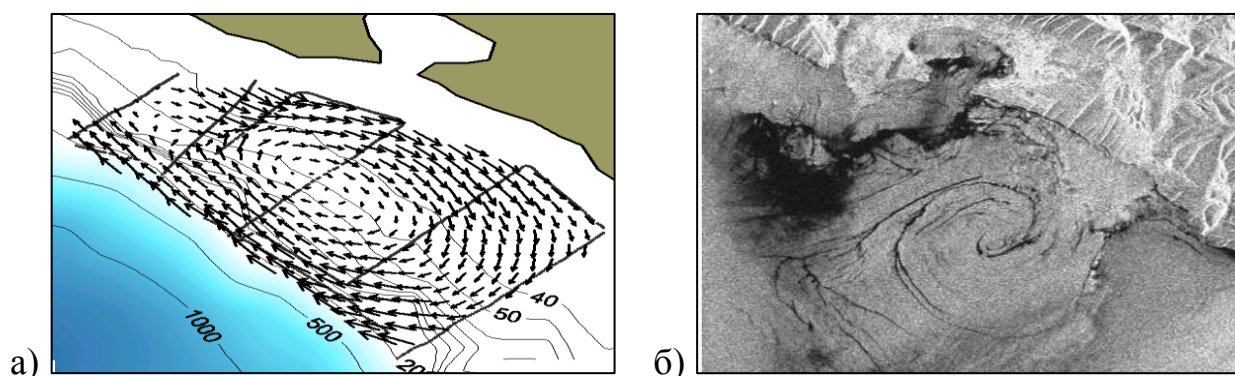


Рисунок 1.1 – Проявления субмезомасштабных вихрей в спутниковых и *in-situ* данных вблизи Геленджикской бухты. а – поле скоростей течений за 29.09.2008 [Зацепин и др., 2011, с.602], б – фрагмент РЛИ за 16.10.1998 [Лаврова, 2005, с.119]

Чтобы оценить время жизни (существования) вихревой структуры, необходимо производить повторные измерения с небольшим временным интервалом не более нескольких часов.

Основными недостатками изучения субмезомасштабных вихрей с помощью *in-situ* измерений являются следующие факторы: проблема обнаружения самой структуры; сложность охвата измерениями акватории, на которой регистрируется вихрь; малое время существования вихревой структуры. Кроме того, в Арктическом регионе тяжелые гидрометеорологические условия часто препятствуют проведению натурных измерений. Использование спутниковых данных позволяет решить проблему обнаружения вихрей по их проявлениям на поверхности на значительных по площади акваториях, однако это не дает представление об их вертикальных масштабах. Поэтому существует необходимость сочетания высокоразрешающих спутниковых данных и наблюдений *in-situ* для изучения всего комплекса характеристик субмезомасштабных структур [Зацепин и др, 2013; Зимин и др., 2015; Атаджанова, Зимин, 2016]. Пример проявления субмезомасштабных

вихрей в *in-situ* измерениях в поле скорости и в спутниковых данных представлен на Рисунке 1.1. Рассмотрим подробнее, как и в каких спутниковых данных проявляются вихри.

Спутниковые наблюдения. Данные спутниковых наблюдений в различных диапазонах в последние несколько десятилетий являются основным способом изучения субмезомасштабных вихрей в различных районах Мирового океана, как, например, на Рисунке 1.2 (Митягина, Лаврова, 2008,20,09; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2011; Karimova, 2012; Дубина и др., 2013; Гинзбург и др., 2015).

Оптический диапазон. Проявления вихревых структур в видимом диапазоне (Рисунок 1.2, а) 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). Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений» [Лаврова и др., 2011, с.80], благодаря которым вихри могут проявляться как спиралевидные структуры либо пятна вод разной контрастности.

В данных инфракрасного 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 1.2, б).

В качестве инструментов, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах, используются следующие сенсоры, установленные на спутниках. AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) – усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения, установленный на нескольких спутниках серии NOAA-KLM. Радиометр имеет пять спектральных каналов и выполняет измерения в диапазоне от видимого до инфракрасного, обладает пространственным разрешением 1,1 км. Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) установлен на борту спутников Terra и Aqua. MODIS имеет 36 спек-

тральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем,

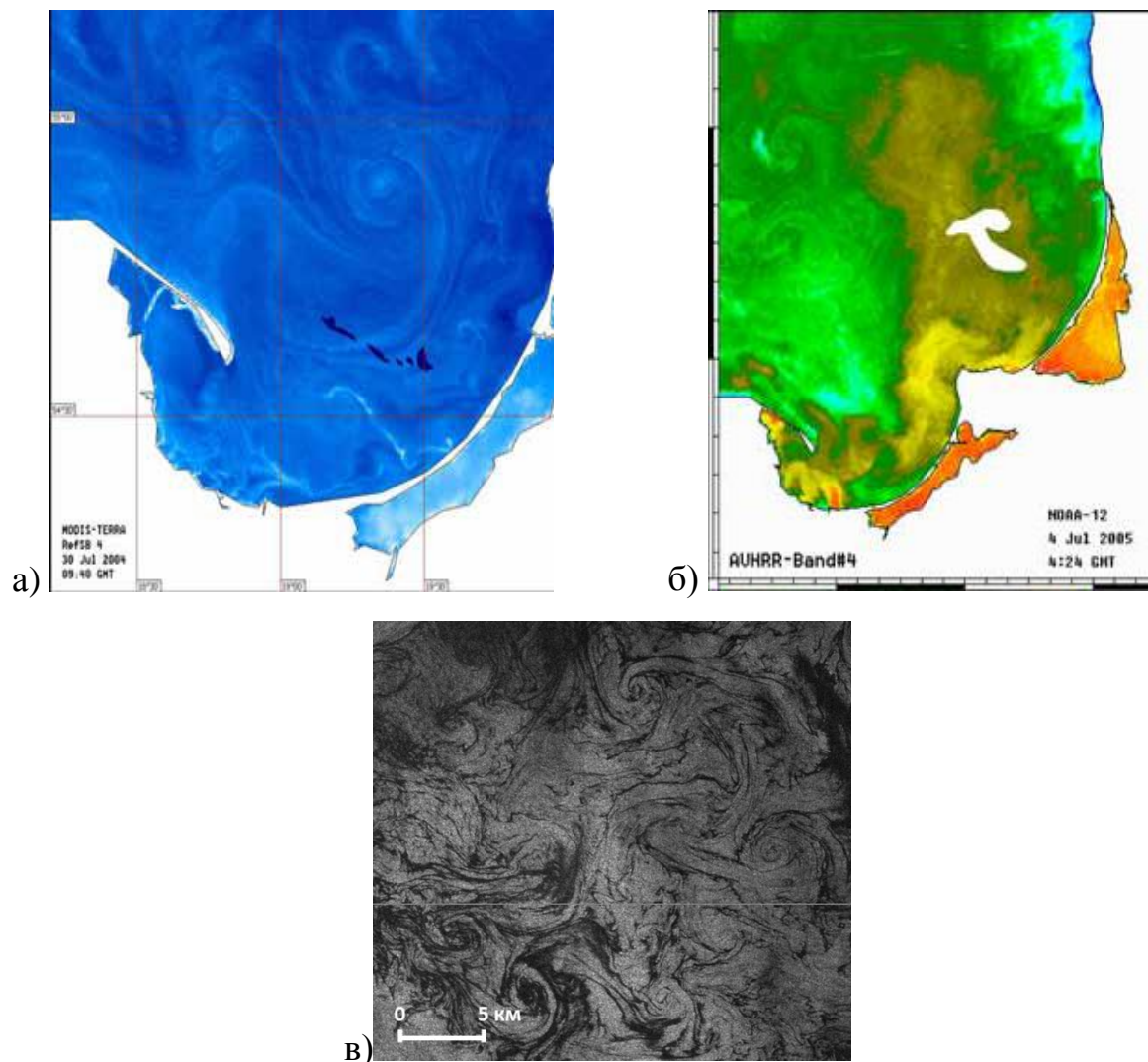


Рисунок 1.2 – Проявления субмезомасштабных вихрей в разных типах спутниковых данных, где а – фрагмент изображения в оптическом диапазоне и б – фрагмент ИК-изображения Балтийского моря [Лаврова и др., 2011, с.74, 189], в – фрагмент радиолокационного изображения Баренцева моря

среднем и тепловом инфракрасном диапазонах. Он обладает широкой полосой съемки (2 330 км) и разрешением около 1000 м [Лаврова и др., 2011]. Из серии Landsat в настоящее время работают спутники Landsat-7 и 8, имеющие Multispectral Scanner, который сканирует Землю вертикально, строго в надир. Съемка проводится в четырех спектральных зонах. Ширина полосы съемки 185 км, разрешение составляет 80 м для оптического и 240 м для тепловых диапазонов

[<http://www.geol.vsu.ru>]. Спутник Sentinel-2 так же имеет датчики, работающие в оптическом диапазоне, которые снимают полосу с наземной шириной 290 километров с разрешением от 10 метров до 60 метров в зависимости от спектрального канала [<https://sentinel.esa.int>].

Стоит отметить, что вихри диаметром от сотен метров до нескольких километров «редко проявляются на спутниковых инфракрасных и оптических изображениях, получаемых при помощи сенсоров Modis Aqua/Terra и AVHRR NOAA, вследствие слабых тепловых или оптических контрастов, недостаточного пространственного разрешения сенсоров. Они могут достаточно четко обнаруживаться только на снимках с высоким пространственным разрешением (метры – десятки метров)» [Лаврова и др., 2011, с.332]. Однако использование только оптических данных с высоким разрешением для исследования субмезомасштабных вихрей в арктических морях, где часто отмечается наличие сильной облачности, представляется малоэффективным.

Радиолокация. Сигнал, принимаемый радиолокаторами, создается за счет обратного рассеяния радиоволн на гравитационно-капиллярных волнах преимущественно из-за резонансного брэгговского механизма. Вихревые структуры на радиолокационных изображениях проявляются в виде структур, образованных тонкими закрученными в спирали или дуги темными или, наоборот, яркими светлыми полосами на морской поверхности, при этом визуализация вихревых структур на РЛИ возможна благодаря различным механизмам проявления, например – ледового, пленочного, сдвигово-волнового [Каримова, 2010; Каримова и др., 2011]. Пленочный механизм заключается в «прорисовки» вихревых структур в результате подавления капиллярно-гравитационных волн поверхностными пленками естественного происхождения, при этом в результате конвергенции образуются на поверхности воды нитевидные слики, закручивающиеся в спирали. Сдвигово-волновой механизм работает при ветрах до 12 м/с и обуславливается взаимодействием капиллярно-гравитационных волн и сдвиговых течений. Ледовый механизм действует при наличии трассеров в виде льда в воде.

В отличие от съемки в оптическом диапазоне, которые также позволяют получить информацию о мгновенном состоянии океана, у радиолокационной съемки есть ряд преимуществ:

- независимость от времени суток из-за использования активного зондирования;
- всепогодная съёмка ввиду практически полной прозрачности атмосферы для микроволнового излучения;
- однородность диэлектрических свойств воды в микроволновом диапазоне, в следствие чего вариации рассеянного сигнала связаны преимущественно только с геометрическими параметрами возмущений;
- изображения с высоким пространственным разрешением в широкой полосе обзора.

Однако для радиолокации существует ряд ограничений: скорости ветра должны быть слабыми или умеренными, а угол зондирования от  $20^\circ$  до  $60^\circ$  [Каримова, 2010; Лаврова и др., 2011].

Последние десятилетия радиолокационное (РЛ) зондирование в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне является одним из основных методов дистанционного исследования в целом субмезомасштабных структур в Мировом океане, в особенности в Арктическом регионе [DiGiacomo, Holt, 2001; Митягина, Лаврова, 2008; Лаврова и др., 2011; Karimova, 2012; Зимин и др., 2014; Kozlov et al., 2014, 2015; Зубкова и др., 2016; Zimin et al, 2016; Karimova, Gade, 2016].

В качестве инструментов используются Envisat ASAR, Radarsat SAR-1,2, Sentinel-1 SAR.

Envisat ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) наблюдал Землю в микроволновом спектре от 4 до 8 ГГц. Разрешение снимков от 30 до 150 м с шириной полосы обзора от 56 до 400 км в зависимости от режима съемки. Данные поступали с 2002 по 2012 гг. [Лаврова и др., 2016].

Radarsat SAR (Synthetic Aperture Radar)-1,2 – радиолокаторы с синтезированной апертурой в С-диапазоне длин волн (5,6см) с шириной полосы обзора от 25 км до 500 км и разрешением от 8 м до 100 м. SAR Radarsat – 1 обеспечивал

данными с 1995 по 2013 гг., а SAR Radarsat-2 с 2007 по настоящее время [Лаврова и др., 2011].

Sentinel-1 SAR - радиолокатор с синтезированной апертурой в С-диапазоне. Разрешение составляет от 5 м до 40 м с шириной полосы обзора до 250 км. Информация по радиолокатору и данные с 2014 года по настоящее время доступны на сайте Sentinel Online.

## 1.2. Характеристика объектов исследования: Баренцева, Карского и Белого морей

Баренцево, Белое и Карское моря относятся к Арктическому бассейну [Добровольский, Залогин, 1982] (Рисунок 1.3). Для всех трех морей характерны малые оценки бароклинного радиуса Россби, приливы, в теплый период прижатый к поверхности пикноклин, взаимодействие вод разного происхождения, сложный рельеф дна и наличие сезонного ледового покрова, что играет важную роль в гидрологическом режиме этих морей.

Физико-географическое описание. Баренцево море – одно из самых больших по размерам морей России площадью 1 424 тыс. км<sup>2</sup> (Рисунок 1.3, а). В Баренцевом море средняя глубина составляет 220 метров, при этом большая часть моря имеет глубины 300–400 м. Южная часть имеет глубины менее 200 м и отличается выравненным характером. Наиболее глубокие места расположены в западной части моря. Здесь же находится и максимальная глубина [Гидрометеорология..., 1990].

На востоке Баренцево море граничит с Карским морем, которое имеет площадь 885.2 тыс. км<sup>2</sup> и ограничено евразийским побережьем и островами: Новая Земля; Земля Франца Иосифа; Северная Земля. Южная и восточная части моря, прилегающие к материку, являются мелководными и от более глубоководной и неровной северной части моря отделяются узкой полосой глубин 100-200 м. Средняя глубина моря составляет 111 метров, максимальная – 600 м [Добровольский, Залогин, 1982].



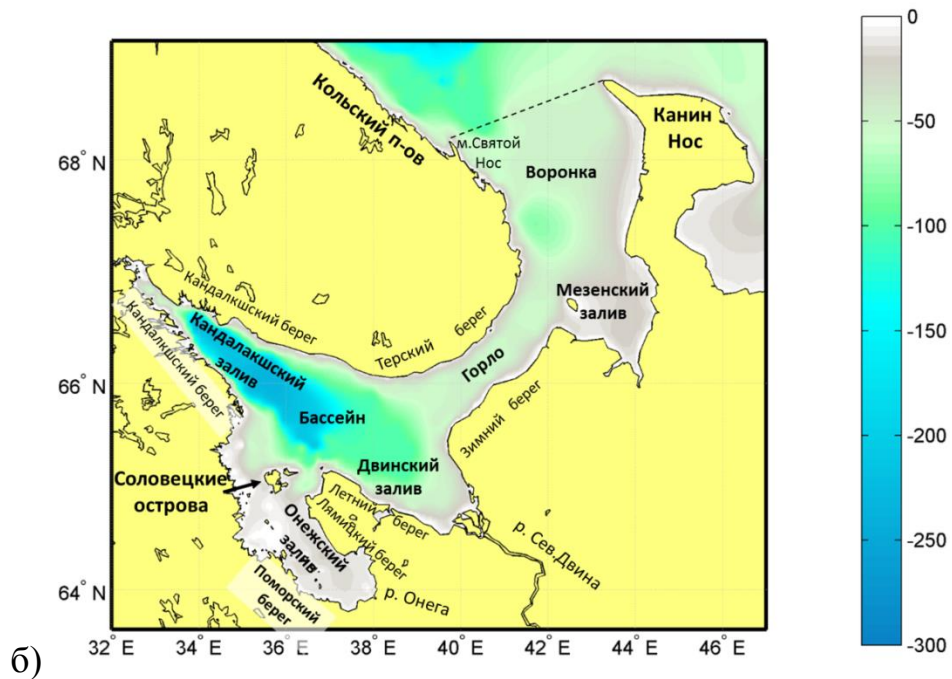
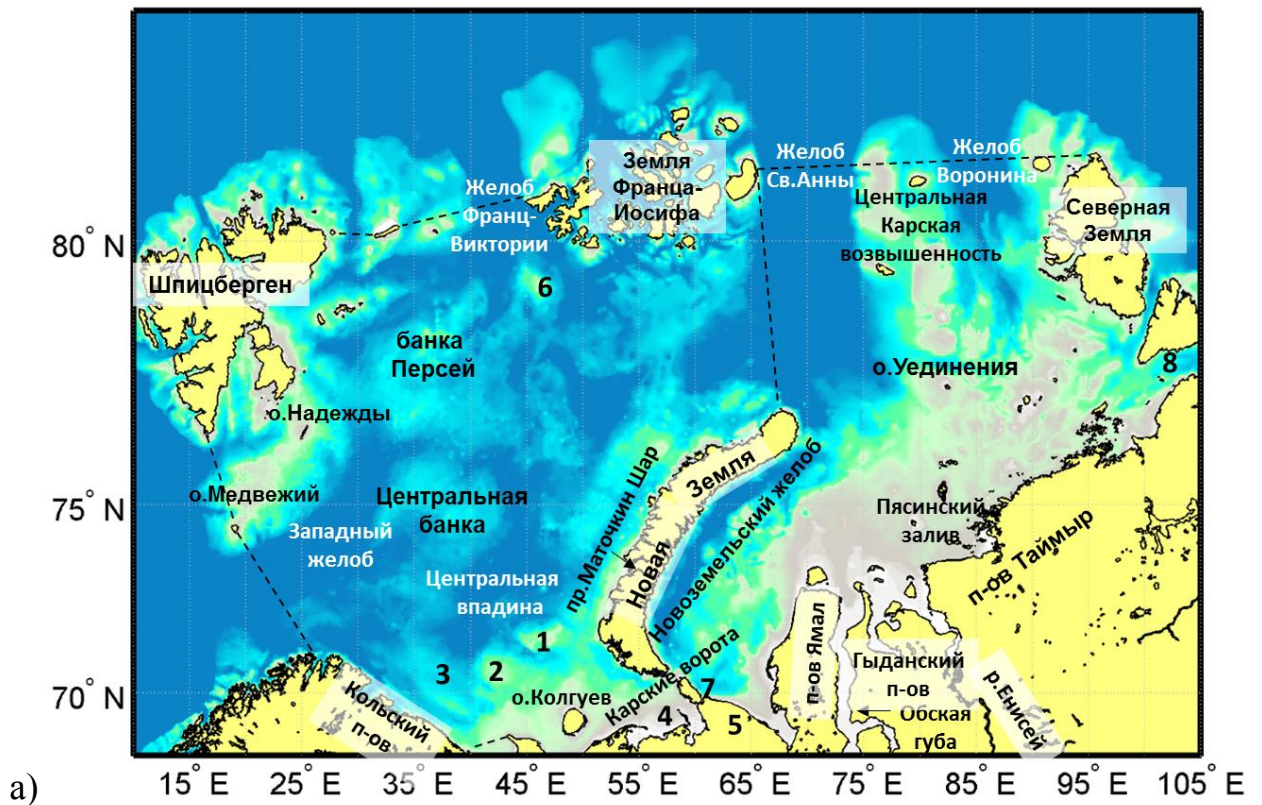


Рисунок 1.3 – Карты батиметрии Баренцева, Карского (а) и Белого (б) морей, шкала в м. Цифрами обозначены: 1 – Гусиная банка; 2 – Северная Каннинская банка; 3 – Мурманское поднятие; 4 – Печорское море; 5 – Югорский п-ов; 6 – банка юго-восточнее Земли Франца-Иосифа; 7 – пролив Югорский Шар; 8 – пролив Вилькицкого

На юге Баренцево море граничит с Белым морем по линии между мысами Канин Нос и Святой Нос (Рисунок 1.3, б). Белое море является одним из самых маленьких по размерам морей России (площадь равна всего 90 тыс. км<sup>2</sup>). Ввиду сильной расчлененности моря, его разделяют на отдельные районы, при этом средняя глубина равняется 67 м, а максимальная 350 м. Наиболее глубокими районами являются Бассейн и Кандалакшский залив [Гидрометеорология..., 1991].

Течения. В Баренцевом море выделяются системы теплых и холодных течений (Рисунок 1.4, а). Система теплых течений представлена ветвями теплого Нордкапского течения, скорость которого при входе в Баренцево море составляет около 25 см/с. Течения распространяются со скоростями до 10 см/с с юго-запада в центральную часть моря, а также вдоль берега к юго-восточной части моря, проникая в Печорское море и в Горло Белого моря со скоростями до 20 м/с, и в направлении к Новой Земле (скорости до 5 см/с). Через проливы южнее Новой Земли происходит взаимодействие течений с течениями Карского моря. Систему холодных течений выделяют в северной части моря, при этом течения направлены преимущественно на юг и юго-запад, а их скорость составляет до 50 см/с [Гидрометеорология..., 1990].

В Карском море (Рисунок 1.4, а) выделяется циклонический круговорот в юго-западной части и потоки в центральных и северных районах с преимущественным направлением на север и северо-восток. Их скорость обычно варьируется от 5 до 15 см/с, но при совпадении по направлению с ветровыми течениями возможно увеличение скорости до 70–90 см/с. Формирование течений в Карском море, в первую очередь, подвержено влиянию речного стока и водообмена с Баренцевым морем. При этом система течений может значительно изменяться из-за типов атмосферной циркуляции, что может привести к сокращению, либо расширению циклонического круговорота вод [Добровольский, Залогин, 1982].

В Белом море (Рисунок 1.4, б) в Горле смешиваются потоки «питающего» течения (из Баренцева моря), и «стокового» течения с более пресными водами – из Белого моря. Их названия соответственно течения Дерюгина и Тимонова [Филатов, Тержевик, 2007]. В вершинах заливов из-за речного стока возникают сто-

ковые течения, направленные в Бассейн. В Бассейне из-за движущихся в противоположных направлениях вод создаются слабые циклонические круговороты перед входом в заливы, между которыми возникает антициклоническое движение вод. Скорости постоянных течений составляют 10–15 см/с.

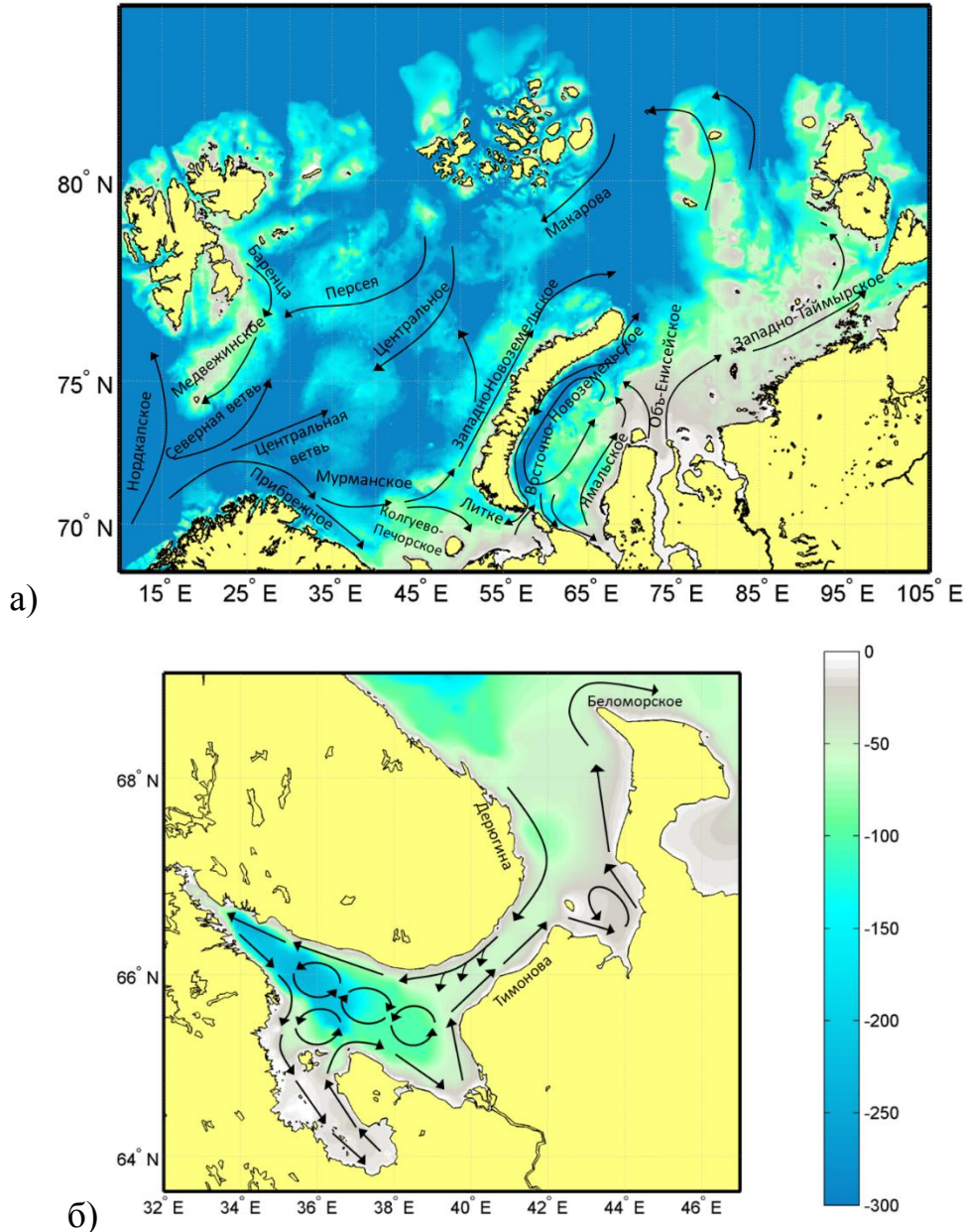


Рисунок 1.4 – Схемы поверхностных течений Баренцева, Карского (а), Белого (б) морей на картах глубин, шкала в м

Приливы. Баренцево, Карское и Белое моря являются приливными. В Баренцевом море приливы формируются атлантической приливной волной и волной из Северного Ледовитого океана, при этом они имеют преимущественно правильный полусуточный характер и охватывают всю толщу моря. Скорости приливных

течений преимущественно постепенно уменьшаются с глубиной, однако в слое сезонного термоклина скорости приливных течений наоборот увеличиваются. Как правило, они превышают скорости постоянных и могут достигать 154 см/с. Также приливы вызывают значительные изменения уровня. Высота подъема уровня при приливе у Мурманских берегов достигает 3 м, а на севере и северо-востоке высота приливов уменьшается. В период сизигий скорости приливных течений в 1,5–2,5 раза больше, чем в период квадратур, в зависимости от района моря [Гидрометеорология..., 1990].

Приливы в Карском море формируются за счет приливной волны из Баренцева моря и волны из Северного Ледовитого океана. Севернее о. Уединения они соединяются. При подходе к берегам волны отражаются от них, интерферируют и изменяют свою величину. В целом, в Карском море преобладают также правильные полусуточные приливы, но в отдельных районах наблюдаются суточные и смешанные приливы. Скорость приливных течений может достигать 150 см/с, что значительно превышает скорости постоянных течений. Приливные изменения уровня сравнительно невелики и обычно не превышают 1 м [Добровольский, Залогин, 1982].

В Белом море приливы формируются за счет приливной волны из Баренцева моря. Приливы имеют правильный полусуточный характер. Максимальные скорости могут достигать 250 см/с. Скорости приливных течений в сизигию в 2–3 раза больше, чем в квадратуру. Благодаря конфигурации берегов и характеру рельефа дна, наибольшая величина прилива составляет около 7,0 м [Гидрометеорология..., 1991].

Ветровые условия. Над Баренцевым морем в зимний период отмечается переменная синоптическая обстановка, характеризующаяся сильными ветрами, большими колебаниями температуры воздуха, выпадением осадков «зарядами». Преимущественное направление ветров – юго-западное силой 3–5 баллов, иногда вырастая до 7–8 баллов. В летний период над морем формируется устойчивый антициклон, погода становится устойчивой, прохладной и пасмурной со слабыми, преимущественно северо-восточными ветрами. Распределение среднемесячных

скоростей ветра на всей акватории для теплого сезона представлено на Рисунке 1.5, а. Видно, что за теплый период 2007 и 2011 гг. средняя по акватории скорость ветра варьировалась от 1 до почти 4,5 м/с [Добровольский, Залогин, 1982].

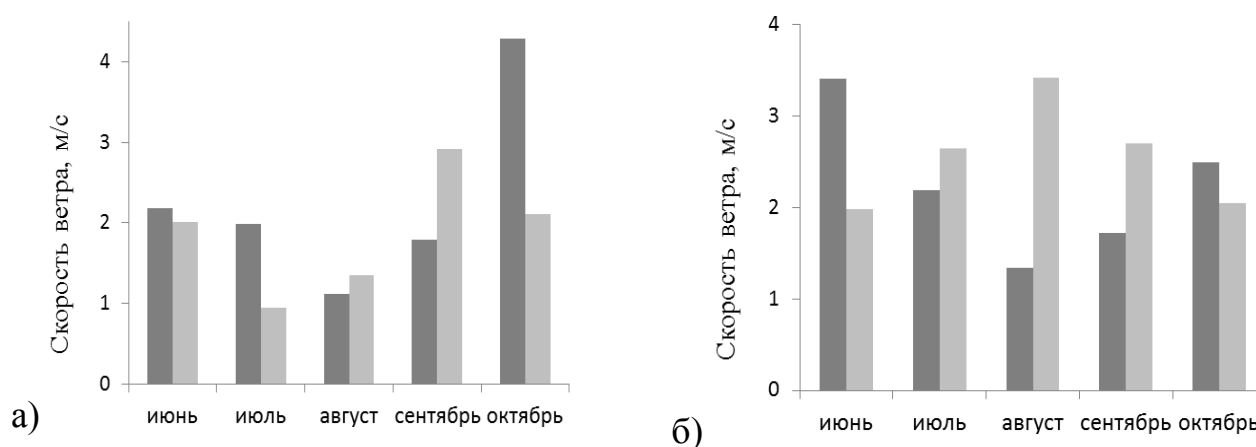


Рисунок 1.5 – Среднемесячная скорость ветра в течение безледного сезона в Баренцевом (а) и Карском (б) морях за 2007 (темно-серый цвет) и 2011 (светло-серый) гг. (по данным NOAA NCEP-NCAR CDAS-1)

Обычные для лета метеорологические условия нарушаются вторжением воздушных масс из Атлантического океана. При этом ветер меняет направление на юго-западное и усиливается до 6 баллов, наступают кратковременные прояснения. Такие вторжения свойственны главным образом западной и центральной части моря, в то время как на севере продолжает сохраняться относительно устойчивая погода. В переходные сезоны над морем преобладает неустойчивая пасмурная погода с сильными и переменными по направлению ветрами [Добровольский, Залогин, 1982].

В начале холодного сезона в Карском море в северной части моря преобладает северный ветер, а в южной части отмечается неустойчивость ветров по направлению, при этом в среднем скорость ветра в этот период около 6–7 м/с. Зима в Карском море характеризуется преобладанием в большей части моря южных, юго-западных и юго-восточных ветров. Лишь на северо-востоке часто наблюдаются ветры северных румбов. Скорость ветра составляет около 7–8 м/с, но при этом нередко она достигает штормовой силы. В теплое время года дуют ветры, неустойчивые по направлению, скорость которых обычно не превышает 5–6 м/с.

В летний период отмечается формирование местной области повышенного давления, что приводит к преобладанию ветров северных румбов со скоростями 4–5 м/с [Добровольский, Залогин, 1982]. Распределение средних для всей акватории скоростей по месяцам для теплого сезона представлено на Рисунке 1.5, б. Стоит отметить, что среднемесячные скорости варьировались в течение сезона от почти 1,5 до 3,5 м/с.

В Белом море зимой отмечаются ветра с преобладающим юго-западным направлением и скоростью 4–8 м/с, а погода холодная и пасмурная со снегопадом. Смещение в район Белого моря антициклона из Арктики вызывает северо-восточные ветры. В летний период обычно преобладают северо-восточные ветры силой 2–3 балла, а небо характеризуется сплошной облачностью. Когда над северо-восточной Европой устанавливается антициклон, над морем преобладают юго-восточные ветры и ясная солнечная погода. [Добровольский, Залогин, 1982].

Среднемесячные оценки верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) внутри сезона. Во всех трех морях в течение летнего периода происходит формирование сезонного приповерхностного термоклина (пикноклина), которое начинается с перехода теплового баланса поверхности моря к положительным значениям и продолжается до тех пор, когда глубина слоя скачка достигнет таких значений, при которых перемешивание в поверхностном слое уже не может заметно повлиять на условия в слое термоклина [Гидрометеорология..., 1991]. По климатическим данным толщина ВКС и глубина верхней границы сезонного термоклина/пикноклина в зависимости от района может варьироваться от нескольких метров в начале теплого сезона до 50–60 м в конце.

В Таблице 1.1. приведены средние оценки толщины ВКС внутри теплого сезона по данным EССO2 Cube92 model output для Баренцева и Карского морей (среднее за 2007 и 2011 гг.), для Белого моря (2010 г.) для районов, которые в течение теплого сезона свободны ото льда. Приведенные года относятся к аномально теплым годам, в связи с этим толщина ВКС отлична от климатических данных.

Таблица 1.1 – Толщина ВКС в метрах

| Месяц    | Баренцево море<br>(центральная часть) | Карское море<br>(юго-западная часть) | Белое море<br>(центральная часть) |
|----------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Июнь     | 18                                    | 8                                    | 8                                 |
| Июль     | 17                                    | 8                                    | 8                                 |
| Август   | 22                                    | 12                                   | 12                                |
| Сентябрь | 30                                    | 16                                   | 17                                |
| Октябрь  | 45                                    | 22                                   | 24                                |

Наименьшая толщина верхнего слоя во всех трех морях отмечается в начале теплого сезона – июнь, июль. Для Баренцева моря толщина составила менее 20 метров, а для Карского и Белого морей менее 10 м. При столь незначительной толщине вероятнее всего процессы, протекающие у поверхности, будут охватывать весь верхний слой. К концу сезона толщина достигала величины минимум в два раза больше, чем в начале сезона.

Оценки внутреннего бароклинного радиуса Россби. Важной для изучения вихрей характеристикой, зависящей от параметров ВКС и стратификации вод, является внутренний бароклинный радиус Россби. В [Nurser, Bacon, 2014] приводятся среднегодовые оценки радиуса Россби для арктических морей, а также для летнего и зимнего сезонов, при этом радиус для Баренцева, Карского и Белого морей варьируется от 3,3 до 4,6 км.

По данным базы данных ЕСИМО [Атаджанова и др., 2017] были рассчитаны средние климатические оценки бароклинного радиуса деформации Россби для августа, когда пикноклин наиболее ярко выражен. Средние оценки для трех морей составили от 3 до 5 км, что не противоречит [Nurser, Bacon, 2014]. При этом максимальные значения радиуса для Баренцева моря равнялись 9,5 км, для Карского 6 км, а для Белого моря 8 км [Атаджанова и др., 2017] (Таблица 1.2).

Приведенные оценки показывают, как изменчива величина радиуса Россби, и насколько условны ее оценки. Поэтому в качестве условной верхней границы субмезомасштаба для исследуемых морей в данной работе будет использоваться

величина 6 км, как минимальное значение радиуса Россби из максимальных для каждого из трех морей.

Таблица 1.2 – Климатические значения бароклинного радиуса Россби для августа

| Море      | Средний радиус, км | Максимальный радиус, км |
|-----------|--------------------|-------------------------|
| Белое     | 4,3                | 8                       |
| Баренцево | 4,9                | 9,5                     |
| Карское   | 3                  | 6                       |

Ледовый покров. В Баренцевом море отмечается сезонная изменчивость ледовитости [Гидрометеорология..., 1990]. Замерзание акватории моря начинается в проливе между Землей Франца-Иосифа (ЗФИ) и Северо-Восточной земли, а затем на участках Восточно-Шпицбергенского течения и между архипелагами ЗФИ и Новая Земля. Максимальный ледовый покров отмечается во вторую декаду апреля. Отступление кромки льда по направлениям к северу и востоку, а также его разрежение происходит с апреля по сентябрь преимущественно за счет таяния более тонких льдов. Процесс таяния и разрушения ледяного покрова начинается в мае-июне под действием солнечной радиации и адвективного притока тепла, минимум ледовитости приходится на конец августа – начало сентября. Аномально теплые годы характеризуются полным очищением акватории ото льда в августе и в сентябре, а в аномально холодные годы ледяной покров в эти же месяцы сохраняется преимущественно в северных районах на 40–50 % его площади.

Акватория Карского моря ежегодно полностью покрывается ледовым покровом, при этом лед образуется не только в самом море, но и поступает из Центрального Арктического бассейна [Добровольский, Залогин, 1982]. По многолетним данным в северной части моря лед наблюдается практически весь год, а в юго-западной части моря лед отмечается в течение 7–8 месяцев с ноября по июнь-июль. Льдообразование в Карском море обычно начинается в сентябре в северных районах и в октябре – ноябре на юге. Начало таяния ледяного покрова в море отмечается в среднем в конце мая в его юго-западной части. К концу июля половина

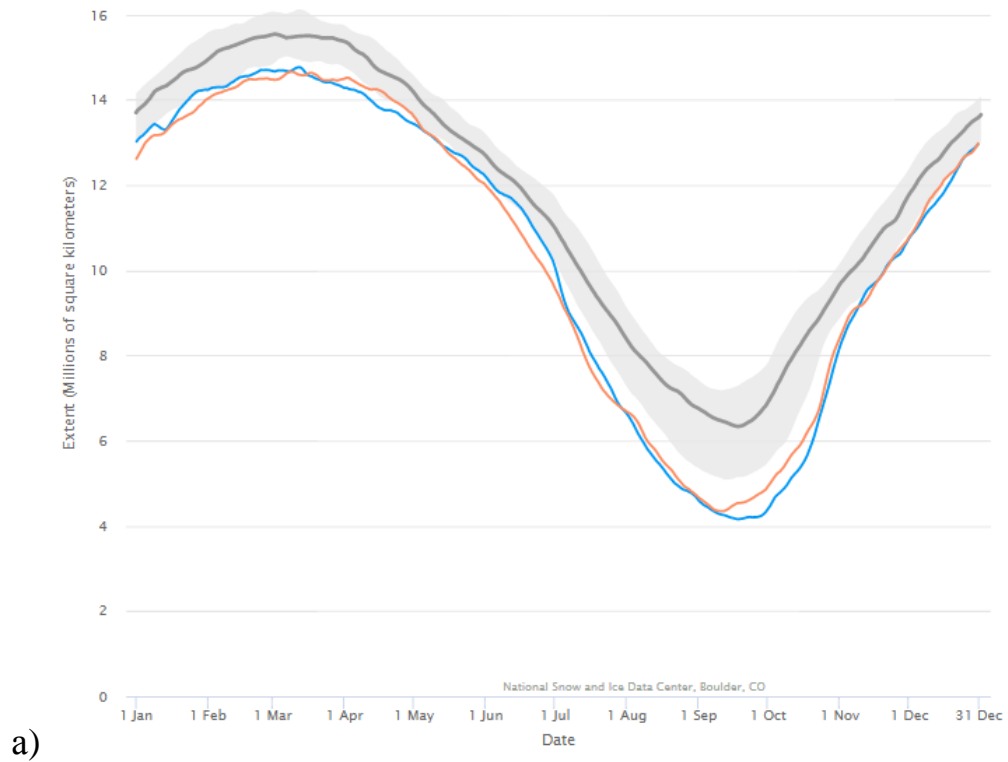


юго-западной части моря под влиянием тепловых и динамических процессов очищается ото льда. В конце августа – начале сентября в 80 % случаев этот район полностью освобождается ото льда. В прибрежных районах отмечается более интенсивное таяние льда, чем в мористых районах. В северо-восточной части моря таяние льда и очищение происходит медленнее, чем в юго-западной части моря. Очищение моря наиболее интенсивно происходит в июле и августе. В среднем к концу августа ото льда очищается около 60 % акватории моря. В сентябре процессы таяния замедляются.

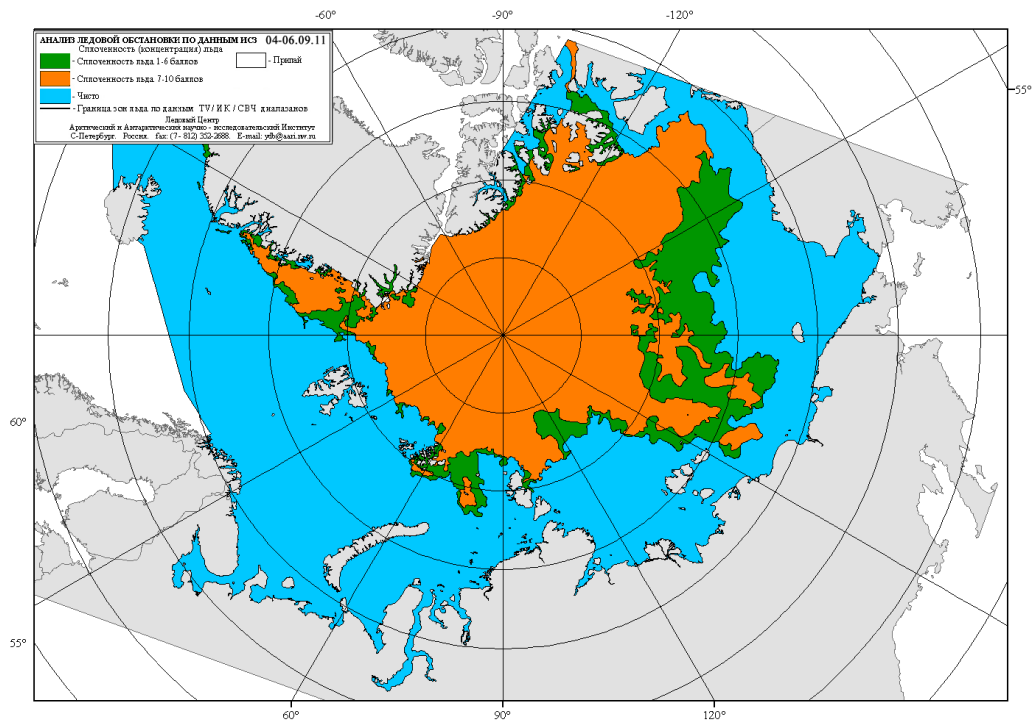
Белое море покрывается льдом каждую зиму и полностью освобождается ото льда весной, его ледяной покров также считается сезонным [Гидрометеорология..., 1991]. Зимой все море покрывается льдом, однако это не сплошной покров, а постоянно дрейфующий лед. Весьма существенная черта ледового режима Белого моря – постоянный вынос льда в Баренцево море. Ледообразование (примерно в конце октября) начинается с устья Мезени, а позднее всего (в январе) у Терского берега Воронки и Горла. Раньше всего (в конце марта) льды исчезают в Воронке. К концу мая обычно все море освобождается ото льдов, но иногда полное очищение моря происходит только в середине июня.

Особенности ледовитости в условиях современного климата. В настоящее время климат на планете меняется, что находит отражение в уменьшении площади ледяного покрова в Северном Ледовитом океане. В XXI веке площадь льда менее 4,3 млн. км<sup>2</sup> наблюдалась в 2007, 2011, 2012 и 2016 гг., при среднем минимуме за 1979–2010 в районе 6 млн. км<sup>2</sup>. В качестве примера на Рисунке 1.6, а приведено среднемесячное распределение площади льда в течение года для 2007 и 2011 гг.. В эти года площадь льда меньше по сравнению с тем, что отмечалось за период с 1981 по 2010 гг., особенно разница значительна в сентябре.

На примере карты распределения ледового покрова за 04–06.09.2011 (Рисунок 1.6, б) видно, что к началу месяца кромка льда располагается севернее архипелага Шпицберген и северо-восточнее архипелага Земля Франца-Иосифа, и Баренцево море даже частично не покрыто льдом, что значительно отличается от



a)



б)

Рисунок 1.6 – Распределение площади льда в Арктике. Внутригодовое распределение площади льда по месяцам, где показаны серой тонкой линией медиана за период с 1981 по 2010 г., толстой серой линией размах за этот период, синей линией площадь льда в 2007 году, оранжевой – в 2011 г. по данным National snow and ice data center (а). Обзорная ледовая карта Северного Ледовитого океана ААНИИ за 04-06.09.2011 (б)

среднего климатического положения [Гидрометеорология...,1990]. Для Карского моря ситуация также отличается от среднеклиматической [Добровольский, Залогин, 1982], так как оно практически полностью освобождено ото льда. В эти годы Белое море в теплый сезон полностью свободно льда.

За период с 2000 по 2014 гг. [Жичкин, 2015] состояние вод Баренцева моря характеризовалось высоким теплосодержанием, низкой ледовитостью, а также отмечалось преобладание отрицательных ледовых аномалий. К числу самых малоледовитых лет, относились сезоны 2005–2006, 2007–2008, 2011–2012 и 2012–2014 гг. В Карском море за в период 2005–2012 гг. [Жичкин, 2015] также имели место высокое теплосодержание вод и низкая ледовитость, при этом самым малоледовитым в этот период оказался сезон 2011–2012 гг.

Белое море лед наблюдался только в зимне-весенний период.

## Выводы к главе 1

В данной работе предметом исследования будут служить субмезомасштабные вихревые структуры с пространственным масштабом от сотен метров до десятка километров (порядка климатического бароклинного радиуса Россби) и временем жизни от часов до суток. Вихри данного масштаба являются слабоизученным звеном в передачи энергии по каскаду от мезомасштабных процессов к мелкомасштабным. Наилучшим средством их изучения в Арктическом регионе является использование высокоразрешающих радиолокационных изображений, на которых вихри при слабых и умеренных ветрах проявляются в виде закрученных в спирали или дуги светлых и темных полос.

Объектом исследования в данной работе являются Баренцево, Карское и Белое моря. Все три моря относятся к морям Северного Ледовитого океана, расположены преимущественно на шельфе, являются приливными, имеют сложный рельеф, обладают сезонным ледовым покровом, в теплый сезон характеризуются слабыми и умеренными ветрами, что важно является важным условием для исследований с использованием РЛИ.

## ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В БЕЛОМ МОРЕ

### 2.1. Проявления субмезомасштабных вихревых структур в разных типах данных

С помощью инфракрасного радиометра малые вихри (пространственный масштаб порядка единиц километров) в Белом море регистрировались на границе пролива Горло [Гидрометеорология., 1991]. По *in-situ* данным в работах [Зимин и др., 2015, Зимин, 2016, 2018] в отдельных районах Белого моря регистрировались вихревые структуры диаметрами от 1,6 до 2,9 км, чаще всего они отмечались севернее Соловецких островов над свалами глубин и банками. Было показано, что районы частой регистрацией вихрей характеризовались усилением в 1,5–2 раза вертикального и горизонтального турбулентного обмена, а где формирование вихревых структур над неровностями дна связано с приливной динамикой. Однако *in-situ* измерения не позволяют охватить все море, что и привело к необходимости использованию спутниковых данных.

Субмезомасштабные вихревые структуры, как было рассмотрено в первой главе, могут так же находить свое проявление и в данных разных спутниковых сенсоров. Для регистрации проявлений субмезомасштабных вихрей в Белом море в разнородных данных использовались спутниковые данные за 24.06.2010 по ТПМ и концентрации хлорофилла, а также радиолокационное изображение *Envisat ASAR* в режиме съемки *WSM (Wide Swath Mode)*. Для подспутникового эксперимента за 24.06.2015 использовались данные по температуре и концентрации хлорофилла, полученные с помощью спутниковых измерений и *in-situ* измерений с *CTD*-зонда *T-90* на основании полигонной съемки [Атаджанова, Зимин, 2016]. Спутниковые данные по ТПМ и концентрации хлорофилла (*Modis Aqua*) были получены с сайта *Ocean Color Web*, при этом поля концентрации хлорофилла были обработаны региональным алгоритмом для Белого моря [Kravchishina et al., 2011].

На Рисунке 2.1 представлено сопоставление квазисинхронных данных РЛИ и данных температуры поверхности моря за 24.06.2010 для Белого моря.

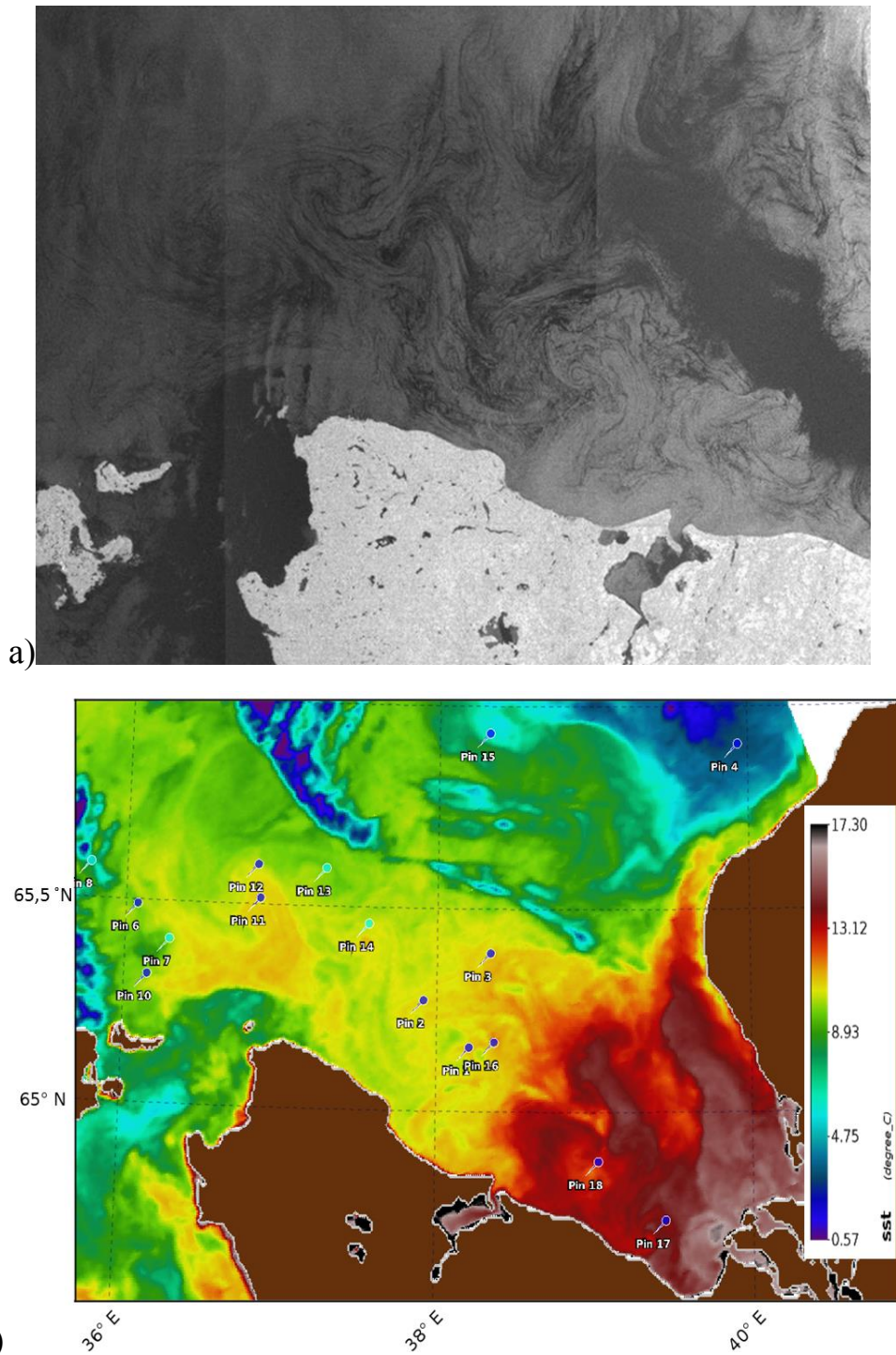


Рисунок 2.1 –Фрагменты спутниковых данных: радиолокационного изображения за 24.06.2010 8:11 UTC с проявлениями вихревых структур (а) и поля ТПМ за 24.06.2010 9:35 UTC (б), где синими булавками отмечены положения центров циклонов, а голубыми – антициклонов, зарегистрированных по РЛИ

Анализ РЛИ показал, что из 18 поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур 14 вихрей были циклоническими, а 4 антициклоническими. При этом в данных ТПМ нашли свое проявление только 12 вихрей. Из

них отмечались в виде холодных пятен 7 структур и в виде теплых пятен 5 вихрей, при этом не отмечалось четкой связи между холодным/теплым пятном и типом вращения (Таблица 2.1) [Атаджанова, Зимин, 2016]. Из чего следует, что независимо от типа вращения внутри вихря может отмечаться как подъем, так и опускание вод, что является следствием невыполнения геострофического баланса и подтверждает агеострофичный характер вихрей [Зацепин и др., 2013]. Хотя принято считать, что в мезомасштабных вихрях с циклоническим типом вращения должен наблюдаться апвеллинг, характеризующийся пониженной температурой и повышенной концентрацией хлорофилла в центре [Nenciolia et al, 2008]. При этом в данных концентрации хлорофилла ни один субмезомасштабный вихрь не имел своего проявления.

Таблица 2.1 – Распределение количества вихрей в штуках по характерным проявлениям

| Тип вращения      | Холодное пятно | Теплое пятно | Вне поля ТПМ | Не проявляется | Итого |
|-------------------|----------------|--------------|--------------|----------------|-------|
| Циклонический     | 6              | 3            | 3            | 2              | 14    |
| Антициклонический | 1              | 2            | 1            | –              | 4     |

Результаты сопоставления квазиодновременных спутниковых данных (Рисунок 2.1) привели к необходимости проведения подспутникового эксперимента на основе близких по времени спутниковых и контактных данных температуры и концентрации хлорофилла, цель которого заключалась в выявлении того, какие вихри находят свое отражение в спутниковых данных. Район работ в Онежском заливе был выбран в результате предварительного анализа РЛИ за теплый период 2009-2012 гг. [Зимин и др., 2016], где вихри часто отмечались в области Онежской фронтальной зоны. Судовые измерения проводились с 23.06.2015 22:37 Мск по 24.06. 04:22 Мск, спутниковые данные датировались 24.06.2015 12:20 Мск.

Сопоставление судовых и спутниковых данных за 24.06.2015, разница между которыми составила около 9 часов, показало, что вихрь, обнаруженный по in-

situ данным, характеризовался пятном холодных вод и пониженной концентрацией хлорофилла (Рисунок 2.2, 2.3) [Атаджанова, Зимин, 2016].

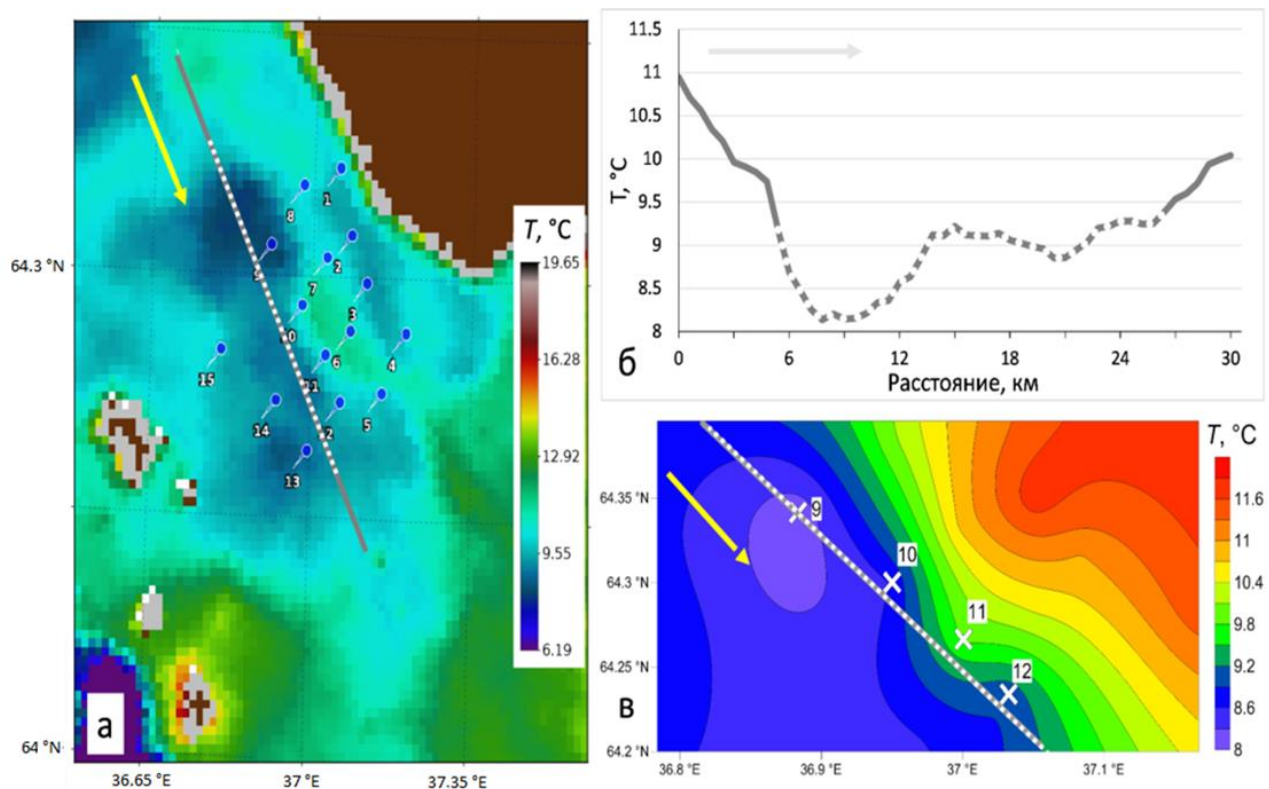


Рисунок 2.2 – Распределение температуры на поверхности (а) и на разрезе (б) по спутниковым данным, также на глубине 1 м по данным in-situ (в). Серый цвет – весь разрез, пунктир – часть разреза, проходящая по полигону in-situ измерений, стрелка – направление разреза, цифрами указаны номера станций, точками и крестиками обозначено положение станций

При этом вихрь на поверхности по данным концентрации хлорофилла практически не прослеживался и не нашел своего отражения в спутниковых данных концентрации хлорофилла (Рисунок 2.3). Одна из причин отсутствия проявлений вихрей на поверхности может быть связана с мутностью вод из-за стока реки Онега.

Поле температуры, наоборот, полностью отразило существование вихря в поверхностном слое, как по спутниковым, так и по натурным данным (Рисунок 2.2).

Данный вихрь прослеживался и в толще воды до 12 метров, где начинается пикноклин (Рисунок 2.4). На данной глубине и концентрация хлорофилла, и поле температуры показали четкое проявление вихревой структуры [Атаджанова, Зимин, 2016].

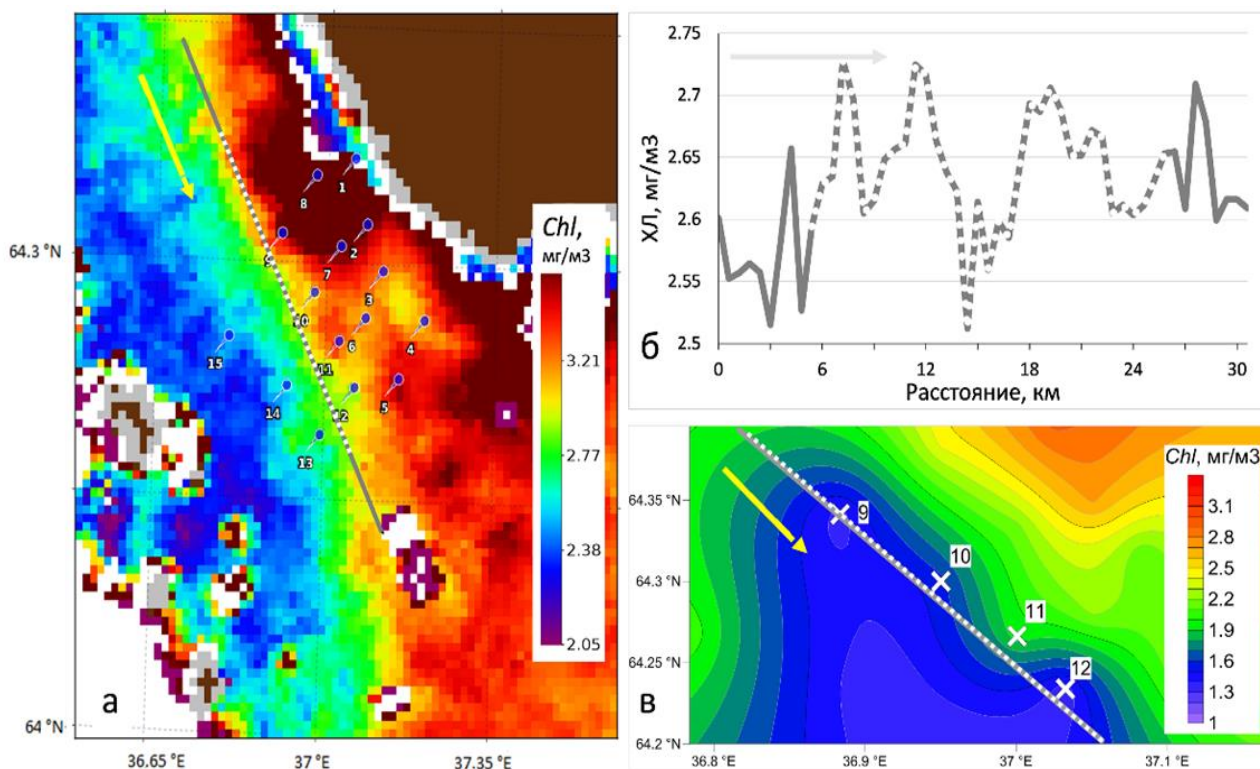


Рисунок 2.3 – Распределение концентрации хлорофилла на поверхности (а) и на разрезе (б) по спутниковым данным, также на глубине 1 м по данным in-situ (в). Серый цвет – весь разрез, пунктир – часть разреза, проходящая по полигону in-situ измерений, стрелка – направление разреза, цифрами указаны номера станций, точками и крестиками обозначено положение станций



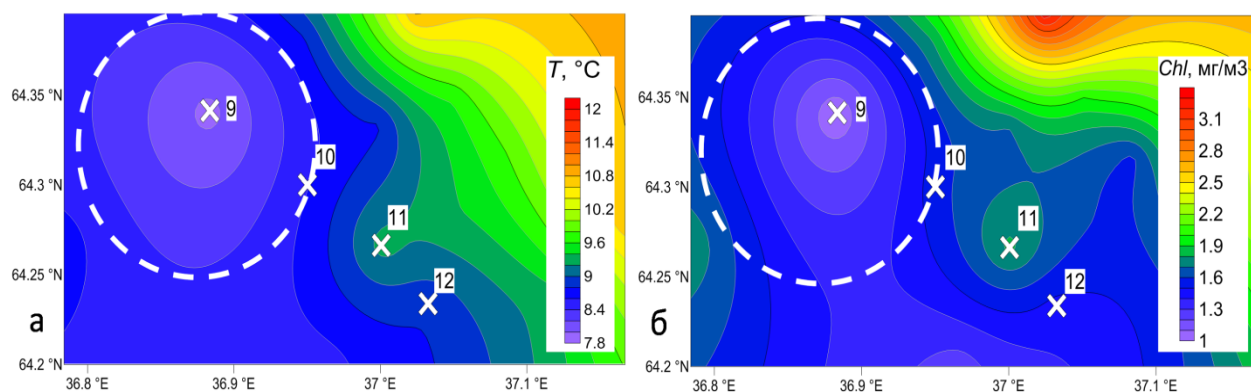


Рисунок 2.4 – Распределение температуры (а) и концентрации хлорофилла а (б) на глубине 12 метров. Крестиками указаны местоположения станций с 9 по 12 на полигоне. Пунктиром выделена область вихревой структуры

Низким значениям температуры в центре вихря соответствовали низкие значения концентрации хлорофилла, как на поверхности, так и во всей толще. Как следствие, в районах, где вихри часто встречаются, через 1–2 дня существование упаковки или цепочки вихрей, может приводить к резкой изменчивости термохалинной структуры и концентрации хлорофилла на локальной акватории.

## 2.2. Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур

Анализ поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур в Белом море проводился на основе 221 радиолокационного изображения за май - сентябрь 2009–2012 гг. (60 шт. – 2009 г., 111 шт. – 2010 г., 37 шт. – 2011 г., 13 шт. – 2012 г.), покрытие которыми представлено на Рисунке 2.5. За 2009-2011 использовались РЛИ, полученные с радиолокатора ENVISAT ASAR в С-диапазоне и режимах съемки WSM (ширина полосы обзора 400×400 км, пространственное разрешение 150×150 м) и IMP (100×100 км и 30×30 м соответственно), за 2012 год со спутников RADARSAT-1 с пространственным разрешением 25 м в режиме

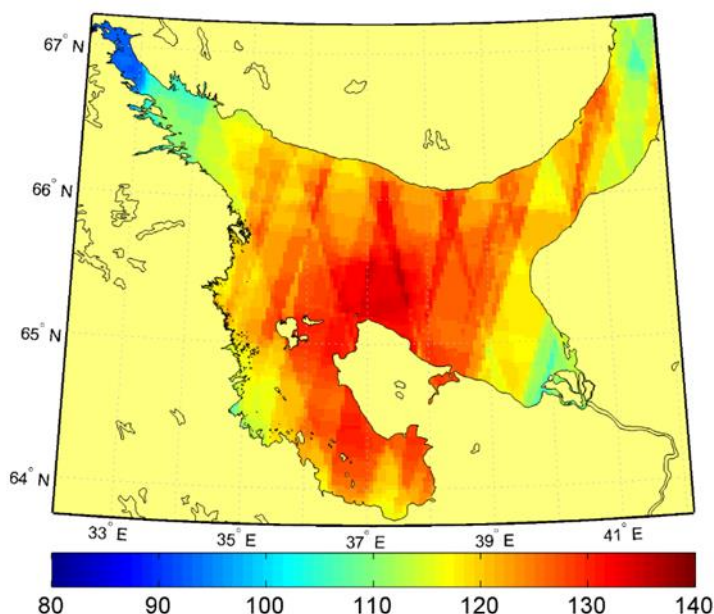


Рисунок 2.5 – Карта покрытия радиолокационными изображениями акватории Белого моря за теплый период (май – сентябрь) 2009–2012 гг., шкала в шт.

съемки SGF (Path Image) и RADARSAT-2 в режиме Fine Quad-Pol с пространственным разрешением 6 м. Данные были получены в Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ в рамках проекта МЕГАГРАНТ.

В среднем по морю покрытие составило 110 РЛИ. Наибольшая обеспеченность изображениями и преимущественно равномерное покрытие отмечалось 2010 году, в то время как в 2009 году изображения преимущественно покрывали Двинский залив, в 2011 году – Онежский залив и юго-западную часть Бассейна, а в 2012 – на границе Горла и Бассейна.

Методика исследования вихревых структур основывалась на методиках, разработанных для исследований в других морях [Митягина, Лаврова, 2009; Каримова, 2012], и заключалась в следующем:

1. На РЛИ визуально определялись структуры в виде полос, закрученных в спирали или дуги. Если их можно было вписать в эллипс, как показано на Рисунке 2.6, они принимались за проявление вихрей;
2. По характерной закрутке полос определялся тип вращения вихря. Спираль, закрученная против часовой стрелки, принималась за проявление вихря

с циклоническим типом вращения ( $Zn$ ), а закрученная по часовой стрелке - проявление вихря с антициклоническим типом вращения ( $Az$ );

3. По центру эллипса определялись координаты, принимаемые за положение вихря (на Рисунке 2.6, б буква  $O$  – центр вихря);

4. В эллипсе измерялись длины максимальной и минимальной оси ( $D_{max}$ ,  $D_{min}$ ), по которым считался средний диаметр вихря как среднее арифметическое между длинами осей.

Фрагменты, на которых были зарегистрированы проявления вихрей, картировались. Полученные характеристики (координаты центра, тип вращения, диаметр) для каждого вихря заносились в общую базу, выполнялись статистические оценки характеристик вихрей с учетом типа вращения по месяцам и годам, анализировались особенности пространственно-временная изменчивости. Кроме того производилось районирование акваторий по относительной частоте встречаемости поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур.

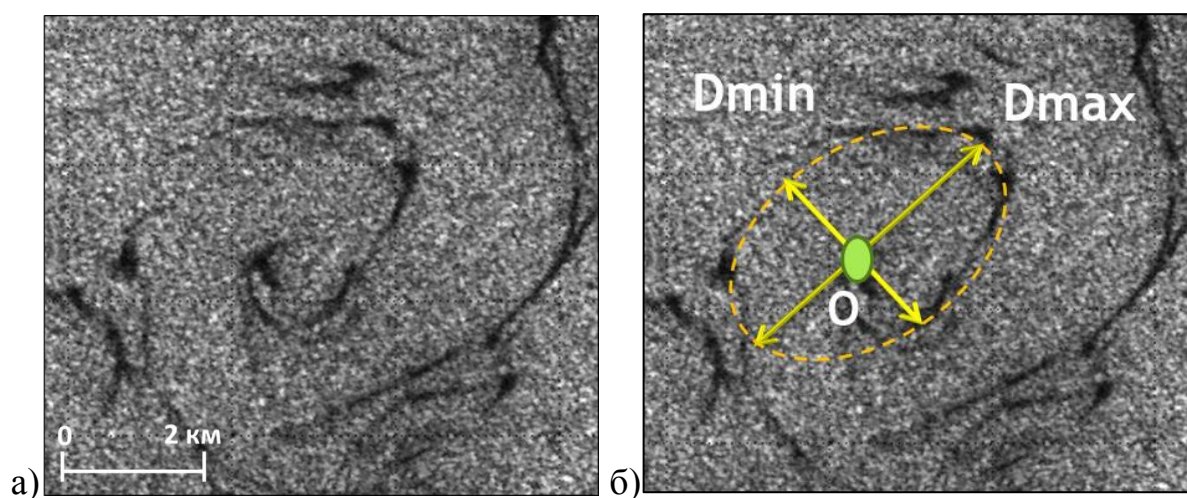


Рисунок 2.6 – Фрагмент радиолокационного изображения в районе Кандалакшского залива на РЛИ Envisat ASAR 17.09.2010 08:40 UTC с проявлением субмезомасштабной вихревой структуры (а) и изображение методики измерений характеристик на том же фрагменте (б)

Всего за период с мая по сентябрь 2009–2012 гг. было зарегистрировано 162 субмезомасштабные вихревые структуры (2009 – 30 шт., 2010 – 117 шт., 2011 – 4

шт., 2012 – 11 шт.), из которых 38 являлись антициклоническими структурами, а 124 – циклонический [Зимин и др., 2016]. Преобладание вихрей с циклоническим типом вращения, которое отмечалось и для других морей [Митягина, Лаврова, 2009; Каримова, 2012; Nakamura et.al., 2012; Karimova, Gade, 2014]. Существуют разные причины, которые могут приводить к преобладанию циклонических вихрей над антициклоническими. Среди них можно выделить наличие фоновой циклонической завихренности течений. В то время как при наличии антициклонической завихренности, например, в море Бофорта наблюдается преобладание антициклонических вихрей [D'Asaro, 1988]. Так же причина может заключаться в конвергентной природе циклонических вихрей [Swenson, Niiler, 1996], при этом поверхностно-активные вещества концентрируются преимущественно в зоне конвергенции, тем самым позволяя более четко визуализировать циклонические вихри в сравнении с антициклоническими, в том числе на РЛИ [Munk et al., 2000].

Вихри регистрировались на всей акватории моря (Рисунок 2.7), однако чаще всего севернее Соловецких островов, на границе между Бассейном и Двинским заливом, а также вблизи Терского берега.

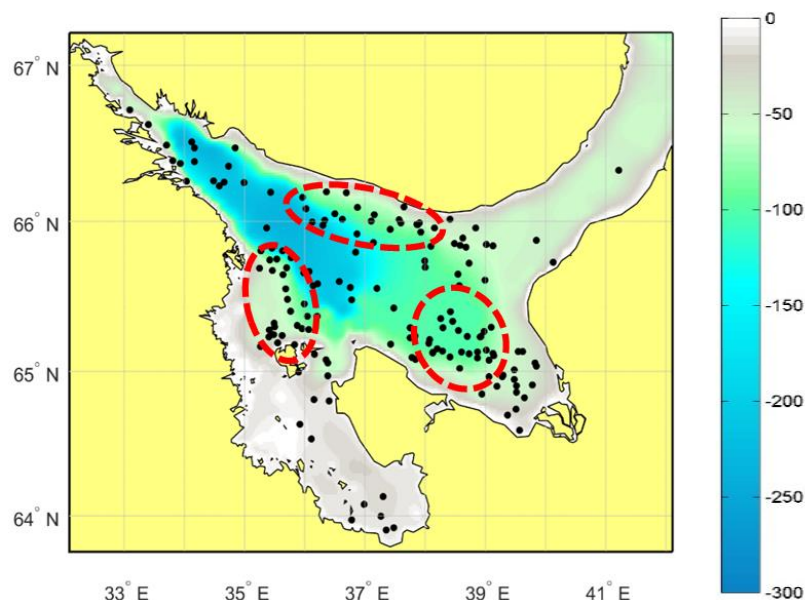


Рисунок 2.7 – Пространственное распределение положений центров вихревых структур (черные точки) за исследуемый период. Красные круги – районы частой регистрации проявлений вихрей

Около 50 % проявлений вихревых структур отмечалось на акватории Басейна, при этом  $Z_n$  вихрей почти в 3 раза больше, чем  $A_z$ . Максимум структур в этом районе регистрировалось у Терского берега вблизи Горловского и Соловецкого фронтов (севернее Соловецких островов). У Терского берега пространственный масштаб составил от 4 до 9 км, у Соловецких островов – от 1.5 до 10 км (Рисунок 2.8, а) [Зимин и др., 2016].

Четверть проявлений регистрировалась в Двинском заливе с размерами от 5 до 8 км. Однако несколько раз были отмечались вихри с диаметром более 10 км. Соотношение  $A_z$  к  $Z_n$  составило примерно 1 к 4. Вихри циклонического типа при этом тяготеют к восточной части залива, антициклонические – к северной и центральной части залива.

В Кандалакшском и Онежском заливах зафиксировано по 15 проявлений вихрей. Как и в других районах моря, отмечалось преобладание вихрей с циклоническим типом вращения. Наиболее крупные вихри отмечались в Кандалакшском заливе (более 9 км).

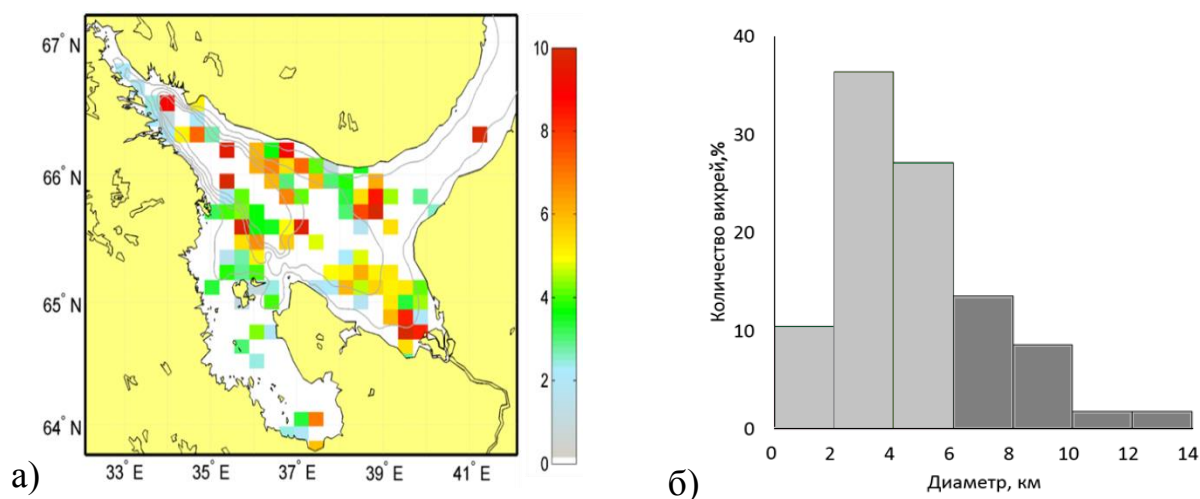


Рисунок 2.8 – Диаметры вихревых структур в Белом море за теплый период 2009–2012 гг.. Пространственное распределение диаметров поверхностных проявлений, осредненных на единицу сетки ( $\sim 144 \text{ км}^2$ ), в км (а). Гистограмма диаметров вихревых структур, где светло-серый цвет – минимальное количество вихрей, относимых к субмезомасштабу (б)

Проявления 6 циклонических вихрей были зарегистрированы в Горле. Они резко различаются по размерам, на южной границе их диаметр составляет от 2 до 8 км, в центральной части более 10 км [Зимин и др., 2016].

Диаметр вихревых структур в Белом море варьировался от 0,9 до 13,2 км, при этом как минимум ~ 75 % зарегистрированных вихрей можно отнести к субмезомасштабу при учете условной границы в 6 км. Как циклонические, так и антициклонические вихри чаще всего (~ 37 %) наблюдались с диаметром от 2 до 4 км (Рисунок 2.8, б) со средним значением, модой и медианой 4,7, 2 и 4,2 км соответственно, которые близки к среднему климатического значения радиуса Россби (4,3 км) для Белого моря.

В Таблице 2.2. и на Рисунке 2.9 приведены внутрисезонная изменчивость характеристик зарегистрированных вихрей с учетом типа вращения. При относительно равномерном покрытии радиолокационными изображениями (Рисунок 2.5) вихри чаще всего регистрировались в июне и июле, когда происходило формирование приповерхностного пикноклина. На эти месяцы пришлось ~ 65 % всех вихревых структур, при этом пик вихревой активности отмечался в июле (Рисунок 2.9, а), как среди Zn (циклонических) вихрей, так и среди Az (антициклонических).

Таблица 2.2 – Характеристики поверхностных проявлений вихрей в Белом море за 2009–2012 гг.

| Месяц    | Количество вихрей, шт |     |       | Средний (мин. – макс.) диаметр, км |                | Средний диаметр, км |
|----------|-----------------------|-----|-------|------------------------------------|----------------|---------------------|
|          | Az                    | Zn  | Всего | Az                                 | Zn             |                     |
| Май      | –                     | 1   | 1     | –                                  | 2,2            | 2,2                 |
| Июнь     | 9                     | 41  | 50    | 8 (2,9–13,2)                       | 4,5 (1,4–9,3)  | 5,1                 |
| Июль     | 18                    | 38  | 56    | 5,1 (0,9–12,1)                     | 5,6 (2,1–10,6) | 5,4                 |
| Август   | 7                     | 24  | 31    | 3,5 (1,2–5,5)                      | 3,3 (1,1–7)    | 3,4                 |
| Сентябрь | 4                     | 20  | 24    | 5,8 (1,2–12,5)                     | 3,6 (1,5–9,6)  | 4                   |
| Итог     | 38                    | 124 | 162   | 5,6 (0,9–13,2)                     | 4,4 (1,1–10,6) | 4,7                 |

К концу теплого сезона (Рисунок 2.9, а) за все исследуемые года наблюдалось заметное уменьшение вихревой динамики, при этом на август и сентябрь пришлось около 35 %, и было зарегистрировано около 20 % и 15 % всех вихрей соответственно. В мае проявления вихрей практически не регистрировались. Среднемесячный диаметр вихрей варьировался в пределах единиц километров (от 2,2 до 5,4 км), при этом у антициклонических вихрей он был практически всегда больше (Рисунок 2.9, б). Вероятно, это связано с тем, что в среднем антициклонические вихри существуют дольше и достигают больших размеров, чем циклонические [Митягина, Лаврова, 2009].

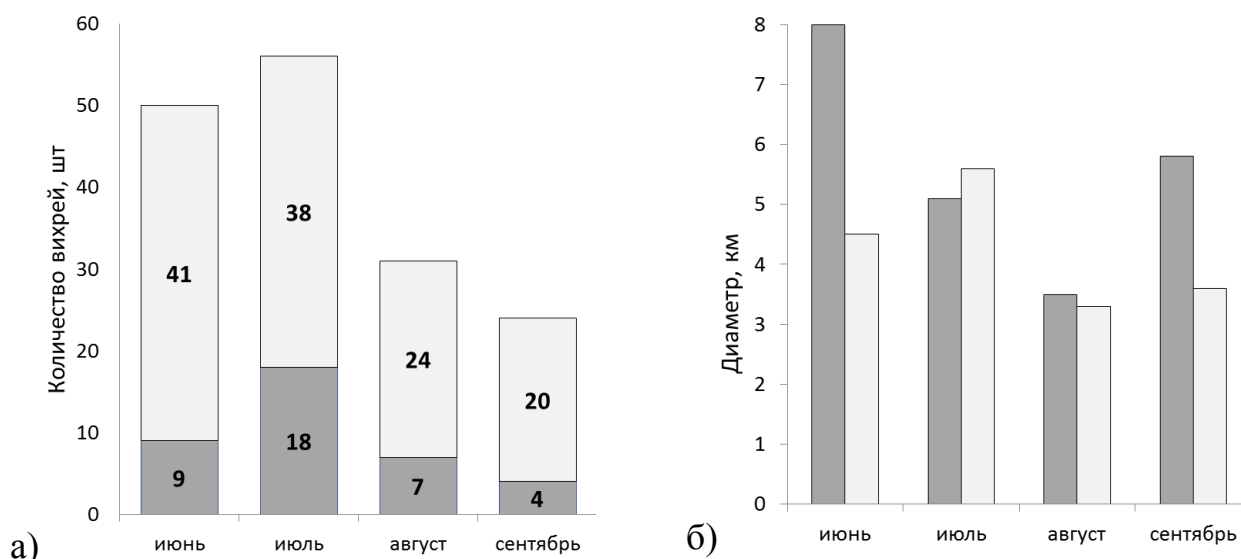


Рисунок 2.9 – Внутрисезонное распределение количества вихрей (а) и средних диаметров (б) с учетом типа вращения в Белом море за теплый период 2009–2012 гг. (темный цвет – антициклонический тип, светлый цвет – циклонический тип)

### 2.3. Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны

Ввиду того, что в Белое море впадает много рек, распределение температуры воды имеет свои особенности. Более 75 % всего стока приходится на долю рек, впадающих в Онежский (река Онега 27 км<sup>3</sup>), Двинский (Северная Двина 171 км<sup>3</sup>) и Мезенский заливы (Мезень 38,5 км<sup>3</sup>). Большой неравномерностью характеризуется и внутригодовое распределение стока рек, текущих в эти заливы. Максимум стока наблюдается весной (май) и составляет 40 % годового стока.

Из-за речного стока и взаимодействия с водами Баренцева моря через пролив Горло на поверхности Белого моря отмечаются следующие водные массы [Гидрометеорология...,1991]:

1) баренцевоморская водная масса. Занимает западную часть Воронки от поверхности до дна. Характеризуется однородностью по температуре и солёности, имеет температуру  $2,1^{\circ}\text{C}$  и солёность  $34\text{‰}$ ;

2) водная масса Горла. Она занимает все Горло и южную часть Воронки, однородна по вертикали и для нее характерны температура и солёность  $1,0\text{--}1,7^{\circ}\text{C}$  и  $28,5\text{--}28,8 \text{‰}$ . От вод Баренцева моря отделяется фронтом;

3) поверхностная водная масса Бассейна. Эта водная масса расположена на всей акватории Бассейна до глубины 25 м, имеет температуру  $6,4\text{--}7,0^{\circ}\text{C}$  и солёность  $26,6 \text{‰}$ . В слое между 10 и 25 м она проникает в Двинский и Кандалакшский заливы;

4) распресненные воды заливов. Эти воды образуются в результате смешений поверхностной водной массы Бассейна и речных вод. Прогреваются до температуры  $7,2^{\circ}\text{C}$  и имеют солёность  $21\text{--}22 \text{‰}$  (до глубины 10 м). Могут простираться в Бассейн на 15–25 миль;

5) слабо трансформированные речные воды. Располагаются в вершинах Двинского и Онежского заливов с температурой  $8,5^{\circ}\text{C}$  и солёностью  $4,3\text{--}7,6 \text{‰}$  (до глубины 5 метров).

На основе данных водных масс в Белом море выделяют пять основных термических фронтов: фронт на границе с Баренцевым морем, Горловский, Соловецкий, Двинский и Онежский. Последние два (Рисунок 2.10) относятся к стоковым фронтальным зонам и возникают в результате стока рек Онега и Северная Двина в Онежский и Двинский заливах соответственно. Горловская и Соловецкая фронтальные зоны, фронты которых представлены на Рисунке 2.10, относятся к шельфово-приливным. Горловский фронт проходит вдоль юго-западной границы Горла и разделяет воды квазиоднородные воды Горла и стратифицированные воды Бассейна. Соловецкая фронтальная зона располагается около Соловецких островов в районе с относительно небольшими глубинами и значительными скоростями



ми приливных течений. Соловецкий фронт разделяет слабо стратифицированные холодные (перемешанные) воды, окружающие архипелаг, от стратифицированных с прогретым верхним слоем вод Бассейна (с севера) и Онежского залива (с юга). Фронт на границе с Баренцевым морем разделяет баренцевоморские и горловские воды [Романенков и др., 2016].

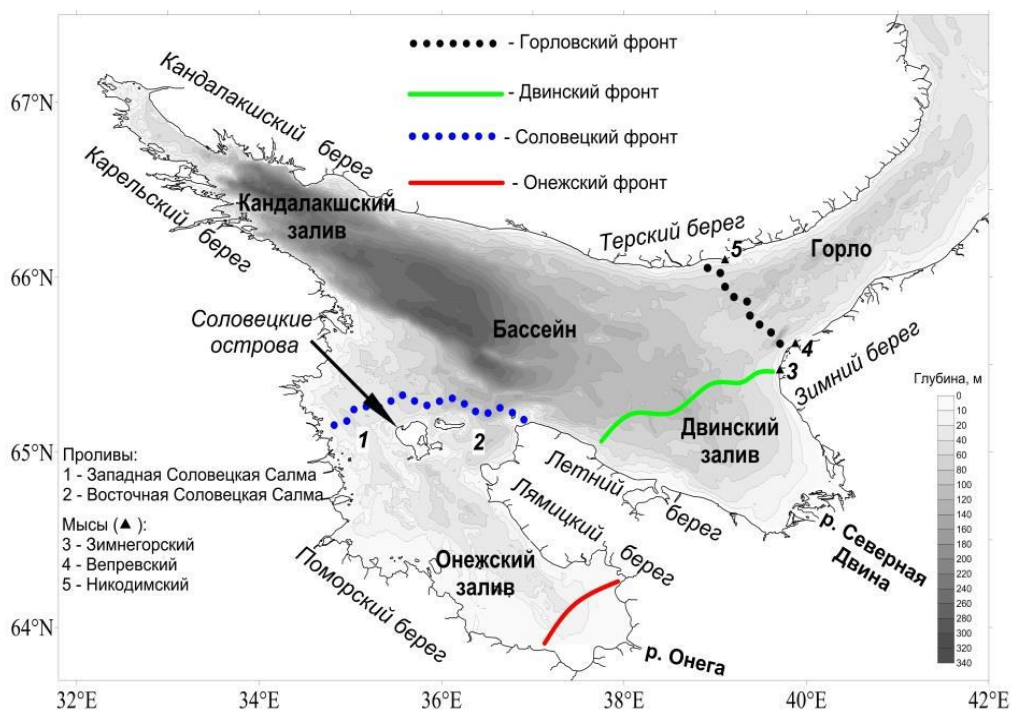


Рисунок 2.10 – Основные положения гидрологических фронтов в Белом море по [Романенков и др., 2016]

Для исследования связи между проявлениями субмезомасштабных вихрей и фронтальной динамикой использовались данные о среднедекадных и среднемесячных положениях термических фронтов, полученных в соавторстве [Романенков и др., 2016]. Исследование температурных фронтов в Белом море производилось с использованием суточных спутниковых данных по ТПИМ, полученные с Modis Aqua/Terra за период с мая по сентябрь 2010 года. Производился анализ Горловской, Двинской, Соловецкой и Онежской фронтальных зон, ФЗ на границе Белого и Баренцева морей не рассматривалась ввиду сложности ее идентификации. Под фронтальной зоной, как и в [Федоров, 1983, с. 22], понималась такая зона, в которой «пространственные градиенты термогидродинамических характери-

стик (в данном случае – температуры) значительно обострены по сравнению со средним равномерным распределением между устойчиво существующими климатическими или иными экстремумами», при этом «фронтальный раздел – это поверхность внутри фронтальной зоны, совпадающая с поверхностью максимального градиента одной или нескольких характеристик», а за фронт принимался «след пересечения фронтального раздела с любой выбранной поверхностью, в частности с поверхностью океана» [Федоров, 1983, с. 22]. При этом фронтальная зона может содержать в себе несколько фронтальных разделов.

Композитные карты включали в себя области смещения декадных положений фронтов или другими словами область изменчивости ФЗ, а также положения центров вихрей по данным за 2010 год за каждый месяц и за весь теплый период года.

В Белом море на основе спутниковых данных с мая по сентябрь 2010 г. были зарегистрированы 4 основных термических фронтальных зоны, которые называют по географической локализации (Рисунок 2.11): Горловская; Двинская; Онежская; Соловецкая [Романенков и др., 2016]. Среднемесячные положения основных фронтов данных ФЗ за июнь-август 2010 г. показаны на Рисунке 2.11, а. Однако, как видно из карты, среднемесячные положения не обладают значительной динамикой и близки друг к другу, что привело к необходимости исследования среднедекадных положений (Рисунок 2.11, б). Сравнение двух карт среднемесячных и среднедекадных положений фронтов показывает, насколько сильна динамика фронтов по среднедекадным данным. Особенно ярко это выражено для Двинского и Горловского фронтов. Из чего следует, что для построения композитных карт лучше всего использовать среднедекадные положения фронтов.

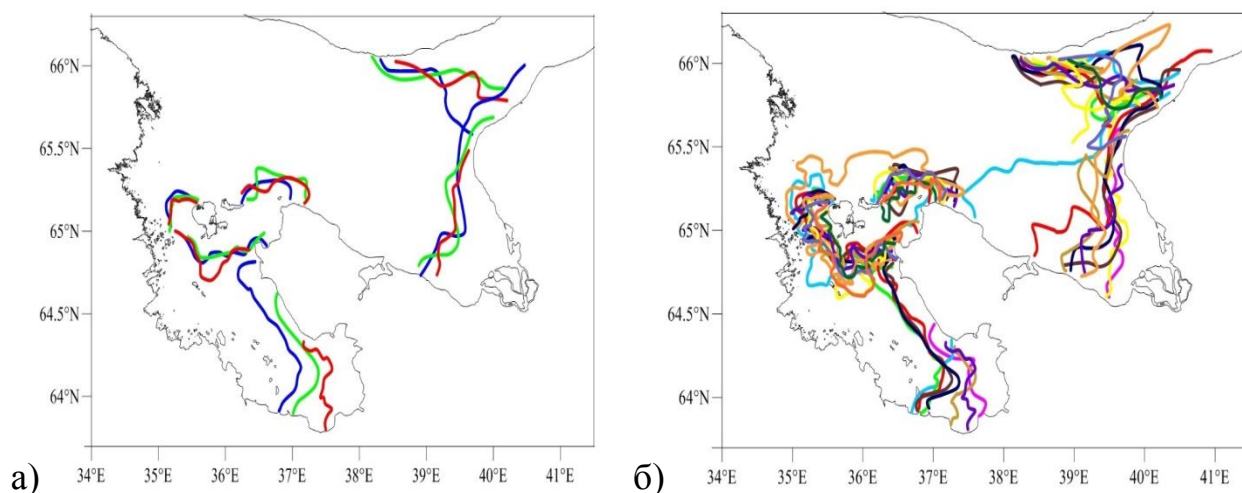


Рисунок 2.11 – Фронты в Белом море [Романенков и др., 2016]. а – Среднемесячные положения Горловского, Двинского, Соловецкого и Онежского фронтов за июнь-август 2010 г. Синий цвет – июнь, зеленый – июль, красный – август.

б – положение тех же фронтов за каждую из 14 декад с мая по сентябрь

На Рисунке 2.12 представлена как наиболее показательная общая композитная карта для Белого моря период с июня по сентябрь 2010 года, в которой области изменчивости ФЗ ограничены наиболее удаленными друг от друга среднедекадными положениями фронтов за исследуемый период.

По композитным картам как для каждого месяца, так и по обобщенной композитной карте, было получено, что вихри в течение сезона часто регистрировались вблизи и внутри областей изменчивости Горловской, Двинской, Соловецкой и Онежской фронтальных зон. Для каждого месяца производилась оценка количества вихрей внутри областей изменчивости ФЗ по месяцам. Результаты проведенной оценки по месяцам сведены в Таблице 2.3.

Наибольшее число вихрей за месяц внутри всех областей изменчивости ФЗ отмечалось в июле 2010 года (~ 77 %), когда отмечалось наибольшее смещение среднедекадных фронтов в течение одного месяца. В июне и августе внутри областей отмечалось примерно по 60 % за каждый месяц, а в сентябре, когда смещение фронтов было незначительным, количество вихрей внутри областей было минимальным – всего 13 %.

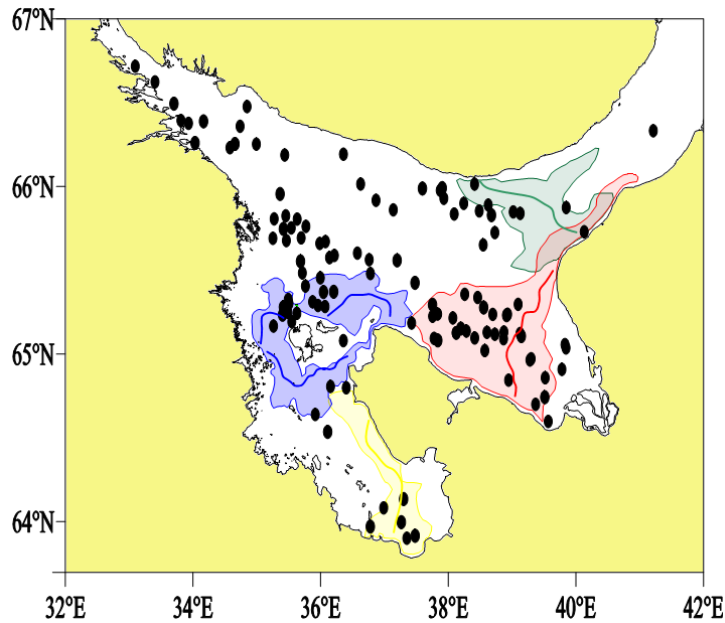


Рисунок 2.12 – Композитная карта Белого моря, сочетающая в себе положения центров вихревых структур (черные круги) за июнь-сентябрь 2010 г., а также среднесезонные положения фронтов (сплошная линия) и области изменчивости их фронтальных зон за тот же период: зеленый цвет – Горловский фронт; красный – Двинский фронт; синий – Соловецкий фронт; желтый – Онежский фронт

Таблица 2.3 – Количество вихрей внутри областей изменчивости фронтальных зон по месяцам за 2010 г.

| Месяц                   | Июнь | Июль      | Август | Сентябрь | Всего |
|-------------------------|------|-----------|--------|----------|-------|
| Количество вихрей,<br>% | 62   | <b>77</b> | 57     | 13       | 57    |

## Выводы к главе 2

Сопоставление разнородных спутниковых данных показало, что не зависимо от типа вращения (циклонический и антициклонический) в субмезомасштабных вихрях может отмечаться как подъем, так и опускание вод. Результаты подспутникового эксперимента показали, что анализируемые субмезомасштабные вихревые структуры находят свое проявление как в спутниковых данных, так и в

in-situ измерениях. При этом они прослеживаются во всем ВКС до глубины сезонного пикноклина, на которой отмечается наиболее четкое проявление вихрей.

Анализ радиолокационных изображений, покрывающих Белое море, за теплый период 2009–2012 гг. позволил зарегистрировать 162 поверхностных проявления субмезомасштабных вихревых структур, из которых почти три четверти являлись циклонами. Вихри имели средний диаметр (4,7 км) порядка среднего климатического радиуса Россби, однако чаще всего встречались вихри с диаметром от 2 до 4 км (~ 37%). При этом средний диаметр антициклонических вихрей превалировал над средним диаметром циклонических. Вихри чаще всего регистрировались севернее Соловецких островов, на границе Двинского залива и Бассейна, а также вдоль Терского берега. Высокая вихревая активность отмечалась в период формирования приповерхностного пикноклина, при этом пик пришелся на июль. Меньше всего вихрей отмечалось в мае и сентябре.

Анализ фронтальной динамики за теплый сезон 2010 г. позволил выявить, что среднемесячные положения термических поверхностных фронтов были близки к средним за сезон, однако среднедекадные положения иллюстрировали значительную внутримесячную изменчивость. Оценка количества проявлений вихревых структур внутри областей изменчивости ФЗ по месяцам показала, что вихри внутри областей отмечались каждый месяц, однако наибольшее число проявлений внутри областей изменчивости регистрировалось в июле до 75 % вихрей за месяц, когда отмечалась максимальное смещение фронтов.

Результаты исследований, представленные во второй главе диссертации, опубликованы в [Atadzhanova et al., 2015; Атаджанова и др., 2015а, 2015б, 2016а, 2017в, 2018а; Атаджанова, Зимин, 2016; Зимин и др., 2014, 2015 а, 2015г, 2016, 2017а, 2017б, 2018б; Родионов и др., 2016; Романенков и др., 2016].

### ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

#### 3.1. Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур

Вихревые структуры в Баренцевом море с диаметром от единиц до десятков километров ранее регистрировались неоднократно во время полигонных съемок в северо-западной части Баренцева моря [Косолапов, Лебедев, 1989; Лебедев, 1992], а также прослеживались на севере моря в районе Прикромочной фронтальной зоны [Федоров, Гинзбург, 1988] и в центральной части моря [Родионов, Костяной, 1998]. Спутниковые данные [Костяной и др., 1992] позволили зарегистрировать антициклонические и циклонические меандры в районе Полярной фронтальной зоны. Там же на участке Полярной фронтальной зоны на южной периферии возвышенности Персея отмечались вихри в виде мелкомасштабной пятнистости с горизонтальными размерами от 5 до 15 км [Vage et al., 2014].

Для выявления особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей в Баренцевом море были проанализированы спутниковые радиолокационные изображения, полученных с ENVISAT ASAR в С-диапазоне и режимах съемки WSM (ширина полосы обзора 400×400 км, пространственное разрешение 150×150 м) и IMP (100×100 км и 30×30 м соответственно) за июнь–октябрь 2007 (1203 изображения) и 2011 (838 изображений) годов. Выбор этих лет был обусловлен минимальным распространением льда на акватории Баренцева моря [Жичкин, 2015], что соответствует общим климатическим тенденциям (раздел 1.2) за период работы радиолокатора синтезированной апертуры ENVISAT ASAR с весны 2002 по весну 2012 года и большой обеспеченностью данными. Фрагменты снимков, где ледовые и ветровые условия (приводный ветер более 15 м/с) не позволяли бы увидеть поверхностные проявления вихрей, не учитывались при расчете покрытия акваторий радиолокационными изображениями. Данные были получены в Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ в рамках проекта МЕГАГРАНТ.

Количество РЛИ, покрывающих Баренцево море, в течение теплого сезона 2007 года было неравномерным (Таблица 3.1). Наибольшее число изображений пришлось на октябрь – более 40 % всех изображений. В сентябре отмечалась наименьшая обеспеченность РЛИ (10 %), в остальные месяцы – примерно по 15 % на каждый.

Таблица 3.1 – Количество радиолокационных изображений за каждый год в шт.

| Месяц       | 2007 год | 2011 год |
|-------------|----------|----------|
| Июнь        | 177      | 115      |
| Июль        | 217      | 151      |
| Август      | 197      | 163      |
| Сентябрь    | 119      | 192      |
| Октябрь     | 493      | 217      |
| Весь период | 1203     | 838      |

При среднем покрытии радиолокационными изображениями всей акватории Баренцева моря за два года около 250 РЛИ (Рисунок 3.1, а), на 2007 г. пришлось около 130 РЛИ на площадь моря, при этом наиболее обеспеченными данными являлись районы юго-западнее Земли Франца-Иосифа, севернее и западнее архипелага Шпицберген, где покрытие составляло более 200 снимков на акватории (Рисунок 3.1, б).

В 2011 году максимальное число РЛИ (почти 50 %) отмечалось в сентябре и октябре. Наименее обеспеченным по количеству РЛИ был июнь, в то время как в июле и августе было примерно одинаковое количество – чуть меньше 20 % в каждом месяце. Наибольшее покрытие Баренцева моря (свыше 200 изображений) сосредоточено в районе между архипелагом Шпицберген и Землей Франца-Иосифа (Рисунок 3.1, в). При среднем покрытии около 100 изображений южная и юго-восточная часть моря практически имеют крайне низкую обеспеченность изображениями (менее 30 РЛИ), а севернее острова Колгуев и полуострова Канин снимки вообще не покрывали акваторию в этот год.

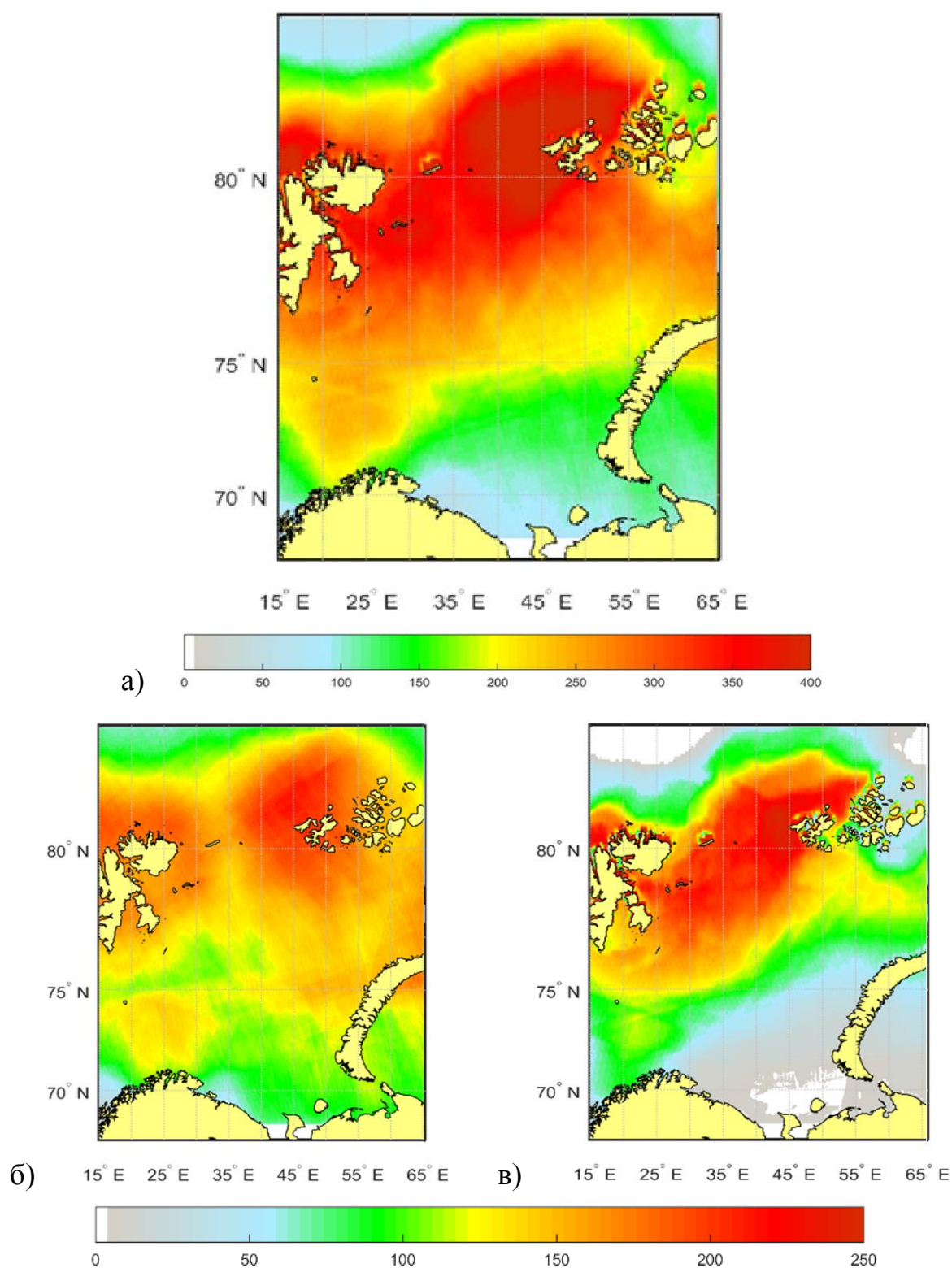


Рисунок 3.1 – Карты покрытия акватории Баренцева моря за июнь–октябрь за два года (а) и по годам 2007 (б), 2011 (в) с учетом ледовых и ветровых условий, шкала в шт.

Методика выделения характеристик поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей в Баренцевом море была идентична методике, описанной для



Белого моря в разделе 2.2.

В Баренцевом море вихревые структуры широко распространены на всей акватории моря (Рисунок 3.2, а). Отмечались как отдельные вихревые структуры, так и группы, диполи и цепочки вихрей. Всего за июнь-октябрь 2007 и 2011 гг. в Баренцевом море было детектировано 2934 малых вихревых структуры, среди которых преобладали циклонические вихри – 81 % вихрей (2383 шт.). Такое преобладание была уже выявлена для Белого моря и ее возможные причины рассмотрены в разделе 2.2.

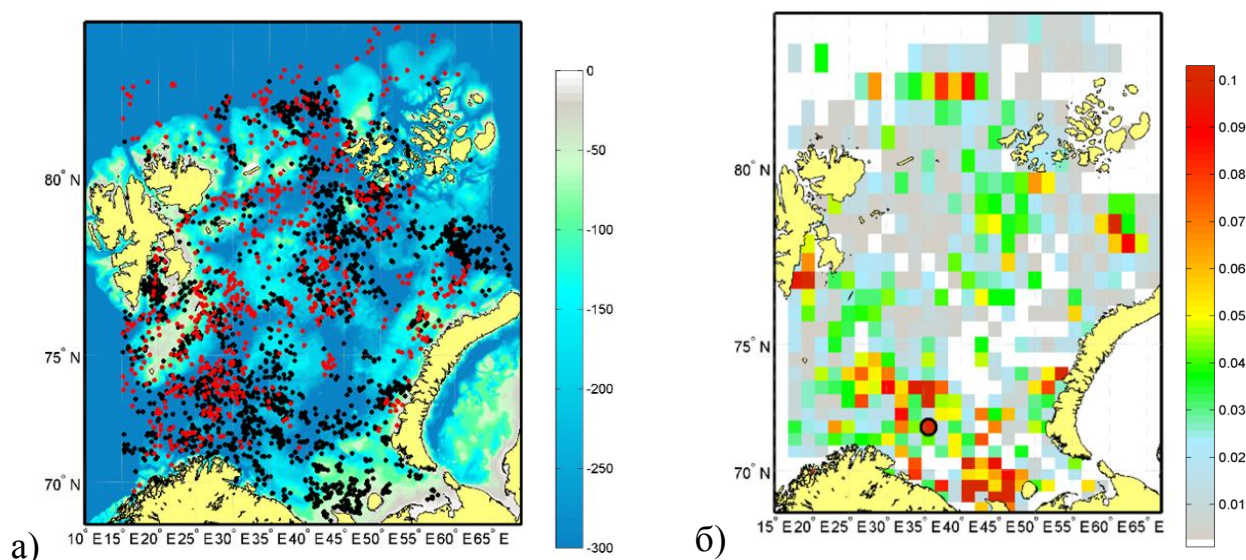


Рисунок 3.2 – Распределение вихрей в Баренцевом море. (а) – Центры вихревых структур, где черными кружкам показаны вихри за 2007 год, красными – за 2011 год, шкала показывает глубину в м. (б) – Относительная частота встречаемости вихрей на РЛИ в условных единицах, где кругом отмечен район с максимальным значением частоты

Для количественной оценки регистрации вихрей на РЛИ была посчитана относительная частота встречаемости (безразмерный показатель, отражающий долю вихрей на РЛИ и равен отношению количества вихрей к количеству РЛИ на единицу сетки  $\sim 2500 \text{ км}^2$ ). По Рисунку 3.2, б. видно, что чаще всего (с частотой более 0,1 или на каждом 10 снимке) вихри встречались к северо-западу от ЗФИ, возле восточного берега острова Западный Шпицберген, в юго-западной части

моря (в районе поступления атлантических вод), в центральной части пролива между ЗФИ и Новой Землей, возле мыса Канин Нос. Практически все перечисленные районы характеризуются либо неровностями дна, либо наличием фронтальных зон. Наибольшая относительная частота встречаемости составила 0,37 (отмечена кругом на Рисунке 3.2, б), т.е. чаще, чем на каждом 4 снимке. Максимальное число вихрей на 1 тыс. км<sup>2</sup> составило 14 штук и отмечалось там же.

Анализ пространственной изменчивости положения вихрей на акватории Баренцева моря по месяцам производился на основе карт, сочетающих в себе топографию дна и положения центров вихрей за теплый сезон по месяцам 2007 и 2011 гг. В июне (Рисунок 3.3, а) большая часть вихрей отмечалась в районах, где наблюдается усиление градиентов поверхностной температуры вблизи Шпицбергенской банки, ввиду близко расположенных друг к другу Арктических и Атлантических вод [Oziel et al., 2016]. В районах Западного желоба и периферии банки Персея также регистрировалось скопление вихрей.

Такие особенности могут объясняться проявлением различных видов неустойчивости фронтальных течений. Например, признаки баротропной неустойчивости течений были отмечены в ходе экспедиционных исследований в юго-восточной части Шпицбергенской банки [Морозов и др., 2017]. Ранее образование вихревых структур наблюдалось в ходе съемок фронтальных разделов вдоль южной периферии Центрального желоба [Костяной и др., 1992]. Как правило, речь шла о мезомасштабных вихревых структурах. Но в условиях сложного рельефа и проявлении других видов неустойчивости, например, топографической, могут порождать более мелкие вихри, что объясняет высокую встречаемость этих вихрей в указанных районах.

Также в июне по РЛИ большая концентрация вихрей отмечалась у западного берега архипелага Новая Земля, особенно у пролива Маточкин Шар, где летом наблюдается фронтальная зона за счет взаимодействия шельфовых вод Новой Земли и Новоземельского течения [Родионов, Костяной, 1998]. Причина возникновения вихрей в районе банки юго-восточнее ЗФИ может быть связана с влиянием топографических эффектов над неровностями дна.

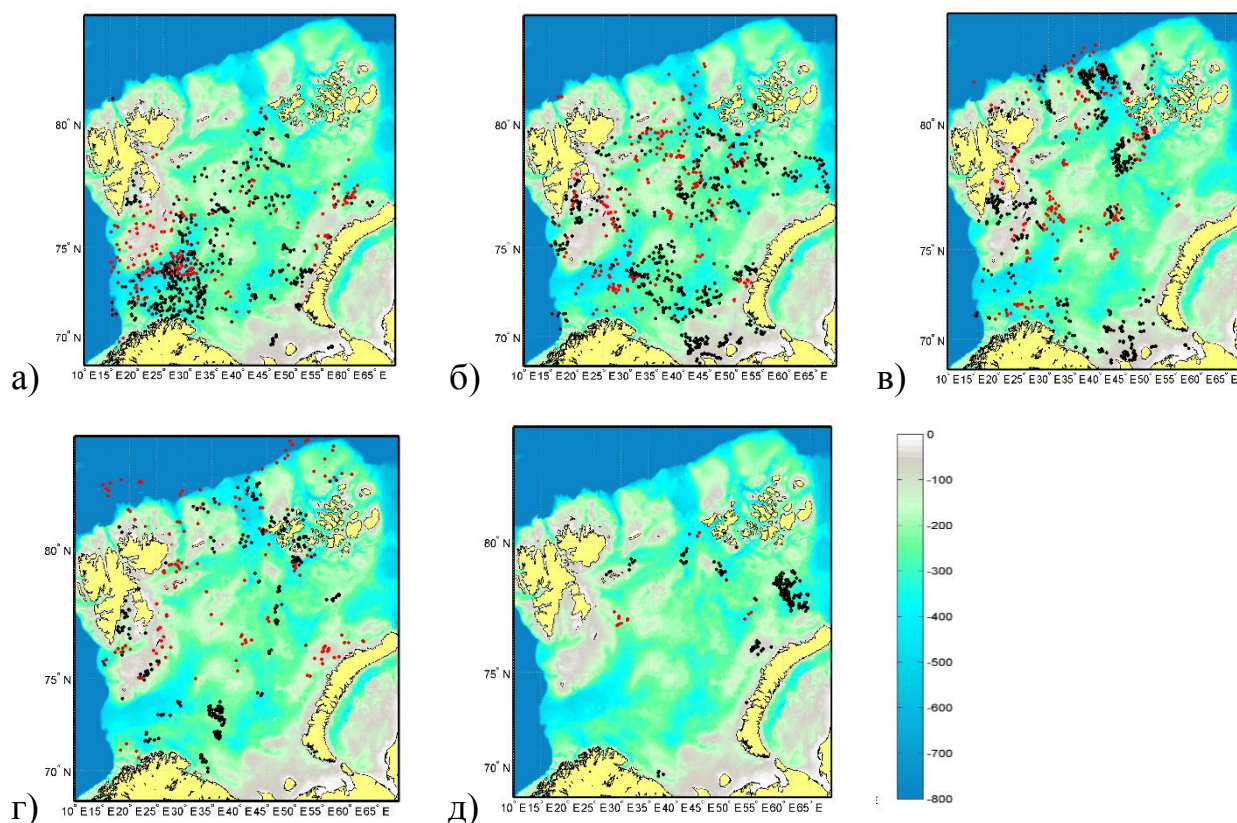


Рисунок 3.3 – Пространственное распределение центров малых вихревых структур на картах глубин (шкала в м) по месяцам: июнь (а); июль (б); август (в); сентябрь (г); октябрь (д). Черным цветом отмечены центры вихрей за 2007 г., красным – за 2011 г.

В июле, в период интенсивного формирования тонкого пикноклина, вихри начинали регистрироваться и в других районах (Рисунок 3.3, б). Увеличилась концентрация вихрей в юго-восточной части моря, а также область вихреобразования над Западным желобом «продвинулась» в район между Центральной банкой и Мурманским поднятием, усилилась вихревая активность на периферии Шпицбергенского мелководья и банки Персея, а также в районе банки юго-западнее ЗФИ. Появились вихри между северной оконечностью Новой Земли и ЗФИ, что может быть связано неустойчивостью Прикромочного фронта, который продвигается на север ввиду начала таяния льда в проливе. Начали регистрироваться вихри над неровностями дна севернее 80 °с.ш.

Если в июне и июле вихри относительно были «разбросаны» по акватории, то в августе (Рисунок 3.3, в) они преимущественно «группировались». Большие

скопления вихрей отмечались на периферии банки юго-восточнее ЗФИ и над желобом Франц-Виктории, что может быть связано с топографическими эффектами над неровностями дна. Чуть поменьше группы вихревых структур регистрировались севернее острова Белый, между Шпицбергенским мелководьем и банкой Персея, юго-западнее банки Персея, у восточного берега острова Западный Шпицберген. В юго-восточной части моря вихри регистрируются севернее Канина Носа, где существуют в теплое время Беломорское и Печорское стоковые фронтальные течения [Гидрометеорология..., 1990]. Практически не отмечались вихри у западного берега Новой Земли. Стали проявляться вихри вблизи Кольского полуострова.

В сентябре (Рисунок 3.3, г) вихревые структуры отмечались еще реже, чем в августе. При этом больших скоплений практически не наблюдалось, чаще встречались единичные вихри или небольшие группы. Большая часть вихрей находилась в северной части моря в районах неровностей дна. Наибольшее скопление вихрей отмечалось между Центральной возвышенностью и Мурманским мелководьем.

В октябре вихри регистрировались изредка (Рисунок 3.3, д), за исключением группы вихрей в проливе между Новой Землей и ЗФИ. Так же, как и во все другие месяцы, вихри регистрировались на периферии банки юго-восточнее ЗФИ и на периферии Шпицбергенского мелководья (со стороны банки Персея).

За два года наблюдений диаметр вихревых структур в Баренцевом море варьировался от 0,2 до 25 км. Учитывая условную верхнюю границу субмезомасштаба как 6 км, около 90 % зарегистрированных вихрей можно отнести к этому масштабу (светло серый цвет на Рисунке 3.4, а). Как циклонические, так и антициклонические вихри чаще наблюдались с диаметром 2–4 км (Рисунок.3.4, а) со средним значением, модой и медианой 3,6, 2,8 и 2 км соответственно, которые имеют порядок среднего климатического значения радиуса Россби (4,9 км) для Баренцева моря. Выполнение условия (формула 1.2) для вихрей с размерами порядка бароклинного радиуса Россби позволяет предположить в качестве механизма генерации бароклинную неустойчивость в районах фронтальных зон.

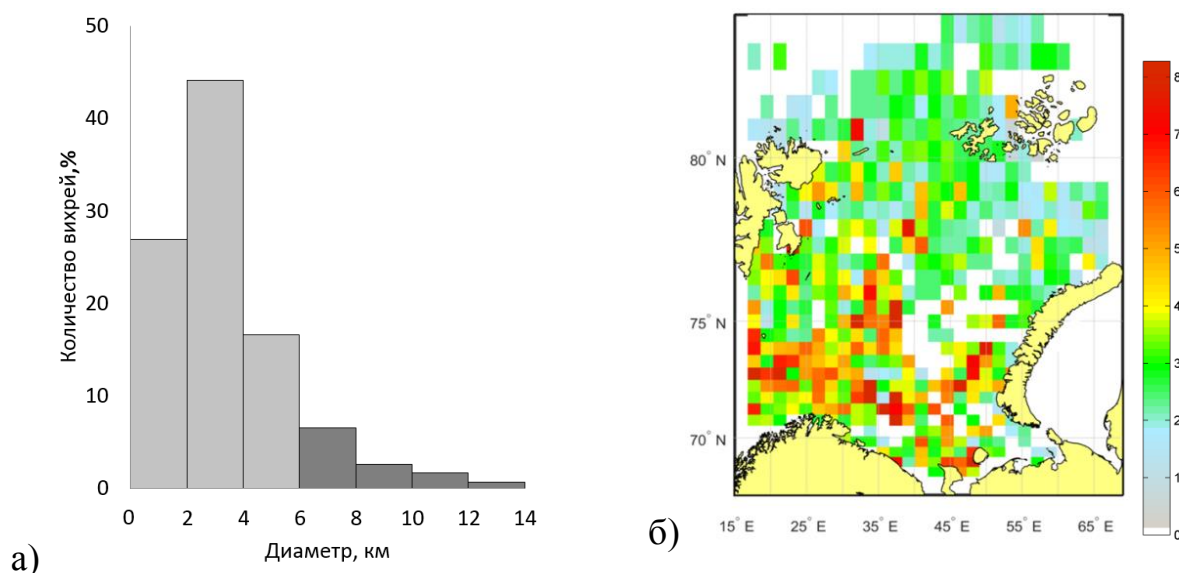


Рисунок 3.4 – Диаметры вихревых структур в Баренцевом море. Гистограмма диаметров вихревых структур за теплый период 2007 и 2011 гг. (а), где светло-серый цвет – минимальное количество вихрей, относимых к субмезомасштабу. Пространственное распределение диаметров поверхностных проявлений, осредненных на единицу сетки (около  $2500 \text{ км}^2$ ), шкала в км (б)

Как следует из Рисунка 3.4, б, крупные вихри свыше 7–8 км регистрировались в зоне распространения атлантических вод на поверхности (на склонах Мурманского поднятия, Гусиной, Северной Канинской, Персея, Шпицбергенской банок, а также Западного Желоба). Напротив, вихри с размерами меньше 2 км были зарегистрированы преимущественно севернее и северо-восточнее Шпицбергена, а также между Землей Франца-Иосифа и Новой Землей.

В Баренцевом море в 2007 и 2011 годы зарегистрировано 2187 и 747 вихревых структур соответственно (Таблица 3.2). В 2007 году при более-менее равномерном покрытии вихри встречались практически во всех районах моря. В 2011 годом ситуация схожа (Рисунок 3.2, а) за исключением южной и юго-восточной части моря ввиду малого покрытия снимками (Рисунок 3.1, в).

Таблица 3.2 – Характеристики поверхностных проявлений вихрей в Баренцевом море за 2007 и 2011 гг.

| Месяц                   | Количество вихрей, шт |      |       | Средний (мин, – макс,) диаметр, км |               | Средний диаметр, км |
|-------------------------|-----------------------|------|-------|------------------------------------|---------------|---------------------|
|                         | Az                    | Zn   | Всего | Az                                 | Zn            |                     |
| Баренцево море, 2007 г, |                       |      |       |                                    |               |                     |
| Июнь                    | 103                   | 390  | 493   | 4,7(0,3–17,1)                      | 4(0,3–15,6)   | 4,2                 |
| Июль                    | 139                   | 498  | 637   | 6(0,2–21)                          | 3,8(0,2–25)   | 4,3                 |
| Август                  | 156                   | 366  | 522   | 3,5(1–18,3)                        | 3,7(0,7–20,4) | 3,6                 |
| Сентябрь                | 83                    | 279  | 362   | 2,4(0,5–12,1)                      | 2,2(0,2–15,9) | 2,2                 |
| Октябрь                 | 25                    | 148  | 173   | 2,9(0,5–10,6)                      | 2,2(0,4–9,8)  | 2,3                 |
| Итог                    | 506                   | 1681 | 2187  | 4,2(0,2–21)                        | 3,4(0,2–25)   | 3,6                 |
| Баренцево море, 2011    |                       |      |       |                                    |               |                     |
| Июнь                    | 13                    | 173  | 186   | 4,6(1,6–10,3)                      | 4,4(1,6–12,9) | 4,4                 |
| Июль                    | 17                    | 200  | 217   | 5,2(1,9–14,5)                      | 3,5(0,9–15,6) | 3,6                 |
| Август                  | 11                    | 183  | 194   | 3,1(1,7–6,4)                       | 2,3(1,2–5,4)  | 2,4                 |
| Сентябрь                | 4                     | 132  | 136   | 2,0(1,5–2,6)                       | 2,7(1,0–9,9)  | 2,7                 |
| Октябрь                 | –                     | 14   | 14    | –                                  | 2,5(1,0–4,9)  | 2,5                 |
| Итог                    | 45                    | 702  | 747   | 4,2(1,6–14,5)                      | 3,3(0,9–15,6) | 3,3                 |

Еще одна важная особенность распределения вихрей в 2011 году заключается в том, что вихри регистрировались значительно севернее, чем в 2007 г. (Рисунок 3.2, а) из-за более удаленного к северу положения кромки льда. Однако основные районы наибольшей встречаемости (северо-западнее ЗФИ, возле юго-восточнее Шпицбергена, в районе поступления атлантических вод) характерны для обоих лет.

Характерно, что в оба года отмечалось преобладание вихрей с циклоническим типом вращения над антициклоническим, вероятно, по тем же причинам, которые рассматривались для Белого моря. При этом, если в 2007 году соотношение вихрей циклонического типа к антициклоническому был 3 к 1, то в 2011 году антициклонических вихрей было детектировано всего 6 % от всех вихрей за этот год. Средний диаметр антициклонических вихрей был больше (~ в 1.2 раза), чем у циклонических. Так при изменчивости размера антициклонических вихрей от 0,2 км до 21 км за 2007 год и от 1,6 до 14,5 за 2011 год его среднее значение в оба го-

да составило 4,2 км, что больше средних диаметров циклонических вихрей, равных 3,4 км и 3,3 км за 2007 и 2011 года соответственно.

Статистические оценки диаметров за сезон в целом и для каждого года в отдельности схожи. При изменчивости диаметров вихревых структур от 0,2 км до 25 км в 2007 году и от 0,9 км до 15,6 км в 2011 году, как видно из гистограмм на Рисунке 3.5, так же около 90 % вихревых структур относятся к субмезомасштабу, при этом в оба года преобладали вихри (до 40 % за 2007 г. и до 57 % за 2011 г.) с диаметром от 2 до 4 км (Рисунок 3.5). Средние значения диаметров 3,6 км и 3,3 км за 2007 и 2011 гг. У большинства исследуемых вихрей пространственный масштаб порядка бароклинного радиуса Россби согласуется с необходимым условием для бароклинной неустойчивости (формула 1.2). И как следствие, одной из наиболее вероятных причин образования является бароклинная неустойчивость, которая обычно отмечается в районах фронтальных зон.

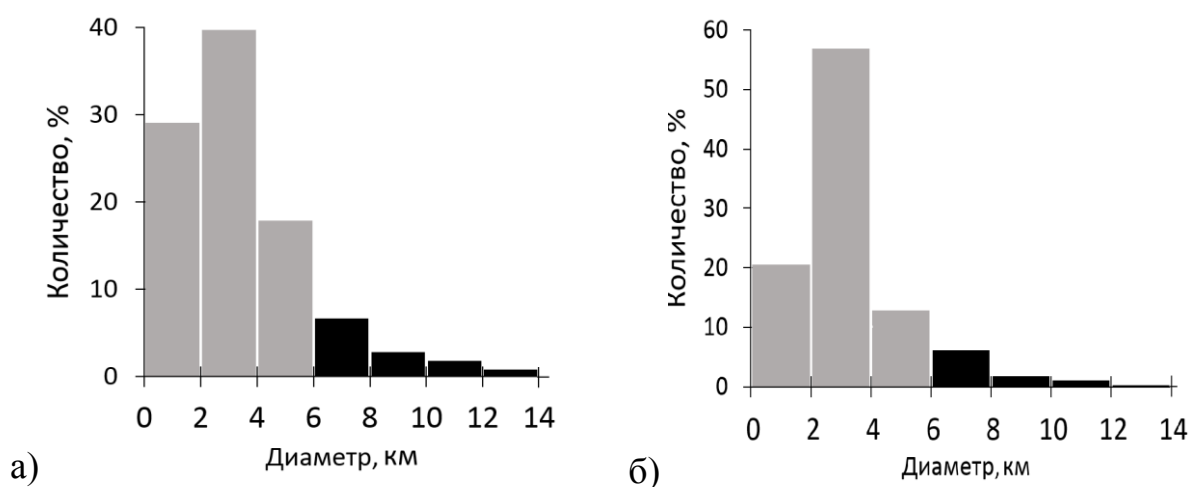


Рисунок 3.5 – Гистограммы распределения диаметров вихрей в Баренцевом море за 2007 (а) и 2011 (б) года, где светло-серый цвет – минимальное количество вихрей, относимых к субмезомасштабу

Характеристики внутрисезонной изменчивости по годам распределения вихрей представлены Таблице 3.2.

В 2007 году наибольшая вихревая активность была зарегистрирована в первой половине сезона с июня по август, при этом максимальное количество вихрей пришлось на июль (около 30 %). На протяжении всех теплых месяцев количество

циклонических вихрей превышало количество антициклонических в 2–5 раз. Наименьшее число вихрей было зарегистрировано в октябре. Наибольший разброс значений диаметра вихрей (от 0,2 до 25 км) отмечался в июле, а наименьший (от 0,4 до 9,8 км) в октябре. Среднемесячный размер максимальным был в июле как в целом (4,3 км), так и для вихрей с Az (6 км) и Zn (3,8 км) типами вращения. В то время как наименьший был в сентябре (2,2 км), для Az типа составил 2,4 км, для Zn 2,2 км. Среднемесячный диаметр антициклонических вихрей всегда преобладал над размером циклонических.

В 2011 году ситуация схожа, высокая вихревая активность зарегистрирована с июня по август, при этом так же около 30 % пришлось на июль. Однако за каждый месяц количество Zn вихрей было больше Az минимум в 10 раз. В отличие от 2007 года, в октябре 2011 года не было зарегистрировано ни одного антициклонического вихря и всего лишь 14 циклонических. Максимальная вариабельность значений диаметра вихрей (от 0,9 до 15,6 км) как и в 2007 году отмечался в июле, а наименьшая (от 1 до 4,9 км) в октябре. Среднемесячные диаметры в целом (4,4 км) и для циклонических вихрей (4,5 км) максимальны были в июне. При этом среднемесячный размер антициклонических вихрей (5,2 км) и вариабельность значений диаметра для антициклонов были максимальны в июле так же, как и в 2007 г., что позволяет судить о том, именно в этом месяце генерируются чаще всего наиболее крупные антициклонические вихри. Минимальное среднемесячное значение отмечалось в октябре. Как и в 2007 году среднемесячный диаметр антициклонических вихрей всегда преобладал над размером циклонических.

Внутрисезонное распределение вихревых структур в целом за теплый период обоих лет (Рисунок 3.6, а) показало аналогичные закономерности, что и для каждого года в отдельности.

Вихревая активность с июня по июль увеличивалась незначительно, а с июля по октябрь уменьшилась в 4,5 раза. Пик вихревой активности, который пришелся на июль, когда отмечается интенсивное формирование приповерхностного пикноклина, составил 854 вихря за месяц. При этом максимальное количество антициклонических вихрей наблюдалось в августе.



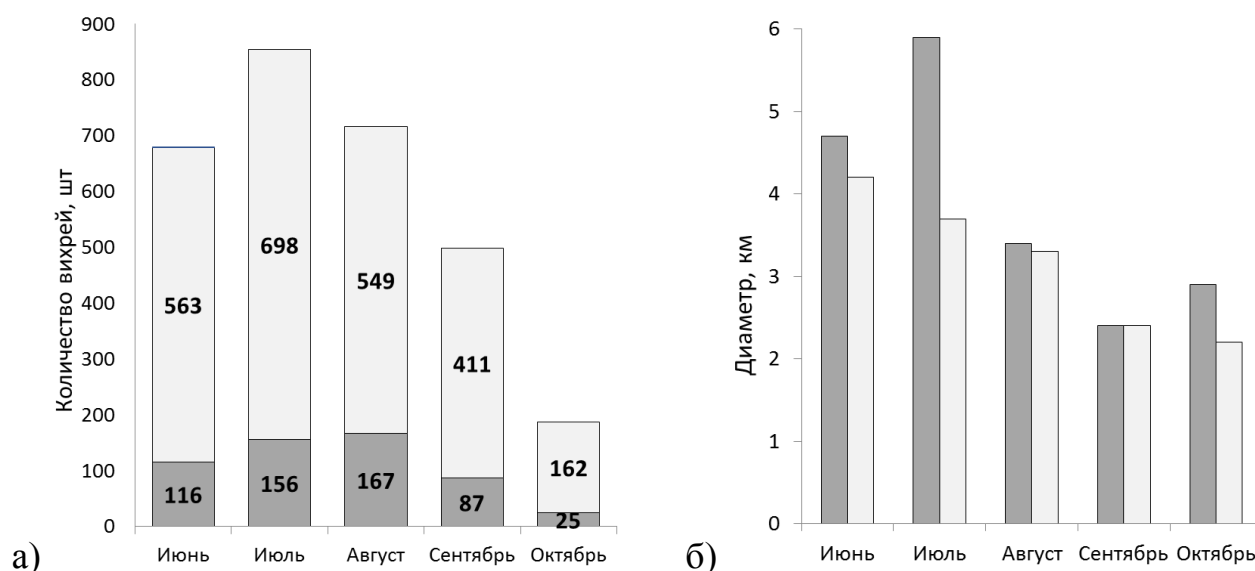


Рисунок 3.6 – Внутрисезонное распределение количества вихрей (а) и средних диаметров (б) с учетом типа вращения (темный цвет – антициклонический тип, светлый цвет – циклонический тип) в Баренцевом море

Среднемесячный диаметр всех вихрей в течение сезона варьируется от 2,3 км до 4,2 км и имеет масштаб (единицы километров) климатического значения бароклиного радиуса Россби (4,9 км) для Баренцева моря. При этом с июня по октябрь наблюдается тенденция к уменьшению среднемесячного диаметра. Однако почти во все месяцы среднемесячные диаметры антициклонических вихрей превалировали над среднемесячными диаметрами циклонических вихрей (Рисунок 3.6, б). Хотя последних было от 3 до 6,5 раза больше за каждый месяц (Рисунок 3.6, а).

### 3.2. Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны

Как было описано в разделе 3.1, вихревые структуры размером порядка единиц километров отмечались в районах фронтальных зон Баренцева моря. При этом градиенты гидрологических характеристик моря, ассоциируемые с фронтальными зонами, в первую очередь связаны с границами водных масс [Воды Баренцева моря..., 2016].

В Баренцевом море на поверхности выделяют следующие водные массы [Гидрометеорология..., 1990]:

1. атлантические воды характеризуются высокой температурой и солёностью (летом 8–10 °С и 34,5–35,0 ‰). Эта водная масса сохраняется в юго-западной части моря по всей глубине в течение всего года;
2. арктические воды имеют отрицательные температуры и пониженную солёность (летом не более 1 °С и 33–34 ‰). Они являются частью поверхностной водной массы Арктического бассейна, которая образуется к северу от Шпицбергена и Земли Франца Иосифа, и вносятся в море адвективным течением с севера;
3. прибрежные воды отличаются значительной амплитудой годового хода температуры и пониженной солёностью за счет материкового стока. Они подразделяются на Мурманскую (33,5–34,5 ‰), Беломорскую (33–34 ‰), Печорскую (от 7 до 15 °С и от 0 до 30‰), Новоземельскую (5–6 °С и 34,0–34,5 ‰) водные массы;
4. баренцевоморские воды характеризуются пониженной температурой и повышенной солёностью (летом 34,5 ‰) и образуются в результате перемешивания атлантической и арктической водных масс. В этой водной массе существуют различия по температуре за счет зависимости летнего прогрева от широты.

Границами водных масс обычно считают фронтальные зон. Для фронтальных зон характерна значительная изменчивость характеристик, обусловленная нестационарностью течений и условий теплообмена между морем и атмосферой. В Баренцевом море в качестве самой протяженной и наиболее выраженной фронтальной зоны принимают климатическую Полярную фронтальную зону. Проходя с запада на восток между 73 ° и 76 °с.ш., она пересекает все море отделяет друг от друга холодные баренцевоморские воды и теплые атлантические. Лучше всего данная фронтальная зона выделяется в западной части моря, где проходит по 74 °с.ш. В восточной половине ее положение становится менее определенным. При ширине фронтальной зоны 5-20 миль средние градиенты температуры и солёности как на западе, так и на востоке составляют 0,1–1,0 °С и 0,02–0,10 ‰ на милю, максимальные 2,5 °С и 0,4 ‰ на милю [Гидрометеорология..., 1990].

В Баренцевом море отмечаются и другие фронтальные зоны. По [Чвилев, 1991] на основе океанографических крупномасштабных съемок в море по темпе-

ратуре и солености было выделено четыре фронтальные зон (ФЗ): Полярная, прибрежная, северная и фронтальная зона зимней конвекции, которая образуется в центральной части моря в зимний период в результате конвективного перемешивания. Полярная фронтальная зона считается климатической, а Северная связана с кромкой льда, и считается сезонной. По [Родионов, Костяной, 1998] система фронтальных зон объединена в единую Северную Полярную фронтальную зону Баренцева моря, которая разделяется на (Рисунок 3.7):

I – Медвежинская ФЗ. Образуется в результате взаимодействия Медвежинского течения с водами Нордкапского течения (вдоль кромки шельфа острова);

II – ФЗ, локализованная вдоль периферии Западного Желоба. Образуется в результате взаимодействия вод северной ветви Нордкапского течения с окружающими водами;

III – ФЗ центральной возвышенности. Создается в результате взаимодействия центральной ветви Нордкапского течения с баренцевоморскими водами;

IV – ФЗ на периферии Центрального желоба. Образуется в результате взаимодействия баренцевоморских вод с водами атлантического и прибрежного происхождения;

V – ФЗ восточной части Баренцева моря. Образуются в результате взаимодействия вод Мурманского и Новоземельского течения с водами шельфа архипелага Новая Земля и область между полуостровом Канин и Новой Землей;

VI – Прикромочные арктические ФЗ. Образуются на периферии линзы холодных (распресненных) вод, образовавшихся в результате таяния льда;

VII – Прибрежные ФЗ. Образуются в результате взаимодействия баренцевоморских вод, вод прибрежной ветви Нордкапского течения, вод Мурманского течения и вод речного выноса.

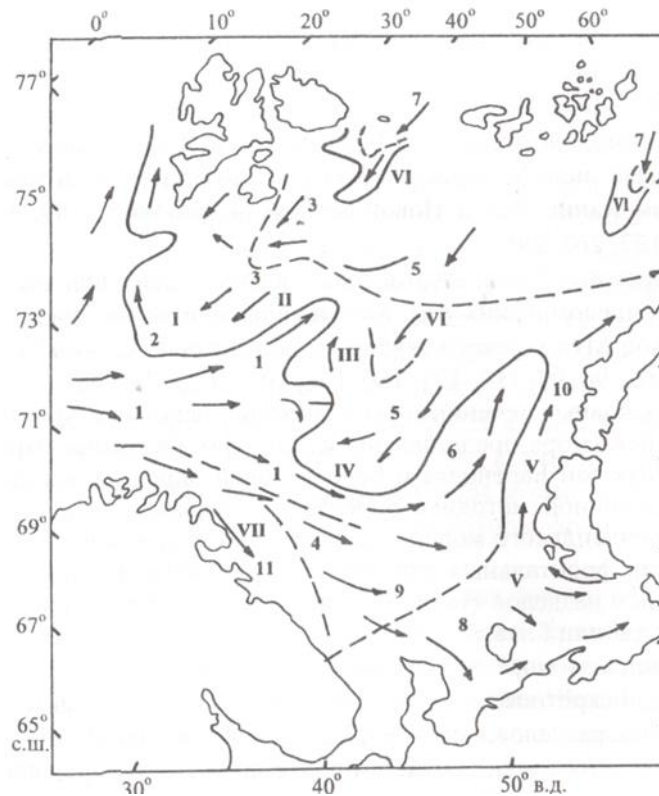


Рисунок 3.7 – Схема основных течений и фронтальных зон Баренцева моря.

Римскими цифрами обозначены фронтальные зоны: I – Медвежинская; II – Западного желоба; III – Центральной возвышенности; IV – Центрального желоба; V – Восточной части моря; VI – Прикромочая (Арктическая) и глубинные; VII – Прибрежная. Арабскими цифрами обозначены течения: 1 – Нордкапское; 2 – Медвежинское; 3 – Восточно-Шпицбергенское; 4 – Мурманское; 5 – Центральное; 6 – Новоземельское; 7 – Глубинное; 8 – Колгуево-Печерское; 9 – Канинское; 10 – Литке; 11 – Мурманское прибрежное. По [Родионов, Костяной, 1998, с.134]

По генезису можно выделить три типа ФЗ: Полярная; Прикромочная; Прибрежная. Полярная фронтальная зона (ПФЗ) объединяет в себя I – V фронтальные зоны. Ввиду того, что бассейн моря обладает значительными изменениями глубин дна, структура ПФЗ подвержена сильному влиянию топографических особенностей в большей мере обуславливающих ее мезомасштабную структуру [Воды Баренцева моря..., 2016]. Полярная ФЗ наиболее четко проявляется в западной части, по направлению на восток ее градиенты ослабевают, при этом ее положение в западной и центральной частях связывают с донной топографией [Parsons et

al., 1996]. Что касается Прикромочной ФЗ, то известно, что она является сезонной фронтальной зоной, и изменение ее положения связано с перемещениями ледовой кромки. Прибрежная ФЗ является также сезонной. Изменчивость градиентов температуры во ФЗ на разных глубинах и в разные месяцы составляет от 0,01 до 0,08 °С/км [Ожигин, 1989].

Фронты и фронтальные зоны активно исследуются по данным температуры как по спутниковым, так и по *in-situ* данным [Родионов, Костяной, 1998; Kushnir et al., 2011; Vage et al., 2014; Basedow et al., 2014; Oziel et al., 2016; Воды Баренцева моря..., 2016; Морозов и др., 2017]. Однако в большинстве работ, посвященных изучению фронтальных зон Баренцева моря, рассматриваются сравнительно небольшие участки моря, а сами данные носят отрывочный характер, что связано со сложностью их идентификации по единым критериям на всей акватории моря.

Для выявления связи между положениями вихрей и районами температурных фронтальных зон, производилось сопоставление положений центров поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей и градиента ТПМ. На Рисунке 3.8 приведен пример подобного сопоставления по данным 2007 года для района юго-восточнее архипелага Шпицберген. Видно, что большая часть проявлений вихревых структур отмечается внутри и вблизи зон повышенного градиента, которые связаны с фронтальными зонами различного генезиса. Регистрация вихревых структур вблизи и внутри фронтальных зон привела к необходимости исследования фронтальных зон и их характеристик.

Для анализа мезомасштабной (внутримесячной) и синоптической (внутри-сезонной) изменчивости поверхностных положений фронтов и оценки их роли в распределении проявлений субмезомасштабных вихрей в Баренцевом море использовались среднесуточные данные ТПМ продукта GHRSSST Level 4 OSTIA Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (Asia-Pacific data-research center) за период с июня по октябрь 2007 и 2011 гг. Данные уровня обработки L4 генерируются путем объединения спутниковых (с микроволновых и инфракрасных датчиков) и локальных наблюдений (с дрейфующих и заякоренных буев и

судов) на сетке  $0,054^\circ$  на  $0,054^\circ$ . Данные получены с сайта Asia-Pacific data-research center.

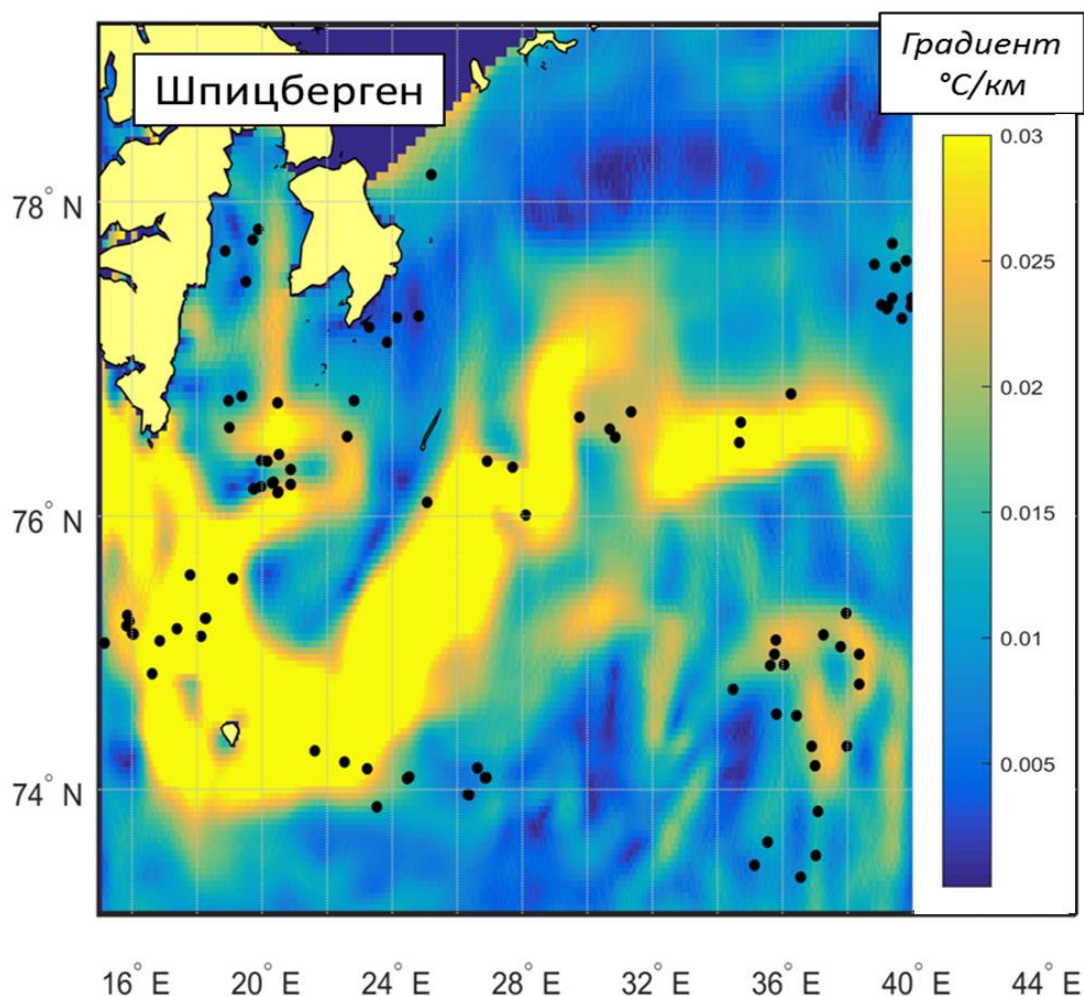


Рисунок 3.8 – Карта среднедекадных значений градиента ТПМ и положения центров проявлений субмезомасштабных вихрей (черные круги) за 1 декаду июля 2007 г.

Методика исследования фронтальных зон заключалась в следующем. Рассчитывались декадные и среднемесячные поля температуры путем осреднения суточных данных температуры продукта OSTIA. Расчет полей среднемесячных и среднедекадных градиентов температуры для каждой точки поля  $(i, j)$  производился по Формулам (3.1–3.5) с использованием осредненной ТПМ за исследуемый период по методике, изложенной в [Воды Баренцева моря..., 2016].

Шаги расчетной сетки (км) по параллели ( $\Delta S_1$ ) и меридиану ( $\Delta S_2$ ) рассчитывались по формулам 3.1 и 3.2 соответственно; зональная  $(\frac{\partial D}{\partial x})$  и меридиональная  $(\frac{\partial D}{\partial y})$  составляющие градиента в точке – по формуле 3.3 и 3.4 соответственно; модуль горизонтального градиента ( $|GradD|$  в °C/км) – по формуле 3.5:

$$\Delta S_1 = 1.852 \times |\lambda_{j+1} - \lambda_j| \times \cos \frac{\varphi_{i+1} + \varphi_{i-1}}{2}, \quad (3.1)$$

$$\Delta S_2 = 1.852 \times |\varphi_{i+1} - \varphi_i|, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{D_{i,j+1} - D_{i,j-1}}{2 \times \Delta S_1}, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial D}{\partial y} = \frac{D_{i+1,j} - D_{i-1,j}}{2 \times \Delta S_2}, \quad (3.4)$$

$$|GradD| = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial y}\right)^2}, \quad (3.5)$$

где  $\lambda$  – долгота,

$\varphi$  – широта,

$D$  – значение параметра (ТПМ) в узлах регулярной сетки ( $i, j$ ).

При вычислениях точки имели следующую индексацию (Рисунок 3.9):

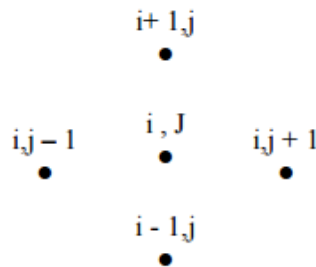


Рисунок 3.9 – Схема узлов сетки с индексами  $i, j$

Для выделения фронтальных зон по [Федоров, 1983] градиент температуры внутри них должен быть на порядок больше климатического значения градиента. Климатический градиент, в частности, для Баренцева моря составляет  $0,01$  °C/км, а на разных глубинах в разные месяцы варьируется от  $0,01$  до  $0,08$  °C/км [Ожигин, 1989]. В связи с этим применить критерий Федорова при выделении фронтов Баренцева моря оказалось невозможным, так как уже при градиенте больше климатического минимум в три раза фронтальные зоны распадаются на отдельные пят-

на повышенных градиентов или не проявляются [Воды Баренцева моря...,2016]. Поэтому фронтальной зоной для Баренцева моря было принято считать те области, в которых градиент температуры больше  $0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$  [Чвилев, 1990, 1991].

По картам среднедекадных и среднемесячных градиентов ТПМ выделялись области максимумов, которые идентифицировались как фронтальные зоны. Внутри каждой фронтальной зоны выбирались характерные изотермы ТПМ, соответствующие положению самого интенсивного фронтального раздела, выделенного по карте градиентов. Используя положения характерных изотерм, определялась линия основного фронта для каждой декады и каждого месяца, что принималось за среднедекадные и среднемесячные положения фронтов соответственно. Последующее объединение этих данных позволило оценить внутримесячную и внутрисезонную изменчивость поверхностных положений фронтов [Зимин и др.,2018]. Для Баренцева моря исследовались Прикромочная и Полярная фронтальная зона. Данные фронтальные зоны являются наиболее крупными в Баренцевом море, а также лучше всего в сравнении с другими проявляются в данных ТПМ. Ширина и максимальный градиент ТПМ на фронте для фронтальных зон оценивались с использованием трех меридиональных разрезов (для Баренцева  $20^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$  и  $50^{\circ}$  в.д. (Рисунок.3.10). Данные разрезы были выбраны для оценки характеристики фронтов в разных частях моря.

На Рисунке 3.11 представлена методика выделения характеристик на меридиональном разрезе в Баренцевом море по  $50^{\circ}$  в.д. На графике выделяются два максимальных градиента ТПМ, которые показывают положения фронтов на данном разрезе ( $\Phi$ ). Кроме этого по графику выделяется ширина ( $L$ ) каждой фронтальной зоны, которая определяется по границе удвоенного климатического градиента ( $0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ).



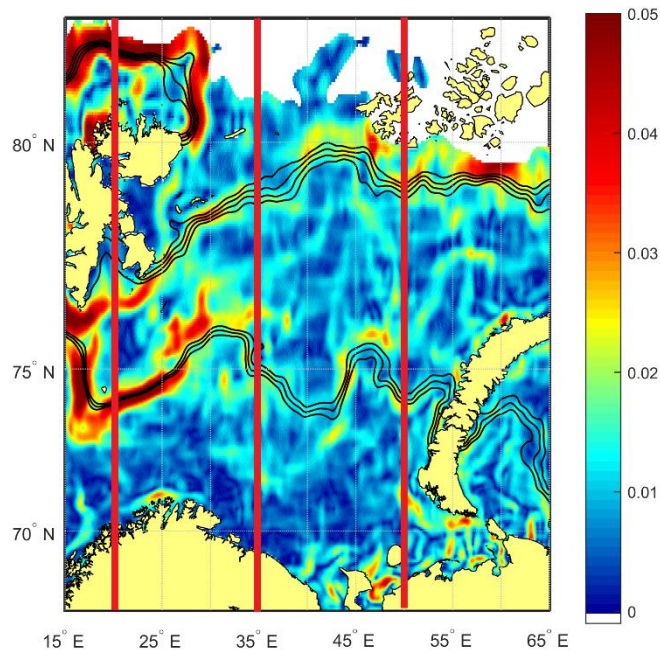


Рисунок 3.10 – Карта градиента ТМП за третью декаду сентября 2011 года, шкала в  $^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Приведенные изолинии являются изолиниями ТПМ, проходящими через зоны высоких градиентов ТПМ и соответствующими основным фронтальным зонам, три вертикальные линии – положения разрезов для определения характеристик ФЗ

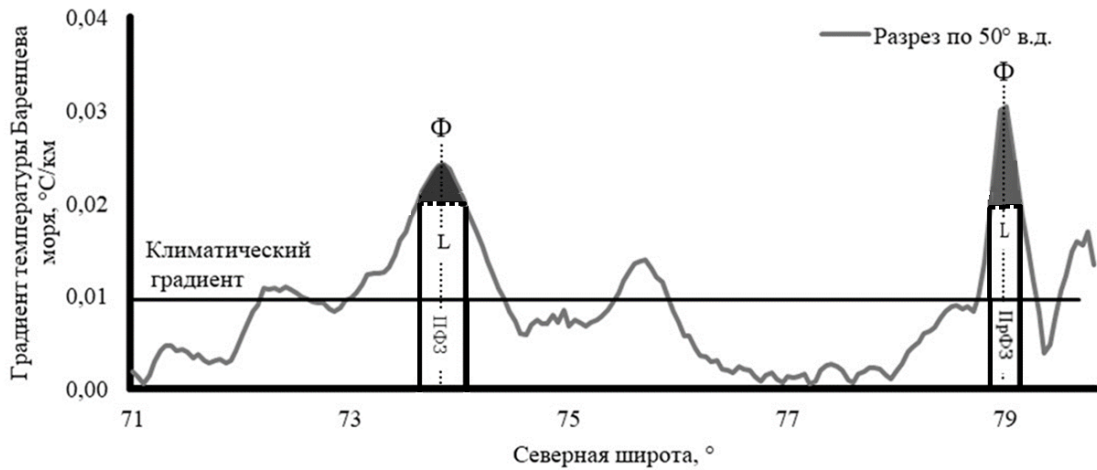


Рисунок 3.11 – Разрез градиента среднемесячной температуры на  $50^{\circ}$  в.д. за август 2011, где ПФЗ – Полярная фронтальная зона, ПрФЗ – Прикромочная фронтальная зона, L – ширина фронтальной зоны,  $\Phi$  – максимальный градиент ТПМ и положение фронта, горизонтальной линией показан климатический градиент  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{км}$

Для оценки роли фронтальной динамики на распределение субмезомасштабных вихрей строились композитные карты за июнь – сентябрь 2007 и 2011 гг. за каждый месяц, аналогичные картам для Белого моря. На карты наносились область изменчивости ФЗ и положения вихрей за месяц. Область изменчивости ФЗ включала в себя область смещения положения декадных фронтов за месяц вместе с областью средней за сезон полуширины ФЗ (50 км). При анализе композитных карт производился подсчет количества поверхностных проявлений вихрей за каждый месяц, попадающих в область изменчивости ФЗ.

В Баренцевом море за 2007 и 2011 года поле градиентов температуры поверхности моря имело пятнистый характер с зонами повышенных и пониженных градиентов (см. Рисунок 3.10). Наибольшие градиенты наблюдались в западной части моря в районе острова Медвежьего, где близко контактируют арктические и атлантические воды. В этом районе максимальный градиент составлял 0,05–0,07 °С/км, при движении с запада на восток градиенты значительно ослабевали до 0,01–0,02 °С/км. В северной части моря градиенты были до 0,03–0,05 °С/км. Фоновый градиент составил менее 0,01 °С/км. Также регистрировались высокие градиенты (более 0,03 °С/км) в районе Беломорского и Печорского стоковых течений.

Прикромочная фронтальная зона имела среднедекадную ширину от 67 км до 111 км в 2007 году и от 56 км до 109 км в 2011 году. Максимальный среднедекадный градиент ФЗ по разрезам варьировался от 0,02 до 0,07 °С/км. Полярная фронтальная зона имела ширину от 102 км до 172 км в 2007 году и от 86 км до 170 км в 2011 году. Максимальный среднедекадный градиент Полярной ФЗ по разрезам в оба года составлял от 0,02 до 0,06 °С/км.

Прикромочная ФЗ формируется, как описывалось ранее, за счет таяния кромки арктического льда. Основной фронт этой зоны динамично перемещается по всей северной части Баренцева моря как в 2007 году, так и в 2011 году (Рисунок 3.12, а, в). В оба года самое южное положение фронта наблюдалось в июне, а самое северное – в августе. В оба года в июне северо-восточнее острова Медвежий положение Прикромочного фронта находилось довольно близко к положе-

нию Полярного фронта. В июле фронт значительно продвигается на север в сравнении с июнем из-за интенсивного отступления кромки льда за счет таяния.

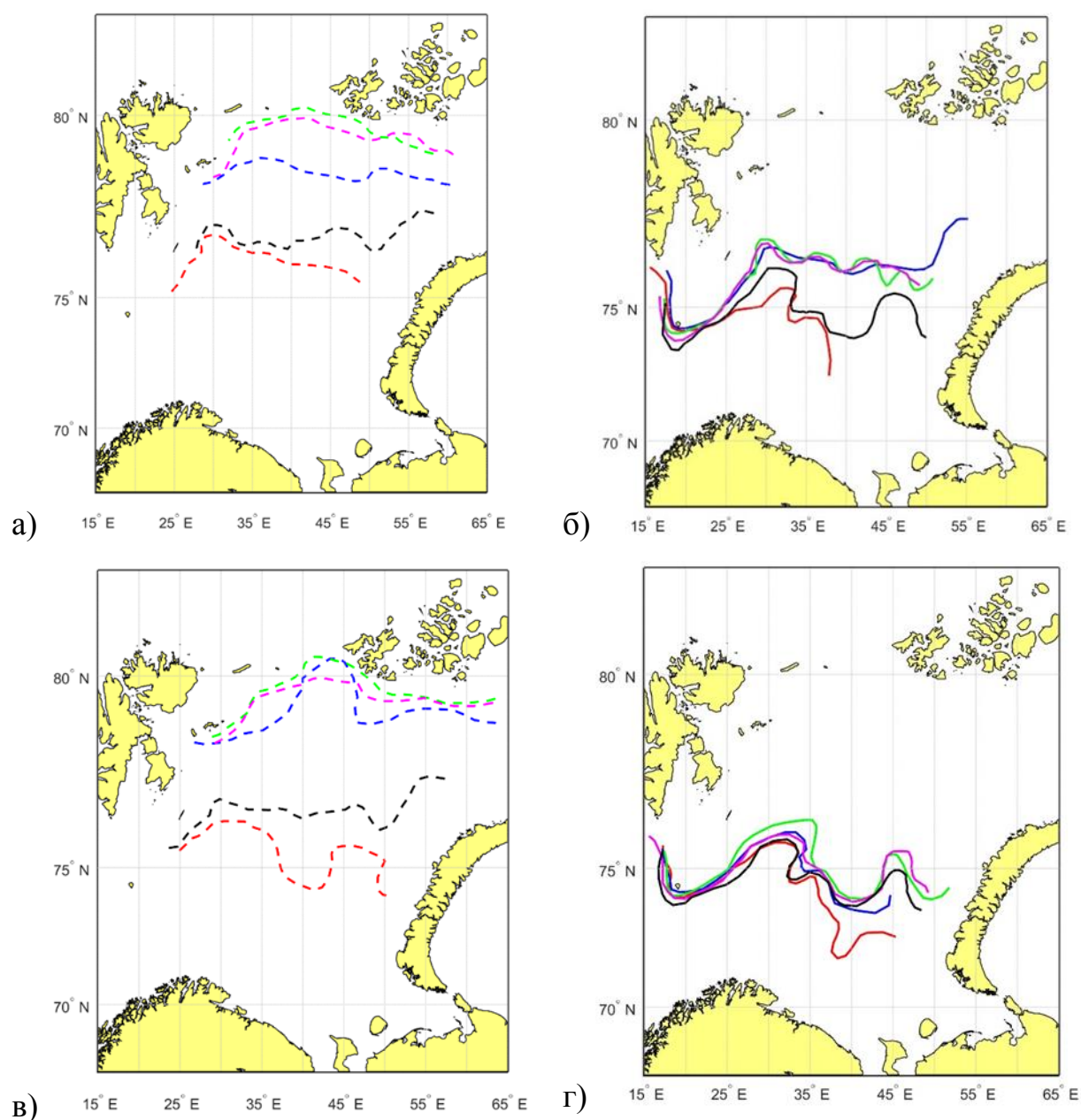


Рисунок 3.12 – Среднемесячные положения Прикромочного и Полярного фронтов в 2007 году (а, б) и в 2011 году (в, г). Пунктиром обозначено положение Прикромочного фронта, сплошной линией – Полярного фронта. Красный цвет – июнь, синий – июль, зеленый – август, розовый – сентябрь, черный – октябрь

При этом в июле 2011 фронт имел большую изменчивость, чем в июле 2007. В августе в оба года Прикромочный фронт достигнул практически северной границы моря между архипелагом Шпицберген и Землей Франца-Иосифа. В сентяб-

ре положения фронта близко в оба года к положению в августе. Однако со второй половины сентября начинается смещение положения фронта на юг, что так же отмечалось в монографии [Родионов, Костяной, 1998], а в октябре положение было близко к июню.

Полярная ФЗ является квазистационарной в западной части моря, где сконцентрированы максимальные градиенты ТПМ. Фронт этой зоны (Рисунок 3.12, б, г) подвержен наибольшей динамике в восточной части моря, при этом область изменчивости положения фронта в 2007 году больше, чем в 2011 году. За счет поступления теплых атлантических вод и поверхностного прогрева восточная часть фронта в течение июня – августа активно продвигается на восток к архипелагу Новая Земля. Изменение температуры на большой площади и значительная динамика фронта указывают на то, что тепловой режим моря в значительной мере определяется крупномасштабными процессами, которые в отдельные месяцы характеризовались усилением адвекции тепла из Норвежского моря и интенсификацией теплообмена с атмосферой. При этом положение фронта в августе 2007 года немного севернее, чем в 2011 году, хотя оба года малоледовитые.

Для выявления роли фронтальной динамики в формировании субмезомасштабных вихрей анализировались композитные карты, на основе которых производилась количественная оценка вихрей внутри областей изменчивости ФЗ (Таблица.3.3).

В 2007 году за выбранный период было зарегистрировано 2014 субмезомасштабных вихрей (Рисунок 3.13). При этом почти четверть из них попадали в области изменчивости Прикромочной и Полярной ФЗ (Таблица 3.3). Максимальное количество вихрей внутри областей изменчивости по месяцам регистрировалось в июле (38,1 %), когда отмечалось максимальное смещение среднедекадных положений фронтов (Рисунок 3.13, в). В июне и августе (Рисунок 3.13, а, д) внутри областей изменчивости отмечалось 24 % и 13,4 % вихрей соответственно. В июне область изменчивости Прикромочной ФЗ больше, чем в августе, а у Полярной ФЗ наоборот, хотя вихрей внутри каждой из областей примерно одинаково.

Таблица 3.3 – Количество вихрей внутри областей изменчивости фронтальных зон по годам и месяцам в Баренцевом море

| Месяц    | Количество вихрей |                            |                        |                |                  |                            |                        |                |
|----------|-------------------|----------------------------|------------------------|----------------|------------------|----------------------------|------------------------|----------------|
|          | 2007 год          |                            |                        |                | 2011 год         |                            |                        |                |
|          | Всего (100%), шт  | Область Прикромочной ФЗ, % | Область Полярной ФЗ, % | Обе области, % | Всего (100%), шт | Область Прикромочной ФЗ, % | Область Полярной ФЗ, % | Обе области, % |
| Июнь     | 493               | 12,8                       | 11,2                   | 24             | 186              | 9,7                        | 12,9                   | 22,6           |
| Июль     | 637               | <b>20,3</b>                | <b>17,8</b>            | <b>38,1</b>    | 217              | <b>43,8</b>                | 5,5                    | <b>49,3</b>    |
| Август   | 522               | 6,7                        | 6,7                    | 13,4           | 194              | 13,9                       | <b>16</b>              | <b>29,9</b>    |
| Сентябрь | 362               | 6,9                        | 3                      | 9,9            | 136              | 7,4                        | 2,2                    | 9,6            |
| Итог     | 2014              | 12,5                       | 10,7                   | <b>23,2</b>    | 733              | 20,5                       | 9,5                    | <b>30</b>      |

Меньше всего (~ 10 %) вихрей за месяц внутри обеих областей отмечалось в сентябре (Рисунок 3.13, ж), при этом сами области были минимальны за весь период.

В 2011 году в Баренцевом море с июня по сентябрь отмечалось 733 вихря, из которых 30 % регистрировались внутри областей изменчивости ФЗ (Таблица 3.3). В июле внутри областей было зарегистрировано максимальное количество - почти половина вихрей за месяц (49,3 %). Именно в этом месяце отмечалась максимальное смещение положений фронтов, Прикромочный фронт в течение июля сместился на несколько сотен километров (Рисунок 3.12, г) на север. В июне в область изменчивости ФЗ попало чуть меньше четверти вихрей за месяц (Рисунок 3.13, б), и почти треть вихрей внутри областей отмечалась в августе 2011 года, хотя положения декадных фронтов варьировались незначительно (Рисунок 3.13, е). В сентябре 2011 г. количество вихрей внутри областей было наименьшим, как и в 2007 г., около 10 % (Рисунок.3.13, з).

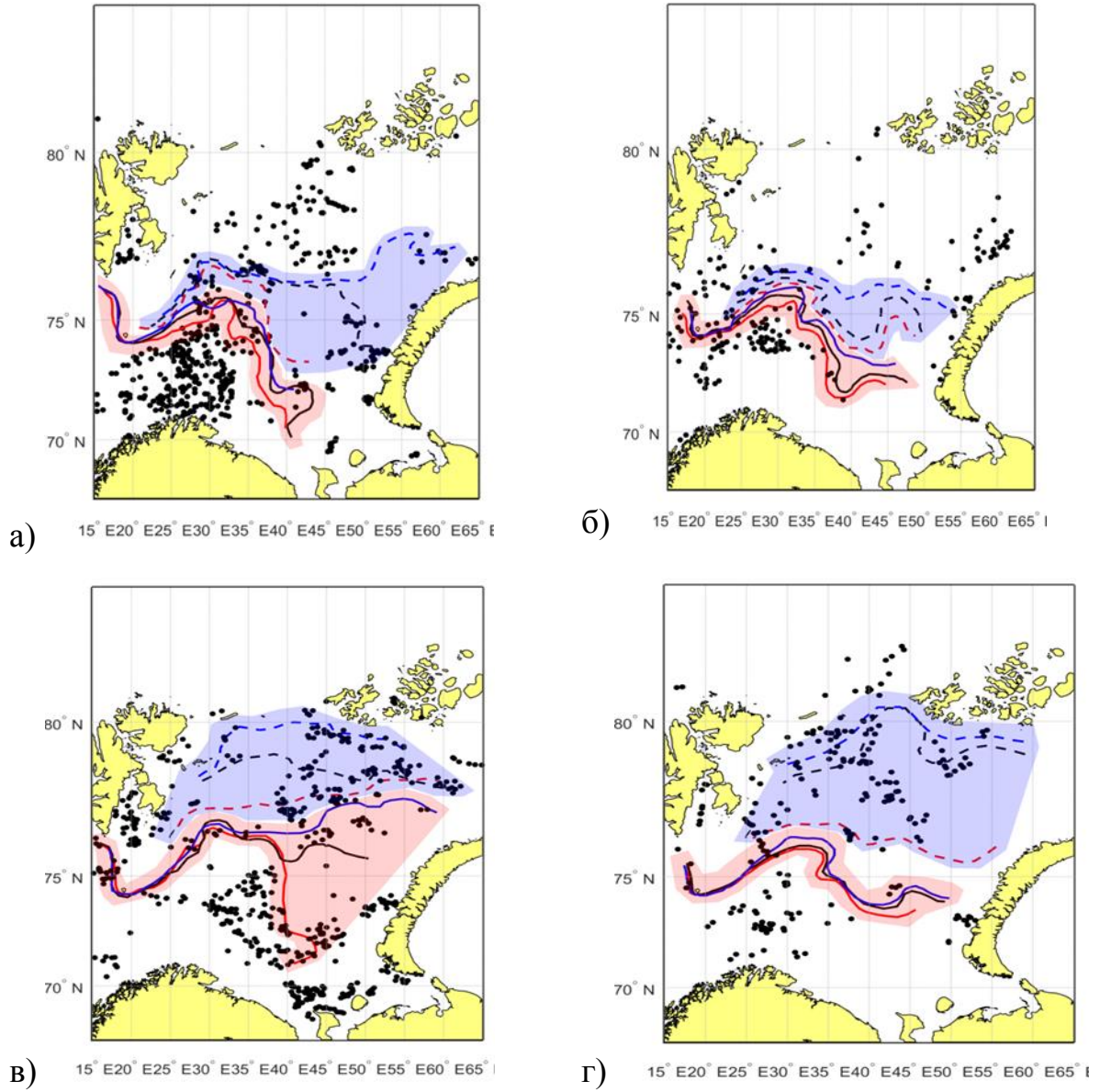
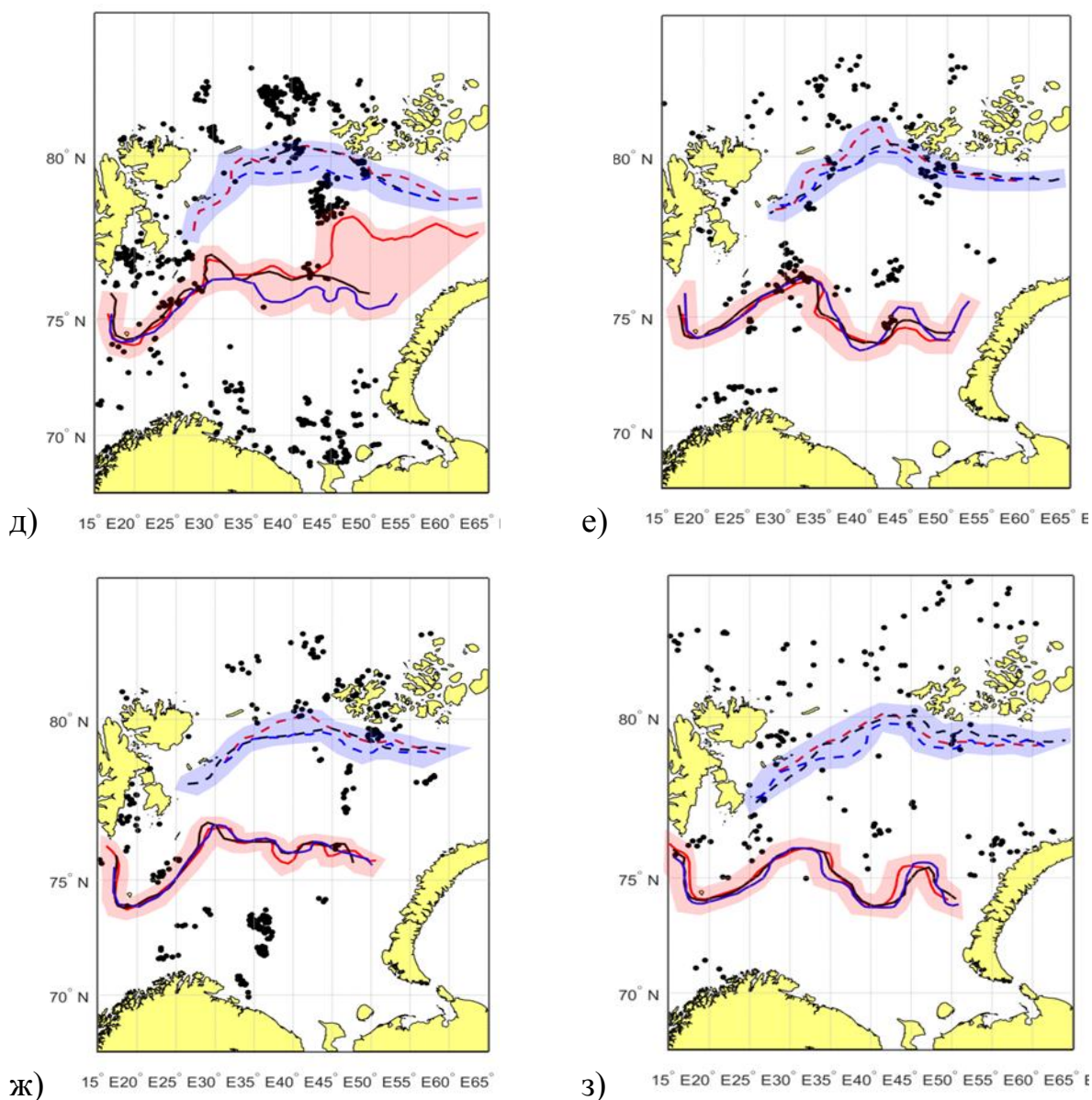


Рисунок 3.13 – Композитные карты, где а, в, д, ж – июнь, июль, август, сентябрь 2007 г., б, г, е, з – те же месяцы 2011 г. Пунктирная линия – положения Прикромочного фронта, сплошная линия – Полярного фронта, красная линия – положения фронтов и вихрей за первую декаду, черная – за вторую декаду, синяя – за третью декаду. Синие и красные области – области изменчивости Прикромочной и Полярной ФЗ соответственно



Продолжение рисунка 3.13

### 3.3. Вихревые структуры над неровностями дна и приливные процессы

Пространственное распределение положений центров поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей в Баренцевом море (Рисунок 3.3) показало, что вихри неоднократно регистрировались в районах неровностей дна. Анализ градиента глубин (Рисунок 3.14, а) позволил выявить, что наибольшие неровности дна находятся в северной части моря, где вихри часто регистрируются на протяжении практически всего сезона, когда эти области свободны ото льда и вне зависимости от положения фронтов.

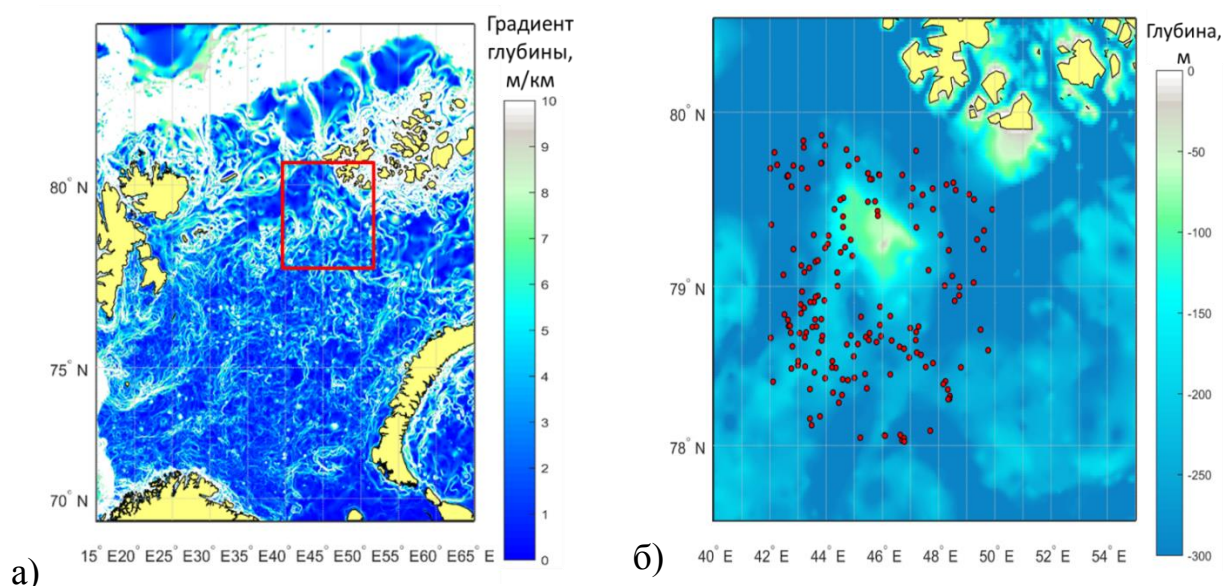


Рисунок 3.14 – Карта градиента глубин Баренцева моря (а), где красным квадратом отмечен фрагмент (б), сочетающий в себе карту глубин и положения центров вихрей за теплый сезон 2007 г., которые обозначены красными точками

Для связи между положениями вихрей и топографическими эффектами, как причиной формирования вихревых структур в районах неровностей дна под влиянием приливной динамики, производился анализ параметров проявлений вихревых структур в районе юго-западнее ЗФИ, который характеризовался значительными неровностями дна (Рисунок 3.13, б). Характеристики вихрей, зарегистрированных в исследуемом районе на основе данных за 2007 г., представлены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики вихрей в районе южнее ЗФИ (Баренцево море) по данным 2007 года

| Месяц    | Количество, шт |     |       | Средний диаметр, км |
|----------|----------------|-----|-------|---------------------|
|          | Az             | Zn  | Всего |                     |
| Июнь     | 3              | 9   | 12    | 2,9                 |
| Июль     | 2              | 65  | 67    | 2,7                 |
| Август   | 19             | 47  | 66    | 3,5                 |
| Сентябрь | –              | 12  | 12    | 1,6                 |
| Октябрь  | –              | 14  | 14    | 3,4                 |
| Итого    | 24             | 147 | 171   | 3                   |



Субмезомасштабные вихревые структуры вблизи исследуемой банки регистрировались в течение всего теплого сезона. Характеристики зарегистрированных вихрей в целом соответствовали средним по акватории: отмечалось значительное преобладание структур с циклоническим типом вращения, и преимущественно диаметры вихрей имели масштаб бароклинного радиуса Россби. Сопоставление времени регистрации вихрей в районе с данными по приливу в пункте м. Флора показало, что 57 % (97 шт.) вихрей отмечалось в период сизигийного прилива, когда приливные течения имеют максимальные скорости. В то время как на квадратуру пришлось только 20 % (34 шт.).

### Выводы к главе 3

В результате анализа радиолокационных изображений за теплый период 2007 и 2011 гг. в Баренцевом море было зарегистрировано 2934 поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур со средним диаметром (3,6 км) порядка климатического бароклинного радиуса Россби, при этом чаще всего встречались вихри от 2 до 4 км (~ 45 %). Среди зарегистрированных структур почти 80 % вихрей имели циклонический тип вращения, а также имело место быть преобладание средних диаметров антициклонических вихрей над диаметрами циклонических.

Чаще всего вихри встречались северо-западнее ЗФИ, возле восточного берега острова Западный Шпицберген, в юго-западной части моря (в районе поступления атлантических вод), в центральной части пролива между ЗФИ и Новой Землей, в районе полуострова Канина. Максимальная встречаемость вихрей отмечалась севернее Кольского полуострова. При этом районы частой встречаемости от году к году преимущественно сохранялись.

Наибольшее число проявлений за сезон обоих лет отмечалось в начале сезона в период интенсивного формирования приповерхностного пикноклина из-за распространения пресных вод в результате сильного таяния льда и летнего прогрева поверхностного слоя. Средние параметры вихрей от года к году и в течение

теплого сезона в обоих морях в целом сохранялись. При этом пик вихревой активности за каждый год отмечался в июле.

Как минимум около 90 % зарегистрированных проявлений имели масштаб бароклинного радиуса Россби. При этом чаще всего встречались вихри размером от 2 до 4 км. Для выявленных вихрей с диаметром порядка радиуса Россби бароклинная неустойчивость в районах фронтальных зон может быть одной из основных причин формирования данных вихрей.

В Баренцевом море по данным за июнь-сентябрь 2007 и 2011 годов регистрировались Прикромочная и Полярная фронтальные зоны, а также были детектированы положения их основных фронтов. Анализ внутрисезонной и внутримесячной динамики ФЗ показал значительную нестационарность термических фронтов на поверхности. Прикромочный фронт в течение теплого периода перемещается по всей северной части Баренцева моря, наиболее динамичен в июле, а самого северного положения достигает в августе в оба года. Полярный фронт квазистационарен в западной части моря, с июня по август продвигается на восток к архипелагу Новая Земля, при этом наибольшая динамика отмечается в 2007 году.

Сопоставление положений центров поверхностных проявлений вихрей и областей изменчивости фронтальных зон показал, что вихревая активность внутри областей изменчивости ФЗ наиболее интенсивна в период наибольшей фронтальной динамики, когда области изменчивости фронтальных зон максимальны. Наибольшее смещение положений фронтов отмечалось в июле в оба года.

Совместный анализ положений центров поверхностных проявлений вихревых структур над неровностями дна и периодами приливных течений позволило подтвердить связь между ними. Чаще всего вихревые структуры над неровностями (больше половины вихрей) дна регистрируются в сизигийный прилив, когда приливные течения максимальны.

Результаты исследований, представленные в третьей главе диссертации, опубликованы в [Атаджанова и др., 2016а, 2016б, 2017а, 2017б, 2017в, 2017г, 2018а, 2018б; Зимин и др., 2015б, 2018а, 2018б; Коник и др., 2017б, 2018; Свергун и др., 2017а, 2017б, 2017в, 2018].

## ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В КАРСКОМ МОРЕ

### 4.1. Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур

Для Карского моря для выявления особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей аналогично Баренцеву морю спутниковые РЛИ ENVISAT ASAR в тех же режимах съемки за июнь-октябрь 2007 и 2011 гг. (900 и 275 РЛИ соответственно). Покрытие изображениями представлено на Рисунке 4.1. Данные так же были получены в Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ в рамках проекта МЕГАГРАНТ.

Покрытие моря снимками в теплый период 2007 года представлено на (Рисунок 4.1, б). В целом большую часть акватории охватывает более 150 изображений, исключения составляют юго-западная часть моря и область севернее, западнее и южнее Северной Земли, где покрытие составляло менее 100 снимков.

Для 2011 г. покрытие спутниковыми РЛИ изображено на Рисунке 4.1, в. Покрытие изображениями акватории Карского моря за весь сезон было еще более неравномерным, чем в 2007 году и в среднем было от 50 до 100 изображений, за исключением южной части моря, где оно равнялось менее 30 снимков на единицу площади (Рисунок 4.1, в).

В Карском море (Таблица 4.1) в 2007 году почти половина всех РЛИ пришлось на октябрь, в то время как за июнь (когда большая часть моря все еще была покрыта льдом) и сентябрь обеспеченность изображениями составила чуть больше 10 %. В июле и августе акваторию моря покрывало примерно по 20% от всех РЛИ.

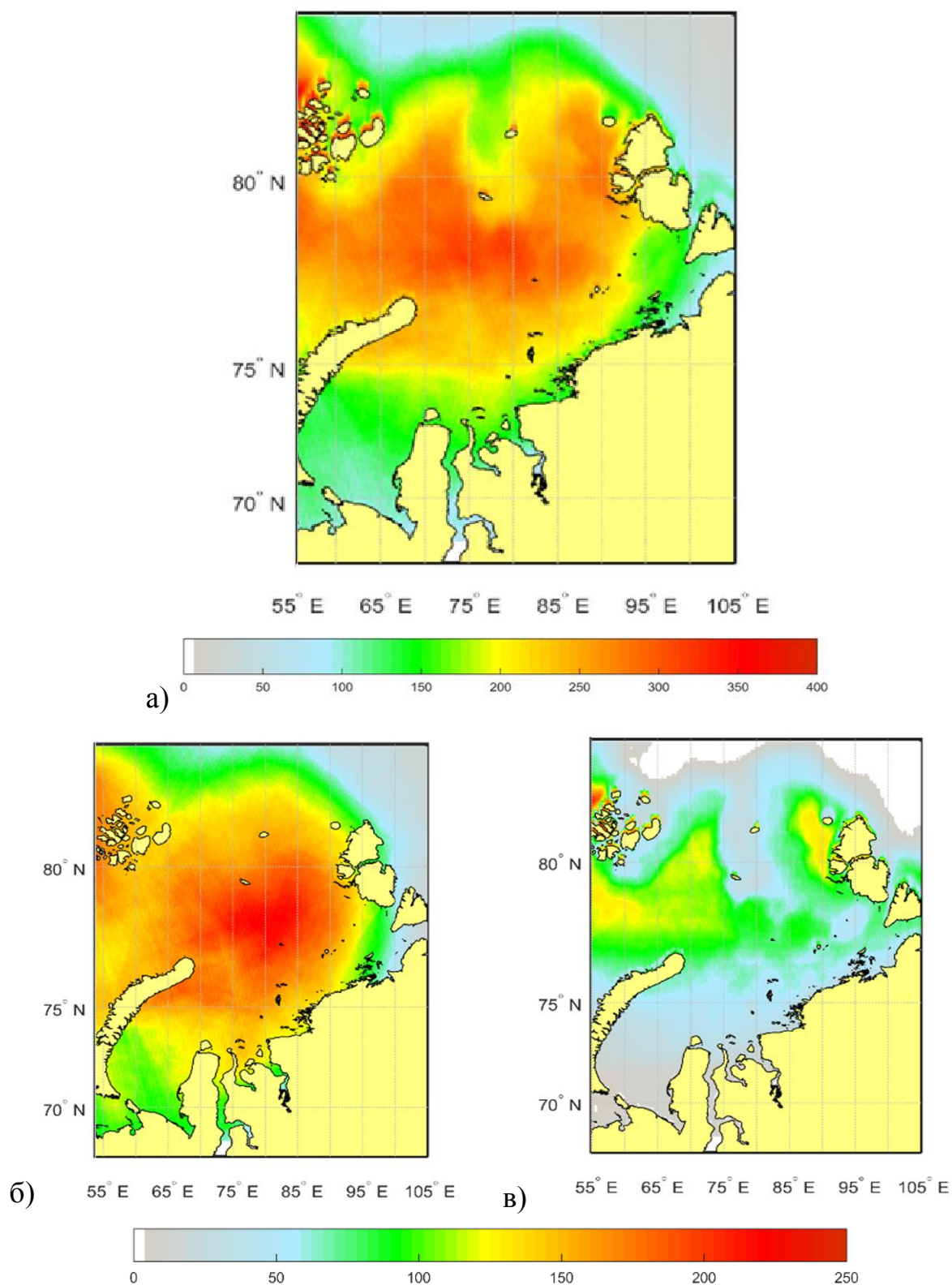


Рисунок 4.1 – Карты покрытия акватории Карского моря за июнь – октябрь за два года (а) и по годам 2007 (б), 2011 (в) с учетом ледовых и ветровых условий, шкала в шт.

Таблица 4.1 – Количество радиолокационных изображений за каждый год

| Месяц       | 2007 год | 2011 год |
|-------------|----------|----------|
| Июнь        | 46       | 37       |
| Июль        | 199      | 57       |
| Август      | 154      | 59       |
| Сентябрь    | 57       | 47       |
| Октябрь     | 444      | 75       |
| Весь период | 900      | 275      |

Максимальное число РЛИ (почти одна треть) пришлось на октябрь (Таблица 4.1), минимальное количество РЛИ было в июне составило 13 %. В июле и августе число снимков было примерно одинаковым – по 20 %. В сентябре было 17 %.

Методика детектирования поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей и выделения их характеристик в Карском море была такой же, как для Белого и Баренцева морей (раздел 2.2).

Вихреобразование в Карском море преимущественно сконцентрировано в центральной и юго-западной частях моря, где глубины были до 100 м (Рисунок 4.2, а). Всего за теплый период 2007 и 2011 гг. было зарегистрировано 1444 малых вихрей, из них 91 вихрь был антициклоническим, 1353 – циклонический. Причины преобладания циклонических вихрей аналогичны рассмотренным ранее для Белого и Баренцева морей.

С относительной частотой встречаемости более 0,1 (когда вихри отмечались на каждом десятом снимке) вихревые структуры встречались в районах распространения речных вод и формирования сезонного Стокового фронта, а именно между северной оконечностью Новой Земли и западным берегом полуострова Ямал, в центральной части шельфа Карского моря. С такой же частотой они регистрировались юго-западнее Северной Земли, где имеются значительные топографические неровности с перепадами глубин до 150 м. Наибольшая частота встречаемости (частота 0,18 или чаще, чем на каждом 6 снимке) обнаружена южнее се-

верной оконечности Новой Земли (отмечено кругом на Рисунке 4.2, б). Также в этом месте отмечалось максимальное количество вихрей 11 штук на 1 тыс. км<sup>2</sup>.

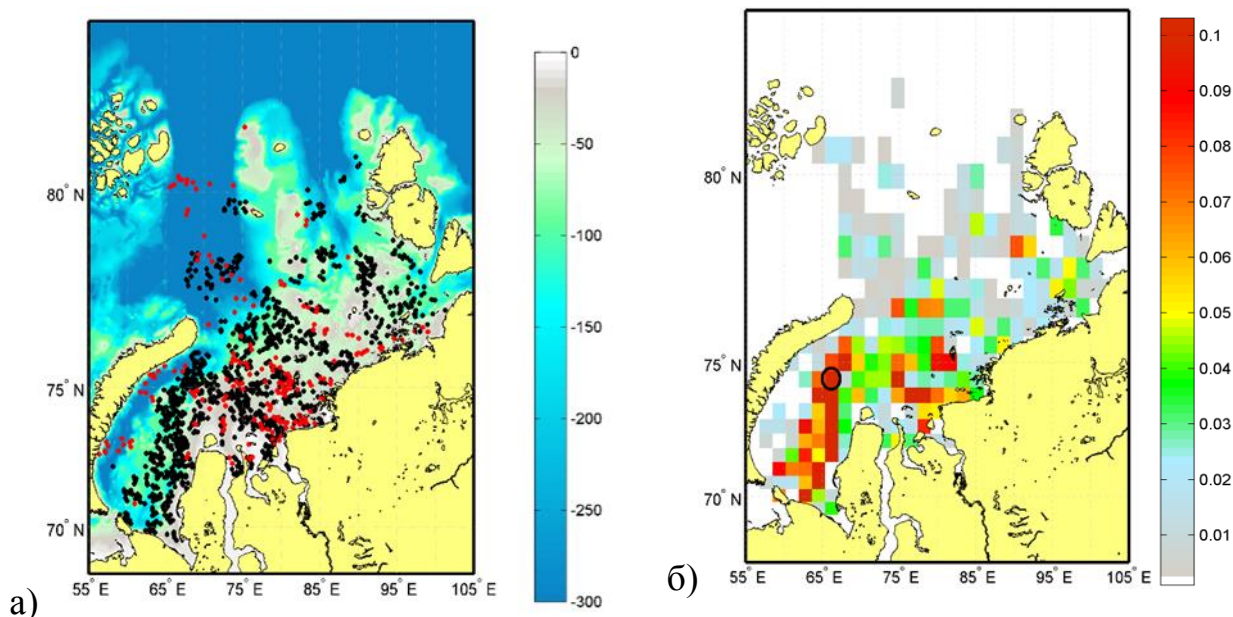


Рисунок 4.2 – Распределение вихрей в Карском море. (а)- Центры вихревых структур, где черными кружкам показаны вихри за 2007 год, красными – за 2011 год, шкала показывает глубину в м. (б) – Относительная частота встречаемости вихрей на РЛИ в условных единицах, где кругом отмечен район с максимальным значением частоты

Изменчивость распределения вихрей по пространству за теплый период двух лет по месяцам для Карского моря представлена на Рисунке 4.3. В июне вихри регистрировались только в 2011 году у берегов Новой Земли, вблизи Пясинского залива и западнее островов Арктического Института (Рисунок 4.3, а).

В июле (Рисунок 4.3, б) вихри начали проявляться в юго-западной и центральных частях моря, когда интенсивно формировался тонкий пикноклини была интенсивная фронтальная динамика. Вихри регистрировались в зоне распространения речных вод: севернее и северо-западнее о-вов Известий ЦИК; при выходе на мелководье из Обской губы (западнее острова Свердрупа); в южной части желоба Святой Анны вблизи кромки льда, что может быть связано как с топографическими эффектами, так и с неустойчивостью в районе Прикромочной ФЗ. Кроме

этого вихри регистрировались на перепаде глубин с западной стороны от п-ва Ямал. В 2007 году в этом районе отмечались высокие градиенты ТПМ за счет таяния льда вблизи берега Новой Земли и как следствие образования тонкого пикноклина, в то время как в 2011 году лед как раз долго таял вблизи полуострова Ямал, а вихри отмечались возле Новой Земли.

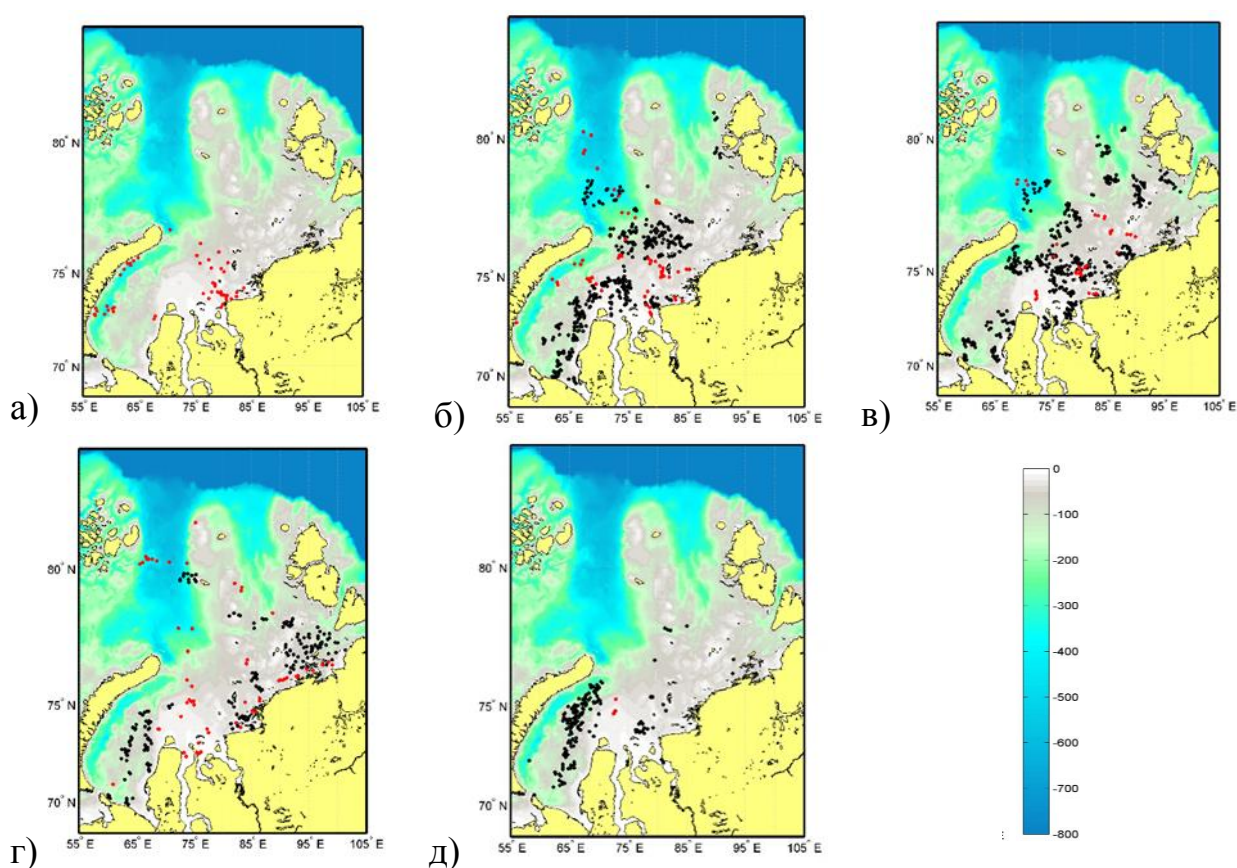


Рисунок 4.3– Пространственное распределение центров малых вихревых структур на картах глубин (шкала в м) по месяцам: июнь (а); июль (б); август (в); сентябрь (г); октябрь (д). Черным цветом отмечены центры вихрей за 2007 год, красным – за 2011 год

По сравнению с июлем в августе (Рисунок 4.3, в) вихревые структуры располагались на большей части акватории. Наибольшая концентрация вихрей отмечалась в центральной части моря в зоне распространения речных вод. Так же, как и в июле, вихри отмечались в южной части желоба Св. Анны, однако западнее п-ова Ямал количество вихрей значительно сократилось. Неоднократно вихри реги-

стрировались вблизи неровностей дна (южная часть желоба Воронина, вблизи западных берегов Северной Земли).

В сентябре (Рисунок 4.3, г) вихри встречались лишь в отдельных небольших районах. Как и в августе, в сентябре вихри встречались чаще всего восточнее центральной части Новоземельского желоба. Значительно увеличилась встречаемость вихрей юго-западнее Северной Земли. Кроме этого вихри регистрировались западнее острова Визе на периферии желоба Св. Анны и на мелководье вблизи Пясинского залива.

В октябре (Рисунок 4.3, д) вихри в основном были сконцентрированы между Новоземельским желобом и Обским мелководьем, а также северо-восточнее косы Восточной. В северо-восточной части Карского моря в этом месяце вихри практически не встречаются.

За два года регистрировались вихри размером от 0,4 км до 14,4 км. Крупные вихри с диаметром больше 6 км регистрировались крайне редко, преимущественно в районе пролива Карские ворота и у северной оконечности Новой Земли, а также в юго-восточной части моря (Рисунок 4.4, а). При учете условной границы субмезомасштаба 6 км в данный масштаб попадает около 97 % зарегистрированных вихрей. При этом более 50% вихрей имели диаметр от 2 до 4 км (Рисунок 4.4, б), как среди циклонических, так и антициклонических вихрей. Средний диаметр вихревых структур за исследуемый период составил 2,5 км, при этом средний размер антициклонических вихрей больше, чем у циклонических. Мода и медиана диаметров вихрей равнялись 2,3 км и 2,9 км соответственно, при этом данные значения меньше среднего климатического бароклинного радиуса Россби именно для Карского моря (3 км). Удовлетворение условия (Формула 1.2) для вихрей с масштабом порядка бароклинного радиуса Россби позволяет отметить в качестве механизма генерации бароклинную неустойчивость в районах фронтальных зон.



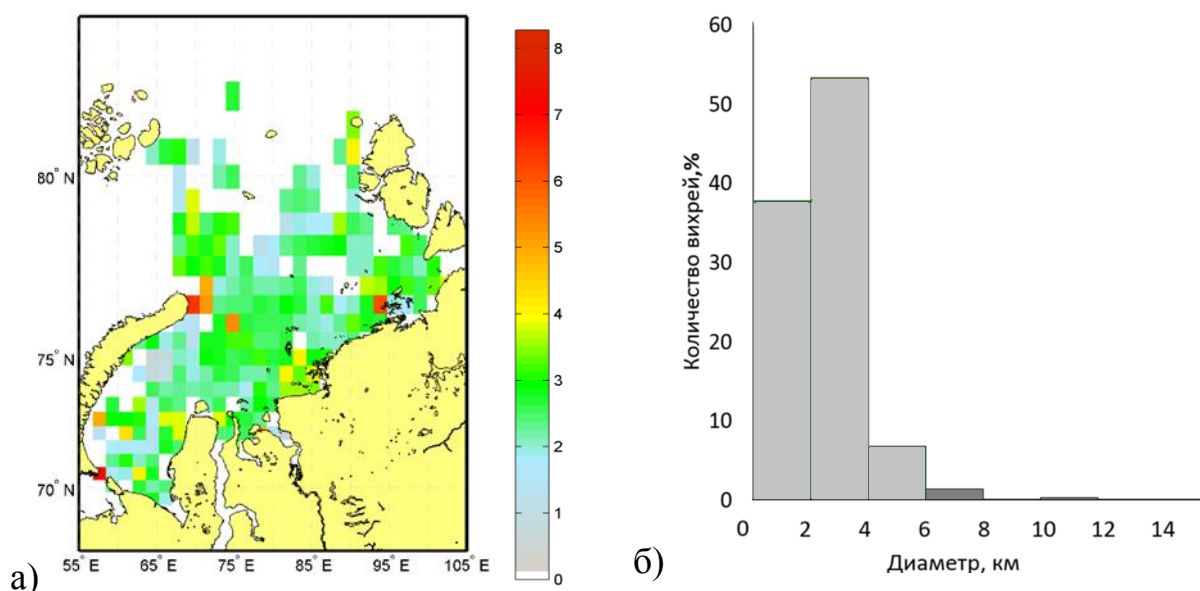


Рисунок 4.4 –Диаметры вихревых структур в Карском море. Пространственное распределение диаметров поверхностных проявлений в км, осредненных на единицу сетки ( $\sim 2500 \text{ км}^2$ ) (а). Гистограмма диаметров вихревых структур за теплый период 2007 и 2011 гг. (б), где светло-серый цвет – минимальное количество вихрей, относимых к субмезомасштабу

В Карском море в 2007 году было зарегистрировано почти в 6 раз больше малых вихрей (1242 структуры) [Атаджанова и др., 2017], чем в 2011 году (202 структуры), что может быть связано с двумя причинами: с особенностями ледовой обстановки (см. раздел 1.2) и большой разностью в покрытии. Одно из отличий в ледовых условиях заключается в том, что в июне 2011 года в юго-западной части моря было больше областей, свободных ото льда, чем в 2007, что позволило в 2011 году начать регистрацию вихрей уже в июне. Однако в 2011 году покрытие Карского моря преимущественно было сконцентрировано в северной части моря, при этом РЛИ было в 3 раза меньше, чем в 2007. Но в целом, основные районы наибольшей встречаемости совпадают (между северной оконечностью Новой Земли и западным берегом полуострова Ямал, а также в районе центральной части шельфа).

Статистические оценки диаметров в целом за сезон и за каждый год схожи. При изменчивости диаметров вихревых структур от 0,4 км до 14,4 км в 2007 году и от 0,2 км до 12,5 км в 2011 году так же почти 100 % вихревых структур можно

отнести к субмезомасштабу, так как они имеют масштаб порядка бароклинного радиуса Россби для Карского моря, что согласуется с необходимым условием для бароклинной неустойчивости и из чего следует, что одной из причин образования исследуемых вихрей является бароклинная неустойчивость в районах ФЗ.

В оба года преобладали вихри (от 50 до 60 %) с размерами от 2 до 4 км (Рисунок, 4.5), а средние значения диаметров 2,4 км и 2,8 км за 2007 и 2011 гг. близки к величине среднего климатического бароклинного радиуса Россби (~ 3 км).

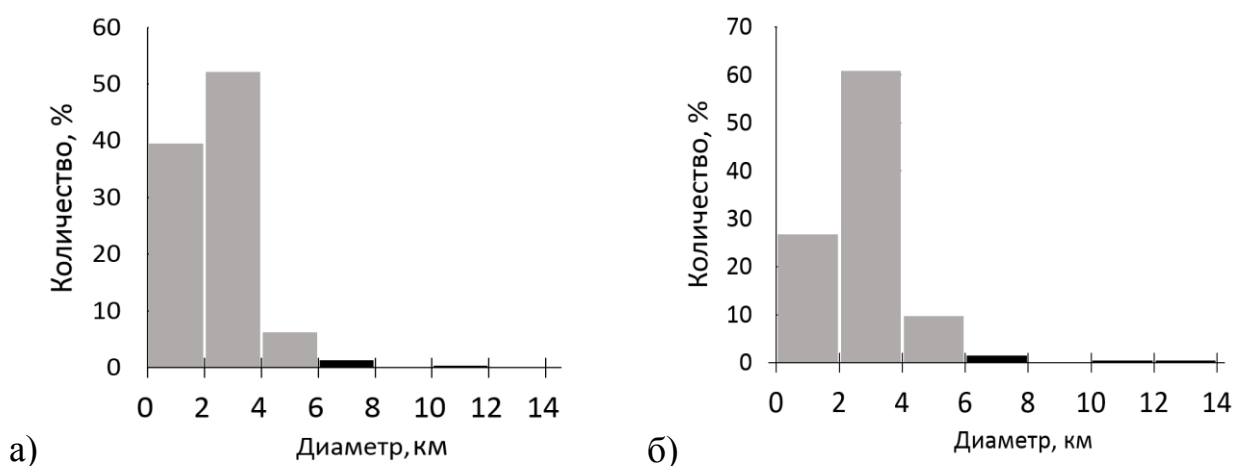


Рисунок 4.5 – Гистограммы распределения диаметров вихрей в Карском море за 2007 (а) и 2011 (б) года, где светло-серый цвет – минимальное количество вихрей, относимых к субмезомасштабу

Наибольшая вихревая активность в Карском море в 2007 году регистрировалась с июля по август (Таблица 4.2), когда было зарегистрировано 30 и 38 % соответственно. В июне из-за значительного ледового покрова вихри не отмечались. На протяжении всех теплых месяцев количество циклонических вихрей (94 %) значительно превышало количество антициклонических. Меньше всего вихрей регистрировалось в сентябре, хотя незначительно число вихрей отличалось от октября. При этом наибольший разброс значений диаметра вихрей (от 1,1 до 14,4 км) был именно в сентябре, а наименьший (от 0,9 до 6,8 км) в июле. Наибольший среднемесячный размер как для всех типов вихрей (3 км), так и для циклонических (3 км) и антициклонических (3,6 км) отмечался в сентябре, тогда как наименьший был в октябре – 1,2 км для всех вихрей, 1,2 км для циклониче-

ских и 1,6 км для антициклонических вихрей. Среднемесячный диаметр последних всегда преобладал.

Таблица 4.2 – Характеристики поверхностных проявлений вихрей в Карском море за 2007 и 2011 гг.

| Месяц              | Количество вихрей, шт |      |       | Средний (мин. – макс.) диаметр, км |               | Средний диаметр, км |
|--------------------|-----------------------|------|-------|------------------------------------|---------------|---------------------|
|                    | Az                    | Zn   | Всего | Az                                 | Zn            |                     |
| Карское море, 2007 |                       |      |       |                                    |               |                     |
| Июль               | 17                    | 359  | 376   | 2,9(1,1–6,8)                       | 2,4(0,9–6,2)  | 2,5                 |
| Август             | 46                    | 434  | 480   | 2,9(1,6–8,3)                       | 2,6(0,8–13,6) | 2,7                 |
| Сентябрь           | 12                    | 176  | 188   | 3,6(1,7–5,9)                       | 3(1,1–14,4)   | 3                   |
| Октябрь            | 2                     | 196  | 198   | 1,6(1,2–2)                         | 1,2(0,4–7,2)  | 1,2                 |
| Итог               | 77                    | 1165 | 1242  | 2,8(1,1–8,3)                       | 2,3(0,4–14,4) | 2,4                 |
| Карское море, 2011 |                       |      |       |                                    |               |                     |
| Июнь               | 3                     | 46   | 49    | 3,3(2,2–5,1)                       | 2,9(1,2–6,4)  | 2,9                 |
| Июль               | 5                     | 51   | 56    | 5,0(1,8–10,8)                      | 2,9(1,4–12,5) | 3,1                 |
| Август             | 4                     | 31   | 35    | 3,8(2,2–5,1)                       | 2,4(1,8–3,7)  | 2,6                 |
| Сентябрь           | 2                     | 57   | 59    | 2,6(2,4–2,8)                       | 2,6(1,2–4,6)  | 2,6                 |
| Октябрь            | –                     | 3    | 3     | –                                  | 5,0(4,5–5,6)  | 5                   |
| Итог               | 14                    | 188  | 202   | 3,9(1,8–10,8)                      | 2,8(1,2–12,5) | 2,8                 |

В 2011 году ситуация немного иная (Таблица 4.2). Пик вихревой активности отмечался в сентябре, хотя незначительно количество за сентябрь (29 % вихрей) отличалось от июля (27 % вихрей). Практически в каждый месяц отмечалось преобладание циклонических вихрей минимум в 10 раз, за исключением октября, когда всего было зарегистрирован три вихря с циклоническим типом вращения. Максимальный разброс значений диаметра вихрей (от 1,4 до 12,5 км) был в июле, минимальный (от 4,5 до 5,6 км) в октябре. Среднемесячные диаметры как для обоих типов вихрей (3,1 км), так и для каждого в отдельности (Az – 5 км, Zn – 2,9 км) были максимальны в июле. Минимальные среднемесячные значения для циклонических вихрей (2,4 км) были в августе, а для антициклонических (2,6 км) – в сентябре. Как и в 2007 году среднемесячный диаметр антициклонических вихрей почти всегда преобладал над размером циклонических.

Пик вихревой активности в Карском море при анализе всех данных за два года пришелся на август (Рисунок 4.6, а). В этом месяце за оба года было зарегистрировано 35 % всех вихревых структур. При этом отмечался максимум как для количества циклонических, так и антициклонических вихрей. В июле также отмечалась интенсивная вихревая динамика, но число всех вихрей было на 5% меньше, чем в августе. В целом вихревая активность увеличивалась с июня по август, затем уменьшалась к октябрю.

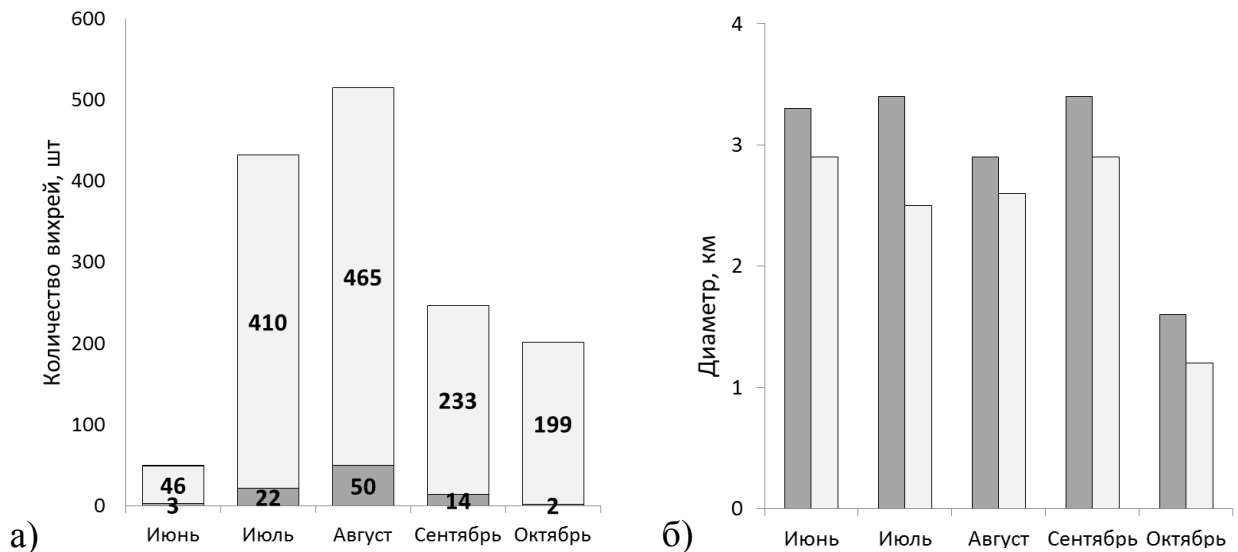


Рисунок 4.6 – Внутрисезонное распределение количества вихрей (а) и средних диаметров (б) с учетом типа вращения в Карском море

(темный цвет – антициклонический тип, светлый цвет – циклонический тип)

Среднемесячные диаметры вихрей имели незначительную изменчивость (Рисунок 4.6, б) с июня по октябрь и варьировались с 1,2 км до 3 км, что меньше, чем средний климатический радиус Россби для Карского моря и значительно меньше условной границы субмезомасштаба (6 км). При этом средний размер антициклонических вихрей был во все месяцы больше и достигал 3,4 км, в то время как средний диаметр циклонических вихрей был максимальным при величине 2,9 км.

#### 4.2. Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны

Температура поверхности воды в Карском море в теплый период года незначительно отличается от зимней, так как весной тепло расходуется, прежде всего, на таяние льда. Хотя летом в самые теплые месяцы на свободных ото льда поверхностях температура воды может достигать 10 °С, а подо льдом поднимается чуть выше точки замерзания. Только в тех местах, где есть влияние материкового стока, температура поверхности постепенно увеличивается [Добровольский, Залогин, 1982].

В Карское море впадает большое число рек, но реки Енисей и Обь преимущественно определяют объем речного стока (75–80 %). Стоит отметить, что распространение речных вод по акватории зависит от господствующих ветров [Pavlov et al., 1996].

В Карском море на поверхности выделяют несколько водных масс [Добровольский, Залогин, 1982]:

- 1) Поверхностные арктические воды поступают с севера. Температура близка к температуре замерзания, а соленость равняется около 33,5 ‰;
- 2) Баренцевоморские воды поступают в Карское море севернее мыса Желания и через Южные Новоземельские проливы – проливы Карские ворота и Югорский шар (температура и соленость летом 10,5 °С и 35,3 ‰);
- 3) Поверхностные модифицированные летние воды Карского моря. Образуются в результате смешения речных вод и поверхностной арктической водой. Характеризуются повышенной температурой и низкой соленостью, растекаются по поверхности более плотных арктических вод (до глубины 5–7 метров, с температурой и соленостью 7 °С и 24,5 ‰);
- 4) Речные воды. Влияние речного стока особенно отчетливо проявляется в весенне-летний период, так как под воздействием выноса вод и их тепла быстро очищаются приустьевые районы моря, в результате чего самые теплые и наименее соленые (температура 11,7 °С и соленость 0,5 ‰).

В Карском море выделяют несколько фронтальных зон. Фронтами служат области соприкосновения речных, морских и прикромочных вод. Их параметры изменяются только в течение теплого сезона, так как в холодный они отсутствуют [Добровольский, Залогин, 1982]. Стоковая фронтальная зона может отмечаться как в поле температуры (граница между более теплыми модифицированными речным стоком водами и более холодными морскими водами), так и в поле солености [Kubryakov et al., 2016]. Как уже отмечалось, существует несколько типов распространения речного стока в Карском море [Pavlov et al., 1996] из-за влияния ветра на поверхностный опресненный слой: веерообразно (по значительной части моря); западный (отклоняясь к северо-западу (Рисунок 4.7)); восточный (продвигаясь узкой полосой вдоль берега материка на восток к морю Лаптевых). Прохождение речных вод на запад к Новой Земле приводит к изоляции вод юго-западной части Карского моря от притока холодных вод с севера, что при взаимодействии с притоком летних баренцевоморских вод через южные Новоземельские проливы (Карские ворота и Югорский Шар) создает условия для интенсивного прогрева вод в этом районе [Pavlov et al., 1996].

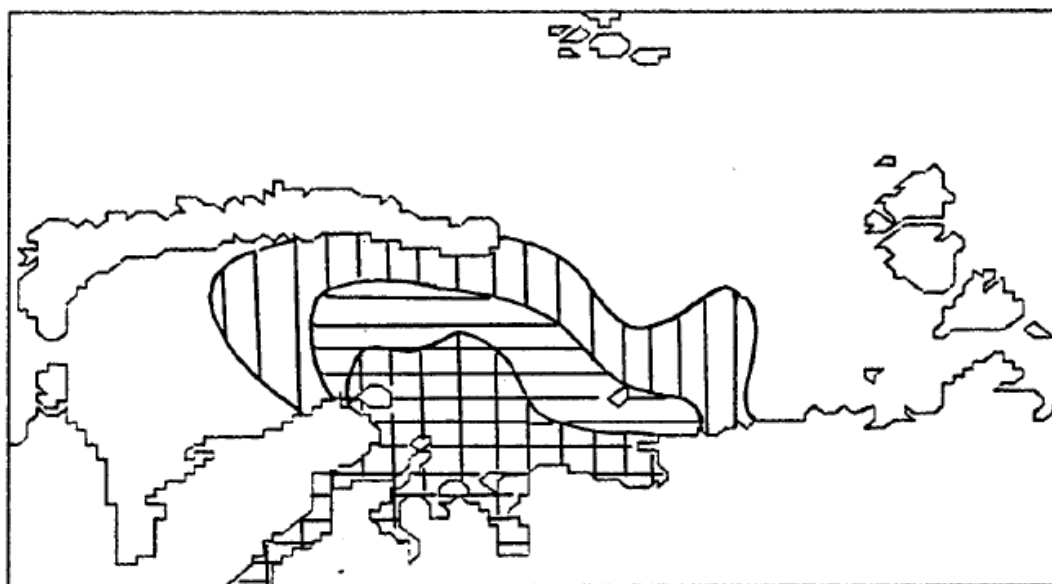


Рисунок 4.7 – Схематичное изображение распространения речных вод в Карском море по западному типу, где область вертикальных линий обозначает вклад речных вод 50–70%, горизонтальных линий – от 70 до 90 %, клетчатый – свыше 90 % [Pavlov et al., 1996, p.38]

Хотя для Карского моря описаны зоны смешения водных масс, однако в литературе отсутствуют сведения о климатических положениях фронтальных зон. Как правило, их положение описывается по натурным измерениям.

По in-situ данным в статье [Зацепин и др., 2010 а] были выделены стоковые соленостные фронты, разделяющие зоны между менее солеными модифицированными речными и более солеными морскими водами. Было выделено три фронта (Рисунок 4.8, а). Первый восточнее северной оконечности Новой Земли у южной оконечности желоба Св. Анны, второй от центральной части Новой Земли до верхней оконечности п-ова Ямал, а третий фронт отделяет квазиизолированную линзу опресненных вод вблизи Новой Земли между первым и вторым. Стрелки показывают направления распространения речного стока.

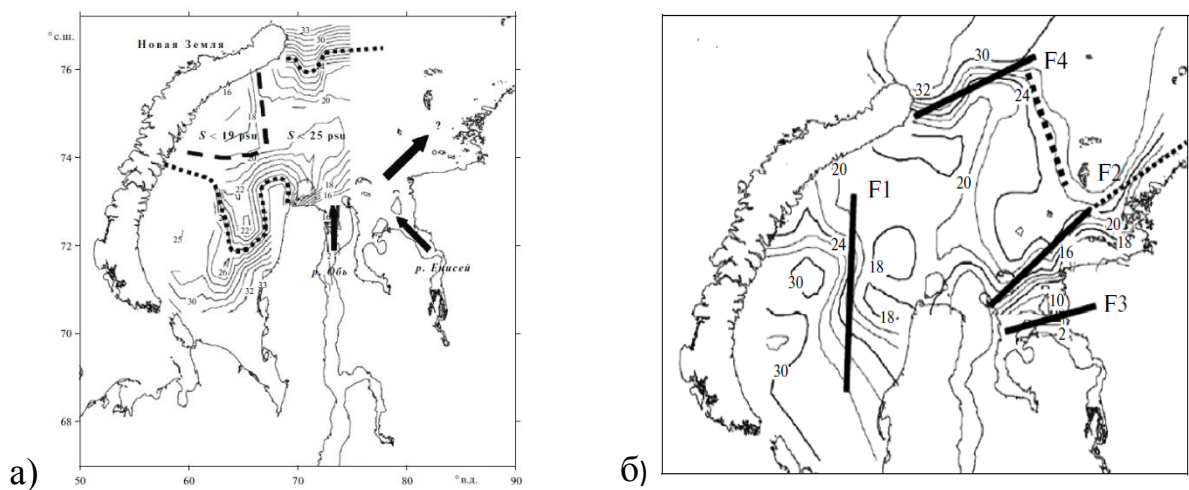


Рисунок 4.8 – Схематическое изображение фронтальных зон на фоне изолиний солености. а – по (Зацепин и др., 2010, с.700), б – по (Завьялов и др., 2015, с.516).

#### Описание в тексте

В статье [Завьялов и др., 2015] выделяют 5 фронтов и фронтальных зон (Рисунок 4.8, б): 1) фронт между водами баренцевоморского происхождения восточнее пролива Карские ворота и водами, опресненными материковым стоком в центральной части моря (F1); 2) фронт между арктическими водами и водами, опресненными материковым стоком в северо-восточной части моря у южной оконечности желоба Св. Анны (F4); 3) внешний стоковый приустьевой фронт реки Енисей севернее о-ва Сибирякова и его продолжение на восток у побережья полуострова

Таймыр (F2); 4) внутренний стоковый фронт реки Енисей в пределах Енисейской губы южнее острова Сибирякова (F3); 5) фронтальная зона, ограничивающая область опресненных вод с востока и вытянутая в меридиональном направлении из района восточнее желоба Св. Анны в сторону полуострова Таймыр (пунктир).

В [Кубряков и др., 2013] на основе спутниковых измерений солености и хлорофилла, а в данных гидрологических зондирований анализируются ареалы распространения речных вод, а также предлагается модель, описывающая динамику трансформации областей, занятых речными водами, для 2011 и 2012 гг.

В северной части моря существует фронтальная зона на периферии прикромочных вод [Добровольский, Залогин, 1982], образовавшихся в результате таяния льда. Такую зону можно считать Прикромочной, а фронт этой зоны можно считать Прикромочным. Он является менее изученным, чем Стоковый фронт и регистрируется не только в поле солености [Воды Баренцева моря..., 2016], но и температуры [Сергеева и др., 2015]. Его положение, размеры и интенсивность часто изменяются в течение теплого времени.

В целом, фронты в Карском море характеризуются значительной изменчивостью в разные годы, зависят от особенностей речного стока и преимущественных направлений ветра (Стокковый фронт), а также от ледовых условий и таяния льда (Прикромочный фронт). При этом вблизи фронтальных зон по данным отрывочных измерений фиксируются вихри и меандры [Щука и др., 2015]. Однако субмезомасштабные вихревые структуры почти не изучены в Карском море, а связь между ними и фронтальной динамикой ранее не рассматривалась. Хотя структуры большего масштаба в виде замкнутых изолиний находят свое отражение в полях солености и температуры [Зацепин, 2010а].

Для анализа мезомасштабной и синоптической изменчивости поверхностных положений температурных фронтов и оценки их роли в распределении проявлений субмезомасштабных вихрей в Карском море использовались среднесуточные данные ТПМ продукта GHRSSST Level 4 OSTIA Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (Asia-Pacific data-research center) за период с июня по октябрь 2007 и 2011 гг. Данные уровня обработки L4 генерируются путем объ-



единения спутниковых (с микроволновых и инфракрасных датчиков) и локальных наблюдений (с дрейфующих и заякоренных буев и судов) в системах оптимальной интерполяции на сетке  $0.054^\circ$  на  $0.054^\circ$ . Данные получены с сайта Asia-Pacific data-research center.

Методика выделения характеристик поверхностных положений фронтальных зон, а также основных фронтов и построения композитных карт аналогична методике, используемой для Баренцева моря (раздел 3.2). В качестве разрезов для определения характеристик ФЗ использовались три меридиональных разреза по  $65^\circ$ ,  $75^\circ$  и  $80^\circ$  в.д.

В Карском море по данным 2007 и 2011 года наибольшие градиенты температуры поверхности до  $0,05\text{--}0,07^\circ\text{C}/\text{км}$  моря наблюдались в июле и августе в центральной и юго-восточной частях моря в районе распространения речного стока, а также с июля по сентябрь в северной части моря вблизи кромки льда.

Стоковая фронтальная зона имела ширину от 72 км до 127 км в 2007 году и от 76 км до 122 км в 2011 году. Максимальный градиент ФЗ по разрезам в оба года варьировался от  $0,02$  до  $0,03^\circ\text{C}/\text{км}$ . Прикромочная фронтальная зона имела среднедекадную ширину от 73 км до 110 км в 2007 году и от 69 км до 101 в 2011 году. Максимальный среднедекадный градиент ФЗ по разрезам в оба года варьировался от  $0,02$  до  $0,03^\circ\text{C}/\text{км}$ .

Прикромочная ФЗ, как и в Баренцевом море, формируется за счет таяния кромки арктического льда. Наибольшая динамика среднемесячного положения (Рисунок 4.9) Прикромочного фронта отмечалась в 2007 году, так как в этот год в Карском море в июле ледовое покрытие было больше, а кромка льда южнее, чем в июле 2011 года. Самого северного положения фронт достигал в августе в оба года. При этом положение фронта в сентябре 2011 г. вблизи склона желоба Святой Анны совпадает с областью фронтальной зоны, зарегистрированной по судовым измерениям [Сергеева и др., 2015].

Стоковая фронтальная зона формируется, как упоминалось ранее, на границы модифицированных Карских вод за счет выноса речных вод в море (речного стока). При этом в оба года речные воды распространялись с западным типом

распространения [Кубряков и др., 2015]. В 2007 году основной фронт Стоковой фронтальной зоны смещался в северном и западном направлениях к Новой Земле (Рисунок 4.9, а), наиболее отдаленное положение отмечалось в июле, при этом начале месяца вдоль Новой Земли над Новоземельским желобом еще отмечался лед. В августе и сентябре 2007 года модифицированные воды доходят до Новой Земли, а в сентябре уже невозможно идентифицировать северную часть Стокового фронта из-за прогрева и смешения модифицированных Карских вод с поступающими Баренцевоморскими водами возле северной оконечности Новой Земли. В 2011 году ситуация иная (Рисунок 4.9, б), в августе и сентябре не удалось идентифицировать южную часть фронта из-за резкого прогрева и смешения модифицированных вод и Баренцевоморских вод, поступающих через южные проливы, после таяния льда в июле 2011 г. от юго-западного берега п-ова Ямал до середины Новой Земли. При этом положение фронта в сентябре 2011 вблизи северной оконечности Новой Земли совпадает с областью фронтальной зоны, полученной в ходе экспедиции в сентябре 2011 года [Флинт и др., 2015].

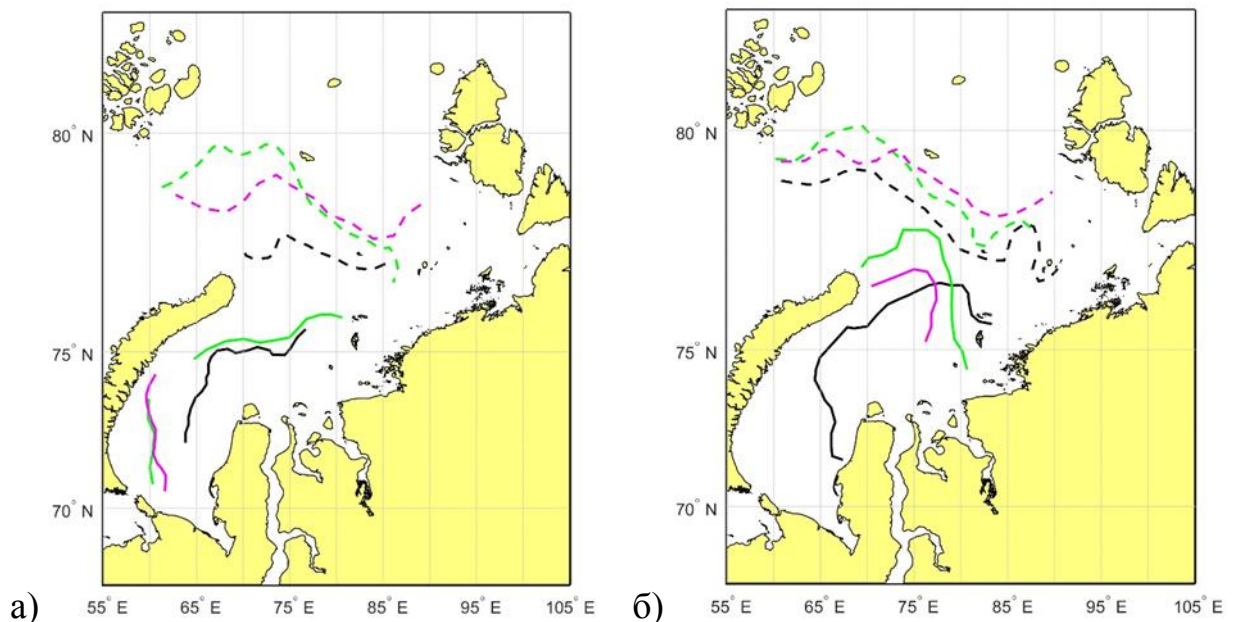


Рисунок 4.9 – Среднемесячные положения Прикромочного (пунктир) и Стокового (сплошная линия) фронтов в 2007 году (а) и в 2011 году (б). Черный цвет – июль, зеленый – август, розовый – сентябрь

Для Карского моря производилась количественная оценка на основе композитных карт за период с июля по сентябрь 2007 и 2011 гг. (Таблица 4.3 и Рисунок 4.10). В 2007 году за исследуемый период было зарегистрировано 1044 субмезомасштабных вихревых структуры, из которых 22.7 % отмечались внутри областей изменчивости ФЗ. Большая часть вихрей за месяц (~ 30 %) внутри областей изменчивости была зарегистрирована в июле (Рисунок 4.10, а), когда в целом отмечалось наибольшее смещение положений фронтов в результате быстрого таяния льда в северной части моря и распространения речных вод по поверхности в юго-западной части. При этом преобладающее число вихрей отмечалось в области изменчивости Стоковой ФЗ (18.4 %). В августе 2007 года (Рисунок 4.10, в) было зарегистрировано чуть меньше четверти всех вихрей за месяц внутри области. При этом положение Стокового фронта переместилось ближе к Новой Земле, а смещение положения Прикромочного фронта было минимальным за сезон, вероятно, в связи с этим в области изменчивости Прикромочной ФЗ было зарегистрировано меньше 1 % вихрей. В сентябре (Рисунок 4.10, д) Стоковый фронт прослеживался лишь частично в отличие от Прикромочного. В целом в обеих областях было зарегистрировано чуть больше 10 % вихрей.

Таблица 4.3 – Количество вихрей в процентах внутри областей изменчивости фронтальных зон по годам и месяцам

|          | Количество вихрей |                            |                        |               |                  |                            |                        |               |
|----------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------|------------------|----------------------------|------------------------|---------------|
|          | 2007 год          |                            |                        |               | 2011 год         |                            |                        |               |
|          | Всего (100%), шт  | Область Прикромочной ФЗ, % | Область Стоковой ФЗ, % | Обе области % | Всего (100%), шт | Область Прикромочной ФЗ, % | Область Стоковой ФЗ, % | Обе области % |
| Июль     | 376               | 8,8                        | 18,4                   | 27,2          | 56               | <b>19,6</b>                | <b>44,6</b>            | 64,2          |
| Август   | 480               | 0,8                        | <b>22,3</b>            | 23,1          | 35               | 5,7                        | 11,4                   | 17,1          |
| Сентябрь | 188               | 10,6                       | 2,1                    | 12,7          | 59               | 15,3                       | 13,6                   | 28,8          |
| Итого    | 1044              | 5,5                        | 17,2                   | <b>22,7</b>   | 150              | 14,6                       | 24,7                   | <b>39,3</b>   |

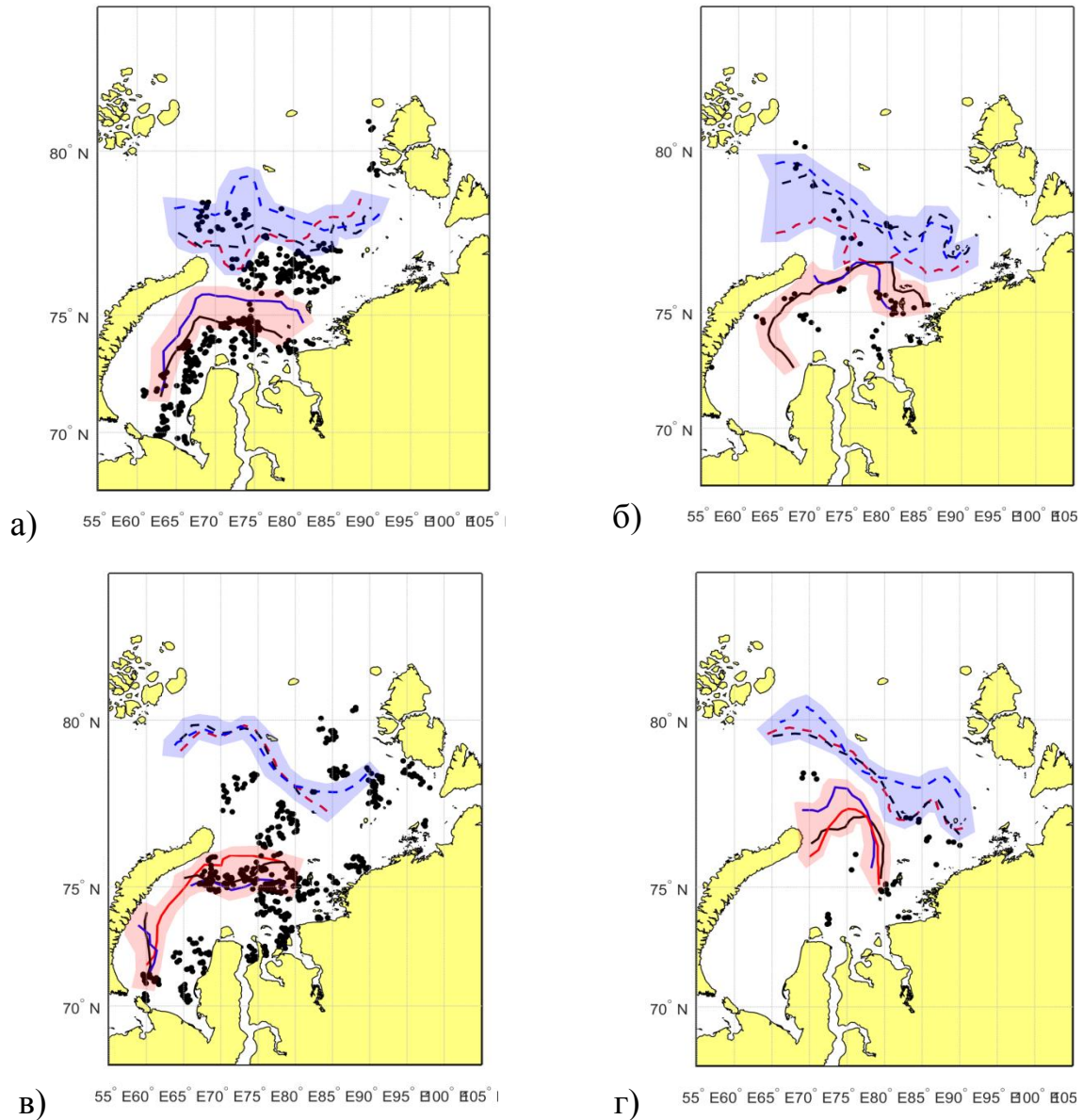
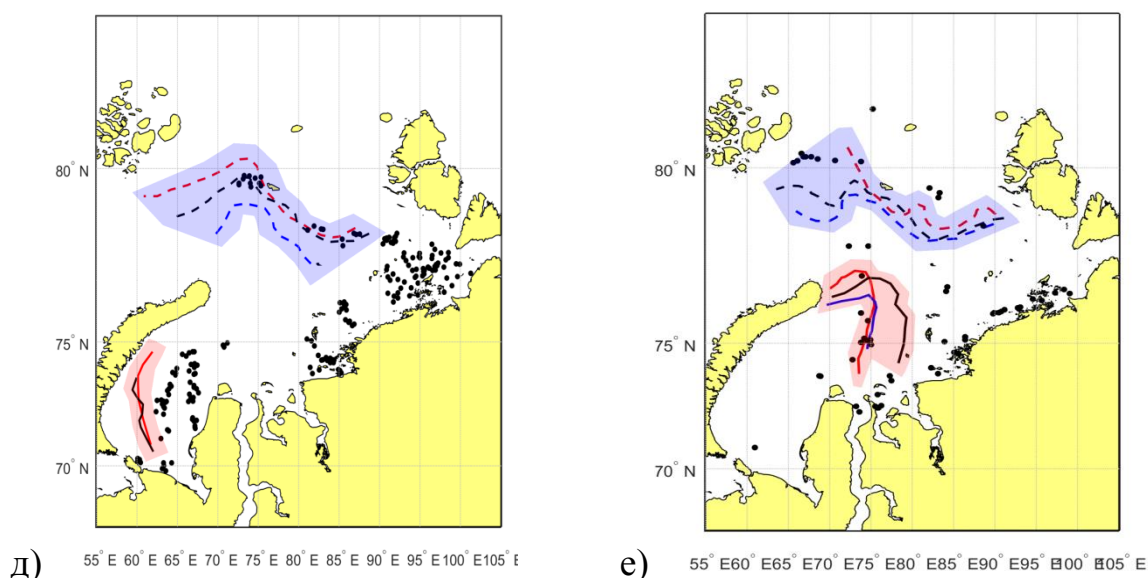


Рисунок 4.10 – Композитные карты, где а, в, д – июль, август, сентябрь за 2007 год, б, г, е – те же месяцы за 2011 год. Черные точки – положения центров вихрей за месяц, пунктирная линия – положения Прикромочного фронта, сплошная линия – Полярного фронта, красный цвет – положения фронтов и вихрей за первую декаду, черный – за вторую декаду, синий – за третью декаду. Синие и красные области – области изменчивости Прикромочной и Стоковой ФЗ соответственно



Продолжение рисунка 4.10

В 2011 году в Карском море за июль-сентябрь зарегистрировано всего 150 вихрей. Почти 40 % вихрей за весь период отмечалось в областях изменчивости ФЗ. В июле из 56 вихревых структур около 65% регистрировалось внутри областей изменчивости ФЗ, когда смещение среднедекадных положений фронтов было максимально за сезон (Рисунок 4.10, б). В августе (Рисунок 4.10, г) всего регистрировалось 35 вихрей, из которых только 17% попали в области изменчивости ФЗ (5,7 % в область изменчивости Прикромочной ФЗ и 11,4 % в область изменчивости Стоковой ФЗ). В сентябре (Рисунок 4.10, е) из 59 вихрей практически одинаковое количество вихрей пришлось на обе области, на Стоковую 13,6%, а на Прикромочную 15,3%.

#### 4.3. Вихревые структуры над неровностями дна и приливные процессы

На акватории Карского моря поверхностные проявления субмезомасштабных вихрей неоднократно регистрировались в районах неровностей дна (Рисунок 4.3). В Карском море, согласно карте градиента глубины (Рисунок 4.11, а), значительные неровности дна отмечаются в районе Новоземельского желоба, в центральной и северной частях моря.

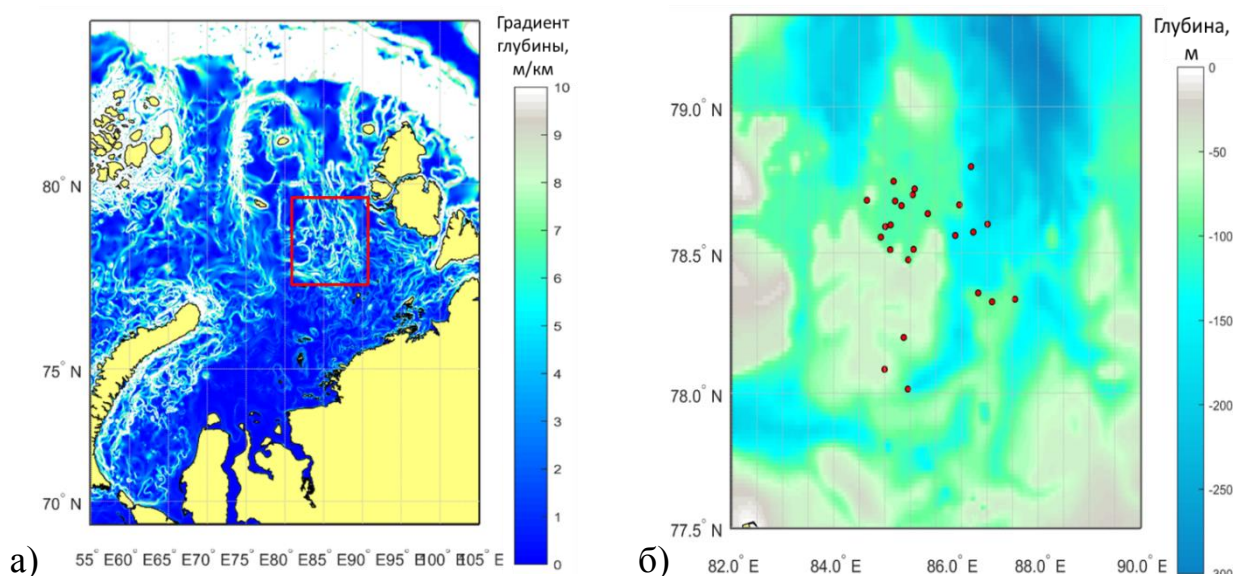


Рисунок 4.11 – Карта градиента глубин Карского моря (а), где красным квадратом отмечено положение фрагмента (б), сочетающего в себе топографию дна и положения центров вихрей за теплый сезон 2007 г., которые обозначены красными точками

Для выявления связи между положениями вихрей и топографическими эффектами аналогично как в Баренцевом море производился анализ проявлений субмезомасштабных вихревых структур в районе северо-восточнее острова Уединения, который характеризовался значительными неровностями дна (Рисунок 4.11, б). Характеристики всех вихрей сведены в Таблице.4.4.

Таблица 4.4 – Характеристики вихрей в районе северо-восточнее острова Уединения по данным 2007 года

| Месяц    | Количество, шт |    |     | Средний диаметр, км |
|----------|----------------|----|-----|---------------------|
|          | Az             | Zn | All |                     |
| Август   | 3              | 15 | 18  | 1,8                 |
| Сентябрь | –              | 5  | 5   | 2,7                 |
| Октябрь  | –              | 1  | 1   | 3,2                 |
| Итого    | 3              | 21 | 24  | 2                   |

Вихри в исследуемом районе регистрировались с августа по октябрь, когда область была свободна ото льда. Характеристики детектированных вихрей в целом соответствовали средним по акватории: диаметры вихрей имели масштаб ба-

роклинного радиуса Россби; количество циклонов было больше, чем антициклонов. Анализ времени регистрации вихрей в районе и данных по приливу в пункте о. Визе показало, что 96 % (23 шт.) вихрей отмечалось в период сизигийного прилива.

#### Выводы к главе 4

В Карском море за июнь-октябрь 2007 и 2011 гг. период было зарегистрировано 1444 поверхностных проявления субмезомасштабных вихрей со средним диаметром от 1,2 до почти 3 км (порядка среднего климатического бароклинного радиуса Россби). Среди вихрей отмечалось значительное преобладание вихрей с циклоническим типом вращения (~ 90 %) и диаметром от 2 до 4 км (~ 55 %). Чаще всего вихри регистрировались в области распространения речных вод (между северной оконечностью Новой Земли и западным берегом полуострова Ямал), при этом районы частой встречаемости от году к году в целом сохранялись. Наибольшая вихревая активность за сезон обоих лет пришлась на начало сезона в период интенсивного формирования приповерхностного пикноклина, когда происходит интенсивное таяние льда на акватории и распространение модифицированных речным стоком вод по направлению к Новой Земле. Средние параметры вихрей от года к году и в течение теплого сезона в целом сохранялись. При этом пик вихревой активности в целом за два года пришелся на август.

Свыше 90 % зарегистрированных проявлений имели масштаб бароклинного радиуса Россби. Для выявленных вихрей с диаметром порядка радиуса Россби бароклиновая неустойчивость в районах фронтальных зон может быть одной из основных причин формирования данных вихрей

В качестве фронтальных зон в Карском море были выделены Прикромочная и Стоковая ФЗ и положение их основных фронтов по данным за июль-сентябрь 2007 и 2011 годов. В оба года самое северное положение Прикромочного фронта наблюдалось в августе в оба года, при этом наиболее динамичен он был в 2007 году. Стоковый фронт перемещался преимущественно в северном и западном направлениях к Новой Земле, в 2007 году в июле фронт приближался к Новой

Земле и распадался на две части, при этом северная часть в сентябре не идентифицировалась. В 2011 году Стоковый фронт полностью регистрировался только в июле, при этом он был ближе к Новой Земле, чем в 2007. Однако в августе и сентябре удалось зарегистрировать только северную часть, вблизи северной оконечности Новой Земли.

Оценка количества проявлений вихревых структур внутри областей изменчивости ФЗ по месяцам показала, что вихри внутри областей отмечались каждый месяц, однако наибольшее число вихревых структур внутри областей изменчивости фронтов отмечалось в июле – до 64 %, когда отмечалась максимальное смещение фронтов.

Сопоставление положений регистрируемых вихревых структур с неровностями дна и периодами приливных течений позволило подтвердить связь вихревой активности над неровностями дна с интенсивностью прилива. Чаще всего вихревые структуры над неровностями дна регистрируются в сизигийный прилив, когда приливные течения максимальны.

Результаты исследований, представленные в четвертой главе диссертации, опубликованы в [Атаджанова и др., 2016а, 2016б, 2017а, 2017б, 2017в, 2017г, 2018а; Зимин и др., 2015в, 2018а; Коник и др., 2017б, 2018; Свергун и др., 2017а, 2017б, 2017в, 2018].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы особенности пространственно-временной изменчивости поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур на фоне процессов большего масштаба (формирование сезонного пикноклина, синоптическая и мезомасштабная фронтальная динамика, приливные процессы) в Баренцевом, Карском и Белом морях. Использовано около 3,5 тысяч радиолокационных изображений высокого разрешения, данные по температуре поверхности моря и концентрации хлорофилла, положения фронтов в Белом море, а также данные контактных наблюдений.

1. Показано, что субмезомасштабные вихри в арктических морях – это структуры, прослеживающиеся в верхнем слое до глубины сезонного пикноклина. При этом в Баренцевом, Карском и Белом морях вихри встречаются в течение всего теплого сезона.

В результате анализа 2041 радиолокационных изображений, полученных с июня по октябрь 2007 и 2011 гг., в Баренцевом море было зарегистрировано 2934 проявления малых вихревых структур с диаметром от 0,2 км до 25 км. Пик вихревой активности как в целом за сезон обоих лет, так и за каждый год отмечался в июле, среднемесячный диаметр в течение сезона варьировался от 2,3 до 4,2 км. На акватории Карского моря на основании анализа 1175 радиолокационных изображений за тот же период было зарегистрировано 1444 проявления субмезомасштабных вихрей, их диаметр варьировался от 0,4 км до 14,4 км. Интенсивная вихревая активность отмечалась в августе (2007 г.) и сентябре (2011 г.), а среднемесячный диаметр в течение сезона менялся от 1,2 до почти 3 км. В Белом море анализ 221 радиолокационного изображения за период с мая по сентябрь 2009–2012 гг. позволил зарегистрировать 162 поверхностных проявления вихрей с диаметром от 0,9 км до 13,2 км. Вихревая активность в течение сезона была максимальна в июле при изменчивости среднемесячного диаметра от 2,2 км до 5,1 км.

2. В Баренцевом море частой встречаемостью вихрей характеризовались районы северо-западнее Земля Франца-Иосифа, возле восточного берега острова

Западный Шпицберген, в юго-западной части моря (в районе поступления атлантических вод), в центральной части пролива между Землей Франца-Иосифа и Новой Землей, в районе полуострова Канин. В Карском море – между северной оконечностью Новой Земли и западным берегом полуострова Ямал, в центральной части шельфа Карского моря. Кроме этого вихри отмечались вблизи неровностей дна: южная оконечность желоба Святой Анны и юго-западнее Северной Земли. В Белом море наибольшая встречаемость отмечалась севернее Соловецких островов, вблизи Терского берега, на границе Бассейна и Двинского залива.

В большинстве приведенных районов возможными причинами генерации вихревых структур с размерами масштаба бароклинного радиуса Россби могут быть бароклинная неустойчивость (в районах фронтальных зон) и топографические эффекты (в районах неровностей дна), развивающиеся под влиянием приливных процессов.

3. Для Баренцева и Карского морей впервые была исследована внутримесячная (мезомасштабная) динамика положений Прикромочного, Полярного и Стокового фронтов.

В Баренцевом море по данным за июнь–сентябрь 2007 и 2011 гг. показана значительная внутримесячная и внутрисезонная изменчивость поверхностных положений основных фронтов Прикромочной и Полярной фронтальных зон, а также получена средняя и максимальная ширина для каждой фронтальной зоны и максимальные среднедекадные градиенты внутри зон. Ширина Прикромочной фронтальной зоны в разные декады варьировалась от 56 до 111 км, а Полярной от 86 до 172 км. Максимальный среднедекадный градиент температуры поверхности моря Прикромочной и Полярной фронтальных зон по разрезам в оба года составлял  $0,07$  °С/км. Основной фронт Прикромочной фронтальной зоны в течение теплого периода перемещался по всей северной части Баренцева моря, наиболее динамичен в июле, а самого северного положения достигал в августе в оба года. Основной фронт Полярной фронтальной зоны был квазистационарен в западной части моря, а в восточной части с июня по август продвигался на восток к архипелагу Новая Земля, при этом наибольшая динамика фронта отмечалась в 2007 году.

В Карском море по данным за июль–сентябрь 2007 и 2011 гг. показана значительная внутрисезонная и внутримесячная изменчивость поверхностных положений основных фронтов Прикромочной и Стоковой фронтальных зон. Ширина Прикромочной фронтальной зоны в разные декады варьировалась от 69 до 110 км, а Стоковой от 72 до 127 км. Максимальный среднедекадный градиент для Прикромочной и Полярной фронтальной зоны по разрезам в оба года достигал  $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . В оба года самое северное положение основного фронта Прикромочной фронтальной зоны наблюдалось в августе в оба года, при этом наиболее динамичен он был в 2007 году. Основной фронт Стоковой фронтальной зоны перемещался преимущественно в северном и западном направлениях к Новой Земле, в 2007 году в июле фронт приближался к Новой Земле и «распадался» на две части, при этом северная часть в сентябре не идентифицировалась. В 2011 году основной фронт Стоковой фронтальной зоны полностью регистрировался только в июле, при этом он был ближе к Новой Земле, чем в 2007. Однако в августе и сентябре удалось зарегистрировать только северную часть Стокового фронта, вблизи северной оконечности Новой Земли.

В Белом море по данным 2010 г., несмотря на несущественную динамику среднемесячных положений фронтов, среднедекадные положения фронтов показали значительное смещение в течение практически каждого исследуемого месяца.

Для Баренцева, Карского и Белого морей впервые была произведена оценка количества центров проявлений вихревых структур внутри областей изменчивости фронтальных зон за каждый месяц. Наибольшее число проявлений вихревых структур внутри областей изменчивости фронтов отмечалось в июле во всех исследуемых морях: в Белом море до 75 % вихрей за месяц; в Баренцевом море до 49 %; в Карском море до 64 %.

4. В Баренцевом и Карском морях вихревые структуры встречаются над неровностями дна, когда эти районы свободны ото льда и преимущественно в период максимальных скоростей приливных течений (сизигийного прилива). Учитывая ранее установленную связь образования вихрей над неровностями дна с при-

ливной динамикой в Белом море, следует, что образование субмезомасштабных вихрей над неровностями дна в этих морях связано с интенсивностью приливных течений.

5. Основные закономерности субмезомасштабной вихревой динамики для трех приливных арктических морей (Баренцева, Карского и Белого морей):

– субмезомасштабные вихри в теплый сезон постоянно присутствуют на акватории;

– вихри имеют диаметр преимущественно от 2 до 4 км и циклонический тип вращения, при этом средние оценки диаметра антициклонических вихрей больше;

– наибольшая субмезомасштабная вихревая активность отмечается в период формирования приповерхностного пикноклина (в начале теплого сезона);

– чаще всего субмезомасштабные вихри встречаются в районах фронтальных зон в период наиболее интенсивной фронтальной динамики и неровностей дна в период наиболее интенсивных приливных течений.

Обнаруженные закономерности показывают общность в распределении проявлений субмезомасштабных вихрей на акватории Баренцева, Карского и Белого морей. Они, по всей видимости, характерны и для других арктических морей. Однако для подтверждения этого требуется дальнейший комплексный анализ для других морей с использованием аналогичных методик, применяемых в данном исследовании.

## СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

РЛИ – радиолокационное изображение

ААНИИ – Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

ВКС – верхний квазиоднородный слой

ЕСИМО – единая система информации мирового океана

ЗФИ – Земля Франца-Иосифа

ИК – инфракрасный

ПрФЗ – Прикромочная фронтальная зона

ПФЗ – Полярная фронтальная зона

РГГМУ – Российский государственный гидрометеорологический университет

РЛ – радиолокационный

СВЧ – сверхвысокочастотный

ТПМ – температура поверхности море

ФЗ – фронтальная зона

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

Az – вихрь с антициклоническим типом вращения

GHRSSST – Group for High Resolution Sea Surface Temperature

IMP – Image Mode Precision

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

OSTIA – Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis

SAR – Synthetic Aperture Radar

WSM – Wide Swath mode of Medium resolution

Zn – вихрь с циклоническим типом вращения

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алескерова, А. А. Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения / А. А. Алескерова, А. А. Кубряков, С. В. Станичный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 1. – С. 63–71.
2. Атаджанова, О. А. Исследование короткопериодных внутренних волн и малых вихревых структур на акватории Белого моря по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Труды IV Научно-технической конференции молодых ученых «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2015а. – С. 225–228.
3. Атаджанова, О. А. Исследование влияния субмезомасштабных вихрей на распределение фитопланктона в поверхностном слое Белого моря по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, И. В. Салинг // Труды VIII Международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб., 2015б. – С. 146–149.
4. Атаджанова, О. А. Малые вихри в Онежском заливе Белого моря и их влияние на распределение хлорофилла / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 6. – С. 110–118.
5. Атаджанова, О. А. Исследование субмезомасштабных вихрей Белого, Баренцева и Карского морей по данным спутниковых наблюдений / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Материалы молодежной научной конференции. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2016а. – С. 40–44.
6. Атаджанова, О. А. Статистический анализ малых вихревых структур в Карском и Баренцевом море по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Тр. XIII Всероссийской конф. «При-

кладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестор–История, 2016б. – С. 167–169.

7. Атаджанова, О. А. Межгодовая и внутрисезонная изменчивость характеристик малых вихрей в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, А. А. Коник, Е. И. Свергун, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Институт космических исследований Российской академии наук, 2017а. – С. 234.

8. Атаджанова, О. А. Поверхностные проявления фронтов и малых вихрей в Баренцевом и Карском морях в теплый период года / О.А. Атаджанова, А.В. Зимин, Д. А. Романенков, А. А. Коник, Е. И. Свергун, К. А. Мартын, И. Е. Козлов // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. – Москва: ИО РАН, 2017б. – С. 31–33.

9. Атаджанова, О.А. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений/ О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Морской гидрофизический журнал. – 2017в. – №2. – С. 80–90.

10. Атаджанова, О. А. Малые вихри в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным и роль фронтальной динамики в их образовании / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, А. А. Коник, Д. А. Романенков // Сборник докладов V научно–технической конференции молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – СПб., 2017г. – С. 266–269.

11. Атаджанова, О. А. Особенности субмезомасштабной вихревой динамики Баренцева, Карского и Белого морей по данным спутниковых наблюдений / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, А. А. Коник, Е. И. Свергун, Д. А. Романенков // Процессы в геосредах. – 2018а. – № 3(17).– С. 191–192.

12. Атаджанова, О. А. Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море / О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Е. И. Свергун, А. А. Коник // Морской гидрофизический журнал. – 2018б. – №3. – С.237–246.

13. Белоненко, Т. В. Временная изменчивость фазовой скорости волн Россби в Северной части Тихого океана / Т. В. Белоненко, А. А. Кубряков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 9–18.
14. Ожигин, В. К. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В. К. Ожигин, В. А. Ившин, А. Г. Трофимов, А. Л. Карсаков, М. Ю. Анциферов. – Мурманск: ПИПРО, 2016. – 260 с.
15. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиев. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 1. – 280 с.
16. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 2. Белое море. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – Вып. 1. – 240 с.
17. Гинзбург, А. И. Вихревая динамика в Юго–Восточной Балтике по данным спутниковой радиолокации / А. И. Гинзбург, Е. В. Булычева, А. Г. Костяной, Д. М. Соловьев // Океанология. – 2015. – Т. 5, № 6. – С. 893–902.
18. Гинзбург, А.И. Нестационарные вихревые движения в океане / А.И. Гинзбург // Океанология. – 1992. – Т.32, Вып. 6. – С. 997–1004.
19. Гинзбург, А. И. О роли вихрей в распространении нефтяных загрязнений по акватории юго–восточной Балтики (по данным спутникового мониторинга) / А. И. Гинзбург, Е. В. Булычева, А. Г. Костяной, Д. М. Соловьев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. –Т. 12, № 3. –С. 149–157.
20. Голенко, Н. Н. Гидрологические условия в районе водораздела Норвежского, Гренландского и Баренцева морей летом 1985 года / Н. Н. Голенко, А. Б. Зубин, В. А. Разживин; под ред. Р. В. Озмидова // Структура гидрофизических полей Норвежского и Гренландского морей. – М.: ИОАН. – 1987. – С. 18–23
21. Государственная программа Российской Федерации «Социально–экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до



- 2020 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 24.04.2017).
22. Дистанционное зондирование Земли при эколого–геологических исследованиях. Системы съемки спутников типа Landsat [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/4Graduate/RemoteSensing/Lecture04.pdf> (дата обращения: 18.12.2016).
23. Добровольский, А. Д. Моря СССР / А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. – М.: Изд-во МГУ. – 1982. – 192 с.
24. Дубина, В. А. Вихревая структура течений в заливе Петра Великого / В. А. Дубина, П. А. Файман, В. И. Пономарев // Известия ТИНРО: сб. науч. тр. – Владивосток, 2013. – Т. 173. – С. 247–258.
25. Жабин, И. А. Формирование антициклонического вихря на фронте Ойясио по данным спутниковых наблюдений / И. А. Жабин, Г. В. Корчуганов // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 4. – С. 13–21.
26. Жичкин, А. П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей / А. П. Жичкин // Вестник Кольского научного центра РАН – 2015. – №1. – С. 55–64.
27. Журбас, В. М. Кластеризация плавающих частиц из-за субмезомасштабной динамики: модельное исследование для Финского залива Балтийского моря / В. М. Журбас, Г. Вяли, Я. Лаанеметс, У. Липс // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 21–35.
28. Завьялов, П. О. Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. / П. О. Завьялов, А. С. Ижицкий, А. А. Осадчиев, В. В. Пелевин, А. Б. Грабовский // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 514–525.
29. Зацепин, А. Г. Субмезомасштабные вихри на Кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы / А. Г. Зацепин, В. И. Баранов, А. А. Кондрашов, А. О. Корж, В. В. Кременецкий, А. Г. Островский, Д. М. Соловьев // Океанология. – 2011. – Т. 51, №4. – С. 592–605.

30. Зацепин, А. Г. Поверхностный опресненный слой в Карском море / А. Г. Зацепин, П.О. Завьялов, В.В. Кременецкий, С.Г. Поярков, Д.М. Соловьев // *Океанология*. – 2010а. – Т.50, №5. – С. 698–708.
31. Зацепин, А. Г. Циркуляция вод в юго–западной части Карского моря в сентябре 2007 г. / А. Г. Зацепин, Е. Г. Морозов, В. Т. Пака, А. Н. Демидов, А. А. Кондрашов, А. О. Корж // *Океанология*. – 2010б. – Т.50, №5. – С. 683–697.
32. Зацепин, А. Г. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. / А.Г. Зацепин, А. Г. Островский, В. В. Кременецкий, В. Б. Пиотух, С. Б. Куклев, Л.В. Москаленко, О. И. Подымов, В. И. Баранов, А. О. Корж, С. В. Станичный // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2013. – Т. 49, № 6. – С.717–732.
33. Зацепин, А. Г. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа /А. Г. Зацепин, Д. Н. Ёлкин, А. О. Корж, С. Б. Куклев, О. И. Подымов, А. Г. Островский, Д. М. Соловьев // *Морской гидрофизический журнал*. – 2016. – № 3. – С. 16– 25.
34. Зимин, А. В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море / А. В. Зимин // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. – 2016. – № 44. – С.104–120.
35. Зимин А.В. Субприливные процессы и явления в Белом море. – М: ГЕОС, 2018. – 220 с.
36. Зимин, А. В. Субмезомасштабные вихри данным спутниковых наблюдений в Белом море / А. В. Зимин, И. Е. Козлов, О. А. Атаджанова // *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620713 от 20.05.2014*.
37. Зимин, А. В. Опыт разработки системы мониторинга короткопериодных процессов и субмезомасштабных структур в Белом море и результаты ее апробации летом 2014 года / А. В. Зимин, Д. А. Романенков, О. А. Атаджанова, А. А. Родионов, А. В. Моисеев // *Ученые записки РГГМУ*. – 2015а. – № 41. – С. 116 – 125.
38. Зимин, А. В. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Баренцева моря по радиолокационным изображениям [Электронный ресурс] / А. В. Зимин,

О. А. Атаджанова, Д. А. Романенков, А.В. Артамонова, А. В. Березина, А. А. Кони́к, Е. К. Сантьева, К. А. Сафонова, Е. И. Свергун, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов Тринадцатой всероссийской открытой ежегодной конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов).– Москва: ИКИ РАН, 2015б. – электрон, опт. диск (CD-ROM).

39. Зимин, А. В. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Карского моря по радиолокационным изображениям [Электронный ресурс] / А. В. Зимин, О. А. Атаджанова, Д. А. Романенков, А.В. Артамонова, А.В. Березина, А. А. Кони́к, Е. К. Сантьева, К. А. Сафонова, Е. И. Свергун, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов Тринадцатой всероссийской открытой ежегодной конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов) – Москва: ИКИ РАН, 2015в. – электрон, опт. диск (CD-ROM).

40. Зимин, А. В. Динамика гидрологических фронтов и короткопериодные явления в Белом море [Электронный ресурс]/ А. В. Зимин, О. А. Атаджанова, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов Тринадцатой всероссийской открытой ежегодной конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов) – Москва: ИКИ РАН, 2015г.– электрон, опт. диск (CD-ROM).

41. Зимин, А. В. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений / А. В. Зимин, О. А. Атаджанова, Д.А. Романенков, И. Е. Козлов, Б. Шапрон // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 1–2. – С. 129–135.

42. Зимин, А. В. Проявления субмезомасштабных вихрей в дистанционных и контактных наблюдениях в Белом море / А. В. Зимин, О. А. Атаджанова // Труды

IX Международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб., 2017а. – С.106–110.

43. Зимин, А. В. Структура и изменчивость основных фронтальных зон в Белом море в теплый сезон / А. В. Зимин, Д. А. Романенков, О. А. Атаджанова // Труды Всероссийской конференции к 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, доктора физико–математических наук, профессора Льва Николаевича Карлина «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы», 2017б. – С. 218–220.

44. Зимин, А. В. Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Баренцева моря / А. В. Зимин, А. А. Коник, О. А. Атаджанова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018а. – № 51. – С.99–108.

45. Зимин, А. В. Субмезомасштабные процессы и явления в приливных арктических морях (Белом, Баренцевом и Карском) / А. В. Зимин, Д. А. Романенков, О. А. Атаджанова, Е. И. Свергун, А. А. Коник // Сборник трудов Международного симпозиума «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере» (МСП–2018) – М.: ИО РАН, 2018б. – С. 147–150.

46. Зубкова, Е. В. Наблюдение короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых на основе спутниковых радиолокационных измерений / Е. В. Зубкова, И. Е. Козлов, В. Н. Кудрявцев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 6. – С. 99–109.

47. Калашникова, Н. А. Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне / Н. А. Калашникова, О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина, А. Н. Серебряный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 228–240

48. Каменкович, В. М. Синоптические вихри в океане / В.М. Каменкович, М. М. Кошляков, А. С. Монин. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 511 с.

49. Каримова, С. С. О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях / С. С. Каримова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 152–160.

50. Каримова, С. С. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации / С.С. Каримова // Исследование Земли из космоса. – 2012. – №3. – С. 31–47.
51. Каримова, С. С. Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных / С. С. Каримова, О. Ю. Лаврова, Д. М. Соловьев // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 5. – С. 15–23.
52. Коник, А. А. Изменчивость характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Карского моря за 2007 и 2011 года / А. А. Коник, О. А. Атаджанова, А. В. Зимин // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – Москва: ИКИ РАН, 2017а. – С. 261.
53. Коник, А. А. Количественные оценки изменчивости основных фронтальных зон Баренцева моря в 2007 и 2011 годах по данным температуры поверхности моря / А. А. Коник, О. А. Атаджанова, А. В. Зимин // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – Москва: ИКИ РАН, 2017б. – С. 262.
54. Коник, А. А. Фронтальные зоны Баренцева и Карского морей / А. А. Коник, О. А. Атаджанова, А. В. Зимин // Процессы в геосредах. – № 3(17). – 2018. – С. 239–240.
55. Корчагин, Н. Н. Мезоокеанология / Н. Н. Корчагин, А. С. Монин. – М.: РАН, 2004. – 176 с.
56. Косолапов, А. А. Экспериментальные исследования климатических фронтальных зон Баренцева моря / А. А. Косолапов, И. А. Лебедев // Тез. Всес. семинара «Океанологические фронты северных морей: характеристики, методы исследований, модели». – М.: ГМЦ СССР, 1989. – С. 16.
57. Костяной, А. Г. О вихреобразовании в Полярной фронтальной зоне Баренцева моря / А. Г. Костяной, И. А. Лебедев, Б. А. Новиков, В. Б. Родионов // Труды ААНИИ. – 1992. – Т. 426. – С. 19–32.

58. Костяной, А. Г. Мелкомасштабные вихри Черного моря / А. Г. Костяной, А. И. Гинзбург, Н. А. Шеремет, О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, №1. – С. 248–259.
59. Кубряков, А. А. Распространение речных вод в Черном и Карском морях по спутниковым измерениям уровня, солености и хлорофилла а / А. А. Кубряков, С. В. Станичный, А. Г. Зацепин, В. В. Кременецкий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2013. – № 27. – С. 394–398.
60. Кубряков, А. А. Формирование и распространение поверхностного опресненного слоя в Карском море / А. А. Кубряков, А. Г. Зацепин, С. В. Станичный // Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. – М.: АПР, 2015. – С. 11–14.
61. Лаврова, О. Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне / О. Ю. Лаврова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 118–123.
62. Лаврова, О. Ю. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С.А. Лебедев, М.И. Митягина, А.И. Гинзбург, Н.А. Шеремет. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
63. Лаврова, О. Ю. Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации. / О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина, А. Г. Костяной // Проблемы постсоветского пространства. – 2015 – №4 – С. 29–52.
64. Лаврова, О. Ю. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. / О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина, А. Г. Костяной. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 335 с.
65. Лебедев, И. А. Некоторые результаты статистического анализа синоптической и мезомасштабной изменчивости температуры воды в Баренцевом море / И. А. Лебедев // Труды ААНИИ. – 1992. – Т. 430. – С. 169–181.

66. Митягина, М. И. Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо–восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга / М. И. Митягина, О. Ю. Лаврова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008 – Т.2, Вып.5. – С.155–164.
67. Митягина, М. И. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо–восточной части Черного моря / М. И. Митягина, О. Ю. Лаврова // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 5. – С. 72–79.
68. Морозов, А. Н. Полярная фронтальная зона западного желоба Баренцева моря по данным контактных наблюдений 2007 года / А. Н. Морозов, В. К. Павлов, О. А. Павлова, С. В. Федоров // Морской гидрофизический журнал. – 2017. – №2. – С. 39–53.
69. Никитин, О. П. О квазистационарном антициклоническом вихре над Ньюфаундлендской котловиной / О. П. Никитин // Труды Государственного океанографического института. – 2017. –№ 218. – С. 63–73.
70. Обзорные ледовые карты СЛО. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aagi.ru>. (дата обращения 10.04.2015).
71. Ожигин, В. К. О фронтальных зонах Баренцева моря / В. К. Ожигин // Вопросы промысловой океанологии Северного бассейна: Сб. науч. тр ПИНРО. – Мурманск, 1989. – С. 89–103.
72. Озмидов, Р. В. О некоторых особенностях энергетического спектра океанической турбулентности / Р. В. Озмидов // Доклады АН СССР. – 1965. – Т. 161, № 4. – С. 828–832.
73. Пантюлин, А. Н. Динамика, структура и водные массы: глава в монографии «Система Белого моря. Том II. Водная толща и взаимодействующая с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера» / А. Н. Пантюлин. – М.: Научный мир, 2012. – С.309–379.
74. Рогачев, К. А. Субмезомасштабные струи на континентальном шельфе залива Петра Великого (Японское море) / К.А. Рогачев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и

технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 186–190.

75. Рогачев, К. А. Спутниковые наблюдения регулярных вихрей в заливах Шантарского архипелага, Охотское море / К. А. Рогачев // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 6. – С. 54–60.

76. Родионов, А. А. Комплексные исследования гидродинамических и гидроакустических явлений в мезо– и субмезомасштабном интервале изменчивости гидрофизических полей в арктических морях (на примере Белого моря) / А. А. Родионов, А. В. Зимин, Д. А. Никитин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 16–21.

77. Родионов, А. А. Оценка влияния субмезомасштабных вихревых структур на распространение акустических сигналов в Белом море / А. А. Родионов, Д. А. Никитин, А. В. Зимин, О. А. Атаджанова, К. Б. Филин // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестор–История, 2016. – С. 220–223.

78. Родионов, В. Б. Океанические фронты морей Северо–европейского бассейна / В. Б. Родионов, А. Г. Костяной. – М.: ГЕОС, 1998. – 292 с.

79. Романенков, Д. А. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря / Д. А. Романенков, А. В. Зимин, А. А. Родионов, О. А. Атаджанова, И. Е. Козлов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2016. – Т. 9, № 1. – С. 59–72.

80. Свергун, Е. И. Малые вихри и фронтальные зоны в Баренцевом и Карском морях за безлёдный период 2007 и 2011 годов / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, А. А. Коники, О. А. Атаджанова // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – Москва: ИКИ РАН, 2017а. – С. 291.

81. Свергун, Е. И. Внутренние волны и фронтальные зоны в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным, полученным за безлёдный период 2007 года / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, А. А. Коники, О. А. Атаджанова, Е. В. Зубкова, И. Е. Козлов // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой кон-



ференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – Москва: ИКИ РАН, 2017б. – С. 290.

82. Свергун, Е. И. Малые вихри, внутренние волны и фронтальные зоны в Баренцевом и Карском морях по спутниковым данным, полученным за безлёдный период 2007 и 2011 годов / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, А. А. Коник, О. А. Атаджанова, Е. В. Зубкова, И. Е. Козлов // Труды Всероссийской конференции к 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, доктора физико-математических наук, профессора Льва Николаевича Карлина «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы», 2017в. – С. 421–424.

83. Свергун, Е. И. Изменчивость фронтальных разделов и короткопериодные внутренние волны в Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых наблюдений за теплый период 2007 года / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, О. А. Атаджанова, А. А. Коник, Е. В. Зубкова, И. Е. Козлов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 181–188.

84. Сергеева, В. М. Структура и распределение фитопланктона в глубоководных районах северной части Карского моря / В. М. Сергеева, И. Н. Суханова, Е. И. Дружкова, А. Ф. Сажин, А. Б. Демидов, С. А. Мошаров, В. В. Кременецкий, А. С. Полухин // Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. – М.: АПР, 2015. – С.111–115.

85. Федоров, К. Н. Приповерхностный слой океана / К. Н. Федоров, А. И. Гинзбург – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 304 с.

86. Федоров, К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов / Федоров К. Н. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 296 с.

87. Физический энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 944 с.

88. Филатов, Н. Н. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевик. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 335 с.

89. Флинт, М. В. Мезопланктон области континентального склона в Карском море / М. В. Флинт, С. Г. Поярков, К. А. Соловьев // Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. – М.: АПР, 2015. – С. 129–134.
90. Чвилев, С. В. Гидрологические фронты юго–западной части Баренцева моря и их внутригодовая изменчивость / С. В. Чвилев // Гидрология Южного океана и Северной Атлантики: Сб. науч. тр. (межвуз.). – Л.: Изд–во ЛГМИ, 1990. – Вып. 109. – С. 101–116.
91. Чвилев, С. В. Фронтальные зоны Баренцева моря / С. В. Чвилев // Метеорология и гидрология. – 1991. – №.11. – С. 103–108.
92. Щука, С. А. Структура течений Карского моря / С. А. Щука, В. В. Кременецкий, А. А. Недоспасов, А. О. Корж // Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. – М.: АПР, 2015. – С. 23–28.
93. Asia–Pacific data–research center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apdrc.soest.hawaii.edu/> (дата обращения: 08.08.2015).
94. Atadzhanova, O. A. Sub–mesoscale structures of the White sea: small eddies and short–period internal waves / O. A. Atadzhanova, A. V. Zimin, D. A. Romanenkov, I. E. Kozlov, B. Chapron // Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях; 2015 г., Калининград: Сборник материалов конференции». – М: Изд.: МАКСПресс, 2015. – С. 26–29.
95. Basedow, S. L. Secondary production at the Polar Front, Barents Sea, August 2007 / S. L. Basedow, M. Zhou, K. S. Tande, // Journal of Marine Systems. –2014. – Vol. 130. – P. 147–159.
96. Brink, K. H. Instability of a tidal mixing front in the presence of realistic tides and mixing / K. H. Brink // Journal of Marine Research. – 2013. – Vol. 71. –P. 227–252.
97. Capet X. Mesoscale to submesoscale transition in the California Current system. Part I: Frontal processes / X. Capet, J.C. McWilliams, M.J. Molemaker, A.F. Shchepetkin // J. Phys. Oceanogr. – 2008.a. – Vol. 38(1). – P. 29–43.

98. Capet X. Mesoscale to submesoscale transition in the California Current system. Part II: Frontal processes / X. Capet, J. C. McWilliams, M. J. Molemaker, A. F. Shchepetkin // *J. Phys. Oceanogr.* – 2008.b. – Vol. 38(1). – P.44–64.
99. Chelton, D. B. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation. / D. B. Chelton, R.A. De Szoeke, M. G. Schlax, K. L. Naggar, N. Siwerts // *J. Phys. Oceanogr.* – 1998. – Vol. 28. – P. 433–460.
100. D’Asaro, E. A. Generation of submesoscale vortices: A new mechanism / E. A. D’Asaro // *J. Geophys. Res.* – 1988. – Vol.93, №C6. – P.6685–6693.
101. DiGiacomo, P. M. Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight / P. M. DiGiacomo, B. Holt // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106. – №C10. – P.22521–22543.
102. ECCO2 Cube92 model output [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/ecco2\\_cube92.php](http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/ecco2_cube92.php) – свободный (дата обращения 18.05.2016).
103. Gurova, E. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic / E. Gurova, B. Chubarenko // *Oceanologia.* – 2012. – Vol.54, № 4. – P. 631–654.
104. Hattermann, T. Eddy-driven recirculation of Atlantic Water in Fram Strait / T. Hattermann, P. E. Isachsen, W.-J. von Appen, J. Albretsen, A. Sundfjord // *Geophysical Research Letters.* – 2016. – V. 43, Issue 7. –P.3406–3414.
105. Johannessen, O. M. A note on the topographically controlled oceanic Polar Front in the Barents Sea / O. M. Johannessen, L. A. Foster // *J. Geophys. Res.* – 1978. – V.83, № C9 – P. 4567–4571.
106. Karimova, S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data / S. Karimova // *Advances in Space Research.* – 2012. – Vol. 50 –P.1107–1124.
107. Karimova, S. Eddies in the Red Sea as seen by satellite SAR imagery / S. Karimova, M. Gade, in: Barale, V., Gade, M. (Eds.) // *Remote Sensing of the African Seas.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – P. 357–378.

108. Karimova, S. Improved statistics of submesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery / S. Karimova, M. Gade // *International Journal of Remote Sensing*. – 2016. – Vol.37, Issue 10. – P. 2394–2414.
109. Klein, P. The oceanic vertical pump induced by mesoscale and submesoscale turbulence / P. Klein, G. Lapeyre // *Annu. Rev. Mar. Sci.* – 2009. – Vol. 1(1). – P. 351–375.
110. Kozlov, I. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea / I. Kozlov, D. Romanenkov, A. Zimin, B. Chapron // *Remote Sens. Environ.* – 2014. – Vol.147 – P. 99–107.
111. Kozlov, I. E. Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data / I. E. Kozlov, V. N. Kudryavtsev, E. V. Zubkova, A. V. Zimin, B. Chapron // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – Vol. 51, issue 9. – P. 1073–1087.
112. Kravchishina, M. D. Spatial and temporal variability of chlorophyll “a” in the White Sea in 2002–2010 from satellite and ship data / M. D. Kravchishina, V. I. Burenkov, O. V. Kopelevich, S. V. Sheberstov, S. V. Vazyulya, N. V. Politova, A. N. Novigatsky, A. S. Filippov, V. P. Shevchenko // *Proceedings of the VI International Conference “Current problems in Optics of Natural Waters (ONW’2011)”*. – St.–Peterburg, September 6–9, 2011. – P. 82–85
113. Kubryakov, A. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based Lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data / A. Kubryakov, S. Stanichny, A. Zatsepin // *Remote sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 176. – P. 177–187.
114. Kushnir, V. “Flashes” of chlorophyll-a concentration derived from in situ and remote sensing data at the polar front in the Barents sea / V. Kushnir, V. Pavlov, A. Morozov, O. Pavlova // *The Open Oceanography Journal*. – 2011. – Vol. 5. – P. 14–21.
115. Mahadevan, A. An analysis of mechanisms for submesoscale vertical motion at ocean fronts / A. Mahadevan, A. Tandon // *Ocean Modell.* – 2006. – Vol. 14 (3–4). – P. 241–256.

116. Manucharyan, G. E. Submesoscale sea ice-ocean interactions in marginal ice zones / G. E. Manucharyan, A. F. Thompson // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2017. – Vol.122, Issue12. – P. 9455–9475.
117. Mensa, J. A. Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics / J. A. Mensa, M.–L. Timmermans, I. E. Kozlov, W. J. Williams, T. Özgökmen // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2018. – Vol. 123. – P. 2635–2645.
118. Mityagina, M. I. Multi-sensor study of eddy and internal wave dynamics in the north-eastern Black Sea coastal waters / M. I. Mityagina, O. Yu. Lavrova., S. S. Karimova // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 31, №17. – P. 4779–4790.
119. Munk, W. Spirals on the Sea / W. Munk, L. Armi, K. Fischer, F. Zachariasen // *P.Roy.Soc. A Math. Phy.* – 2000. – V. 456. – P. 1217–1280.
120. Nakamura, T. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow / T. Nakamura, J. P. Matthews, T. Awaji, H. Mitsudera // *J. Geophys. Res.* – 2012. – Vol. 117. – C. 12014.
121. National snow and ice data center. Arctic sea ice news and analysis. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-ice-graph/> (дата обращения: 18.04.2017).
122. Nenciolia, F. Physical dynamics and biological implications of a mesoscale eddy in the lee of Hawai'i: Cyclone Opal observations during E-Flux III/ F. Nenciolia, V. S. Kuwaharaa, T. D. Dickeya, Y. M. Riic, R. R. Bidigarec // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. – 2008. – Vol. 55, Issues 10–13. – P. 1252–1274.
123. NOAA NCEP-NCAR CDAS-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/> – свободный (дата обращения 18.09.2018).
124. Nurser, A. J. G., Bacon S. The Rossby radius in the Arctic Ocean / A. J. G. Nurser, S. Bacon // *Ocean Science*. – 2014. – Vol. 10, Issue 6. – P. 967–975.

125. Ocean Color Web. Data browsers. Level 1 and 2 Browser. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl> (дата обращения 01.04.2015).
126. Oziel, L. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) / L. Oziel, J. Sirven, J–C. Gascard // *Ocean Science*. – 2016. – Vol. 12. – P. 169–184.
127. Parsons, A. R. The Barents Sea Polar Front in summer / A. R. Parsons, R. H. Bourke, R. D. Muench, C. S. Chiu, J. F. Lynch, J. H. Miller, A. J. Plueddemann, R. Pawlowicz // *Journal of Geophysical Research*. – 1996. – Vol. 101(C6) – P. 14201–14221.
128. Pavlov, V. K. Hydrometeorological regime of the Kara, Laptev, and EastSiberian seas / V. K. Pavlov, L. A. Timokhov, G. A. Baskakov, M. Y. Kulakov, V. K. Kurazhov, P. V. Pavlov, S. V. Pivovarov, V. V. Stanovoy // *Technical Memorandum APL–UW TM1–96*, University of Washington. – P. 1996. – 179.
129. Polyakov, I. V. Greater role for Atlantic inflows on sea–ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean / I.V. Polyakov, A. V. Pnyushkov, M. B. Alkire, I. M. Ashik, T. M. Baumann, E. C. Carmack, I. Goszczko, J. Guthrie, V. V. Ivanov, T. Kanzow, R. Krishfield, R. Kwok, A. Sundfjord, J. Morison, R. Rember, A. Yulin // *Science*. – 2017. – Vol. 356 (6335). – P. 285–291.
130. Sentinel Online – ESA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sentinel.esa.int> (дата обращения: 20.12.2016).
131. Stewart, R. H. Introduction to physical oceanography [Электронный ресурс] / R. H. Stewart. – Texas A & M University, 2008. – 345 p. – Режим доступа: [https://www.colorado.edu/oclab/sites/default/files/attached-files/stewart\\_textbook.pdf](https://www.colorado.edu/oclab/sites/default/files/attached-files/stewart_textbook.pdf) (дата обращения: 17.10.2015).
132. Swenson, M. S. Statistical analysis of the surface circulation of the California Current / M. S. Swenson, P. P. Niiler // *J. Geophys. Res.* – 1996. – Vol.101. – № C10. – P. 22631–22645.

133. Thomas, L. N. Friction, frontogenesis, and the stratification of the surface mixed layer / L. N. Thomas, R. Ferrari // *J. Phys. Oceanogr.* – 2008. – Vol. 38(11). – P. 2501–2518.
134. Thomas, L. N. Submesoscale processes and dynamics / L. N. Thomas, A. Tandon, A. Mahadevan // *Ocean Modeling in an Eddy Regime, Geophys. Monogr. Ser.* – 2008. – Vol. 177. – P. 17–38.
135. Timmermans, M.–L. Scales of horizontal density structure in the Chukchi Sea surface layer / M.–L. Timmermans, P. Winsor // *Continental Shelf Research.* – 2013. – Vol. 52. – P. 39–45.
136. Vage, S. Physical structure of the Barents Sea Polar Front near Storbanken in August 2007 / S. Vage, S. L. Basedow, K. S. Tande, M. Zhou // *Journal of Marine System.* – 2014. – Vol. 130. – P. 256–262.
137. Zhao, M. Characterizing the eddy field in the Arctic Ocean halocline / M. Zhao, M.–L. Timmermans, S. Cole, R. Krishfield, A. Proshutinsky, J. Toole // *Journal of Geophysical Research Oceans.* – 2014. – Vol. 119, Issue 12. – P. 8800–8817.
138. Zhong, Y. Submesoscale impacts on horizontal and vertical transport in the Gulf of Mexico / Y. Zhong, A. Bracco // *J. Geophys. Res. Oceans.* – 2013. – Vol. 104. – P. 5651–5668.
139. Zimin, A. V. Complex monitoring of short–period internal waves in the White Sea / A. V. Zimin, I. E. Kozlov, O. A. Atadzhanova, B. Chapron // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* – 2016. – Vol. 52. – P. 951–960.