

На правах рукописи



Зимин Алексей Вадимович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ И
ЯВЛЕНИЙ В БЕЛОМ МОРЕ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (Санкт-Петербургский филиал), Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный консультант:

Родионов Анатолий Александрович, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, директор Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Иванов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела взаимодействия океана и атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург.

Войнов Геннадий Николаевич, доктор географических наук, заведующий лабораторией Санкт-Петербургского отделения Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова», Санкт-Петербург.

Белоненко Татьяна Васильевна, доктор географических наук, старший научный сотрудник кафедры океанологии Института наук о Земле федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, г. Петрозаводск.

Защита состоится «13» октября 2016 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 при ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт - Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета и на сайте:

<http://www.rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «___» сентября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук,
профессор



В.Н. Воробьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Океанологические наблюдения последних десятилетий позволили обнаружить значительную изменчивость течений, температуры и солености с горизонтальным масштабом порядка единиц километров и на временном интервале от долей часов до суток. Она обусловлена такими явлениями и процессами, как тонкая структура вод, короткопериодные внутренние волны, малые вихревые и струйные структуры, локальная динамика фронтальных разделов, которые играют важную роль не только в вертикальном обмене из-за значительных вертикальных скоростей, но и в горизонтальном перемешивании [Thomas et al., 2008; Lévy et al., 2012]. Процессы и явления в указанном (субмезомасштабном) интервале изменчивости в энергетическом аспекте являются переходным звеном в каскаде масштабов от элементов синоптической и мезомасштабной циркуляции к микроструктуре океана [Munk et al., 2000]. В силу несовершенства теоретического описания и трудностей экспериментальных наблюдений субмезомасштабных структур короткопериодные явления и обусловленная ими изменчивость гидрофизических полей оказались недостаточно изученными в прошлые десятилетия, особенно в морях российской Арктики, где в последние годы отмечаются заметные изменения климатических характеристик вод. В частности в летний сезон наблюдается обострение пикноклина, что приводит к повышению амплитуд внутренних волн и увеличивает их роль в перемешивании [Гордеева и др., 2014].

В Белом море сильная полусуточная приливная (мезомасштабная) динамика является ключевым фактором, определяющим регулярность и специфические особенности явлений и процессов на локальных акваториях [Филатов и Тержевик, 2007; Семенов и Булатов, 2010; Пантюлин, 2012]. Однако сведения об изменчивости процессов на временных масштабах от нескольких минут до полусуток (в данной работе они будут называться субприливными) и ассоциируемых с ними субмезомасштабных явлений, которым в Белом море соответствует пространственный масштаб от сотни метров до десяти километров, носят характер качественных оценок или гипотез. Это препятствует эффективному описанию и прогнозированию гидрологических условий, важных для решения прикладных задач, имеющих важное оборонное и хозяйственное значение при развитии Арктической зоны Российской Федерации [Государственная..., 2014]. Поэтому исследования, направленные на создание системы взглядов на пространственно-временные особенности субмезомасштабных процессов в Белом море в условиях современного меняющегося климата, являются актуальным.

Степень разработанности проблемы. Белое море является одним из наиболее изучаемых окраинных бассейнов Северного Ледовитого океана [Гидрометеорология., 1991; Белое...,1995; Бабков, 1998; Филатов и Тержевик, 2007; Система..., 2012]. В нем определен состав водных масс, выявлена сезонная изменчивость вертикальной структуры вод, показана тесная связь изменчивости термохалинных полей с синоптическими и приливными явлениями. Установлены основные фронтальные разделы и выявлена их значительная сезонная изменчивость. Мощные приливные процессы создают доминирующие на акватории квазипериодические полусуточные приливные течения. В районах, где хорошо выражена стратификация, под влиянием приливо-отливных течений должны возникать внутренние волны (ВВ) полусуточного периода, что было показано по результатам численного моделирования [Семенов и Лунева, 1996; Каган и Тимофеев, 2005, Май и Фукс, 2005]. В районах генерации внутренние приливные волны могут иметь амплитуды до 10 м, однако, как показывают расчёты, при распространении они быстро затухают вблизи очагов генерации [Каган и Тимофеев, 2005]. Надежных наблюдений внутренних приливных волн в Белом море практически не было, что не позволяло подтвердить или опровергнуть результаты моделирования.

Вихри с пространственными масштабами порядка единиц километров и временем жизни несколько часов были зарегистрированы на границе пролива Горло с помощью ИК-радиометра еще в 1985 году [Гидрометеорология., 1991], и считается, что их образование связано со сдвиговой неустойчивостью приливного течения. Однако до настоящего времени нет сведений об особенностях пространственной изменчивости характеристик малых вихрей на акватории Белого моря.

Использование данных дистанционных наблюдений высокого разрешения [Ионов и Шилов, 1996; White..., 2005; Коросов, 2007] позволило обнаружить значительную для всего моря мезомасштабную изменчивость температуры и идентифицируемых по ней фронтальных разделов. Известно также, что установившиеся фронты совершают периодические перемещения на 6 – 8 км вдоль векторов приливных течений с полусуточным периодом [Филатов и Тержевик, 2007]. Мезомасштабные особенности динамики вод наблюдались и в ходе экспедиционных исследований [Солянкин и др., 1994; Ижебейкин, 2001]. Распределения гидрологических элементов по пространству указывали на возможность меандрирования фронтальных разделов с отрывом от них вихревых образований с масштабами до десяти километров. Однако эти спутниковые и контактные данные не позволили регистрировать и описывать характер мезомасштабной изменчивости фронтальных разделов. Полностью отсутствуют оценки связи фронтальной динамики и особенностей формирования малых (субмезомасштабных) вихрей и короткопериодных внутренних волн, которые могут

существенным образом влиять на процессы вертикального и горизонтального обмена на акватории моря.

Океанологические наблюдения последних лет в Белом море [Серебряный и др., 2009; Зимин и др., 2014a] позволили обнаружить значительную короткопериодную изменчивость течений, температуры и солености на отдельных акваториях. Например, в 2010 году в юго-западной части моря неоднократно регистрировались колебания термоклина высотой 15 – 17 метров и периодом 15 – 20 минут [Зимин, 2012a], которые были интерпретированы как проявления короткопериодных внутренних волн. Однако на данный момент отсутствуют сведения о пространственно-временном распределении короткопериодных внутренних волн, хотя Белое море является областью интенсивной диссипации приливной энергии в системе морей Северо-Европейского бассейна [Каган и др., 2013], и представляется, что короткопериодные внутренние волны могут наблюдаться регулярно и вносить значительный вклад в перемешивание на обширных акваториях. Более того, подробное описание особенностей гидрологических процессов и явлений на субприливных временных масштабах до сих пор отсутствует [Родионов и др., 2012].

Остается открытым вопрос о роли короткопериодной изменчивости в турбулентном перемешивании на различных акваториях Белого моря. Отсутствуют основанные на наблюдениях оценки коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена, учитывающие влияние субприливных процессов и необходимые для верификации результатов численного моделирования. Обычно в численных моделях эти коэффициенты задаются как параметры, с помощью которых можно добиться достаточно хорошего согласия полученных решений и результатов наблюдений в разные годы [Волженский и др., 2009].

Для заполнения существующих пробелов в наших знаниях о закономерностях субприливной изменчивости гидрофизических полей, физико-географических особенностей проявлений и динамики субмезомасштабных явлений в Белом море требуется разработка технологии исследований, сочетающей методы специализированных высокоразрешающих по времени и пространству контактных и дистанционных наблюдений. Методы должны учитывать специфику шельфового приливного моря, позволяя, с одной стороны, охватывать наблюдениями значительные акватории, а с другой стороны, получать детальные сведения об изменчивости гидрофизических полей на небольших пространственно-временных масштабах с учетом их связи с динамическими процессами большего масштаба.

Результаты сбора данных согласно разработанной методике на акватории Белого моря и их комплексный анализ представляют собой основное содержание исследования, которое позволит ответить на вопрос о роли субмезомасштабной изменчивости в динамике приливного арктического моря и физико-географических факторах, формирующих эту изменчивость.

Цель работы: на основе систематических высокоразрешающих контактных и дистанционных наблюдений установить пространственно-временные закономерности субмезомасштабной изменчивости процессов и явлений в Белом море в зависимости от фоновых гидрометеорологических условий, приливной и фронтальной динамики.

Для достижения поставленной цели формулируются следующие задачи:

1. Разработать методы исследования и совокупного анализа субмезомасштабной и тонкоструктурной изменчивости характеристик гидрофизических полей и процессов на акватории приливного моря на основе целенаправленного сочетания спутниковых и контактных наблюдений.
2. Описать особенности формирования, количественные параметры изменчивости температуры, солёности и течений на масштабах приливного цикла и меньше в разных по гидрологическим условиям районах моря.
3. Описать количественные параметры и причины формирования тонкой термохалинной структуры вод в разных по гидрологическим условиям районах моря.
4. Получить количественные характеристики пространственно-временной изменчивости короткопериодных внутренних волн.
5. Получить количественные характеристики пространственно-временной изменчивости субмезомасштабных вихрей.
6. Выявить особенности синоптической и мезомасштабной фронтальной динамики и оценить ее роль в географическом распределении короткопериодных внутренних волн и субмезомасштабных вихрей.
7. Установить особенности вклада субмезомасштабных явлений в перемешивание на различных участках акватории моря.

Область исследования: исследование выполнено в области, соответствующей шифру специальности 25.00.28 – океанология: раздел 3 – динамические процессы (волны, вихри, течения, пограничные слои) в океане, раздел 4 – процессы формирования водных масс, их пространственно-временной структуры, гидрофизические поля Мирового океана, раздел 16 – методы проведения судовых, береговых и дистанционных океанологических наблюдений, их обработки и анализа.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней **впервые** для Белого моря на основе данных специализированных наблюдений, полученных по оригинальной методике, их анализа и обобщения:

- установлены особенности формирования и количественные параметры изменчивости температуры, солёности, течений на субприливных масштабах в зависимости от морфометрии дна, вертикальной структуры вод и близости фронтальных разделов;
- обосновано, что тонкая структура вод Белого моря формируется в основном под влиянием процессов, связанных с адвекцией, несоответствующей условиям изопикничности;
- определены пространственные особенности распределения характеристик короткопериодных внутренних волн на акватории Белого моря; установлена зависимость их формирования от приливных процессов; выделены районы наибольшей встречаемости и очаги генерации внутренних волн; выделены районы постоянной встречаемости интенсивных короткопериодных внутренних волн;
- получены оценки пространственно-временной изменчивости характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Белого моря, выявлены районы наибольшей и наименьшей встречаемости;
- выявлены особенности синоптической и мезомасштабной изменчивости основных фронтальных разделов и их структурообразующая роль в распределении короткопериодных внутренних волн и субмезомасштабных вихрей;
- оценен вклад субмезомасштабных явлений в горизонтальный и вертикальный турбулентный обмен в разных районах моря.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется полученным прогрессом в исследовании процессов, протекающих на масштабах меньше приливного цикла на акватории шельфового моря Северного Ледовитого океана. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение, устанавливающее физико-географические закономерности субмезомасштабных процессов в Белом море в условиях современного меняющегося климата. Эти закономерности могут быть перенесены на другие приливные арктические моря. Разработанная совокупность методов специальных наблюдений за субмезомасштабной пространственно-временной изменчивостью характеристик гидрофизических полей в приливном море также имеет более широкий спектр применения. Выполненное обобщение показало ранее недооценённый вклад изученных явлений и процессов в общую динамику моря. Полученные результаты могут использоваться для валидации высокоразрешающих термогидродинамических моделей, размещения хозяйств аквакультуры, повышения безопасности эксплуатации подводных объектов, решения экологических задач и минимизации возможных негативных последствий от катастрофических явлений.

При разработке методов были созданы новые технические решения, относящиеся к области измерительной техники, а более конкретно к системам и устройствам для измерения топографии пикноклина и термоклина [Зимин, 2013в; Зимин, 2013г; Зимин, 2013д], и программное обеспечение, которые могут быть использованы в специализированных системах наблюдения за короткопериодной изменчивостью океанологических полей. Массивы накопленной информации [Зимин и др, 2012б; Зимин и др., 2013е; Зимин и др., 2014б; Муравьев и др., 2014б; Зимин и Моисеев, 2015], включающей данные судовых и спутниковых наблюдений, уникальны по своему объему и набору параметров. Они могут использоваться для дальнейшего анализа, выявления закономерностей и моделирования.

Диссертация выполнялась в рамках реализации плановых исследований по базовым темам государственного задания Института океанологии РАН, программе Президиума РАН № 23, Мега-гранта Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0078), гранта Правительства РФ (договор № 14.Z50.31.0012), гранта РФН ("Мировой океан в XXI веке: климат, экосистемы, ресурсы, катастрофы № 14-50-00095), федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственный контракт № 14.B37.21.0639), грантов РФФИ и хоздоговорных работ с Министерством обороны РФ. Результаты работ по теме диссертации вошли составной частью в отчеты по этим темам и грантам. Итоги исследований используются в учебном процессе в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках курсов «Общая океанология», «Методы специальных океанологических измерений».

Методология и методы исследования. Методологическую основу работы составляет подход, базирующийся на получении и комплексной обработке результатов разнородных высокоразрешающих по времени и пространству контактных и дистанционных наблюдений, путем их сопоставления, картографирования, статистического анализа, а также теоретического анализа факторов и процессов, формирующих изменчивость гидрофизических полей на субмезомасштабном интервале изменчивости в приливном море.

Основная гипотеза исследования заключается в предположении о том, что в Белом море сильная приливная динамика является ключевым фактором, определяющим явления и процессы на масштабах от сотни метров до десятка километров и временном интервале от минут до полусуток. Короткопериодные внутренние волны, малые вихри и интенсивная фронтальная динамика, обусловленные преимущественно приливным воздействием, формируют субмезомасштабные и тонкоструктурные неоднородности гидрофизических полей и аномалии вертикального и горизонтального перемешивания вод.

Исходными данными для исследования являлись: данные учтенных по времени и пространству наблюдений на океанографических полигонах, выполненные в летние сезоны с 2006 по 2014 гг. в различных районах Белого моря по методике, защищенной авторским свидетельством [Зимин, 2013ж]; радиолокационные изображения: Envisat ASAR, Radarsat-1, Radarsat-2 за 2007 и с 2009 по 2012 гг.; данные по температуре поверхности моря MODIS Aqua и Terra за 2010 г. Дополнительно привлекались открытые архивы данных моделирования баротропного прилива и метеорологических карт приземного анализа.

Классические гидрологические подходы, основанные на анализе данных стандартных океанографических станций, дали возможность определить особенности вертикальной стратификации вод, индексы наблюдаемых водных масс, положения фронтальных разделов и т.д. Это позволило отнести районы, на которых выполнялись специальные натурные эксперименты, к участкам акватории с тем или иным характерным для моря гидрологическим режимом. Для каждого выделенного гидрологического района с использованием описательной статистики и спектрального анализа производилась оценка изменчивости характеристик вод (температуры, солености, течений) по данным контактных наблюдений в ходе приливного цикла.

По данным высокоразрешающих контактных измерений определялись повторяемость и обеспеченность высот и периодов колебаний изопикн, и, таким образом, находились характеристики ВВ. Взаимным корреляционным анализом данных, полученных в разных точках полигонов, определялись характерные скорости и длины внутренних волн, а также направления их распространения. Процедура анализа высокоразрешающих спутниковых радиолокационных изображений по характерным проявлениям аномалий на морской поверхности [Козлов и др., 2015] позволила картировать проявления пакетов короткопериодных внутренних волн на акватории всего моря. Для валидации спутниковых данных выполнялось сопоставление характеристик внутренних волн, наблюдаемыми *in situ* и на радиолокационных снимках. На основе спутниковых данных определялись длина цуга волн, количество волн в цуге, длина лидирующей волны, длина гребня лидирующей волны, направление распространения. На основе обобщения спутниковых данных и доступной гидрометеорологической информации производилась оценка временной изменчивости и выявление определяющих ее факторов, районирование особенностей проявлений и выделение очагов генерации короткопериодных внутренних волн.

Для исследования характеристик субмезомасштабной вихревой динамики выполнялись повторяющиеся в разные фазы приливного цикла микрополигонные океанографические съемки. Они позволили установить наличие вихревых образований и определить их характеристики на отдельных участках акватории. Анализ поверхностных проявлений

субмезомасштабных вихрей на всей акватории моря был выполнен с использованием тех же спутниковых изображений (методика изложена в [Лаврова и др., 2011]). Он выявил районы постоянной регистрации поверхностных проявлений вихрей, их тип и характеристики пространственно-временной изменчивости.

Исследование фронтальной динамики базировалось на сочетании результатов контактных измерений на разрезах поперек фронтальных зон различного происхождения в разные фазы приливного цикла и спутниковых данных о характеристиках температуры поверхности моря. Комбинирование этих данных позволило получить представление о синоптической и мезомасштабной (приливной) изменчивости положения основных фронтальных разделов Белого моря. Затем путем комбинирования полученной информации строились композитные карты, сочетающие идентифицированные положения фронтальных разделов, вихревых образований и ВВ. Анализ комплексных карт позволил исследовать связь изменчивости фронтальных разделов и интенсивности проявлений субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн.

Для оценки особенностей турбулентного обмена на масштабах приливного цикла и влияния короткопериодной изменчивости на процессы перемешивания на основе учащенных данных о характеристиках течений рассчитывались коэффициенты вертикального (метод Осборна) и горизонтального (метод Эртеля) турбулентного обмена в различных по типам гидрологических условий районах Белого моря.

Концепция исследования. Субмезомасштабные структуры формируются под влиянием разных по физической природе процессов и в совокупности на акватории моря образуют единую систему, являющуюся переходным звеном от мезомасштабных (приливных) движений к микроструктуре, для их исследования следует применять специальную методологию, сочетающую наблюдения и совокупный анализ широкомасштабных дистанционных и учащенных контактных измерений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы исследования и комплексного анализа тонкоструктурных и субмезомасштабных процессов и явлений на акватории приливного моря на основе сочетания разнородных спутниковых данных и учащенных во времени и пространстве наблюдений на океанографических полигонах, позволяющие проводить мониторинг на акватории всего моря.
2. Закономерности изменчивости гидрофизических полей в субприливном временном масштабе в различных по гидрологическим условиям районах Белого моря.

3. Особенности формирования тонкой термохалинной структуры вод Белого моря.
4. Физико-географические закономерности распределения характеристик и динамики короткопериодных внутренних волн на акватории Белого моря.
5. Физико-географические закономерности распределения характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Белого моря.
6. Закономерности синоптической и мезомасштабной динамики фронтальных разделов в Белом море и ее структурообразующая роль в формировании и распределении субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн.
7. Оценки вклада субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн в турбулентный обмен в Белом море.

Степень достоверности результатов определяется тем, что они получены на основе обширного массива наблюдений, прошедших контроль качества. Результаты анализа данных спутниковых измерений сопоставлялись с данными контактных измерений. Контактные приборы, которыми проводились измерения, прошли государственную поверку. Для обработки результатов использовались методы количественной оценки, не требующие априорных ограничений и, таким образом, исключающие фактор субъективности. Достоверность и новизна научных результатов подтверждается получением авторских свидетельств, патентов и публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах.

Апробация результатов работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, были представлены на следующих научных конференциях и семинарах: Международных конференциях «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт-Петербург, 2007; Москва, 2009, Санкт-Петербург, 2013, Светлогорск, 2015); Международных и Всероссийских конференциях «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург, 2008; 2010; 2012, 2014, 2016); Четвертой межведомственной конференции «Проявление глубинных процессов на морской поверхности» (Нижний Новгород, 2009); Международной конференции «Current Problems in Optics of Natural Waters» (Санкт-Петербург, 2009; 2013, 2015); Международной конференции «Морские исследования полярных областей Земли в международном полярном году 2007/2008» (Санкт-Петербург, 2010); Молодежных конференциях «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2011; 2013, 2015); Международных научно-технической конференциях «Методы и средства океанологических измерений» (Москва, 2011; 2013; 2015); International Conference on Marine Technology (Kuala Terengganu, 2012); Всероссийских открытых ежегодных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2012; 2013, 2014, 2015);

XXIX Международной конференции «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера» (Мурманск, 2013); XII Международной конференции «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря» (Петрозаводск, 2013); семинарах кафедры океанологии и итоговых сессиях ученого совета РГГМУ (Санкт-Петербург, 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2015; 2016); заседаниях Научного совета по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики СПб НЦ РАН (Санкт-Петербург, 2011; 2013); секции ученого совета СПбФ ИО РАН (Санкт-Петербург, 2011; 2012, 2013, 2014, 2015); ученом совете Физического направления ИО РАН (Москва, 2012); семинаре «Система Белого моря» ИО РАН (Москва, 2012; 2016).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликована 51 научная работа, включая 1 раздел в коллективной монографии, 17 статей в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК. Кроме того, диссертантом в соавторстве получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 7 свидетельств о регистрации баз данных, лично 3 патента.

Личный вклад автора заключается в разработке методов исследований, в сборе и обработке исходного материала, постановке цели и задач исследования, их реализации, аналитическом обобщении полученных результатов. Автор лично организовывал и провел все исследования, результаты которых представлены в диссертации.

В частности, соискатель планировал, участвовал и руководил ежегодными экспедиционными исследованиями, выполнявшимися в Белом море с 2006 по 2014 гг. Он разработал оригинальную методику исследования субприливных процессов и явлений. Все гидрологические данные, использованные в работе, получены лично или при его участии. Анализ изменчивости гидрологических полей и процессов был выполнен им самостоятельно.

При его личном участии и методическом руководстве собраны массивы спутниковых данных, послужившие основой исследования, выполнена первичная обработка данных. Им лично проанализированы карты распределения характеристик короткопериодных внутренних волн, малых вихрей и фронтальных разделов и сделаны выводы.

Автор непосредственно принимал участие в создании программных продуктов для обработки данных и формировании баз данных, для получения новых данных им лично разработаны новые технические решения.

Соискателем написана основа большинства статей, опубликованных лично и в соавторстве, представлены на конференциях и научных семинарах результаты выполненных по теме диссертации исследований.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5-ти глав, заключения и списка использованных источников из 195 наименований. В ней содержится 235 страницы, 29 таблиц и 70 рисунков.

Благодарности. Автор, в первую очередь, искренне признателен заслуженному деятелю науки РФ, профессору, д.т.н. А.А. Родионову за его постоянную всестороннюю поддержку в ходе многолетних исследований. Автор благодарен заслуженному работнику высшей школы РФ, профессору, д.ф.-м.н. Л.Н. Карлину за его настоятельную рекомендацию к сотрудничеству с Лабораторией спутниковой океанографии РГГМУ и поддержку в этом сотрудничестве. Автор глубоко благодарен к.г.н. Д.А. Романенкову за весьма ценные практические советы. Автор выражает глубокую признательность профессору д.ф.-м.н. И.А. Степанюку и О.А. Атаджановой за высказанные ценные замечания, благодарит к.ф.-м.н. И.Е. Козлова и Г.В. Жегулина за помощь в получении и обработке спутниковых и судовых данных.

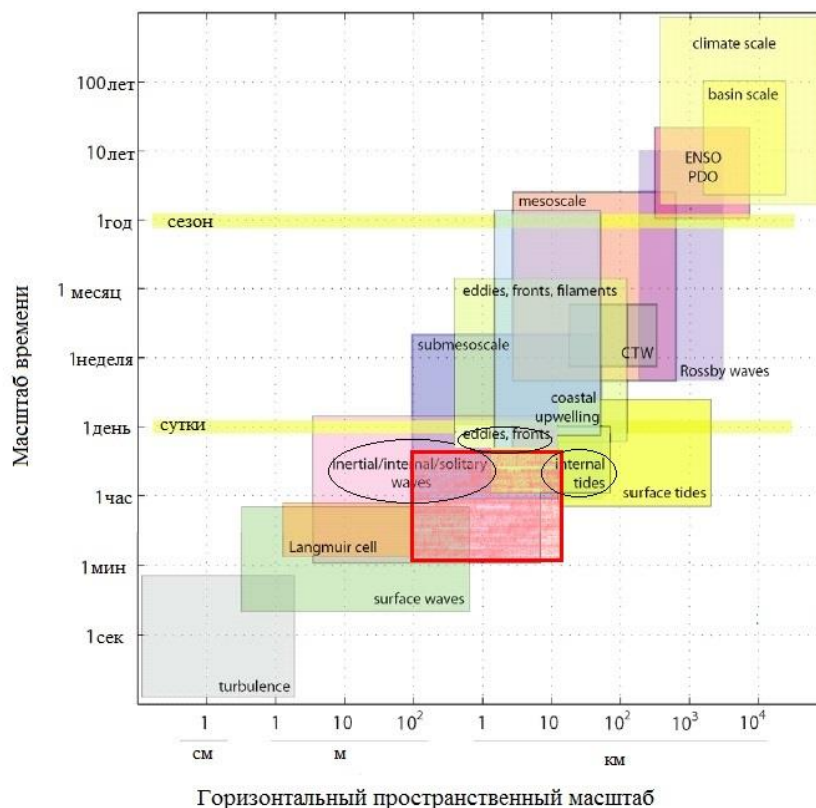
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, описана степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, описана область исследования, обоснованы использованная методология и методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 «Предмет исследования и особенности Белого моря как объекта мониторинга» описаны масштабы изменчивости гидрофизических полей, дан подробный обзор изученности процессов на масштабах полусуточного приливного цикла и менее в Мировом океане, приведены сведения о морфометрии дна, динамике, структуре вод и изменчивости термодинамических полей Белого моря, рассмотрены методы наблюдения (мониторинга) короткопериодной изменчивости гидрофизических полей и процессов в приливном арктическом море.

В разделе 1.1 рассматриваются классификации процессов, используемые в океанологии по масштабам. Показано, что субприливно-интервальная изменчивость включает тонкоструктурный и частично субмезомасштабный интервалы спектра изменчивости океанологических процессов. Наглядное представление об ее месте в иерархии океанских процессов можно получить из схемы на рис. 1. Из схемы (рис. 1) видно, что на указанном для исследования интервале спектра

пространственно-временная изменчивость связывается с такими процессами, протекающими в толще океанских вод, как короткопериодная часть внутреннего волнения различного происхождения (inertial/internal/solitary waves, internal tides), высокочастотная часть вихревой и фронтальной динамики (eddies, fronts).



Красным прямоугольником выделены масштабы области исследования диссертации

Рис.1 – Схема областей различных пространственно-временных масштабов различных физических процессов в океане [Dickey et al, 2006]

Выдвигается основная гипотеза исследований, что в качестве триггерного (приводящего в действие) механизма, запускающего каскад передачи энергии от процессов синоптического масштаба и мезомасштаба к микроструктуре в приливных арктических морях (например, в Белом море), выступают полусуточные приливы. Предполагается, что приливные процессы во взаимодействии со стратификацией вод и топографией дна играют ключевую роль в формировании и разрушении тонкой стратификации вод, малых вихревых структур, короткопериодных внутренних волн, локальной динамики фронтальных разделов и оказывают влияние на интенсивность горизонтального и вертикального турбулентного обмена.

Освещается степень изученности процессов (малых вихревых структур, динамики фронтальных зон, короткопериодных внутренних волн (ВВ), характеристик турбулентности) на указанном интервале изменчивости в различных районах Мирового океана. Показано, что по

отношению к арктическим морям с доминирующим влиянием прилива, к которым относится Белое море, имеется пробел в существующих представлениях, который необходимо заполнить.

Обосновывается выбор Белого моря как объекта исследования: оно отличается богатым набором гидрологических условий, обуславливаемых как морфометрией, так и распределением речного стока, а также приливных движений разной интенсивности; при достаточно хороших знаниях по «классической» гидрологии моря сведения о субприливной изменчивости практически отсутствуют.

В разделе 1.2 приводятся сведения о морфометрии дна, динамике, структуре вод и изменчивости термодинамических полей Белого моря в условиях современного меняющегося климата.

Районы Белого моря резко различаются по средним глубинам и объемам речного стока. Это приводит к неизбежному формированию особенностей в вертикальной структуре вод в каждом из них. Характерной особенностью термохалинной структуры вод Белого моря является наличие двух типов вертикального распределения температуры и солености вод: квазиоднородного («горловского») и стратифицированного («бассейнового»), разделенных фронтами (рис. 2).

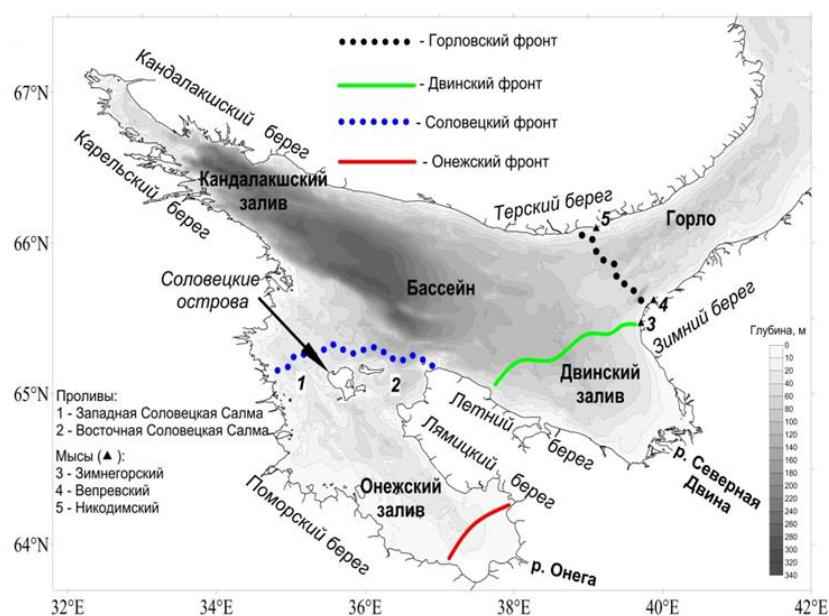


Рис. 2 – Карта Белого моря с положением фронтов [Пантюлин, 2012]

Установлено, что сезонный ход является наиболее значимой и устойчивой в многолетнем плане составляющей колебаний гидрофизических полей в Белом море. Для Белого моря характерно влияние прямого атмосферного воздействия, а также наблюдаются фронтальные и фрикционные синоптические вихревые образования. Большая часть мезомасштабных

колебаний гидрологических элементов в Белом море обусловлена приливным воздействием, в котором доминирует полусуточная волна с периодом 12.42 ч. В значительной части моря приливно-отливные течения превышают непериодические течения, и только в Бассейне, Кандалакшском и Двинском заливах отмечается обратная картина.

Показано, что количественные сведения о субмезомасштабных процессах и явлениях, протекающих в море, все еще недостаточны, зачастую ввиду отсутствия репрезентативной исходной информации. Основной причиной пробела в сведениях о субприливной изменчивости гидрофизических полей являются действующие правила (нормативные акты) сбора и хранения гидрологических данных. Они заведомо оставляют вне поля зрения исследователей все процессы с периодами от минут до нескольких часов и пространственными размерами по горизонтали от ста метров до нескольких километров.

В разделе 1.3 проанализированы используемые в настоящее время методы мониторинга гидрологических полей. Приводится совокупность методов исследования (мониторинга) субприливной изменчивости характеристик океанологических полей и явлений на акватории Белого моря, объём полученных в результате мониторинга данных, результаты интеллектуальной деятельности в рамках создания системы мониторинга.

Показано, что функционирующие в настоящее время в России системы наблюдений ориентированы главным образом на слежение за изменчивостью, определяемой процессами и явлениями бóльшего масштаба, чем те, о которых говорилось выше.

Для исследования тонкоструктурной и субмезомасштабной изменчивости гидрофизических полей на акватории приливного моря разработана совокупность методов, предполагающая целенаправленное сочетание спутниковых данных и учащенных во времени и пространстве наблюдений на океанографических полигонах. На основе этой совокупности методов была предложена специализированная система наблюдений (мониторинга). Основными функционирующими частями, которой являлись морская и спутниковая подсистемы наблюдений.

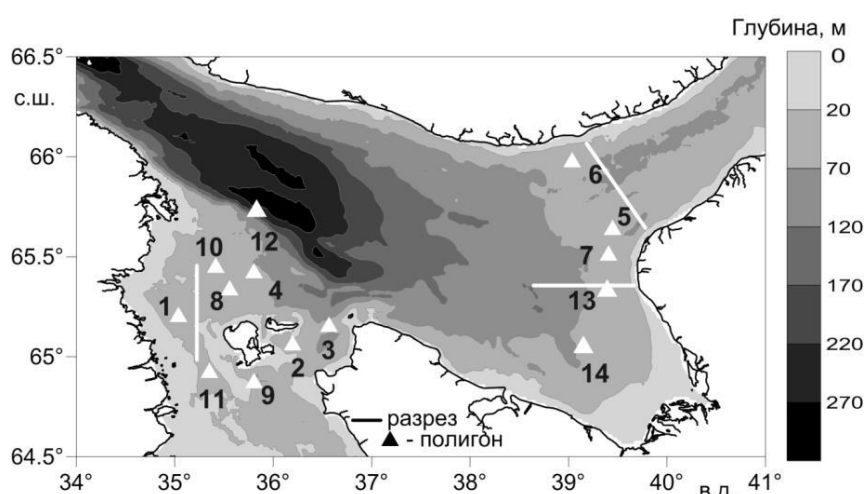
Морская подсистема наблюдений базировалась на данных судовых и буйковых наблюдений. Наблюдения выполняются на океанографических полигонах и разрезах.

Наблюдения на океанографических полигонах выполняются с помощью судна и буйковых станций синхронно в пределах небольших акваторий, соответствующих масштабам порядка бароклиного радиуса Россби, с привязкой всех данных наблюдений к колебаниям уровня. На полигонах выполняют: квазисинхронные мелкомасштабные океанографические съемки и измерения на буйковых станциях, дополненные данными учащенных океанографических станций (сканирований) с заякоренного в районе полигона судна.

Квазисинхронные океанографические съемки (позволяющие оценить поля температуры и солёности) выполняются в разные фазы приливного цикла. На буйковых станциях наблюдения производятся за скоростью и направлением течения, температурой и солёностью с частотой, близкой к частоте Вьясяля-Брента, в течение несколько циклов волны M_2 . Сканирования выполняются СТД-зондом от поверхности до дна.

Океанографические разрезы выполняются в районах фронтальных разделов не менее двух раз в кратчайшие сроки (не более 6 часов) с целью привязки данных наблюдений к фазам прилива.

Наблюдения за летние сезоны с 2006 по 2014 года были выполнены на 22 полигонах и 3 разрезах в различных районах Белого моря (рис. 3).



Треугольниками обозначены местоположения полигонов. Линиями обозначены положения разрезов

Рис. 3 – Схема расположения полигонов и разрезов контактных измерений, выполненных с 2006 по 2014 гг., совмещенная с картой глубин

Спутниковая подсистема наблюдений позволяла получить представления о пространственном распределении проявлений короткопериодных ВВ, субмезомасштабных вихревых структур, фронтальных разделов и их динамике на акватории всего моря. В основе ее эксплуатации лежит использование данных:

- радиолокационных изображений: Envisat ASAR в С-диапазоне и режимах съемки WSM (ширина полосы обзора 400x400 км с разрешением 150 м) и IMP (100x100 км и 30 м, соответственно) за 2007, 2009 — 2011 гг.; Radarsat-1 (С-диапазон, режим ScanSar-W, 300x300 км, разрешение 50 м) и Radarsat-2 (С-диапазон, режим Fine Quad-Pol, 25x25 км, разрешение 8 м) за 2012, 2013);

- изображений MODIS со спутников Terra и Aqua, выполненных с пространственным разрешением около 1 км с 1 мая по 30 сентября 2010 года. Использование этих данных обеспечило плотное покрытие всей исследуемой акватории (рис. 4).

Вся информация со спутников собиралась и предварительно обрабатывалась в *Центре обработки спутниковых данных*. Здесь осуществлялась калибровка и геопривязка спутниковых снимков. Они, как и данные из *Морской подсистемы наблюдений*, поступали в центр мониторинга, а именно в *Кластер обработки и систематизации информации*. Поступающая из системы наблюдений информация дополнялась данными из внешних источников, затем усваивалась, фильтровалась и проходила контроль качества и валидацию. После этого вся информация интегрировалась, подвергалась анализу и сохранялась в базах данных.

На основании выполняемого анализа получался диагноз проявлений короткопериодных процессов на акватории моря, который поступал в *Узел оперативного планирования*. В этом кластере перед началом следующего сезона судовых наблюдений разрабатывался прогноз особенностей короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в различных районах Белого моря. В результате чего выбирались районы судового мониторинга, делался заказ на выполнение специализированных спутниковых съемок. Полномасштабное испытание элементов системы мониторинга было выполнено в ходе работ 2012-2014 гг.

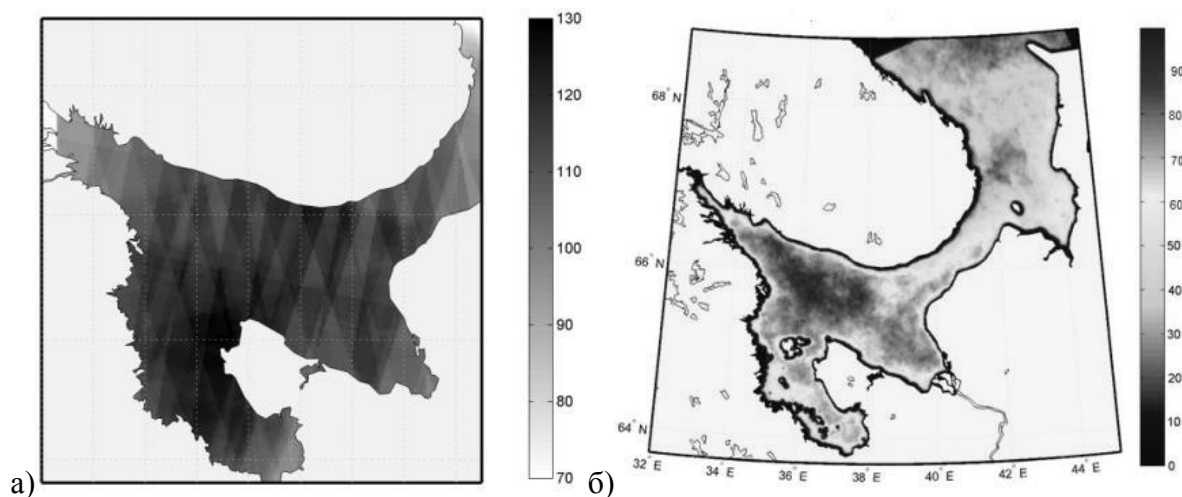


Рис. 4 – Карта покрытия акватории Белого моря в количестве снимков на квадратный километр моря для а) РЛИ с май по сентябрь 2007-2013 гг.; б) данных сканеров MODIS с май по сентябрь 2010 г.

В рамках осуществления натурных работ по данной методике были разработаны новые технические решения, относящиеся к области измерительной техники, а более конкретно к системам и устройствам для измерения топографии пикноклина и термоклина на ходу и в дрейфе судна. Для обработки данных специальных наблюдений создан комплекс оригинальных программных продуктов, а в результате их применения получены уникальные базы данных.

В главе 2 «Количественные характеристики изменчивости гидрофизических полей и тонкой структуры вод на субприливных временных масштабах в различных по гидрологическим условиям районах Белого моря» выявлены статистические особенности и характерные периоды колебаний температуры, солености и течений, оценены характеристики и причины формирования тонкой структуры вод в различных районах моря.

В разделе 2.1 представляются результаты измерений температуры и солености по данным приборов, установленных на буйковых станциях, и сканирований в различных районах Бассейна, в Горле, около фронтальных зон различного генезиса, в заливах с мощным речным стоком (Онежском и Двинском). Приводятся статистические характеристики изменчивости температуры и солености на субприливном масштабе.

На всех полигонах отмечается изменчивость термохалинных полей, в двух диапазонах колебаний с характерными полусуточным (приливым) периодом и периодами в десятки минут (ассоциируемые с короткопериодными ВВ). В разных по гидрологическим условиям и морфометрии дна районах они проявляются по-разному:

- в глубоководной части Бассейна и заливов Белого моря наиболее интенсивные колебания имеют полусуточный период и отмечаются на границе промежуточных и глубинных вод;

- в мелководной части Бассейна (в шельфовых неглубоких районах с хорошо выраженной двухслойной структурой вод) под влиянием прилива отмечается резкое изменение вертикальной структуры вод, но основной вклад в изменчивость вносят короткопериодные колебания типа интенсивных внутренних волн (ИВВ), распространяющиеся в слое между поверхностными и промежуточными водными массами бассейна; в проливных районах около фронтальных зон (на границе Бассейна и Горла, на границе Бассейна и Онежского залива) ИВВ наблюдаются каждый приливной цикл, их высота значительно превышает толщину верхнего однородного слоя, а длительность колебаний лежит в диапазоне от 10 до 20 мин;

- в районах структурных фронтальных зон (Соловецкие салмы, юго-западная часть Горла) наблюдается доминирование приливных колебаний, приводящее к чередованию «горлоского» и «бассейнового» вида вертикальных структур; в период наличия стратификации могут отмечаться короткопериодные колебания незначительной интенсивности;

- в Онежском и Двинском заливе (мелководные районы заливов) на фоне хорошо выраженных полусуточных вариаций термоклина и галоклина отмечаются слабовыраженные короткопериодные колебания, на которые эпизодически накладываются резкие колебания, идентифицируемые как цуги короткопериодных ВВ.

В районах с «бассейновым» типом стратификации средняя толщина слоя охваченного значительными колебаниями, составляет порядка 10 метров. Средняя амплитуда колебаний по температуре за приливной цикл равняется 5 °С, по солености – 1 ‰. Максимальная

изменчивость гидрологических полей отмечалась в районах моря вблизи фронтальных зон. Амплитуды колебаний здесь составляли более 8 °С и 1.2 ‰. Они охватывали значительную толщу вод в нижней части слоя скачка. Максимальные по абсолютной величине колебания отмечаются вблизи Горловского фронта. На полигонах в глубоководной части Бассейна амплитуда колебаний характеристик гидрофизических полей была меньше средних оценок для всего моря.

В районах с «горловским» типом стратификации изменчивость гидрологических характеристик по вертикали не превышала 0.2 °С по температуре и 0.1 ‰ по солености. Под влиянием прилива колебания охватывали всю водную толщу.

Для изучения статистической структуры временных рядов температуры и солености на масштабах приливного цикла и менее использовался спектральный анализ. Исходные ряды наблюдений на каждом полигоне разбивались на блоки, соответствующие двум приливному периодам. Для каждого блока, выделялась трендовая составляющая, как гармоническое колебание с периодом волны M_2 (12.24 ч), и оценивался ее вклад в общую дисперсию. Из исходного ряда удалялся тренд. Получался ряд отклонений от тренда, для которого проводился анализ (пример см. рис. 5).

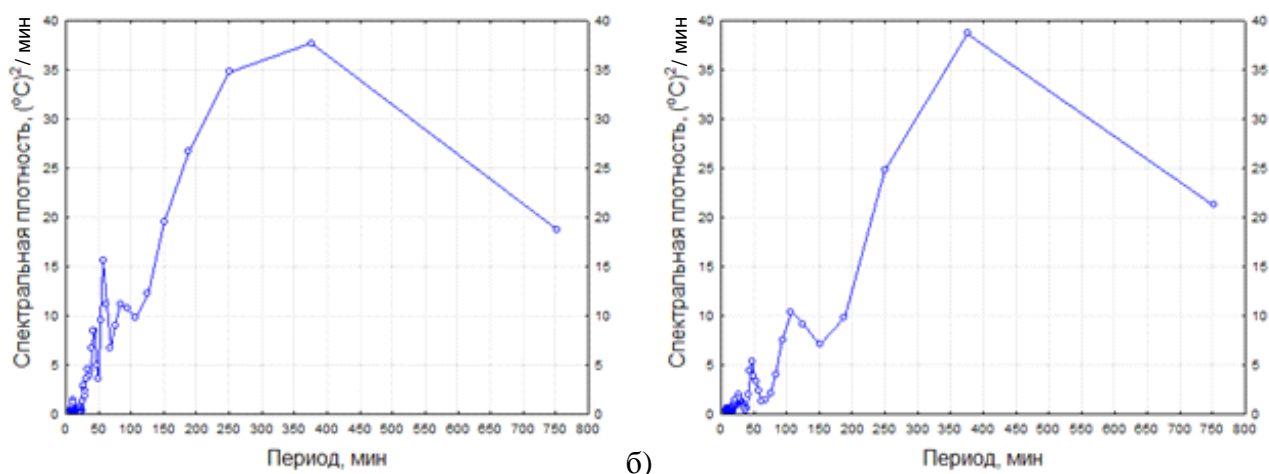


Рис. 5. Функция спектральной плотности с удаленным трендом (M_2) по данным наблюдений за температурой на буйковой станции с помощью прибора JFE Alec, установленного на горизонте 12 метров (а) и 9 метров (б) на полигоне № 4 (Бассейн) 24 июля 2012 г.

В результате анализа на периодах меньше приливного были выделены характерные масштабы: от 12 до 2 часов; от 2 часов до 50 минут, от 50 до 4 минут. Для каждого из выделенных масштабов рассчитывался вклад в общую дисперсию ряда путем суммирования каждой гармоники, попавшей в данный диапазон.

Колебания с периодом, соответствующим приливу, описывают в среднем 62 % от общей дисперсии исходного ряда, колебания в диапазоне от 12 до 2 часов – 26 %, от 2 часов до

50 минут до – 5 %, менее 50 минут – 7 %. Резко отличается от общих тенденций область на границе Бассейна и Западной Соловецкой салмы. Здесь колебания с периодом менее 50 минут вносят вклад в общую изменчивость около 20 %.

Максимальный вклад колебаний с периодом менее 2 часов (до 40 % от общей дисперсии) отмечается в области слоя скачка в шельфовых неглубоких районах моря с хорошо выраженной двухслойной структурой вод около фронтальных зон.

В разделе 2.2 представляются результаты измерений и анализа характеристик течений по данным приборов, установленных на буйковых станциях.

В результате установлено, что:

- на всех полигонах были хорошо выражены полусуточные течения приливного происхождения, которые превосходят по интенсивности течения других временных масштабов;

- картина горизонтальных смещений частиц воды за прилив имеет осциллирующий характер с ненулевым средним значением, но интегральный перенос за приливной цикл по сравнению с пробегом частицы невелик;

- вклад внутриприливной изменчивости течений в общую дисперсию ряда составляет от 3 до 50 % на разных горизонтах и является максимальным на границе Бассейна и Западной Соловецкой салмы и в Двинском заливе;

- на внутри приливном интервале изменчивости выявлено три характерных максимума: от 6 до 3 часов (средний вклад в общую дисперсию ряда 10 %), от 1 до 2 часов (средний вклад – 3 %) и от 8 до 50 минут (средний вклад – 4 %);

- изменчивость проекций течений полей в короткопериодном интервале может достигать более 20 % от общей изменчивости ряда, она отмечается в областях ниже пикноклина в шельфовых неглубоких районах моря с хорошо выраженной двухслойной структурой вод, связывается с короткопериодными ВВ и в абсолютных значениях составляет 10 – 15 см/с;

- максимальная пространственная изменчивость интенсивности внутриприливных процессов зафиксирована на южной границе Горла и на северной границе Соловецких салм.

В разделе 2.3 представляются результаты наблюдений за характеристиками тонкой структуры вод и на основе статистического анализа оценены причины ее формирования. Для анализа диагностики характера и причин наблюдаемых тонкоструктурных неоднородностей используются методы математической статистики, подробно описанные в работах К.Н. Федорова.

Установлено, что во всех районах моря преобладает устойчивая стратификация вод (температура уменьшается с глубиной, соленость растет), на которую накладываются незначительные по вертикальной протяженности инверсионные (от 1 до 2 м) и ступенчатые (от 1 до 6 м) структуры. В отдельных случаях величина ступенек достигала 10 – 15 метров.

На большей части акватории моря максимальные тонкоструктурные колебания на профиле температуры отмечаются в области скачка характеристик (на глубине от 6 до 18 м). В среднем пульсации за приливной цикл в области скачка составляют ± 2 °С и ± 0.5 ‰. При этом горизонты максимальных положительных и отрицательных пульсаций температуры и солености совпадают, что дает основание предполагать волновой характер их происхождения. Максимальные пульсации по температуре на порядок (8-12 раз) превосходят максимальные пульсации по солености. Они отмечаются в районах моря около проливных зон (мористая граница Западной Соловецкой салмы, южная граница Горла). Самые незначительные по абсолютной величине пульсации (менее 0.9 °С и 0.25 ‰) регистрируются в слабо стратифицированных районах моря (центральная часть пролива Восточная Соловецкая салма, юго-западная часть Горла). Кроме того, на этих полигонах максимальная изменчивость наблюдается на горизонтах более 30 – 40 метров. Что связано с влиянием адвекции вод в придонном слое под влиянием прилива.

Большая часть тонкой структуры формируется под влиянием процессов, связанных с адвективными процессами, неудовлетворяющими условиям изопикничности. Тонкая структура под влиянием ВВ образуется преимущественно в верхнем 30 метровом слое моря в районах около проливных зон (мористые районы у Соловецких салм, южная граница Горла). Механизмы же, связанные с изопикнической адвекцией, проявлялись примерно в 20 % случаев на горизонтах под слоем скачка в стратифицированных районах моря (Бассейн).

В Главе 3 «Короткопериодные внутренние волны» приведены статистические характеристики короткопериодного внутреннего волнения по данным контактных наблюдений на различных по гидрологическим условиям акваториях, пространственное распределение короткопериодного внутреннего волнения по акватории всего моря по данным спутниковых наблюдений, оценки динамических характеристик короткопериодного внутреннего волнения на акватории Белого моря на основе климатических данных.

В разделе 3.1 приведены примеры проявлений, статистические характеристики короткопериодных внутренних волны по результатам работ морской подсистемы наблюдений и дан их сравнительный анализ в различных районах моря. Описана изменчивость спектра внутренних волн в сравнении с моделью Гарретта – Манка.

Для получения статистических характеристик о высотах и периодах ВВ по данным сканирования определялась глубина залегания термоклина. Полученные вариации положения термоклина во времени позволили оценить высоту и период каждой из проходящей через полигон внутренней волны. Представления о статистических характеристиках зарегистрированных короткопериодных ВВ, можно получить из таблицы 1.

Таблица 1 – Пространственная и межгодовая (на примере полигона № 1) изменчивость статистических характеристик ВВ, зарегистрированных по данным контактных наблюдений в Белом море в 2009–2014 гг.

Полигон (год)	Количество КВВ за цикл M_2 , шт	Кол-во КВВ за цикл M_2 высотой > 5 м, шт	Период КВВ: средний (мин.– макс.), мин	Высота КВВ: средняя (мин.– макс.), м
1 (2009)	33	5	11 (3–36)	3.1 (1–7.8)
1 (2010)	46	13	18 (4–72)	5.6 (1–17.9)
1 (2011)	40	5	12 (3–32)	3.7 (1–13.9)
1 (2012)	57	3	7 (4–34)	2.2 (1–7.7)
1 (2013)	48	1	12 (3–36)	2.2 (1–7.6)
2 (2012)	81	3	7 (3–25)	2.6 (1–9)
3 (2012)	68	5	9 (3–24)	2.5 (1–8.3)
3 (2014)	36	8	14 (3–30)	4.5 (1–15)
4 (2012)	12	0	8 (4–26)	1.5 (1–3)
5 (2012)	12	0	9 (5–21)	1.8 (1–4.9)
6 (2012)	0	0	–	–
7 (2012)	57	2	13 (3–42)	2.5 (1–7.6)
8 (2012)	11	0	8 (4–23)	1.6 (1–3.5)
9 (2009)	25	5	14 (4–58)	3.9 (1–14.7)
10 (2011)	12	0	25 (6–68)	1.6 (1–3.3)
11 (2011)	26	0	6 (2–20)	1.7 (1–4.9)
12 (2013)	3	0	30 (18–41)	1.2 (1–1.8)
13 (2014)	21	4	16 (6–32)	1.8 (1–7.0)
14 (2014)	7	0	26 (18–56)	1 (1)

Внутреннее волнение не отмечалось только в районах с «горловским» типом стратификации. На всех полигонах поле внутренних волн состоит из двух основных компонент – волн приливных периодов и короткопериодных ВВ. В центральной части Бассейна и заливах преобладают волны с полусуточным периодом. На участках шельфа с выраженной двухслойной структурой вод преобладает короткопериодное волнение, появляющееся регулярно в определенные фазы приливного цикла. Наблюдаемые короткопериодные ВВ можно отнести к первой моде. Самые интенсивные из них (по высоте) распространялись в виде пакетов с максимальной лидирующей волной в цуге. В отдельных районах, располагающихся вблизи фронтов, (см. рис.2) постоянно отмечаются волны, близкие по своим характеристикам к интенсивным внутренним волнам (ИВВ). Их высота сопоставима с толщиной верхнего однородного слоя. В районе полигона № 1 (на границе Бассейна и Западной Соловецкой салмы), располагавшегося вблизи пролива и фронтальной зоны, за 5 лет наблюдений наибольшую повторяемость имели ВВ высотой от 3 до 5 м и периодом от 12 до 17 мин. Средняя высота ВВ составляла 4.3 м, а период – 14 мин. Перемежаемость внутреннего волнения составила около 50%. В ходе каждого приливного цикла в районе полигона

наблюдалось не менее 2–3 волн, которые можно отнести к ИВВ. На полигонах, располагавшихся в районах Бассейна вдалеке от фронтальных зон и неровностей дна, короткопериодные ВВ были весьма редким явлением, а ВВ экстремальных высот там вообще не отмечались.

Во всех рассматриваемых районах с «бассейновым» типом стратификации спектры короткопериодных ВВ превосходили модельный спектр Гарретта – Манка, а по закону спадаения совпадали с ним. При этом максимальное превышение над модельным спектром наблюдалось на полигоне, расположенном в Восточной Соловецкой салме вблизи неровности дна рядом с фронтом приливного перемешивания.

В разделе 3.2 описаны результаты оперативного подспутникового эксперимента и полученные на основе спутниковых данных представления о закономерностях пространственно-временной изменчивости характеристик короткопериодных внутренних волн на акватории Белого моря.

Оперативный подспутниковый эксперимент для исследования особенностей проявления ВВ на поверхности в Белом море проводился летом 2012 года на границе Горла и Бассейна. Он включал одновременные судовые и спутниковые наблюдения. Основные задачи работы заключались в описании по данным контактных измерений характеристик короткопериодных внутренних волн в течение приливного цикла, соответствующего гармонике M_2 , а также в оценке пространственно-временной изменчивости характеристик ВВ на основе спутниковых снимков радиолокаторов с синтезированной апертурой, получаемых в оперативном режиме, и в сопоставлении результатов разнородных наблюдений.

Сопоставление характеристик ВВ, полученных на основе контактных и дистанционных наблюдений, показало их удовлетворительное соответствие. При глубине залегания пикноклина от 8 до 15 м в РЛ-изображениях находили проявление ВВ с высотами от 2 до 4 м, длинами 200 – 300 м и периодами от 9 до 12 минут. Стоит добавить, что в 4 из 6 зафиксированных случаев наблюдения ВВ прохождение сликовых полос на поверхности моря отмечалось визуально. Таким образом, сопоставление разнородных наблюдений показало, что короткопериодные ВВ распространяются, в основном, пакетами и находят свое отражение в судовых, спутниковых и визуальных наблюдениях. Регулярность проявлений таких пакетов на снимках и в измерениях *in situ* в определенные фазы прилива с большой долей уверенности подтверждает их связь с приливной динамикой.

Обобщение спутниковых данных позволило выявить области с различной распространенностью ВВ на акватории Белого моря. По данным спутниковых наблюдений на всех рассмотренных РЛ-снимках было обнаружено 489 пакетов ВВ. Чаще всего ВВ

наблюдались в виде пакетов по 2 – 4 волны с длиной гребня лидирующей волны 16 км. Средняя длина зарегистрированных короткопериодных ВВ – 500 м, период – 12 мин, высота – 2.3 м.

Большинство ВВ зарегистрировано в шельфовых районах с глубинами от 30 до 70 м. В 75 % случаев зарегистрированные проявления ВВ наблюдались в области, охватывающей северо-восток Бассейна, юг Горла и глубоководную часть Двинского залива (рис. 6). Внутри этой области волновые пакеты отмечались чаще всего на границе Горла и Бассейна. В Двинском заливе сигнатуры волн наблюдались реже, преимущественно мористее границы фронта стокового течения реки Северная Двина. Примерно в 20 % случаев отмечались проявления ВВ вокруг Соловецких островов. В основном они привязаны к глубоким частям в районе проливов. Остальные 5 % пришлось на центральную глубоководную часть Бассейна. Не были зарегистрированы ВВ в Кандалакшском заливе, в районах со слабовыраженной стратификацией вод (центральная часть пролива Горло и большая часть Онежского залива) и значительного влияния речного стока (кутовая часть Двинского залива).

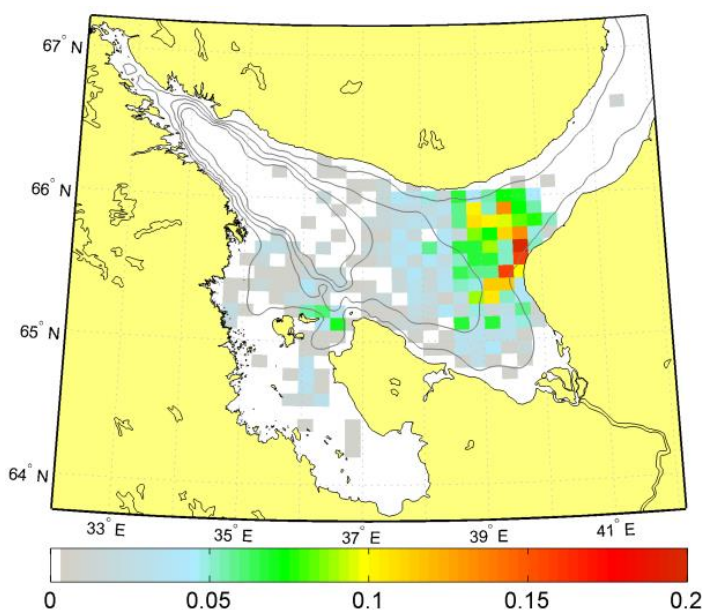


Рис. 6 – Относительная частота встречаемости пакетов ВВ от общего числа РЛИ акватории Белого моря за теплый период 2007, 2009 – 2013 гг.

Длины волн в пакетах колебались преимущественно в диапазоне от 150 до 1500 м при ширине фронта от 2 до 30 км. Наиболее крупные структуры ВВ отмечались в центральной части Бассейна. Длины волн там достигали 2.55 км, величина длины фронта лидирующей волны – до 176 км, протяженность пакета поперек фронта – 11.6 км. Они двигались по направлению из Горла, преимущественно в юго-западном направлении, покрывая значительную часть моря. Предполагается, что пакеты ВВ, возникая регулярно в южной части Горла, движутся через все море, трансформируясь при распространении, и окончательно разрушаются в мелководной зоне севернее Соловецкого архипелага.

В отдельных случаях наблюдались системы последовательных пакетов ВВ, пробегающих все море с финальным разрушением в шельфовой зоне у входа в Западную Соловецкую салму. При этом расстояние между цугами составляло 30 – 40 км, а сами цуги содержали 3 – 9 волн. ВВ внутри цуга имели длины от 1.4 до 2.5 км и охватывали значительные акватории моря.

В Двинском заливе волновые пакеты двигаются во всех направлениях. Преобладают группы от 2 до 5 волн длиной 200–1300 м при длине гребня от 3 до 70 км и средней площади 40 км², чаще всего двигающиеся от стокового фронта, образуемого рекой Северная Двина. В области, прилегающей к Соловецким островам, площади пакетов еще меньше, так как цуги содержат в себе не более 2 – 3 волн; там же часто встречались солитоны.

Проявления ВВ на границе Бассейна и Горла чаще регистрировались в сизигию (28 раз), чем в квадратуру (10 раз). Причем часто они отмечались в прилив и как бы «исходили» из одних и тех же районов, что подтверждает преимущественно приливной характер их образования.

В результате исследований выделены типичные районы регистрации ВВ:

- участки вблизи фронтальных зон с ярко выраженной стратификацией вод, в частности: на границе Бассейна и Горла, в Двинском заливе, севернее Соловецких островов;
- участки шельфа с глубинами 30 – 50 м, где при наличии активной динамики сохраняется стратификация вод и присутствуют значительные неровности дна: подводный желоб на границе Бассейна и Горла, районы Западной и Восточной Соловецких салм.

Выделены районы, где проявление ВВ носит случайный характер:

- Бассейн и Кандалакшский залив (глубоководные участки моря, где приливной поток слабо взаимодействует с дном, большинство КВВ приходят туда из других районов);
- центральная часть Горла и Онежского залива (мелководные участки шельфа, воды которых полностью перемешаны под влиянием приливных процессов).

В заключении сделан вывод о том, что регулярность наблюдений ВВ в определенную фазу волны M_2 и зависимость количества их проявлений от фазы луны подтверждает вывод о преимущественно приливном характере их образования.

В разделе 3.3 описаны результаты оценки типовых характеристик короткопериодного внутреннего волнения на акватории Белого моря на основе климатических данных атласа ЕСИМО.

Получены оценки длин и скоростей внутренних волн с использованием климатических данных для июля и августа. Показано, что оценки по климатическим данным в целом не противоречат результатам натурных измерений, что позволяет утверждать, они могут быть использованы для грубой оценки типовых характеристик короткопериодных ВВ. Полученные типовые климатические оценки характеристик являются полезным инструментом для

планирования натуральных экспериментов и инженерных расчетов. Однако они не учитывают межгодовую изменчивость стратификации вод и локальные особенности отдельных участков акватории весьма неоднородного и богатого фронтальными зонами Белого моря.

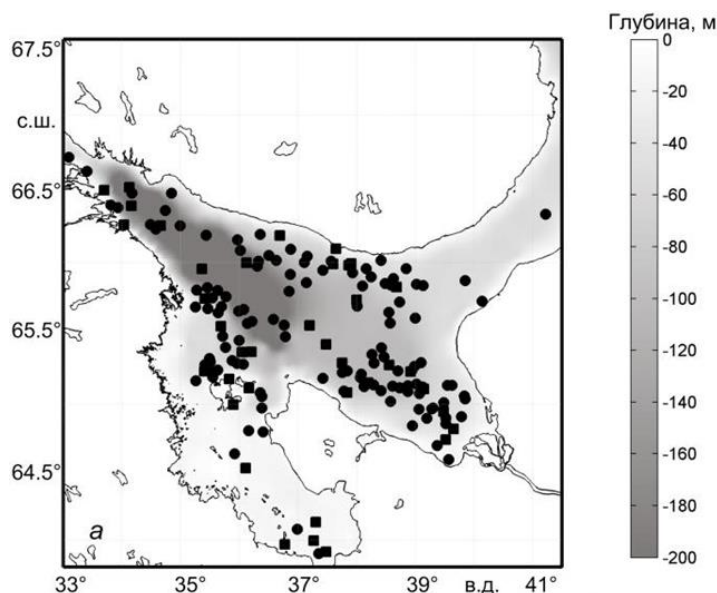
В четвертой главе «Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика» приведены физико-географические особенности проявлений, распределения и динамики субмезомасштабных вихревых структур, характеристики сезонной, синоптической и мезомасштабной динамики фронтальных разделов, особенности взаимосвязи фронтальной динамики и распределения субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн.

В разделе 4.1 приводятся оценки бароклинного радиуса Россби по климатическим данным для Белого моря, описываются особенности проявлений, распределения и динамики субмезомасштабных вихревых структур на различных временных масштабах.

Величина бароклинного радиуса Россби (L_R) варьировалась в пределах от 1 до 8 км. Наименьшие значения отмечаются в мелководных слабо стратифицированных Двинском и Онежском заливах и Горле. В глубоководной части Бассейна и Кандалакшского залива значения радиуса максимальны, и они мало отличаются по месяцам.

По данным измерений на полигонах было установлено, что вихревые субмезомасштабные структуры прослеживаются преимущественно над неровностями дна (банками). Их образование отмечается в определенную фазу прилива. Все зафиксированные структуры имели циклонический тип завихренности и охватывали приповерхностные слои (10 – 20 м), но не всегда четко отражались на поверхностном горизонте. Как правило, образовавшаяся вихревая структура прослеживалась у банки не более 3 – 4 часов, а затем двигалась в направлении доминирующего потока и быстро разрушалась. Они имели характерное время жизни от 3 до 6 часов.

По спутниковым данным за четыре года были детектированы 162 вихря. Они являются распространенным явлением на акватории Двинского залива и Бассейна Белого моря, а также в проливных зонах вокруг островов Соловецкого архипелага (рис. 7). Число вихревых проявлений увеличивается с мая по июль, при этом в июне и июле их количество составило более 65 %. В мае вихревые образования практически не наблюдались на акватории (всего лишь 2 %). Остальная часть вихрей пришлась на август (около 19 %) и сентябрь (около 14 %). В целом по акватории средний диаметр вихревого образования составляет чуть меньше 5 км, что примерно соответствует среднему значению бароклинного радиуса Россби. Наиболее крупные вихри отмечались в открытой части Бассейна (до 13 км), а самые маленькие в прибрежной зоне около Карельского берега и Соловецких островов (0.9 км). Чаше всего наблюдались изолированные циклонические вихри диаметром от 2 до 6 км.



Квадратами и кружками обозначены положения антициклонических и циклонических вихрей

Рис. 7 – Пространственное распределение проявлений вихревых структур на РЛИ акватории Белого моря в 2009 – 2012 гг., совмещенное с картой глубин

В разделе 4.2 описываются результаты исследования фронтальной динамики, которые базировались на сочетании контактных данных, получаемых в разные фазы прилива на разрезах через фронтальные зоны, и спутниковых данных путем совместного анализ карт температуры поверхности моря и ее градиентов.

В летний период в Белом море в основных фронтальных зонах градиент температуры поверхности моря в 10 раз превышает фоновый градиент по морю. Области, где проявляются поверхностные фронты, занимают значительную площадь моря, локализованную около среднего положения фронтальных линий. В Двинском заливе эта область занимает почти две трети акватории залива, а величина смещения стокового фронта на его западном фланге достигает за месяц 70 км. Все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя. Однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров размерами до нескольких десятков километров. Наибольшая изменчивость поля температуры в виде возмущений фронтального раздела присуща Горловской зоне. Эта динамика является важным элементом водообмена в проливе.

Проведенный анализ показывает, что интенсивная динамика фронтов происходит внутри месячных интервалов, в то время как среднемесячные положения фронтальных линий близки к их средним за лето. Из сравнения декадных (рис. 8.а) и месячных (рис. 8.б) карт фронтальных линий следует, что при изучении сезонной изменчивости положения фронтов следует

ориентироваться на декадные данные, которые характеризуют синоптическую изменчивость, а не на среднемесячные оценки этой изменчивости.

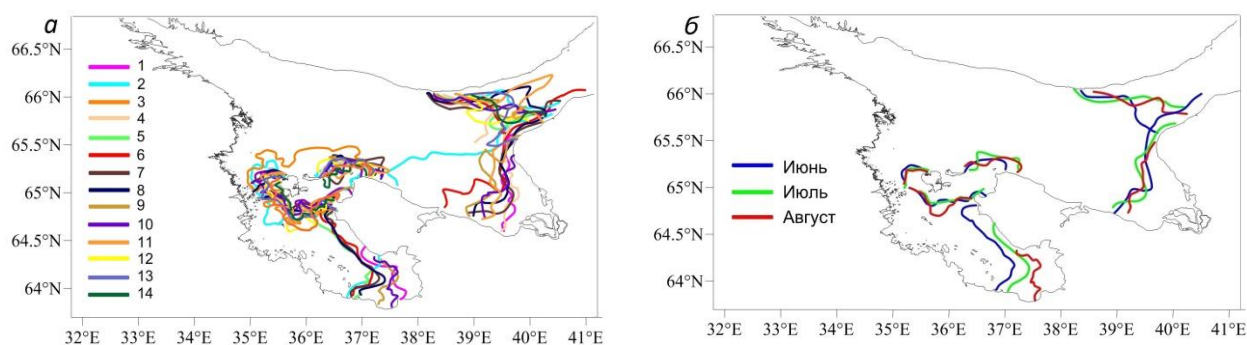


Рис. 8 – Сезонная изменчивость положения фронтальных разделов на поверхности Белого моря: а – положения для каждой из 14-ти декад; б – положения по среднемесячным данным

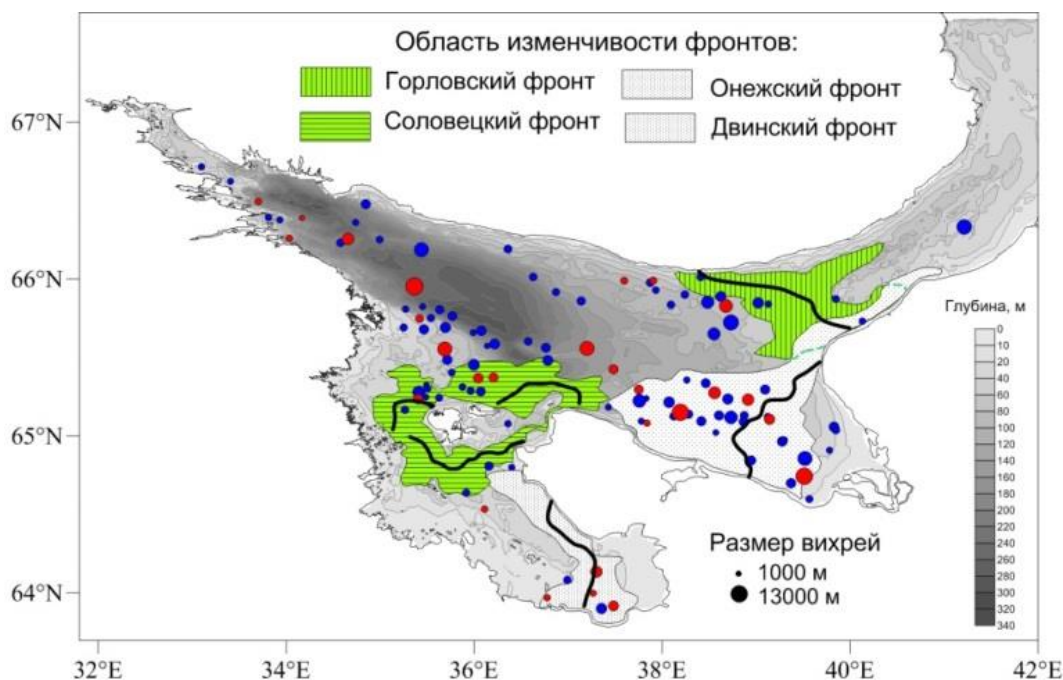
Результаты контактных наблюдений свидетельствуют о значительной мезомасштабной (приливной и ветровой) изменчивости характеристик фронтальных разделов в Белом море. Она проявляется в усилении (ослаблении) значений вертикального и горизонтального градиентов температуры в несколько раз, в колебаниях глубины залегания термоклина до 20 м и в смещениях фронтальных разделов на дистанцию до 15 км. Временной интервал наблюдаемой изменчивости составлял от нескольких часов до суток. Под влиянием приливно-отливных течений и ветра фронтальные структуры различного генезиса могут трансформировать друг друга в Горле. Спутниковые данные подтверждают, что такое взаимодействие часто наблюдается на протяжении всего лета.

В разделе 4.3 описывается структурообразующая роль фронтов в динамике субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн.

Как показал анализ композитных карт субмезомасштабные вихри и ВВ были детектированы на акватории моря преимущественно во фронтальных зонах или вблизи от них (рис. 9, 10). В наибольшей степени это характерно для областей изменчивости Двинского и Горловского фронтов. В Двинском заливе наблюдалась повышенная вихревая активность (см. рис.9), а с Горловским фронтом мы связываем большую часть наблюдаемых проявлений короткопериодных внутренних волн (см. рис. 10.б).

Отмечается, что пик внутриволновой активности приходится на август, а вихревой – на июнь-июль. Повышение вихревой активности происходит на пике формирования стоковых фронтов, когда сезонный прогрев верхнего слоя ещё не достиг своего максимума. Большинство вихрей отмечалось в Двинском заливе, в период наибольшей изменчивости его поверхностного фронта. Напротив, когда в середине августа сезонный термоклин сформирован полностью, а

активность фронтов проявляется в языках и меандрах, то эти обстоятельства способствуют более эффективной генерации короткопериодных ВВ.



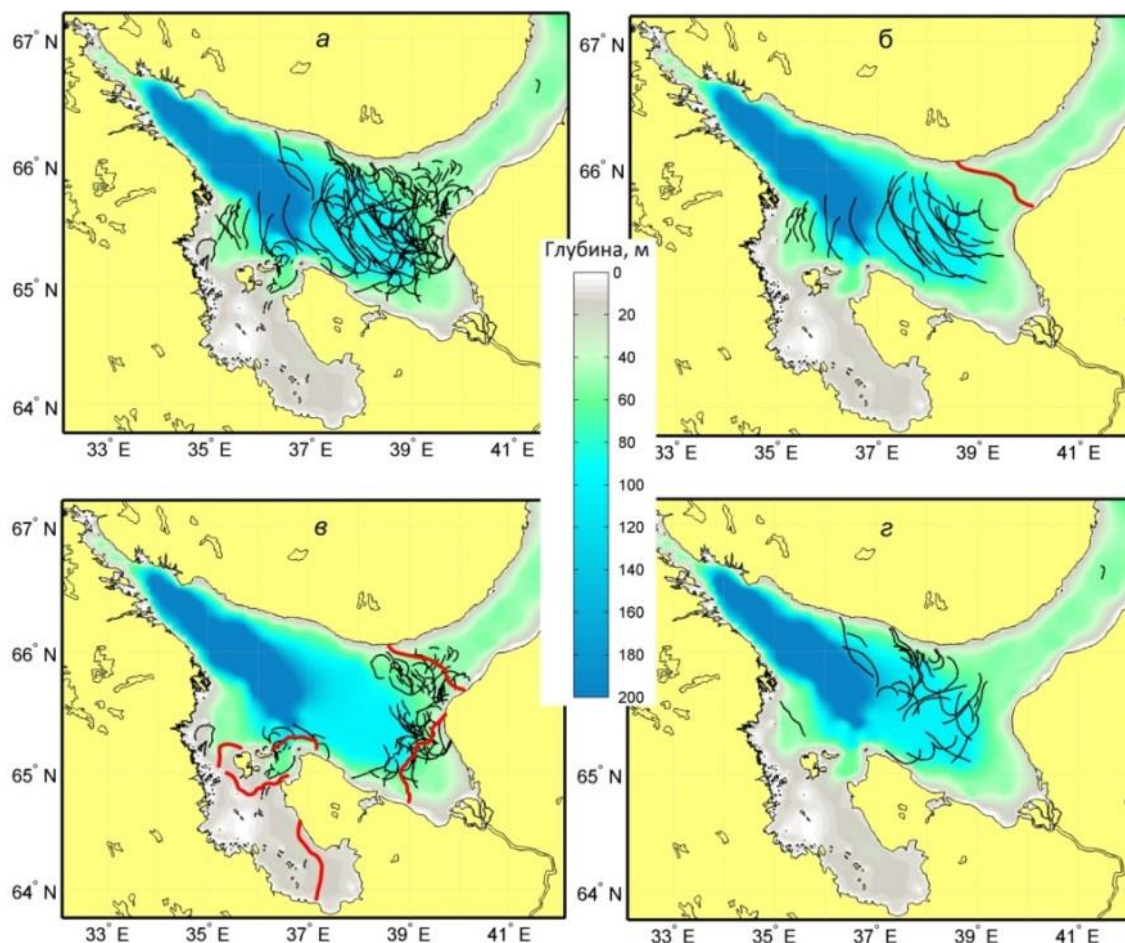
Синим (красным) цветом обозначен циклонический (антициклонический) тип вращения вихря, черным – среднее положение фронтов

Рис. 9. Композитная карта областей изменчивости поверхностных фронтов и субмезомасштабных вихрей в Белом море по данным 2010 г.

Обсуждение причин появления субмезомасштабных вихрей показало, что многие из механизмов их генерации реализуются вблизи фронтов или связаны с активной динамикой фронтальных разделов. В частности, неустойчивость шельфово-приливных фронтов и топографические эффекты в приливно-отливном потоке являются специфическим фактором вихреобразования в Белом море.

Механизм образования и проявления ВВ на акватории моря можно разбить на группы. Первая группа – ВВ в центральной части Бассейна, которые распространялись из Горла, преимущественно в юго-западном направлении (см. рис. 10.б). Это группа регулярно появляющихся ВВ приливного происхождения с очевидным очагом их генерации. Возможный механизм генерации предполагает их образование в результате разрушения бароклинного прилива непосредственно в зоне взаимодействия Горловского термохалинного фронта с сильным приливным потоком. Ко второй группе относятся волны, которые приурочены к областям изменчивости поверхностных фронтов (см. рис. 10.в). Размеры гребней ВВ здесь меньше, а выявить преобладающее направление распространения пакетов не удаётся. Большая часть поверхностных структур приходится на зоны Горловского и Двинского фронтов.

Наконец, остальные волны (см. рис. 10.г), которые не относятся к фронтальным (по географической привязке) или регулярным структурам с определенным очагом генерации.



Черными линиями показаны позиции гребней лидирующих волн в пакетах
Красным линиями отмечены положения фронтальных линий в среднем за сезон

Рис. 10 – Проявления короткопериодных внутренних волн по РЛ данным 2010 года: а – все данные, б – регулярные волновые пакеты из Горла, в – фронтальные волновые пакеты, г – нерегулярные волны

В заключении делается вывод, что основными источниками образования короткопериодных ВВ в Белом море являются дезинтеграция бароклинных приливных и инерционных движений, которые активно проявляется во фронтальных зонах.

В главе 5 «Влияние короткопериодной изменчивости на особенности турбулентного обмена» описаны географические особенности распределения коэффициентов горизонтальной турбулентной вязкости и диапикнической диффузии на масштабах приливного цикла, и выполнена оценка влияния на них субприливных процессов и связанных с ними явлений.

В разделе 5.1 обсуждаются методика расчета и географические особенности распределения горизонтальных компонент коэффициента кинематического турбулентного

обмена на масштабах приливного цикла, проводится оценка их связи с проявлениями субмезомасштабных вихрей и внутренних волн. Расчет инвариантных статистических характеристик турбулентности проводился по методу Эртеля. Расчёты выполнялись с шагом по времени 2 минуты за период в два приливных цикла волны M_2 . Временной масштаб осреднения исходных данных по проекциям скорости для расчета пульсаций течений составлял 30 минут.

Установлено, что значения коэффициентов горизонтальной турбулентной вязкости в среднем составили $10 \text{ м}^2/\text{с}$ за приливной цикл; наиболее интенсивный горизонтальный обмен наблюдался в районе Горла, где значения коэффициента горизонтального обмена на порядок превышают средние значения; минимальные значения коэффициентов отмечаются в мелководной части Бассейна на полигонах, выполненных к северу от Соловецких островов и в центральной части Двинского залива, они на порядок ниже средних оценок; обнаружена анизотропия горизонтального турбулентного обмена (отношение длин осей эллипса составило около 1.5) в прибрежных и проливных районах Белого моря; показано, что максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной субмезомасштабной вихревой активности или частых проявлений короткопериодных внутренних волн. Когда на полигоне регулярно регистрировались ИВВ, горизонтальный обмен за половину суток был больше в 1.5 – 2 раза, чем в их отсутствие.

В разделе 5.2 обсуждаются методика расчета и географические особенности распределения диапикнической диффузии на масштабах приливного цикла, проводится оценка их связи с распределением на акватории проявлений субмезомасштабных вихрей и внутренних волн.

Коэффициент диапикнической диффузии оценивался по методике Осборна. Расчет производился для слоя от 6 до 35 метров (глубины варьировались в зависимости от полигона) с двумя различными шагами по времени. В первом случае расчет был проведен с шагом 2 минуты без осреднения исходной информации для того, чтобы учесть эффекты, связанные с ВВ, а во втором случае после осреднения данных за два часа, чтобы полностью исключить проявления короткопериодных ВВ. Результаты обоих расчетов усреднялись за приливной цикл.

По результатам расчета значения коэффициентов изменяются от 10^{-4} до $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$, в среднем составляя $1.2 \times 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$. Было установлено, что интенсивность вертикального обмена в мористых районах Бассейна и центральной части Двинского залива в 3–4 раза меньше, чем в шельфовых районах; области, где часто регистрируются короткопериодные ВВ, характеризуются повышенной интенсивностью вертикального обмена; под влиянием ИВВ вертикальный обмен под пикноклином усиливается в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На обширном массиве высокоразрешающих спутниковых и контактных наблюдений полученных с 2006 по 2014 годы проведено комплексное исследование субмезомасштабной изменчивости гидрофизических полей в Белом море. Впервые получены числовые оценки внутриприливной изменчивости гидрофизических полей, тонкой структуры вод и особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик короткопериодных ВВ, субмезомасштабных вихрей, синоптической и мезомасштабной фронтальной динамики, а также процессов перемешивания для акватории Белого моря в условиях современного меняющегося климата.

В основе исследования лежит разработанная совокупность методов целенаправленного сочетания разнородных спутниковых данных и учащенных контактных наблюдений и их совокупного анализа. Она позволяет оценивать изменчивость характеристик гидрофизических полей и ассоциируемых с ней процессов и явлений на масштабах от сотни метров до десяти километров и от единиц минут до приливного периода на акватории всего моря в теплый сезон.

Установлены закономерности изменчивости гидрофизических полей на масштабах приливного цикла в разных по гидрологическим условиям районах Белого моря:

- в центральной глубоководной части моря наиболее интенсивные колебания температуры (до 1.5 °С) и солёности (до 0.7 ‰) имеют полусуточный период и выделяются на границе промежуточных и глубинных вод;

- в неглубоких стратифицированных районах моря вблизи фронтальных зон под влиянием прилива возникают значительные изменения вертикальной структуры вод, основной вклад в которые вносят короткопериодные колебания термохалинных характеристик (до 10.2 °С по температуре и до 2.8 ‰ по солёности), соответствующие прохождению пакетов нелинейных ВВ и имеющие максимальный размах до половины глубины моря в слое между поверхностными и промежуточными водами;

- в районах шельфовых фронтальных зон приливные колебания приводят к чередованию нестратифицированного и стратифицированного типов вертикальной структуры вод; в период наличия стратификации в слое скачка отмечаются короткопериодные колебания незначительной интенсивности (около 0.8 °С по температуре и до 0.2 ‰ по солёности);

- в относительно мелководных заливах с мощным речным стоком на фоне плавных и слабовыраженных полусуточных вариаций характеристик термоклина и галоклина эпизодически отмечаются значительные изменения положения слоя скачка, приводящие к

колебаниям до 4.8 °С по температуре и до 0.8 ‰ по солености, соответствующие прохождению одиночных ВВ или малых вихревых структур.

Выявлены закономерности изменчивости гидрофизических полей и тонкой структуры вод на масштабах меньше приливного цикла в разных по гидрологическим условиям районах Белого моря:

- выделяются три характерных максимума изменчивости: 5 – 6 часов, 1 – 2 часа и 8 – 50 минут;

- максимальный вклад в изменчивость суммарно в интервалах от 8 до 50 мин и от 1 до 2 часов (по температуре и солености до 40 % от общей изменчивости в общую дисперсию ряда; по течениям – до 20 %) отмечается в области пикноклина в районах моря с хорошо выраженной стратификацией вод вблизи фронтальных зон;

- средняя толщина слоя, охваченного выраженными колебаниями на субприливных масштабах, составляет 15 м, величина колебаний по температуре – 5 °С, по солености – 1 ‰;

- большая часть тонкой структуры вод формируется под влиянием процессов, связанных с адвекцией, неудовлетворяющей условиям изопикничности;

- кинематический эффект внутренних волн оказывает значительное влияние на трансформацию тонкой структуры вод в верхнем 30 метровом слое.

Найдены физико-географические закономерности распределения характеристик короткопериодных внутренних волн:

- волны встречаются регулярно: в южной части Горла, в Двинском заливе, вокруг Соловецких островов (около фронтов и неровностей дна);

- волны встречаются эпизодически: в центральной части Бассейна и Онежском заливе (большинство волн приходят туда из других районов);

- волны не встречаются в северо-западной части Бассейна, Кандалакшском заливе, кутовых частях Двинского и Онежского заливов;

- короткопериодные внутренние волны встречаются чаще в виде трехволновых пакетов со средними характеристиками: длина волны – 500 м, период – 11 мин, высота – 2.5 м;

- максимальные по площади пакеты волн отмечаются в Бассейне;

- средние характеристики внутренних волн в течении теплого сезона в одни и те же месяцы слабо меняются от года к году;

- максимальное количество короткопериодных внутренних волн отмечается в августе;

- вблизи от фронтальных разделов и неровностей дна (положительных и отрицательных) внутренние волны появляются регулярно с приливной периодичностью, а количество их максимально в сизигию;

- около приливных фронтальных разделов в неглубоких районах моря с выраженной двухслойной структурой вод высота внутренних волн регулярно превышает 10 м.

Найдены физико-географические закономерности распределения характеристик субмезомасштабных вихрей:

- субмезомасштабные вихри чаще всего встречаются на акваториях Двинского залива и Бассейна в районах фронтов и свалов глубин;

- субмезомасштабные вихри наиболее часто имеют циклонический тип вращения, диаметр 2 – 6 километров;

- антициклонические вихри регистрируются в три раза реже циклонических, но их диаметры в среднем больше;

- средние характеристики вихрей в одни и те же месяцы слабо меняются от года к году;

- максимальное количество субмезомасштабных вихрей наблюдается в июне-июле;

- над неровностями дна (банками) около Соловецких островов образование субмезомасштабных вихрей отмечается в определенную фазу прилива, они проявляются в верхнем 10 – 20 метровом слое и прослеживаются в течение 3 – 4 часов.

Установлены особенности локальной фронтальной динамики:

- интенсивная синоптическая динамика фронтов происходит внутри месячных интервалов, в то время как среднемесячные положения фронтальных линий близки к их средним за лето и не отражают особенности сезонного хода фронтальной динамики;

- фронты, в первую очередь, стоковые испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя, однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров, преимущественно у приливных, размерами до нескольких десятков километров;

- значительная мезомасштабная динамика характеристик фронтальных разделов, возникающая под воздействием прилива и ветра, проявляется в усилении (ослаблении) значений вертикального и горизонтального градиентов температуры в несколько раз, в колебаниях глубины залегания термоклина (пикноклина) до 20 м и в смещениях фронтальных разделов на дистанцию до 15 км.

Показана роль фронтов в динамике короткопериодных волн и субмезомасштабных вихрей:

- значительное число субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн (около 65 %) детектируются во фронтальных зонах или вблизи этих зон;

- субмезомасштабные вихревые структуры регистрируются преимущественно внутри зон стоковых (Двинская, Онежская) и на периферии структурных (Горловская, Соловецкая) фронтальных зон;

- повышение вихревой активности происходит на пике трансформации стоковых фронтов в неглубоком пикноклине;

- циклическая динамика фронта приливного перемешивания в Горле является источником регулярных проявлений значительных по размерам гребней короткопериодных внутренних волн, которые могут распространяться на 200 км от района генерации и существовать в течение 3 – 5 циклов волны M_2 , пересекая всю акваторию Бассейна;

- мезомасштабная динамика фронтальных разделов в Белом море, проявляющаяся в языках и меандрах, способствует эффективной генерации хаотично распространяющихся короткопериодных внутренних волн разных направлений;

- максимальное число короткопериодных внутренних волн детектируется, когда фронты на поверхности четко сформированы.

Установлены особенности турбулентного обмена в Белом море на масштабах приливного цикла, учитывающие влияние субприливных явлений:

- установлено, что значения коэффициентов горизонтальной турбулентной вязкости, учитывающие влияние субприливных процессов, могут меняться в разных районах моря от 1 до $30 \text{ м}^2/\text{с}$ за приливной цикл;

- значения коэффициентов диапикнической диффузии меняются от 10^{-4} до $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$;

- прослеживается анизотропия горизонтального турбулентного обмена в прибрежных и проливных районах Белого моря;

- максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной встречаемости субмезомасштабных вихрей или короткопериодных внутренних волн;

- интенсивность вертикального обмена в мористых районах Бассейна и центральной части Двинского залива в 3 – 4 раза меньше, чем в районах около фронтальных зон;

- под влиянием интенсивных короткопериодных внутренних волн вертикальный и горизонтальный обмен под пикноклином усиливается в два раза.

Список публикаций по теме работы в изданиях рекомендованных ВАК, патентов и свидетельств:

1. **Зимин А.В.**, Николаев В.Г. Экспериментальное исследование связи внутренних волн с радиационной температурой по данным наблюдений в прибрежном районе Белого моря // Труды центрального научно-исследовательского института имени акад. А.Н. Крылова. – 2010. – Вып. 51 (335). – С.181–186.
2. **Зимин А.В.** Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология. – 2012. – Т. 52, № 1. – С.16–25.
3. Родионов А.А., Семенов Е.В., **Зимин А.В.** Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2012. – Т. 5, № 2. – С.89–108.
4. **Зимин А.В.**, Пикуль Т.А. Использование вейвлет-преобразования для выделения характеристик внутренних волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2012. – Т. 5, № 3. – С.34–42.
5. **Зимин А.В.**, Родионов А.А., Здоровеннов Р.Э., Романенков Д.А., Шевчук О.И., Родионов М.А., Жегулин Г.В. Исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в Белом море в июле-августе 2012 года с научно-исследовательского судна «Эколог» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2012. – Т. 5, №3. – С.85–88.
6. **Зимин А.В.** Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение полусуточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря // Океанология. – 2013. – Т. 53, №. 3. – С.293–303.
7. **Зимин А.В.**, Родионов А.А., Жегулин Г.В. Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2013. – Т. 6, №3. – С.19–33.
8. **Зимин А.В.**, Романенков Д.А., Родионов А.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А. Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей Белого моря в августе 2013 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 85–92.
9. Kozlov I., Romanenkov D., **Zimin A.**, Chapron B. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // Remote Sensing of Environment. – 2014. – 147. – P.99–107. – doi:10.1016/j.rse.2014.02.017.
10. **Зимин А.В.**, Романенков Д.А., Козлов И.Е., Шапрон Б., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Мясоедов А.Г., Коллар Ф. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 3. – С. 41–55.
11. Родионов А.А., Романенков Д.А., **Зимин А.В.**, Козлов И.Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7, № 3. – С.29–41.
12. Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Атаджанова О.А., **Зимин А.В.**, Романенков Д.А., Шапрон Б., Мясоедов А.Г. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, №4. – С.338–345.
13. **Зимин А.В.**, Козлов И.Е., Атаджанова О.А., Шапрон Б. Комплексный мониторинг короткопериодных внутренних волн в Белом море // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 5. – С.51–61.
14. Родионов А. А., **Зимин А. В.**, Никитин Д. А. Комплексные исследования гидродинамических и гидроакустических явлений в мезо- и субмезомасштабном

- интервале изменчивости гидрофизических полей в арктических морях (на примере Белого моря)// Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 17–23.
15. **Зимин А.В.**, Романенков Д.А., Атаджанова О.А., Родионов А.А., Моисеев А.В. Опыт разработки системы мониторинга короткопериодных процессов и субмезомасштабных структур в Белом море и результаты ее апробации летом 2014 года // Ученые записки РГГМУ. – 2015. – № 41. – С.116–125.
 16. **Зимин А.В.**, Атаджанова О.А., Романенков Д.А. Козлов И.Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 1–2. – С.129–135.
 17. Белевич Т.А., Ильяш Л.В., **Зимин А.В.**, Кравчишина М.Д., Новихин А.Е., Добротина Е.Д. Зависимость особенностей пространственного распределения летнего фитопланктона Онежского залива Белого моря от локальных гидрофизических условий // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 16. Биология. – 2016. – № 3. – С.27-33.
 18. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. Detect_WW – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011617573 от 29.09.2011.
 19. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. Convertor_txt – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011617574 от 29.09.2011.
 20. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. Receiver_LCARD – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011617575 от 29.09.2011.
 21. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. STD_Scan – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011619279 от 01.12.2011.
 22. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. A_D_C_P – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614914 от 31.05.2012.
 23. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. GPS_WS – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012618614 от 21.09.2012.
 24. **Зимин А.В.**, Козлов И.Е., Мясоедов А.Г., Мохнаткин Ф. Ю. Проявления внутренних волн по данным контактных и спутниковых наблюдений в 2010 году – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012261188 от 19.11.2012.
 25. **Зимин А.В.** Устройство для измерения глубины залегания термоклина с дрейфующего судна – Патент на полезную модель №127188 от 20.04.2013.
 26. **Зимин А.В.** Система измерения глубины залегания слоя скачка в море на ходу судна – Патент на полезную модель № 132886 зарегистрирован 27.09.2013.
 27. **Зимин А.В.** Методика выполнения натуральных экспериментов по исследованию короткопериодных внутренних волн в морях Северо-Европейского бассейна – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621214 от 24.09.2013.
 28. **Зимин А.В.**, Козлов И.Е., Атаджанова О.А. Внутренние волны по данным одновременных контактных и спутниковых наблюдений в Белом море – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621214 от 24.09.2013.
 29. **Зимин А.В.** Система измерения высот внутренних волн в море на ходу судна – Патент на полезную модель № 135117 от 27.11.2013.
 30. **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.
 31. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. СУБД ЭИ ИО СПб – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014614227 от 18.04.2014.
 32. Муравьев Е.В., **Зимин А.В.**, Родионов А.А. БД ЭИ ИО СПб – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620281 от 08.05.2014.
 33. **Зимин А.В.**, Моисеев А. Короткопериодная изменчивость ГФП – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620427 от 03.03.2015.