

На правах рукописи

Свергун

Свергун Егор Игоревич

**КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ШЕЛЬФОВЫХ ОБЛАСТЯХ
С ВЫРАЖЕННОЙ ПРИЛИВНОЙ ДИНАМИКОЙ НА ПРИМЕРЕ
БАРЕНЦЕВА МОРЯ И КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА ТИХОГО ОКЕАНА**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2022

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, главный научный сотрудник Лаборатории геофизических пограничных слоев Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (Санкт-Петербургский филиал)

Официальные оппоненты: *Белоненко Татьяна Васильевна*, доктор географических наук, профессор кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета

Куркина Оксана Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф в интересах устойчивого промышленного развития страны и региона Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Защита диссертации состоится «26» декабря 2022 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.170.01 при Мурманском морском биологическом институте Российской академии наук по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мурманского морского биологического института Российской академии наук и в сети Интернет по ссылке: http://www.mmbi.info/fs/files/2798/DISSERTACIYA_SVERGUN_E_I_21-10.pdf
Автореферат разослан «16» ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.170.01,
кандидат географических наук



И.С. Усягина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Короткопериодные внутренние волны (КВВ) в Мировом океане имеют длины от десятков метров до единиц километров, вызывают колебания среды с частотой много меньше инерционной, но больше частоты плавучести [Коняев, Сабинин, 1992] и являются слабо изученной частью динамики океана. КВВ генерируются под влиянием различных механизмов. В их числе, например, образование запрпятственных волн при взаимодействии критического приливного течения с неоднородностями морского дна [Jackson et al., 2012], нелинейно-дисперсионный распад (эволюция) внутреннего прилива [Jackson et al., 2012], локальная дезинтеграция субинерциальных приливных волн [Vlasenko et al., 2005; Морозов, Пака, 2010], взаимодействие с пикноклином или луча энергии внутренней приливной волны [Jackson et al., 2012], или речного плюма [Jackson et al., 2012], или меандра [Lavrova et al., 2011]. Из-за обилия возможных механизмов генерации остаются малоизученными географические особенности их вкладов в образование КВВ на различных шельфовых акваториях.

Актуальность изучения КВВ стимулируется тем, что они являются фактором повышенного вертикального перемешивания и вносят существенный вклад в изменчивость гидрофизических полей, в следствии чего являются объектом пристальных исследований в районах океана, где действуют различные механизмы генерации [Small et al., 1999; Colosi et al., 2001; Бондур и др., 2010; Shroyer et al., 2011; Purwandana et al., 2021]. Сведения о КВВ имеют и чисто прикладное значение, поскольку они способны перераспределять концентрации биогенов и фитопланктона [Lucas et al., 2011; Навроцкий и др., 2012; Garwood et al., 2020], что в конечном результате сказывается на распределении промысловых гидробионтов [Бондур и др., 2020]. Внутренние волны могут влиять на распространение звука в морской среде [Родионов и др., 2012], управляемость подводных аппаратов [Серебряный, 2016], а также приводить в движение донные осадки [Heathershaw, 1985; Quaresma et al., 2007; Stastna, Lamb, 2008; Тюгин и др., 2014].

В последние десятилетия в арктических и субарктических регионах происходят значительные изменения климата [Callaghan et al., 2010; Yamanouchi, Takata, 2020], вследствие которых, в зимнее время, отмечается низкая ледовитость [Жичкин, 2015; Serreze, Stroeve, 2015], и высокое теплосодержание вод [Жичкин, 2015; Barton et al., 2018]. С повышением среднего теплосодержания деятельного слоя океана уменьшается устойчивость стратификации, увеличиваются амплитуды внутренних приливных волн (ВПВ) [Гордеева и др., 2014] и вероятность их обрушения [Vlasenko et al., 2005, Rippeth et al., 2015]. Вследствие этого может интенсифицироваться короткопериодное внутреннее волнение, что делает актуальным расширение временных рамок исследований характеристик КВВ на акваториях с выраженной приливной динамикой, где влияние изменений климата на гидрологическую структуру вод сказывается особо заметно. Согласно [Jackson, 2004], в арктических и субарктических морях КВВ проявляются преимущественно в летний период года. Анализ годового массива современных спутниковых данных поможет дать ответ на вопрос, наблюдаются КВВ в условиях глобальных изменений климата сезонно или круглогодично.

Согласно новой Морской доктрине РФ (<http://www.kremlin.ru/acts/bank/48215/page/1>) изучение континентального шельфа нашей страны является приоритетной задачей. Отметим, что Баренцево море и Курило-Камчатский регион Тихого океана выделяются как области, входящие в состав дальневосточного и северного рыбопромысловых бассейнов, обеспечивающих до 80% российского вылова [Мусаева и др., 2020].

Соответственно новые сведения о районах частой встречаемости КВВ могут являться важным маркером для поиска новых областей промысла.

Изученность КВВ в исследуемых регионах. Общей чертой Баренцева моря и Курило-Камчатского региона является то, что основным источником генерации КВВ в обоих регионах вероятнее всего выступают внутренние приливные волны [Серебряный, 2002; Сабинин, Серебряный, 2007; Nakamura et al., 2010]. Однако для доминирующего полусуточного прилива в Баренцевом море и суточного прилива в Курило-Камчатском регионе они являются субинерциальными и не могут распространяться далеко от мест генерации [Vlasenko et al., 2005; Каган и др., 2010; Морозов, Пака, 2010].

Наиболее активное изучение КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе велось в конце XX – начале XXI века. По данным спутниковых наблюдений [Козлов и др., 2011; Козлов и др., 2014] КВВ на акватории Баренцева моря регистрируются регулярно над неоднородностями донной топографии, что подтверждает их приливное происхождение. Контактные измерения обнаруживают наличие КВВ в различных районах Баренцева моря [Серебряный, 2002; Vlasenko et al., 2003; Morozov et al., 2008; Морозов, Марченко, 2012; Морозов и др., 2017]. При этом КВВ часто регистрируются на фоне полусуточных ВПВ значительной амплитуды [Серебряный, 2002]. Результаты математического моделирования [Талипова и др., 2014] демонстрируют генерацию КВВ с амплитудами до 12 метров при взаимодействии баротропной приливной волны с областью больших градиентов глубин.

В Курило-Камчатском регионе по данным спутниковых наблюдений [Дикинис и др., 1999; Lavrova et al., 1999; Jackson, 2004; Mitnik, Dubina, 2012, Епифанова и др., 2019] установлено присутствие разрозненных ярко-выраженных проявлений КВВ. Результаты контактных наблюдений в проливах Курильской гряды и у Тихоокеанского побережья Камчатки позволили выявить КВВ с амплитудами до 8 метров, которые проявляются в данных наблюдений с приливной периодичностью [Рао, Хе, 2002; Nakamura et al., 2010; Navrotsky, Pavlova, 2010]. Обобщение данных спутниковых и контактных наблюдений [Сабинин, Серебряный, 2007] выявило, что вблизи океанского побережья Камчатского полуострова наблюдается сложная картина цугов КВВ, взаимодействующих друг с другом, а также с меандрами Камчатского течения. В работе делается вывод о генерации КВВ в открытой части залива при распространении луча внутреннего прилива.

Для регионов, смежных с исследуемыми [Alpers et al., 2005; Ho et al., 2009; Kurekin et al., 2020], по спутниковым данным была выявлена существенная изменчивость характеристик проявлений КВВ в течение года. Для Баренцева моря и Курило-Камчатского региона до сих пор не существует оценок внутригодовой изменчивости характеристик КВВ. Практически все рассмотренные выше работы демонстрируют связь КВВ с приливной динамикой, но не дают количественных оценок вклада конкретных механизмов в генерацию КВВ.

Учитывая субинерциальный характер доминирующих гармоник внутреннего прилива в рассматриваемых регионах, в качестве гипотезы исследования полагается, что основным механизмом генерации КВВ на данных акваториях будет локальная дезинтеграция субинерциального внутреннего прилива.

Стоит отдельно отметить, что для исследуемых регионов нет результатов синхронных спутниковых и контактных наблюдений, которые позволили бы сопоставить характеристики КВВ и их поверхностных проявлений. Эта информация важна для валидации исследований, которые опираются на результаты спутниковых наблюдений.

Цель и задачи работы

Цель диссертационного исследования – на основе спутниковых наблюдений с привлечением результатов контактных измерений и данных глобальной приливной модели установить физико-географические особенности поля КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе Тихого океана.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать метод комплексного анализа спутниковых наблюдений и данных приливной модели для количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ.
2. Выявить районы регулярной встречаемости КВВ по спутниковым данным в период с декабря 2018 года по ноябрь 2019 года и выполнить количественную оценку пространственно-временной изменчивости характеристик КВВ в исследуемых регионах.
3. Оценить вклад различных механизмов в генерацию КВВ в каждом из регионов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ на акватории приливногo моря, отличительной особенностью которого является комплексный анализ данных разнородных спутниковых наблюдений с привлечением результатов приливной модели.

2. Особенности распределения проявлений КВВ на рассматриваемых акваториях. В Баренцевом море районы частой встречаемости КВВ расположены около о. Надежды, западнее архипелага Новая Земля и у мыса Желания. В Курило-Камчатском регионе Тихого океана они находятся южнее острова Кунашир, в районе острова Онекотан над хребтом Витязь, около м. Шипунский, а также в Камчатском заливе. Сезонная изменчивость частоты встречаемости проявлений КВВ в данных областях обуславливается стратификацией.

3. Проявлениям КВВ соответствуют внутренние волны с амплитудами от 2,5 метров. При этом в Баренцевом море до 64% проявлений КВВ в месяц находится в очагах генерации полусуточных ВПВ, а в Курило-Камчатского регионе до 70% проявлений КВВ в месяц находится в очагах генерации суточных ВПВ. То есть в исследуемых регионах доминирует механизм генерации КВВ при локальной дезинтеграции полусуточных и суточных субинерциальных ВПВ. Вне очагов генерации ВПВ на акватории Курило-Камчатского региона от мыса Лопатка до мыса Опасный до 78% КВВ в месяц генерируются при взаимодействии мезомасштабных вихревых структур с сезонным пикноклином.

Научная новизна работы определяется тем, что:

1. Был разработан метод количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ, основанная на комплексном анализе данных спутниковых наблюдений, с привлечением контактных измерений и приливной модели.

2. В Баренцевом море были выявлены новые районы регулярной встречаемости проявлений КВВ, расположенные около острова Надежды, западнее архипелага Новая Земля, а также у мыса Желания. В Курило-Камчатском регионе впервые установлено положение районов регулярной встречаемости проявлений КВВ, которые расположены у острова Кунашир, над хребтом Витязь, около м. Шипунский, а также в Камчатском заливе. Впервые было продемонстрировано, что в Курило-Камчатском регионе проявления КВВ регистрируются в период с декабря по март, несмотря на большую толщину верхнего квазиоднородного слоя

3. Для Баренцева моря и Курило-Камчатского региона впервые с использованием критерия tidal body force было выявлено положение очагов генерации ВПВ и показано, что до 70% проявлений КВВ находится в очагах генерации ВПВ.

4. Впервые было показано, что на акватории Курило-Камчатского региона от мыса Лопатка до мыса Опасный в летний и осенний периоды вклад в формирование КВВ вносит взаимодействие мезомасштабных вихревых структур с сезонным пикноклином.

Достоверность полученных результатов определяется подробным анализом измерений при помощи апробированной методики. Результаты спутниковых наблюдений в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе обрабатывались по методике, опирающейся на широкий мировой опыт анализа спутниковых данных. Достоверность результатов дополнительно подтверждается прохождением процедуры рецензирования при публикации материалов диссертации в ведущих профильных журналах.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая значимость исследования определяется тем, что полученные результаты расширяют существующие представления о пространственно-временной изменчивости характеристик КВВ и вкладе различных механизмов в их генерацию в арктических и субарктических регионах РФ. Созданный метод оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ может найти применение на других приливных акваториях. Практическая значимость исследования определяется тем, что его результаты можно использовать при планировании экспериментальных работ по изучению КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе. Результаты выделения районов частой встречаемости проявлений КВВ, можно использовать при планировании деятельности по разведке морских биоресурсов, гидротехническом строительстве и учитывать при решении задач подводной навигации.

Личный вклад автора определяется: участием в экспедиционных исследованиях по измерению характеристик внутренних волн; обработкой архива спутниковых данных с целью регистрации проявлений КВВ; разработке метода количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ; обработкой результатов подспутниковых наблюдений; ведущим вкладом в подготовку научных публикаций; представлением результатов работы на конференциях. Соискателю полностью принадлежит авторство текста статей, в которых он является первым автором, и части текста статей, в которых он является соавтором.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены и обсуждались на всероссийской научной конференции молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана» (2017-2021); всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (2018-2022); всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2018-2021); международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики» (2020); Генеральной ассамблее Европейского геофизического общества (EGU) (2021-2022); Всероссийской научной конференции «Моря России» (2021-2022); Всероссийской конференции «Береговая конференция: натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» (2022); заседаниях учёного совета СПбФ ИО РАН (2018-2022), международной конференции «Оценка состояния ресурсов, экосистем озёр и морей в условиях современных изменений климата и социально-экономического развития» (2022).

Благодарности. Автор благодарен научному руководителю д. г. н. Зимину Алексею Вадимовичу за ценные советы по интерпретации полученных результатов и всестороннюю поддержку, оказанную в ходе работы над диссертацией; член-

корреспонденту РАН, д. т. н. Родионову Анатолию Александровичу за предоставление возможности участия в экспедиционных исследованиях; к. ф.-м. н. Козлову Игорю Евгеньевичу за предоставление исходных кодов в среде Matlab; к. ф.-м. н. Софьиной Екатерине Владимировне и к. г. н. Романенкову Дмитрию Анатольевичу за обсуждение работы и высказанные ценные замечания по ее содержанию работы; коллеге, м. н. с. ИО РАН, Конику Александру Александровичу за консультации для освоения методики выделения фронтальных зон; к. г. н. Атаджановой Оксане Алишеровне за помощь в анализе спутниковых данных в рамках подспутникового эксперимента в Баренцевом море; сотрудникам КГНЦ Дудко Даниилу Игоревичу и Шпилёву Николаю Николаевичу за предоставление средств измерений и участие в проведении экспедиционных исследований; к. г. н. Сандалюку Никите Валерьевичу за консультации при сопоставлении записей колебаний температуры и приливных течений в рамках подспутникового эксперимента в Авачинском заливе.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ №18-35-20078 мол_а_вед «Мезо- и субмезомасштабная динамика верхнего слоя Северного Ледовитого океана: синтез спутниковых наблюдений, контактных измерений и результатов численного моделирования», гранта РФФИ 20-35-90054 Аспиранты «Короткопериодные внутренние волны в приливных морях на разных типах шельфа», а также в рамках государственного задания СПбФ ИО РАН № FMWE-2021-0014.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, приложения. Объем диссертации составляет 133 страницы. Текст диссертации иллюстрирован 55 рисунками и 8 таблицами. Список использованной литературы включает 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны объекты и предмет исследования.

В разделе 1.1 выполняется обзор особенностей КВВ как предмета исследования. КВВ являются достаточно сложным для регистрации процессом, поскольку имеют малые пространственно-временные масштабы. Учитывая достоинства и недостатки контактных и спутниковых методов, наиболее целесообразным инструментом для изучения особенностей пространственно-временной изменчивости КВВ является подход, основанный на анализе результатов спутниковых наблюдений с привлечением результатов контактных измерений. Но для выявления механизмов генерации КВВ требуется создание методик комплексного анализа характеристик КВВ с привлечением данных реанализа и глобальной приливной модели с целью описания фоновой гидрологической обстановки и приливной динамики.

В разделе 1.2 выполняется обзор гидрологического режима Баренцева моря. Делается вывод, что внутригодовая пространственно-временная изменчивость крупномасштабных процессов, определяющих характеристики поля КВВ изучена достаточно хорошо. Однако сведения об изменчивости характеристик КВВ носят фрагментарный характер. Для акватории Баренцева моря анализ характеристик КВВ по спутниковым данным был выполнен только для летнего и осеннего периода 2007 года. Сезонная изменчивость характеристик КВВ за более продолжительный период не рассматривалась. Также, несмотря на наличие результатов сравнения характеристик КВВ

по спутниковым и контактными данным, для Баренцева моря не существует исследований, посвященных прямому сопоставлению характеристик КВВ, полученных в рамках подспутниковых экспериментов. При наличии в приведенных работах упоминаний о приливном характере генерации КВВ, вклад конкретных механизмов в генерацию КВВ не рассматривались.

В разделе 1.3 выполнен обзор особенностей гидрологического режима Курило-Камчатского региона. Было выявлено, что процессы, влияющие на формирование поля КВВ (изменчивость вертикальной структуры вод, приливная динамика) в отдельных районах изучены достаточно хорошо. Однако характеристики КВВ рассматривались только на акваториях около острова Парамушир, проливов Екатерины и Крузерштерна, Авачинского и Кроноцкого заливов. Для Курило-Камчатского региона отсутствуют исследования, которые охватывали всю акваторию региона в течение длительного периода времени. Закономерности возникновения КВВ описаны лишь для шельфа полуострова Камчатка, при этом нет количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ.

Во второй главе описаны исходные данные и методики их обработки.

В разделе 2.1 описаны исходные данные, применяемые в работе, такие как результаты контактных измерений в Баренцевом море и Авачинском заливе, спутниковые изображения Sentinel 1, Alos PALSAR, Sentinel 2, Landsat 8, Suomi NPP, Aqua/Terra MODIS, а также данные реанализа Copernicus и глобального приливного атласа TPXO9.

В разделе 2.2. приведен разработанный метод оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ. На рисунке 1 показана блок-схема разработанного метода.

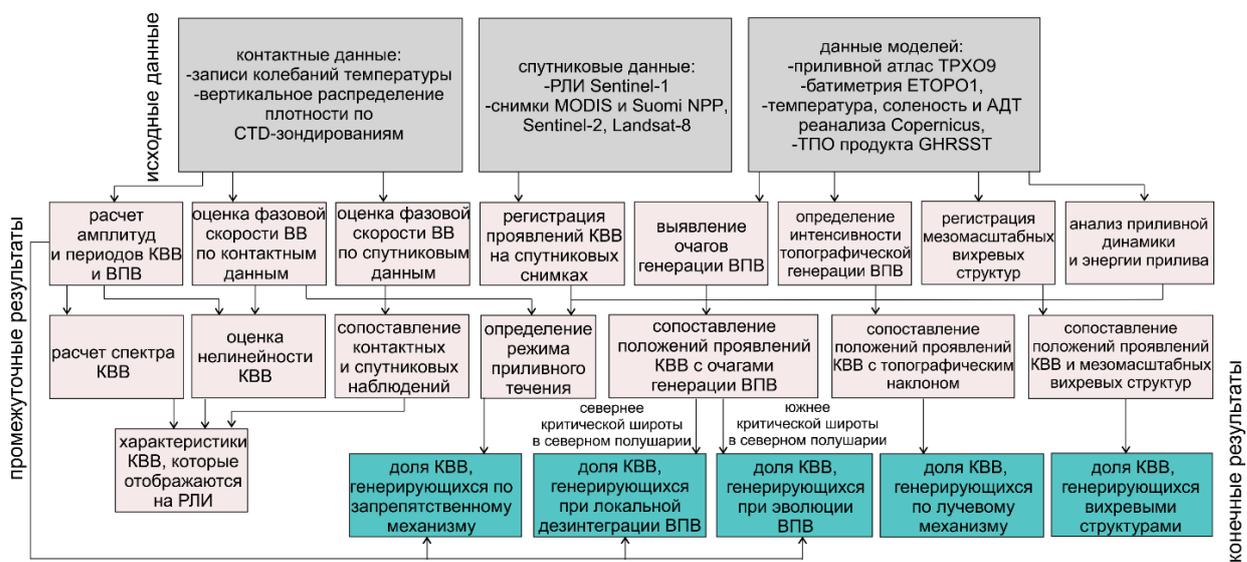


Рисунок 1 – Блок-схема метода количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ.

Начальный этап исследования предполагает анализ результатов синхронных спутниковых и контактных наблюдений для оценки характеристик КВВ, отображающихся на спутниковых снимках. Затем необходимо выполнить анализ приливной динамики и энергетики, рассчитать критерии генерации ВПВ, определить положение мезомасштабных вихревых структур. Далее необходимо произвести построение и анализ композитных карт с привлечением результатов контактных измерений.

Стоит отметить, что применение композитных карт широко используется для анализа особенностей поля КВВ и выявления механизмов генерации КВВ. Отличительная черта разработанного метода, обуславливающая его новизну, состоит в использовании для количественной оценки вклада различных приливных и неприливных механизмов в генерацию КВВ разнородных спутниковых данных и глобальной приливной модели с привлечением контактных данных.

В третьей главе рассмотрены характеристики КВВ в южной части Баренцева моря и в Авачинском заливе Тихого океана.

В разделе 3.1 описаны результаты подспутникового эксперимента в южной части Баренцева моря. Установлено, что район исследований характеризуется высокой активностью КВВ, которые проявляются как в спутниковых, так и в *in-situ* данных. Было показано удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных значений периодов и длин волн. Это позволяет утверждать, что зарегистрированные колебания с амплитудой более полуметра, периодом свыше 10 мин и длинами более 200 м являются ВВ первой моды, которые хорошо описываются соответствующим дисперсионным соотношением.

РЛИ позволили выявить два превалирующих типа пакетов КВВ: во-первых, волны прибрежной зоны, распространяющиеся, как правило, от берега, и во-вторых, КВВ, зарегистрированные в открытом море, с генеральным направлением вдоль берега на северо-запад. Цуговый характер зарегистрированных КВВ проявляется как в данных *in-situ*, так и спутниковых наблюдений.

Результаты прямого сопоставления данных контактных и спутниковых наблюдений показывают, что при глубине залегания пикноклина около 15 м хорошо выраженные в данных контактных наблюдений КВВ с амплитудами от 2.5 м отчётливо отображаются на морской поверхности в виде пакетов волн с длинами порядка 500 м.

В разделе 3.2 описаны результаты подспутникового эксперимента в Авачинском заливе Тихого океана. На записях колебаний температуры по данным экспедиционных исследований зарегистрированы внутренние волны с амплитудами от 1 до 8 м. Было показано, что в Авачинском заливе в 10 % случаев регистрируются ИВВ с амплитудами от 5 до 8 м. Анализ записей колебаний температуры показал, что ИВВ в шельфовой зоне Авачинского залива регистрируются в виде цугов из 2–4 волн. Сопоставление записей колебаний температуры с приливными течениями показало ярко выраженную связь цугов КВВ с приливной динамикой.

По результатам анализа спутниковых изображений обнаружено 72 поверхностных проявления КВВ, преимущественно сконцентрированных в районе свала глубин у изобаты 500 м. Кроме того, выделены поверхностные проявления КВВ, распространяющиеся к берегу с приливной периодичностью. Показано, что КВВ могут распространяться из области взаимодействия мелкого обостренного пикноклина с меандрами Камчатского течения, обнаруженными на спутниковых изображениях.

Сопоставление синхронных данных спутниковых, контактных и визуальных наблюдений выявило, что КВВ с амплитудами от 2,5 м и длинами 300–400 м имеют отчетливые проявления на морской поверхности.

В разделе 3.3 с применением разработанного метода оценивается вклад приливных механизмов в генерацию КВВ. Анализ приливной динамики показал, что в южной части Баренцева моря по всему рассматриваемому региону наблюдаются относительно высокие скорости приливных течений от 40 см/с до 100 см/с. На акватории Авачинского залива, напротив, скорости приливных течений незначительны, и лишь над материковым склоном и континентальным шельфом в окрестностях м. Шипунский они усиливаются до значений

20-30 см/с. Можно предположить, что данная область является зоной «фокусирования» баротропной приливной энергии и, следовательно, интенсификации внутреннего прилива. Вероятно, именно эта особенность нашла отражение в наблюдаемых оценках спектра короткопериодных колебаний.

При рассмотрении критериев мест возникновения и интенсификации внутреннего полусуточного прилива были выявлены особенности генерации КВВ в различных районах (рисунок 2). В юго-восточной части Баренцева моря наиболее вероятно образование КВВ при обтекании приливным потоком неоднородностей рельефа дна по типу запрпятственных волн. В Авачинском заливе вероятен другой механизм генерации КВВ, а именно эволюция ВПВ.

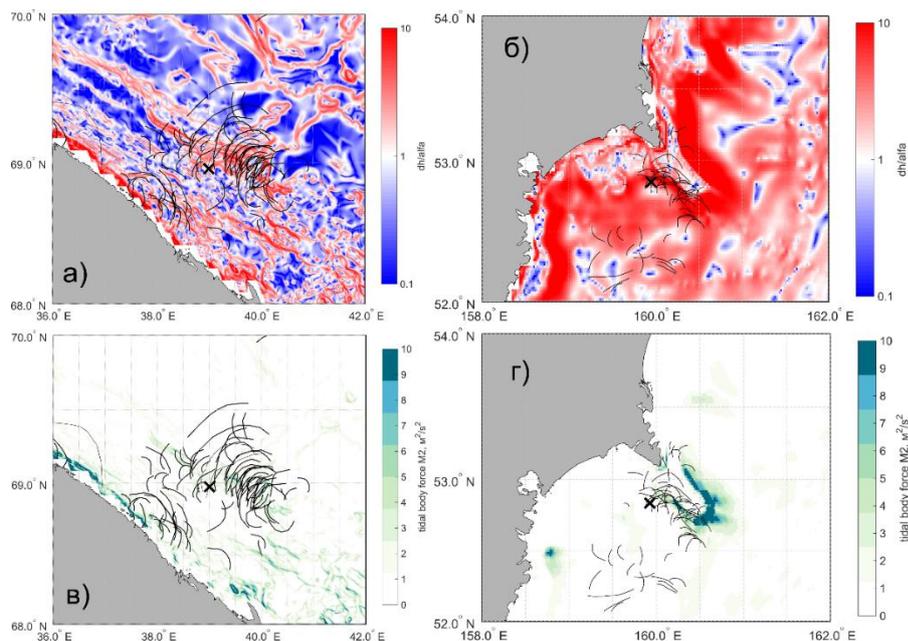


Рисунок 2 – Композитные карты проявлений КВВ с критериями генерации внутренних волн: а) отношением наклона дна к наклону характеристик ВПВ гармоника M2 в южной части Баренцева моря; б) отношением наклона дна к наклону характеристик ВПВ гармоника M2 в Авачинском заливе; в) tidal body force для гармоника M2 в южной части Баренцева моря; г) tidal body force для гармоника M2 в Авачинском заливе. Символ «х» указывает положение точек контактных измерений.

В четвертой главе рассматривается сезонная изменчивость короткопериодных внутренних волн в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе по спутниковым данным.

В разделе 4.1 описываются характеристики проявлений КВВ в Баренцевом море. Скопления проявлений КВВ регистрируются преимущественно в зоне локальных неоднородностей рельефа дна юго-восточнее Шпицбергена, юго-западнее ЗФИ, около Мурманского берега Кольского полуострова и севернее Новой Земли (рисунок 3а). Проявления КВВ на РЛИ регистрируются с начала июня по середину сентября. Минимум количества проявлений отмечается в начале июня и в середине сентября. Выделяется три локальных максимума повторяемости числа проявлений: в третью неделю июля, в первую неделю августа и в первую неделю сентября. Были выявлены «горячие точки» в поле проявлений КВВ, которые совпадают с результатами предыдущих исследований: западнее о. Надежды, западнее ЗФИ. Также были выявлены новые «горячие точки»: северо-западнее Новой Земли, у м. Желания, а также у м. Святой Нос. Положение горячих точек

показано на рисунке 3б. В области «горячих точек» находится около 500 проявлений КВВ, что составляет 68 % от суммарного числа проявлений, зарегистрированных за весь исследуемый период. При этом площадь «горячих точек» составляет не более 10 % от площади Баренцева моря, что указывает на высокую локализованность проявлений КВВ.

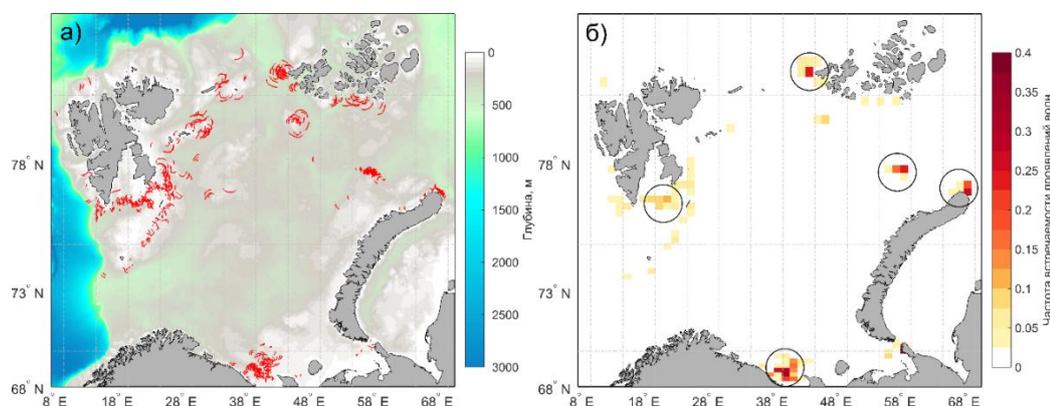


Рисунок 3 – Пространственное положение проявлений КВВ за весь исследуемый период: а) лидирующие гребни; б) частота встречаемости (черные окружности указывают положение «горячих точек»).

В разделе 4.2 описываются характеристики проявлений КВВ в Курило-Камчатском регионе Тихого океана. Из рисунка 4а видно, что подавляющее большинство проявлений КВВ сконцентрировано в шельфовой зоне и над материковым склоном. Лишь минимальное число проявлений регистрируется над большими глубинами. Из рисунка 4б видно, что наиболее часто в течение всего года проявления КВВ регистрировались южнее острова Кунашир, в районе острова Онекотан над хребтом Витязь, около м. Шипунский, а также в Камчатском заливе.

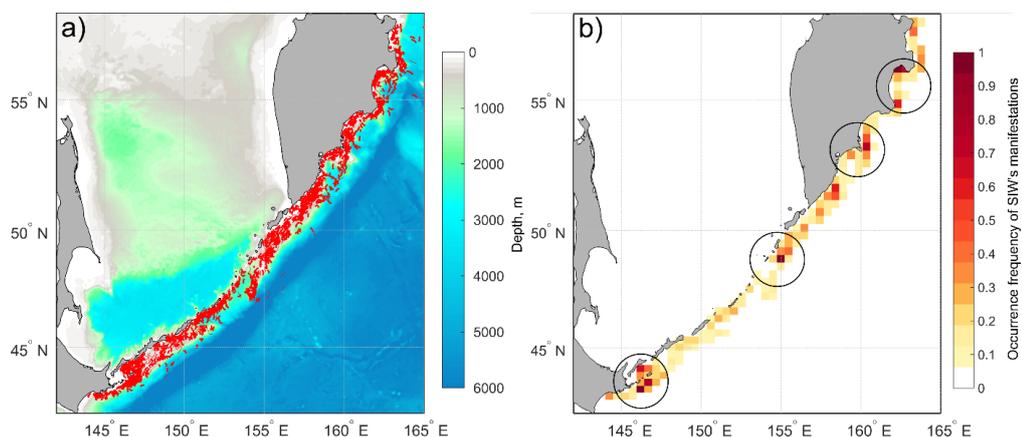


Рисунок 4 – Карты пространственного распределения: а) лидирующих гребней проявлений КВВ за весь исследуемый период; б) частоты встречаемости проявлений КВВ за год (окружностями отмечены области наибольшей частоты встречаемости)

Показано, что в данных областях повышенная частота встречаемости проявлений КВВ регистрируется практически во все сезоны года. В этих областях суммарно регистрируется около 50% от всех зарегистрированных за год проявлений КВВ, а их площадь составляет менее 20% от общей площади исследуемого региона. Было установлено, что количество проявлений волн в регионе сильно варьирует в течение года: зимой было детектировано 47 проявлений, а летом – 927. Межгодовой изменчивости

подвержены частота встречаемости проявлений КВВ и их геометрические характеристики.

В разделе 4.3 по разработанному методу оценивается вклад различных механизмов в генерацию КВВ. На рисунке 5 приведены композитные карты горизонтального распределения критерия tidal body force и положения лидирующих гребней проявлений КВВ в августе 2019 года в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе.

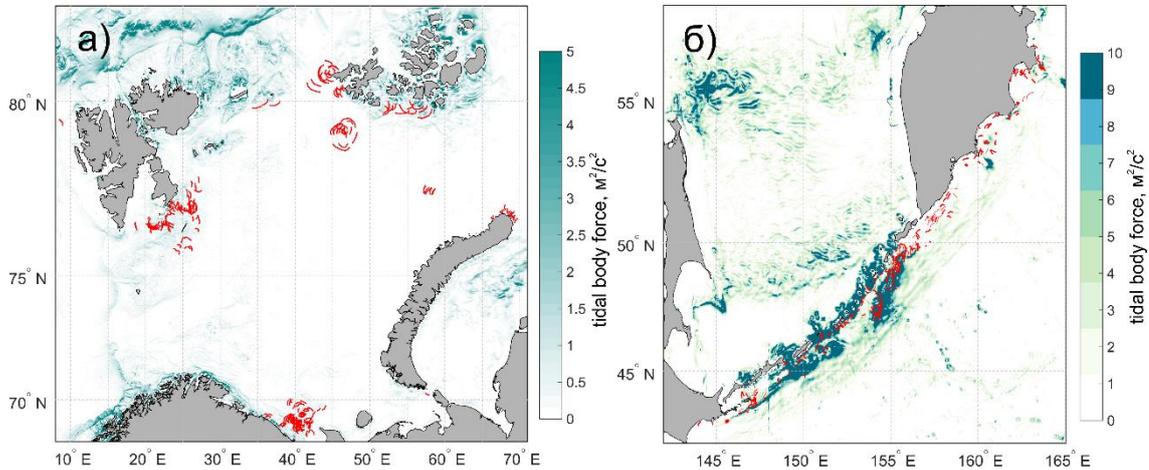


Рисунок 5 – Композитные карты, сочетающие горизонтальное распределение интегрированного по глубине критерия tidal body force для и положения лидирующих гребней проявлений КВВ в августе 2019 года: а) гармоники M2 в Баренцевом море; б) гармоники K1 в Курило-Камчатском регионе.

И в Баренцевом море, и в Курило-Камчатском регионе области «горячих точек» большей частью близки к потенциальным очагам генерации полусуточных и суточных ВПВ, соответственно. Из рисунка 5а видно, основные скопления КВВ в Баренцевом море регистрируются в областях, где значения критерия tidal body force максимальны и составляют 3-5 m^2/c^2 . Рисунок 5б демонстрирует, что юго-восточнее о. Онекотан, вокруг о. Уруп и над хребтом Витязь скопления проявлений КВВ приурочены к областям, где значения критерия tidal body force повышены относительно фоновых значений (1 – 2 m^2/c^2) и составляют от 5 до 10 m^2/c^2 . Области повышенных значений критерия являются потенциальными очагами генерации ВПВ, однако следует иметь в виду, что севернее критических широт ($74,5^\circ$ – для полусуточного прилива в Баренцевом море и 30° для суточного прилива в Курило-Камчатском регионе) ВПВ не могут свободно распространяться, и их дезинтеграция должна происходить вблизи очагов генерации.

Минимальное количество проявлений КВВ в области очагов генерации ВПВ в Баренцевом море отмечалось в июне (16 из 65 проявлений или 25%), а максимальное – в сентябре (83 из 130 проявлений или 64%). В Курило-Камчатском регионе минимальное количество проявлений КВВ в области очагов генерации ВПВ отмечалось в марте (4 из 15 проявлений или 26%). Максимальное число проявлений КВВ в очагах генерации КВВ наблюдалось в августе (206 из 296 проявлений КВВ, что составляет 70%). Сезонная изменчивость критерия tidal body force связана только с изменчивостью стратификации, интегральная величина tidal body force прямо пропорциональна квадрату частоты Вейселя-Брента. Таким образом, в месяцы, когда стратификация ослаблена, было зарегистрировано малое число волн, связь между очагами генерации ВПВ и скоплениями проявлений КВВ не прослеживается. В месяцы, когда отмечается сильная стратификация, а площадь очагов генерации ВПВ повышается, до 70% от всех проявлений КВВ находятся

в потенциальных областях генерации ВПВ. Это может указывать на то, что в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе наиболее вероятен механизм генерации КВВ при локальной дезинтеграции субинерциальных ВПВ вблизи их очагов генерации.

По результатам анализа полей абсолютной динамической топографии и спутниковых данных в видимом диапазоне за летний и осенний периоды было выявлено, что на акватории Курило-Камчатского региона от мыса Лопатка до мыса опасный регистрируется более 10 вихрей в месяц с диаметром от 10 до 60 км. Было выполнено сопоставление положений проявлений КВВ и мезомасштабных вихревых структур.

На рисунке 6 продемонстрирован случай регистрации проявлений КВВ в области мезомасштабной вихревой структуры 21 июня.

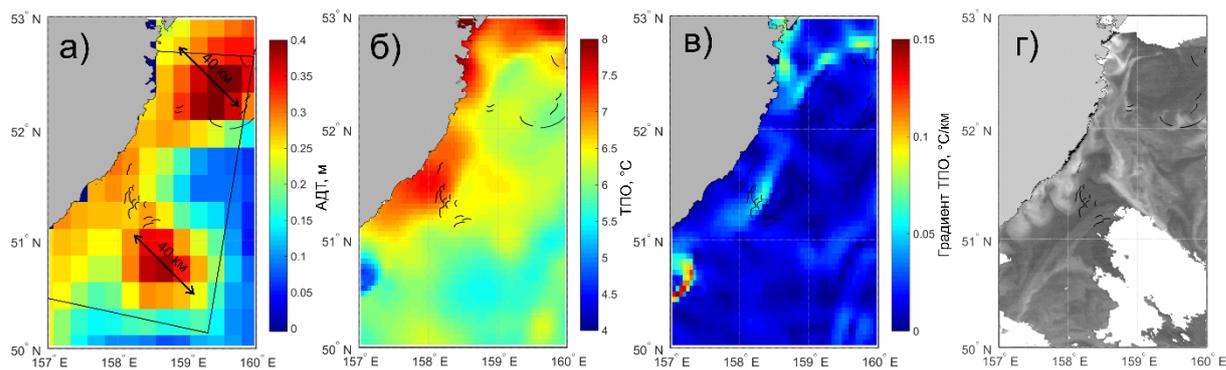


Рисунок 6 – Композитные карты положений проявлений КВВ с полями: а) абсолютной динамической топографии; б) ТПО; в) градиента ТПО; г) яркости зеленого канала спутникового изображения Suomi NPP. Жирной линией показана область наибольшего количества мезомасштабных вихрей в месяц.

Из рисунка 6а видно, что в поле абсолютной динамической топографии в северо-восточной и в юго-западной части акватории присутствовали мезомасштабные вихревые структуры диаметром около 40 км. Указанные структуры находят свое проявление в поле ТПО и ее градиента (рисунки 6 б и в). В поле яркости зеленого канала спутника Suomi NPP (рисунок 6г) находит свое отражение только вихревая структура в северо-восточной части акватории, в то время как вихрь на юго-востоке акватории закрыт облачностью. На периферии вихревых структур находятся проявления КВВ, кривизна лидирующих гребней и направление распространения которых указывает на то, что они генерированы при взаимодействии с пикноклином движущегося или подверженного инерционным колебаниям мезомасштабного вихря. В результате анализа композитных карт было выявлено, что суммарно для летнего и осеннего периода в области вихревых структур и фронтальных зон находится 70% (85 из 118) проявлений КВВ. Минимальная доля проявлений КВВ в области вихрей отмечается в октябре и составляет 24%, а максимальная – в июне и составляет 78%. То есть на выделенном участке акватории Курило-Камчатского региона важную роль в генерации КВВ может играть мезомасштабная вихревая динамика, образованная неустойчивостью крупномасштабного течения. Аналогичный анализ, выполненный для Баренцева моря, не позволил выявить связь положений мезомасштабных вихревых структур и проявлений КВВ.

В заключении приведены основные результаты исследования. В рамках диссертации на основе спутниковых наблюдений с привлечением результатов контактных измерений и данных глобальной приливной модели были установлены физико-географические особенности поля КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе Тихого океана.

Основные результаты работы:

1. Был разработан метод количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ, новизна которого заключается в применении комплекса разнородных спутниковых данных, глобальной приливной модели и данных контактных наблюдений.

2. Были выявлены новые районы регулярной встречаемости КВВ, расположенные в Баренцевом море о. Надежды, западнее архипелага Новая Земля и у м. Желания, а в Курило-Камчатском регионе у о. Кунашир, над Хребтом Витязь, а также у м. Шипунский и в Камчатском заливе.

3. Для Баренцева моря было показано, что проявления КВВ на РЛИ регистрируются с начала июня по середину сентября. Минимум количества проявлений отмечается в начале июня и в середине сентября, а максимум – в первую неделю августа. В Курило-Камчатском регионе проявления КВВ регистрируются в течение всего года, минимальное их число отмечается в феврале, а максимальное – в июле.

4. Было установлено, что положение районов регулярной встречаемости проявлений КВВ совпадает с потенциальными очагами генерации ВПВ. В Баренцевом море в областях очагов генерации ВПВ находится от 25% проявлений в июне до 64% проявлений в сентябре. В Курило-Камчатском регионе доля проявлений КВВ в очагах генерации ВПВ варьируется от 26% в марте до 70% в августе. Это указывает на механизм генерации КВВ, как результат локальной дезинтеграции субинерциальных ВПВ.

5. Вне областей генерации ВПВ на акватории Курило-Камчатского региона от м. Лопатка до м. Опасный до 78% КВВ генерируется при взаимодействии мезомасштабных вихрей с сезонным пикноклином.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Основываясь на результатах исследования, в дальнейшем возможно оценить межгодовую изменчивость проявлений КВВ и районов их частой встречаемости, а также влияния на них климатических изменений, тем самым существенно расширив имеющиеся представления о КВВ на арктических и субарктических акваториях. Изучению межгодовой изменчивости характеристик КВВ также способствует накопление архива РЛИ Sentinel-1 с 2014 года.

Публикации соискателя по теме диссертации. Материалы диссертации изложены в 19 работах, из них 5 опубликованы в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus и включённых в перечень ВАК:

1. Свергун Е.И., Зимин А.В. Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т.10. № 2. С. 13 – 19. DOI: 10.7868/S2073667317020022. – Scopus.

2. Зимин А.В., Свергун Е.И. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей: оценка повторяемости экстремальных высот и динамических эффектов в придонном слое. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11. № 4. С. 66-72. DOI: 10.7868/S2073667318040081 – Scopus.

3. Свергун Е. И., Зимин А. В. Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе – сентябре 2018 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 3. С. 300–312. DOI:10.22449/0233-7584-2020-3-300-312 – Web of Science.

4. Свергун Е.И., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Жегулин Г.В., Романенков Д.А., Коник А.А., Козлов И.Е. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря по данным контактных и спутниковых наблюдений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 4. С. 78–86. DOI: 10.7868/S2073667320040073 – Scopus.

5. Свергун Е.И., Зимин А.В., Лазуткина Е.С. Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона по данным спутниковых наблюдений в летний период // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 1. С. 106–115. DOI: 10.7868/S2073667321010111. – Scopus.

Список материалов в изданиях, индексируемых РИНЦ:

1. Зимин А.В., Атаджанова О.А., Свергун Е.И., Романенков Д.А. Оценка повторяемости экстремальных высот внутренних волн в Баренцевом море в районе постоянных проявлений сигнатур волн на спутниковых снимках // *Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"*, Москва, 13–17 ноября 2017 года. Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2017. – С. 252.

2. Зимин А.В., Родионов А.А., Свергун Е.И. Оценка ожидаемых высот внутренних волн в российских морях по данным экспедиционных исследований // *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: Труды XIV Всероссийской конференции*, Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 2018. – С. 202-203.

3. Свергун Е.И., Зимин А.В. Короткопериодные внутренние волны на шельфе Камчатского полуострова осенью 2018 года: сравнительный анализ результатов экспедиционных и спутниковых наблюдений // *Комплексные исследования Мирового океана: Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых*, Севастополь, 22–26 апреля 2019 года. – Севастополь: Морской гидрофизический институт РАН, 2019. – С. 155-156.

4. Зимин А.В., Свергун Е.И., Коник А.А. Интенсивные внутренние волны в шельфовых районах Арктических морей // *Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики: Тезисы докладов международной научной конференции*, Санкт-Петербург, 02–04 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2020. – С. 250-253.

5. Зимин А.В., Свергун Е.И., Лазуткина Е.С. Изменчивость характеристик внутреннего волнения вблизи Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов по данным спутниковой радиолокации // *Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. Москва: ИКИ РАН, 2020. С. 211.

6. Свергун Е.И., Зимин А.В., Жегулин Г. В., [и др.]. Характеристики короткопериодных внутренних волн в прибрежной части Баренцева моря по данным спутниковых наблюдений и подспутникового гидрофизического эксперимента // *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XV Всероссийской конференции*, Санкт-Петербург, 21–25 сентября 2020 года. – Санкт-Петербург: Б. и., 2020. – С. 200-203.

7. Свергун Е.И., Зимин А.В. Особенности поля короткопериодных внутренних волн на различных типах шельфа по данным спутниковых наблюдений // *Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых*, Москва, 18–24 апреля 2021 года. – Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 2021. – С. 180-181.

8. Svergun, E. and Zimin, A.: Surface manifestations of short-period internal waves of the Kuril-Kamchatka region and the Bering Sea according to satellite observations, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-5910, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5910>, 2021.

9. Свергун Е.И., Зимин А.В., Лазуткина Е.С. Проявления внутренних волн Курило-Камчатского региона в зимний и летний период по данным спутниковых наблюдений // *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы VI Международной научно-практической конференции, Майкоп, 17–21 мая 2021 года. Часть 2.* – Майкоп: Индивидуальный предприниматель Кучеренко Вячеслав Олегович, 2021. – С.100-104.

10. Зимин А.В., Жегулин Г.В., Свергун Е.И., Софьина Е.В., Лазуткина Е.С. Потенциальные очаги генерации внутреннего прилива и проявления короткопериодных внутренних волн на Тихоокеанской акватории Курило-Камчатского региона // *Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН: Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 20–24 сентября 2021 года.* – Севастополь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", 2021. – С. 115-116.

11. Зимин А.В., Свергун, Е.И., Лазуткина Е.С., Жегулин Г.В. Внутригодовая изменчивость характеристик внутреннего волнения вблизи Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов по данным спутниковой радиолокации // *Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН: Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 20–24 сентября 2021 года.* – Севастополь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", 2021. – С. 245-246.

12. Свергун Е.И., Зимин А.В. Внутригодовая изменчивость характеристик проявлений короткопериодных внутренних волн на различных типах шельфа по данным спутниковых наблюдений // *Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 15–19 ноября 2021 года / Институт космических исследований Российской академии наук.* – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2021. – С. 279

13. Svergun, E. and Zimin, A.: Short-period internal waves in tidal seas on various types of shelf according to in situ and satellite observations, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-59, 2022.

14. Свергун Е.И., Зимин А.В., Софьина Е.В. Внутригодовая изменчивость поверхностных проявлений внутренних волн в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе // *Моря России: вызовы отечественной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 26–30 сентября 2022 г.* – Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2022. С. 135-136.