

*На правах рукописи*

АТАДЖАНОВА ОКСАНА АЛИШЕРОВНА

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

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (Санкт-Петербургский филиал)

**Научный руководитель:** **Зимин Алексей Вадимович**  
доктор географических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Белоненко Татьяна Васильевна**  
доктор географических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
университет»,  
профессор кафедры океанологии

**Белокопытов Владимир Николаевич**  
доктор географических наук,  
старший научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки «Морской гидрофизический институт РАН»,  
ведущий научный сотрудник отдела океанографии

**Ведущая организация:**

Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена» (Фонд «Нансен-центр»)

Защита состоится «14» мая 2019 года в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 900.010.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института [http://mhi-ras.ru/thesis\\_defenses.html](http://mhi-ras.ru/thesis_defenses.html)

Автореферат разослан «    »                    2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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, солёности 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 обеспечивать 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 (Горловская, Соловецкая, Двинская, Онежская фронтальные зоны) связаны с географическим положением [Филатов, Тержевик, 2007; Романенков и др, 2016]. В работе [Гидрометеорология..., 1991] упоминаются вихревые структуры с масштабами порядка единиц километров и временем жизни несколько часов, которые отмечались в районе Горловского фронта на основе данных инфракрасного 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.

**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 (ТПМ) продукта OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis). 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.** Впервые показано, что субмезомасштабные вихревые структуры – распространенное явление на акватории Баренцева, Карского и Белого морей в

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

**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).

**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.

**Степень достоверности и апробация результатов.** 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. 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 Всероссийская 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 (2013–2015 гг.), 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.

**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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, выполнен краткий обзор предыдущих исследований по теме, сформулированы цель и задачи работы, изложена научная новизна, сформулированы выносимые на защиту положения, описаны теоретическая и практическая значимость и представлена апробация работы, приводятся сведения о структуре работы и объеме диссертации.

В **Первой главе** рассматриваются «Предмет и объект исследования».

В *Разделе 1.1. «Субмезомасштабные вихри как предмет исследования»* рассматривается классификация масштабов неоднородностей гидрофизических полей и описывается место субмезомасштаба в данной классификации. Указано, что к субмезомасштабному интервалу относятся вихревые структуры с пространственным масштабом от долей до десятка километров (порядка бароклинного радиуса Россби) и временем жизни от нескольких часов до суток. Приводится разделение вихрей по типам в зависимости от их механизма генерации. Дан обзор методов исследования вихрей, на основе которого сделан вывод о том, что наилучшим средством их изучения в Арктическом регионе является использование данных спутниковых РЛИ.

В *Разделе 1.2. «Характеристика объектов исследования: Баренцева, Карского и Белого морей»* приводятся физико-географические особенности каждого моря. Все три моря относятся к морям Северного Ледовитого океана, имеют сложный рельеф дна, характеризуются малыми оценками бароклинного радиуса Россби (средние оценки от 3 до 5 км), обладают сезонным ледовым покровом и в теплый период прижатым к поверхности пикноклином.

Во **Второй главе** анализируются «Особенности проявлений субмезомасштабных вихрей в Белом море».

В *Разделе 2.1. «Проявления субмезомасштабных вихревых структур в разных типах данных»* приводятся результаты сопоставления разнородных данных: спутниковых (РЛИ, карты ТПМ и концентрации хлорофилла) и in-situ наблюдений (температура воды и концентрация хлорофилла), которые позволили выявить, что субмезомасштабные вихри являются структурами, прослеживающимися во всем верхнем слое до глубины сезонного пикноклина. Также показано, что вихри могут характеризоваться как подъемом (в виде пятна холодных вод на поверхности), так и опусканием вод (в виде пятна теплых вод на поверхности), не зависимо от типа вращения, определяемого по РЛИ (Таблица 1), что подтверждает агеострофический характер их развития.

Таблица 1 – Распределение количества вихрей в штуках по характерным проявлениям

Тип вращения	Холодное пятно	Теплое пятно	Вне поля ГПМ	Не проявляется	Итого
Циклонический	6	3	3	2	14
Антициклонический	1	2	1	0	4

В Разделе 2.2. «Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур» приводятся результаты анализа 221 радиолокационного изображения Envisat ASAR, Radarsar-1, 2, охватывающих Белое море за период с мая по сентябрь 2009–2012 гг.. В среднем покрытие было относительно равномерным и составило 120 РЛИ за исследуемый период (Рисунок 1а).

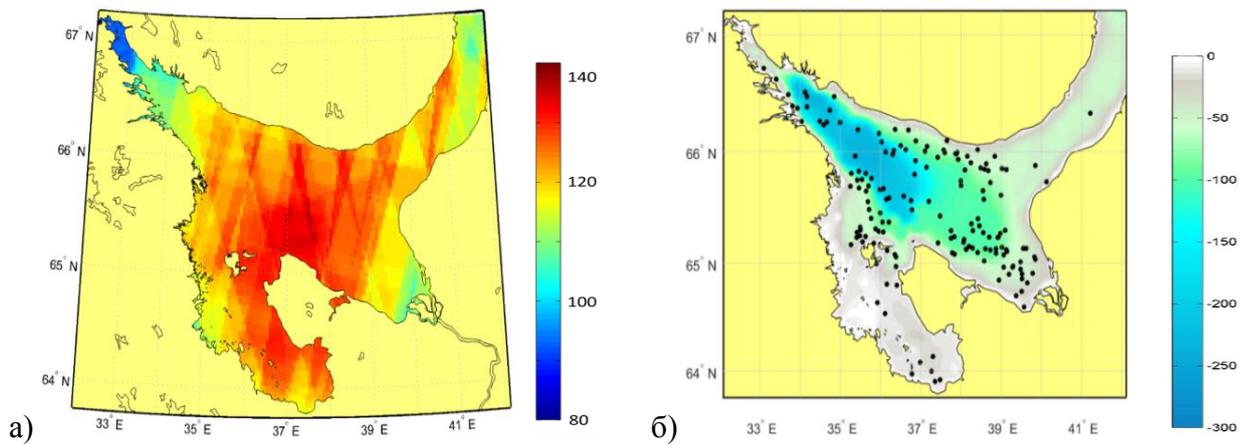


Рисунок 1 – Карты Белого моря за май – сентябрь 2009–2012 гг., на которых изображено покрытие акватории радиолокационными изображениями в шт. (а) и распределение центров поверхностных проявлений вихрей (б), шкала глубин в м

Методика детектирования субмезомасштабных вихревых структур [Зимин и др., 2016] аналогична методике, используемой российскими и зарубежными специалистами для других морей [Митягина, Лаврова, 2009; Каримова, 2012; Karimova, Gade, 2014]. Для вихрей определялись координаты центра, диаметр, тип вращения (антициклонический (Az) /циклонический (Zn)), дата и время регистрации.

За весь исследуемый период было зарегистрировано 162 поверхностных проявления субмезомасштабных вихревых структур, из которых почти три четверти оказались с циклоническим типом закрутки. Такая особенность отмечалась и для других морей, для объяснения которой выдвигались различные гипотезы [Митягина, Лаврова, 2009; Каримова, 2012; Nakamura et al., 2012; Karimova, Gade, 2014].

Выявлено, что проявления чаще всего регистрировались севернее Соловецких островов, на границе Двинского залива и Бассейна, а также вдоль Терского берега (Рисунок 1б), хотя тенденции по размеру на акватории не прослеживалось: встречались как крупные, так и небольшие вихри. В течение сезона вихри чаще всего отмечались в начале теплого сезона в период формирования приповерхностного пикноклина, а с июля по сентябрь количество регистрируемых проявлений уменьшилось в 2–3 раза (Таблица 2). Как минимум 75 % вихрей имели порядок бароклинного радиуса Россби, что позволяет отнести их к субмезомасштабу, чаще всего встречались вихри с диаметром от 2 до 4 км (~ 37 %), а средний диаметр составил 4,7 км. Также отмечалось преобладание среднего размера антициклонических вихрей над циклоническими. Вероятно, это связано с тем, что в среднем антициклонические вихри существуют дольше и достигают больших размеров, чем циклонические [Митягина, Лаврова, 2009].

Таблица 2 – Параметры 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

В Разделе 2.3. «Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны» приводится изученность фронтальных зон в Белом море и рассматривается внутрисезонная и внутримесячная фронтальная динамика (Рисунок 2). Анализ фронтальной динамики позволил выявить, что среднемесячные положения термических поверхностных фронтов были близки к средним за сезон, однако среднедекадные положения (Рисунок 2а) иллюстрировали значительную внутримесячную изменчивость их положения.

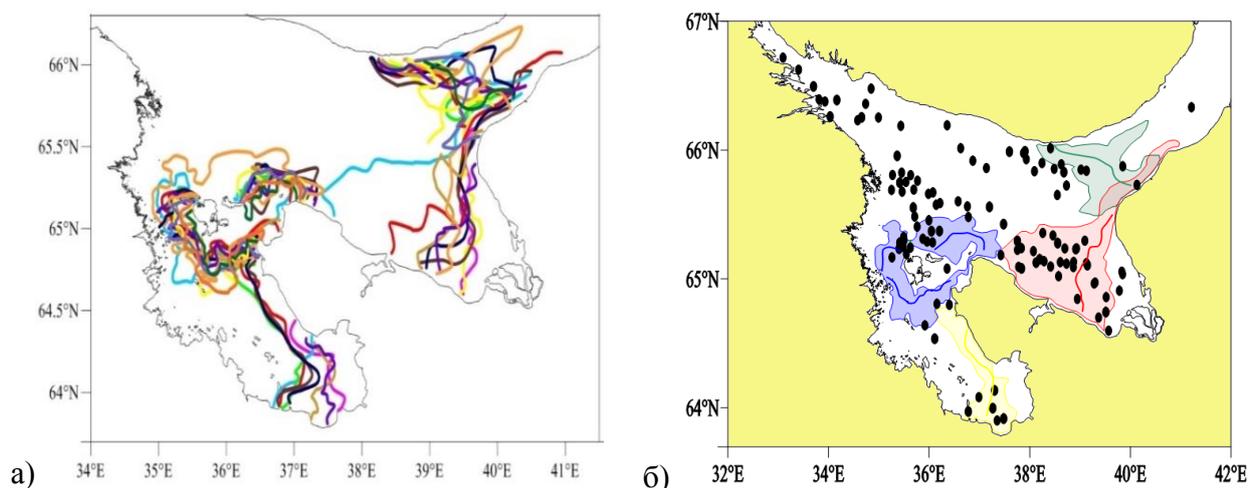


Рисунок 2 – Фронтальная динамика в Белом море по данным за май–сентябрь 2010 г., где а – средние положения Горловского, Двинского, Соловецкого и Онежского фронтов за каждую из 14 декад по [Романенков и др., 2016], б – композитная карта, где сплошная линия означает среднее положение фронта за сезон, зеленый цвет – область изменчивости за сезон Горловской ФЗ, красный – Онежской, синий – Соловецкой, желтый – Двинской, черные точки – положения центров вихрей

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 отмечалось максимальное смещение фронтов. Пример композитной карты за весь сезон представлен на Рисунке 2б.

В третьей главе исследуются «Особенности проявлений субмезомасштабных вихрей в Баренцевом море».

В Разделе 3.1. «Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур» рассматривается изученность субмезомасштабных вихрей в Баренцевом море, и анализируются характеристики

проявлений субмезомасштабных вихрей, детектированных по методике, используемой для Белого моря [Зимин и др., 2016], на основе изображений радиолокатора ENVISAT ASAR за июнь-октябрь 2007 (1203 изображения) и 2011 (838 изображений) годов. Покрытие за оба года в среднем составило около 300 РЛИ (Рисунок 3а). Выбор этих лет был обусловлен минимальным распространением льда на акватории [Жичкин, 2015] за период работы радиолокатора синтезированной апертуры ENVISAT ASAR с весны 2002 по весну 2012 года и большой обеспеченностью данными в этот период.

В результате анализа РЛИ в Баренцевом море было зарегистрировано 2934 поверхностных проявлений вихрей (2187 шт. в 2007 г. и 747 в 2011 г.), из них почти 80 % вихрей имели циклонический тип вращения.

Впервые установлены районы частой регистрации проявлений субмезомасштабных вихрей на акватории Баренцева моря (Рисунок 3б): северо-западнее Земли 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 Канина, севернее Кольского полуострова. В этих районах частота встречаемости (отношение количества РЛИ к количеству вихрей) составила более 0,1, т.е. чаще, чем на каждом 10 РЛИ. Районы частой регистрации вихрей от года к году преимущественно сохранялись.

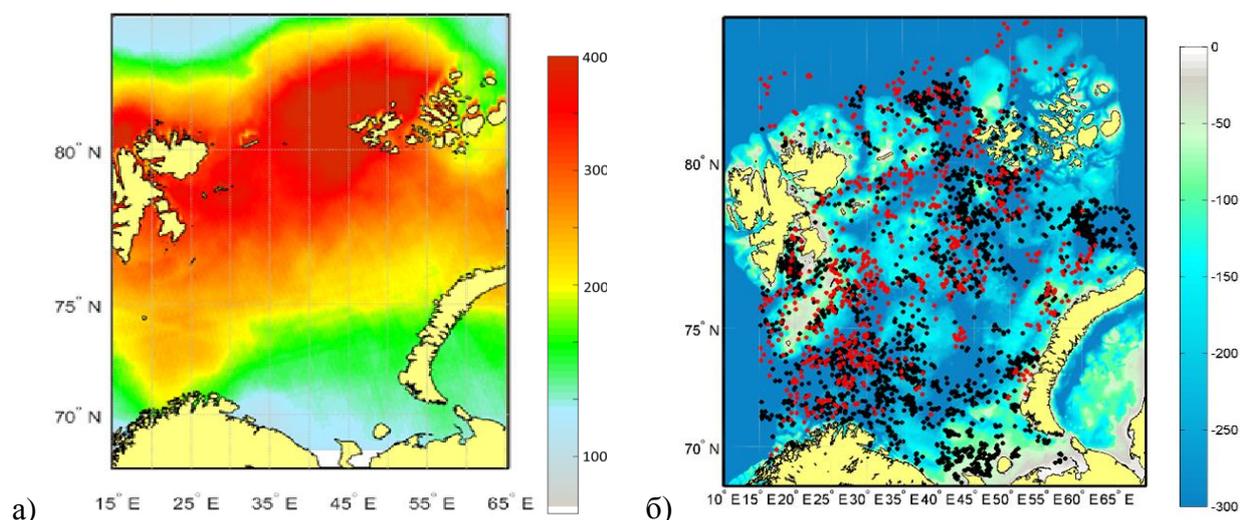


Рисунок 3 – Карты Баренцева моря за июнь – октябрь за 2007 и 2011 гг., на которых изображены покрытие акватории РЛИ в шт. (а) и распределение центров вихрей за 2007 (черные точки), 2011 (красные точки) гг. (б), где шкала глубин в м

Выявлены тенденция в уменьшении размеров вихрей с юго-запада на северо-восток при распределении вихрей на акватории Баренцева моря и преобладание средних диаметров антициклонических вихрей над циклоническими. Чаще всего проявлялись вихри с диаметром от 2 до 4 км (~45 %) при среднем диаметре всех вихрей 3,6 км. При этом не менее 85–90 % вихрей имели порядок бароклинного радиуса Россби, что позволяет отнести их к субмезомасштабу.

Показано, что в течение сезона, как в целом, так и для каждого года в отдельности (Таблица 3), наиболее интенсивна динамика проявлений вихрей в первой половине теплого сезона, при этом пик регистрировался в июле, когда отмечается интенсивное формирование сезонного приповерхностного пикноклина.

К концу сезона количество вихрей за месяц уменьшилось в 4,5 раза. Общие тенденции для всего сезона в целом сохранялись в оба года.

Полученные оценки диаметров вихрей порядка бароклинного радиуса Россби позволяют предположить, что в качестве основного механизма их генерации выступает бароклинная неустойчивость в районах фронтальных зон.

Таблица 3 – Параметры 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
<i>Итого</i>	<i>506</i>	<i>1681</i>	<i>2187</i>	<i>4,2(0,2–21)</i>	<i>3,4(0,2–25)</i>	<i>3,6</i>
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
<i>Итого</i>	<i>45</i>	<i>702</i>	<i>747</i>	<i>4,2(1,6–14,5)</i>	<i>3,3(0,9–15,6)</i>	<i>3,3</i>

В Разделе 3.2. «Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны» рассматривается изученность фронтальных зон в Баренцевом море, и приводятся результаты анализа среднемесячных и среднедекадных поверхностных положений термических фронтов (Прикромочной и Полярной ФЗ) и характеристик фронтальных зон за период с июня по октябрь 2007 и 2011 гг., полученных на основе данных по ТПМ продукта OSTIA GHRSSST, а также оценки количества вихрей внутри областей изменчивости ФЗ.

Производилось осреднение суточных данных ТПМ по декадам и месяцам, рассчитывались поля градиентов с теми же периодами осреднения. По картам градиентов ТПМ выделялись области максимумов (больше климатического градиента минимум в 2 раза), 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 внутри фронтальной зоны для каждой декады и каждого месяца. Для оценки средней ширины фронтальных зон и максимального градиента внутри нее использовалось по три меридиональных разреза градиента ТПМ: 20°, 35° и 50° в. д. Композитные карты за каждый месяц для количественной оценки включали в себя 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 (около 50 км). При анализе композитных карт производился подсчет количества поверхностных проявлений вихрей за каждый месяц, попадающих в область изменчивости ФЗ.

Впервые полученные среднедекадные положения фронтов для теплого сезона показали, что внутримесячная динамика была интенсивнее внутрисезонной и максимальна в июле в оба года, при этом наибольшие смещения фронтов Прикромочной и Полярной ФЗ отмечалось именно в 2007 году. Ширина ФЗ составила в среднем около 100 км.

Композитные карты показали, что вихревая активность внутри областей изменчивости ФЗ отмечается в течение каждого месяца, при этом наиболее она интенсивна в

период наибольшей фронтальной динамики, когда области изменчивости ФЗ максимальны. Наибольшее смещение положений фронтов отмечалось в июле во все года (Рисунок 4), когда в области изменчивости попадало до половины вихрей, зарегистрированных за месяц, что подтверждает связь между частотой проявлений вихревых структур и фронтальной динамикой, которая способствует развитию процессов, связанных с бароклиной неустойчивостью.

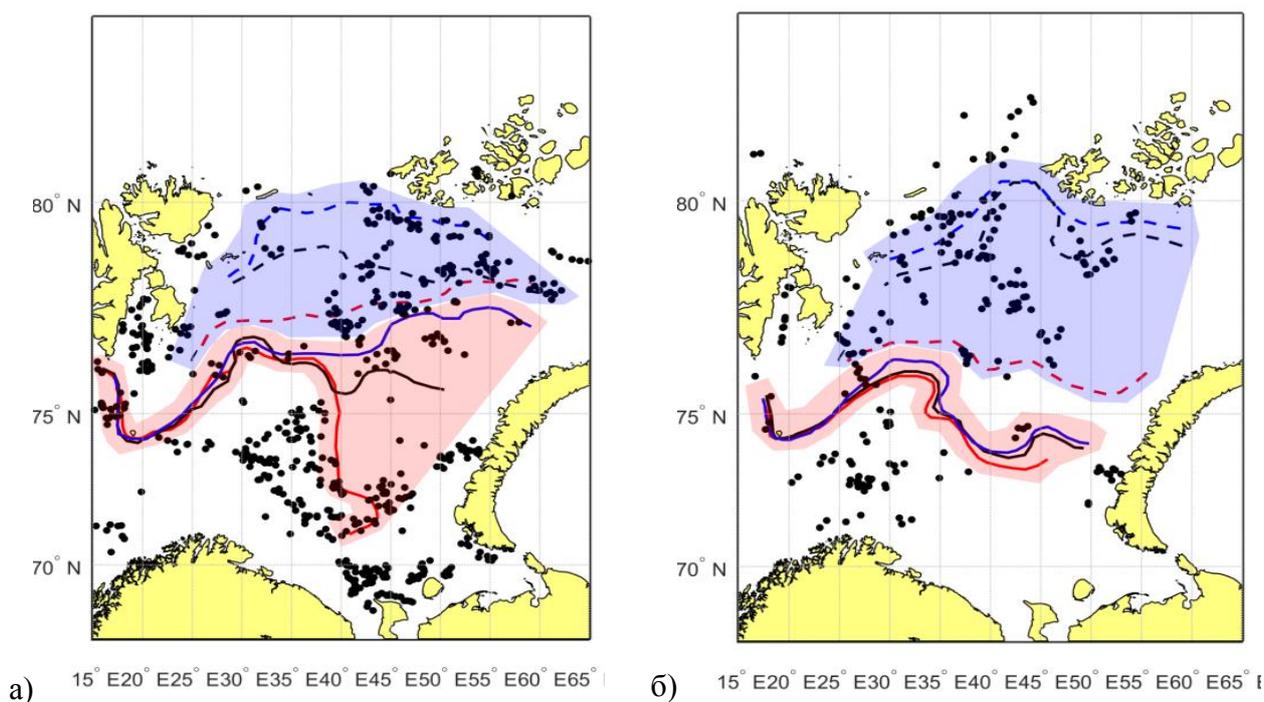


Рисунок 4 – Композитные карты Баренцева моря за июль 2007 (а) и 2011(б) гг. Черные точки – положения центров вихрей за месяц. Пунктирная линия – положения Прикромочного фронта, сплошная линия – Полярного фронта, красная линия – положения фронтов за первую декаду, черная – за вторую декаду, синяя – за третью декаду. Синие и красные области – области изменчивости Прикромочной и Полярной ФЗ соответственно

В Разделе 3.3. «Вихревые структуры над неровностями дна и приливные процессы» приведены результаты совместного анализа положений центров поверхностных проявлений вихревых структур в Баренцевом море над неровностями дна и периодами приливных течений. Характеристики вихревых структур в исследуемом районе в среднем соответствуют средним по акватории.

Чаще всего вихревые структуры над неровностями (больше половины вихрей) дна регистрировались в сизигийный прилив, когда приливные течения максимальны, что показывает связь между проявлениями вихрей и интенсивностью приливных процессов.

В четвертой главе рассматриваются «Особенности проявлений субмезомасштабных вихрей в Карском море».

В Разделе 4.1. «Пространственно-временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений вихревых структур» анализируются зарегистрированные характеристики проявлений субмезомасштабных вихрей в Карском море. Методика выделения характеристик аналогична используемой для Белого и Баренцева морей [Зимин и др., 2016]. В качестве исходных данных использовались РЛИ сенсора ENVISAT ASAR за июнь-октябрь 2007 (900 изображений) и 2011 (275 изображений) годов, покрытие представлено на Рисунке 5а и в среднем составило около 300 РЛИ по акватории.

Вихреобразование преимущественно сконцентрировано в центральной и юго-западной частях моря, где наблюдаются глубины до 100 м (Рисунок 5б). Всего за теплый

период 2007 и 2011 гг. было зарегистрировано 1444 проявлений вихрей (1242 шт. в 2007 г. и 202 в 2011 г.), из них 91 вихрь был антициклоническим, 1353 – циклонический.

Впервые выявлены районы частой регистрации поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей в Карском море: в зоне распространения речных вод и формирования сезонного Стокового фронта, а именно между северной оконечностью Новой Земли и западным берегом полуострова Ямал, в центральной части шельфа моря, 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 северной оконечности Новой Земли.

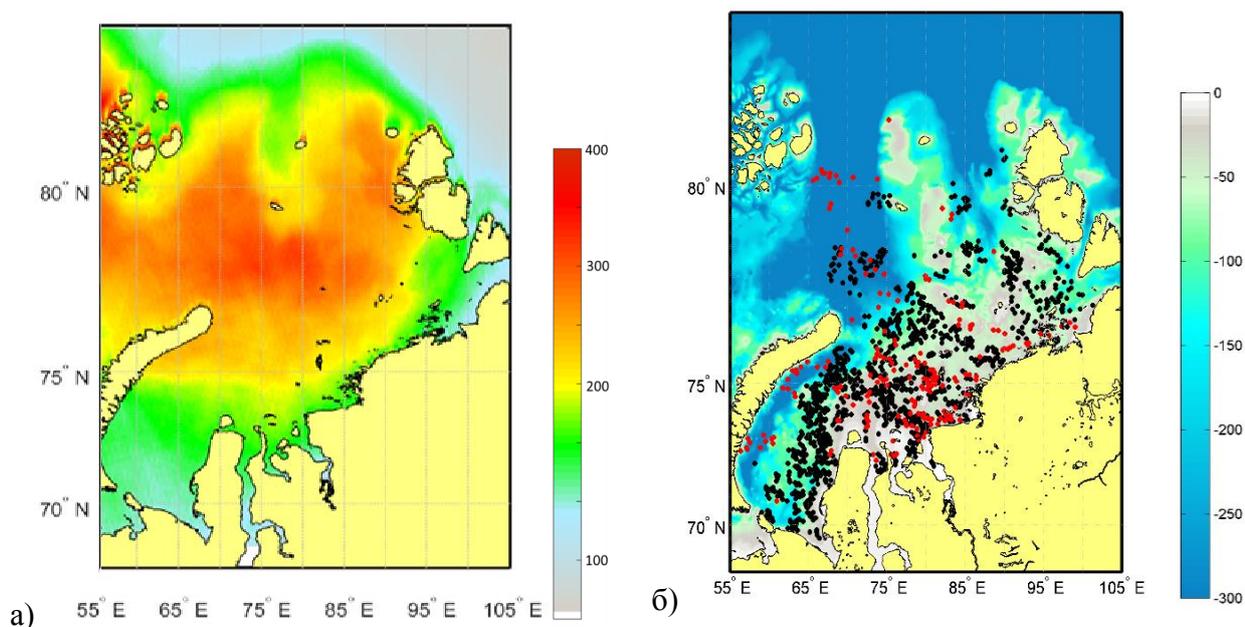


Рисунок 5 – Карты Карского моря за июнь – октябрь за 2007 и 2011 гг., на которых изображено покрытие акватории радиолокационными изображениями в шт. (а) и распределение центров поверхностных проявлений вихрей за теплый период 2007 (черные точки), 2011 (красные точки) гг. (б), шкала глубин в м

Крупные вихри (больше 6 км) на акватории регистрировались крайне редко, и более 50% вихрей имели диаметр от 2 до 4 км. Средний диаметр составил 2,5 км, в течение сезона варьировался в пределах единиц километров и был порядка бароклинного радиуса Россби, при этом средний размер антициклонических вихрей больше, чем у циклонических, что характерно и для каждого года.

Установлено, что наибольшая вихревая активность в целом за теплый сезон двух лет отмечалась в августе, при этом в оба года каждый месяц отмечалось значительное преобладание циклонических структур. При сохранении общих тенденций сезона отмечаются значительные различия во внутрисезонной динамике проявлений для каждого года в отдельности (Таблица 4). Это может быть связано с сильно различающимися ледовыми условиями и количеством РЛИ, покрывающими акваторию моря. Пик вихревой активности в 2007 г. приходится на август, в то время как в 2011 г. – на сентябрь, однако в 2011 г. было зарегистрировано в 6 раз меньше проявлений.

Так же как и в Баренцевом море для вихрей с масштабом порядка радиуса Россби в качестве возможного механизма их генерации может быть бароклинная неустойчивость в районах фронтальных зон.

Таблица 4 – Параметры 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
<i>Итого</i>	<i>77</i>	<i>1165</i>	<i>1242</i>	<i>2,8 (1,1–8,3)</i>	<i>2,3 (0,4–14,4)</i>	<i>2,4</i>
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
<i>Итого</i>	<i>14</i>	<i>188</i>	<i>202</i>	<i>3,9 (1,8–10,8)</i>	<i>2,8 (1,2–12,5)</i>	<i>2,8</i>

В Разделе 4.2. «Субмезомасштабные вихри и основные термические фронтальные зоны» приводится изученность фронтальной динамики в Карском море, и анализируется динамика среднемесячных и среднедекадных поверхностных положений основных термических фронтов Прикромочной и Стоковой ФЗ, а также характеристики фронтальных зон за период с июля по сентябрь 2007 и 2011 гг., полученные на основе данных по ТПМ продукта OSTIA GHRSSST. Методики выделения поверхностных положений фронтов, характеристик фронтальных зон и построения композитных карт (пример на Рисунке 6) аналогичны используемой для Баренцева моря.

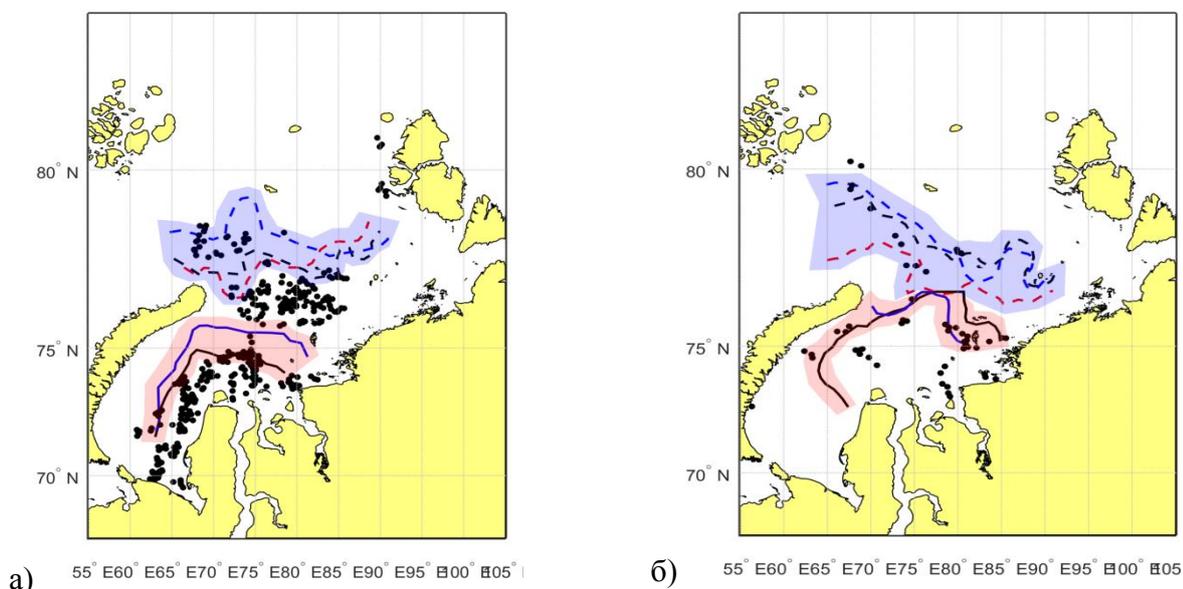


Рисунок 6 – Композитные карты Карского моря за июль 2007 (а) и 2011 (б) гг. Черные точки – положения центров вихрей за месяц. Пунктирная линия – положения Прикромочного фронта, сплошная линия – Полярного, черный – положения фронтов за вторую декаду, синий – за третью. Синие и красные области – области изменчивости Прикромочной и Стоковой ФЗ соответственно

Установлено, что смещение среднемесячных положений фронтов Прикромочной ФЗ за сезон в 2007 г. было значительнее, чем в 2011 г., а для Полярной ФЗ регистрировалась обратная картинка. Средняя ширина ФЗ в течение сезона варьировалась около 100 км.

Анализ композитных карт показал, что вихревые структуры регистрируются внутри областей изменчивости в течение всего сезона, при этом наибольшее число отмечалось в июле в оба года (27 % в 2007 г. и 64,2 % в 2011 г.) (Рисунок 6), когда отмечалась максимальная внутримесячная фронтальная динамика из-за наиболее интенсивно таяние льда северной части моря и распространение модифицированных речным стоком вод в юго-западной части, что способствует развитию процессов, связанных с бароклинной неустойчивостью.

В Разделе 4.3. «Вихревые структуры над неровностями дна и приливные процессы» приводятся результаты сопоставления положений центров проявлений вихрей над неровностями дна и периодами приливных течений в районе северо-восточнее острова Уединения в Карском море по данным за теплый период 2007 года. Выявлено, что чаще всего вихревые структуры (больше 90 %) над неровностями дна регистрировались в сизигийный прилив, когда приливные течения максимальны, что подтверждает связь между образованием вихрей над неровностями дна и интенсивностью приливных процессов.

## 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 проявлений 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 проявлений 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 Земли 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 бароклинные неустойчивости (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  $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . 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 фронтальных зон 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 приливной динамикой в Белом море, следует, что образование субмезомасштабных вихрей над неровностями дна в этих морях связано с интенсивностью приливных течений.

5. Сформулированы 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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. (Atadzhanova, O. A. Submesoscale Eddy Structures and Frontal Dynamics in the Barents Sea / O. A. Atadzhanova, A. V. Zimin, E. I. Svergun, A. A. Konik // Physical Oceanography. – 2018 – V. 25, №3 – P. 220-228).
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. (Atadzhanova, O.A. Satellite Radar Observations of Small Eddies in the White, Barents and Kara Seas / O.A. Atadzhanova, Zimin A.V., Romanenkov D.A., Kozlov I.E. // Physical Oceanography. – 2017 – №2 – P. 75–83).
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 деятеля 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 безледный 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. Атаджанова**, 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://mhiras.ru/news/news\\_201605201055.html](http://mhiras.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 ежегодной 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 поверхности 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.