

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

(Санкт-Петербургский филиал)

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата географических наук

Научный руководитель:

доктор географических наук

Зимин Алексей Вадимович

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

Список используемых сокращений.....	3
Введение.....	4
Глава 1. Описание предмета и объектов исследования	14
1.1 Внутренние волны как предмет исследования	14
1.2 Гидрологический режим Баренцева моря как объект исследования.....	26
1.3 Гидрологический режим Курило-Камчатского региона как объект исследования.....	33
Глава 2. Исходные данные и методы их обработки	42
2.1 Исходные данные	42
2.2 Методы обработки данных.....	48
Глава 3. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых регионах с интенсивной приливной динамикой на примере южной части Баренцева моря и Авачинского залива Тихого океана.....	62
3.1 Подспутниковый эксперимент в южной части Баренцева моря.....	62
3.2 Поспутниковый эксперимент в Авачинском заливе Тихого океана	71
3.3 Сравнение характеристик КВВ в южной части Баренцева моря и в Авачинском заливе Тихого океана.....	80
Глава 4. Сезонная изменчивость короткопериодных внутренних волн в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе по спутниковым данным..	94
4.1 Внутренние волны в Баренцевом море по спутниковым данным	94
4.2 Внутренние волны в Курило-Камчатском регионе по спутниковым данным.....	101
4.3 Сравнение результатов спутниковых наблюдений	108
Заключение	120
Список литературы	122
Приложение. Многолетний массив РЛИ Sentinel для Курило-Камчатского региона.....	133

Список используемых сокращений

КВВ – короткопериодные внутренние волны.

ИВВ – интенсивные внутренние волны.

ВПВ – внутренние приливные волны.

СПбФ ИО РАН – Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им.

П.П. Ширшова Российской академии наук.

КГНЦ – Крыловский государственный научный центр.

ВВ – внутренние волны.

СТД – от англ. Conductivity, Temperature, Depth.

РЛИ – радиолокационные изображения.

ЗФИ – архипелаг Земля Франца Иосифа.

ТПО – температура поверхности океана.

АДТ – абсолютная динамическая топография.

ЧВБ – частота Вьяйсяля-Брента.

ВКС – верхний квазиоднородный слой.

Введение

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 следствие 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.

Таким образом, *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.

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.

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 конференция «Оценка состояния ресурсов, экосистем озёр и морей в условиях современных изменений климата и социо-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.

Глава 1. Описание предмета и объектов исследования

1.1 Внутренние волны как предмет исследования

Понятие внутренних волн. Внутренние волны (ВВ) – колебания устойчиво стратифицированной жидкости, вертикальная амплитуда которых в водной толще гораздо больше, чем на границах жидкости (поверхности и дне) [Коняев, Сабинин, 1992]. Колебания частиц стратифицированной жидкости есть результат баланса силы тяжести и силы плавучести. Ввиду того, что градиенты плотности, обуславливающие силу плавучести, в Мировом океане достаточно малы, то внутренние волны могут достигать значительных амплитуд [Коняев, Сабинин, 1992]. Диапазон изменчивости частот внутренних волн ограничен сверху частотой Вьяйсяля-Брента, которая описывается выражением (1):

$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}, \quad (1)$$

где: N – частота Вьяйсяля-Брента, ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, z – глубина. Снизу частота внутренних волн ограничивается инерционной частотой (2):

$$f = 2\Omega \sin \varphi, \quad (2)$$

где: Ω - угловая скорость вращения Земли, φ – широта места.

Внутренние волны распространены практически повсеместно на шельфах Мирового океана, и вносят значительный вклад в обмен свойствами между океаном и шельфом. На спектре внутренних волн [Garret, Munk, 1975] энергетически доминируют внутренние приливные волны и инерционные внутренние волны (рисунок 1). ВПВ генерируются при взаимодействии баротропного приливного течения и неоднородностей рельефа дна [Morozov,

2018]. Амплитуды ВПВ достигают десятков метров, длины волн – десятков километров, а фазовая скорость около 2 м/с [Коняев, Сабинин, 1992]. Наиболее интенсивно ВПВ генерируются на материковых склонах и склонах подводных хребтов. ВПВ могут распространяться от источников генерации на большие расстояния, как в сторону шельфа, так и в сторону открытого океана. Однако севернее (для северного полушария) критической широты, где разность между приливной и инерционной частотой обращается в ноль, ВПВ не могут существовать в виде свободной волны [Vlasenko et al., 2005]. ВПВ, частота которых меньше критической широты, именуется субинерциальными. Такие волны являются вынужденными и не могут свободно распространяться от места их генерации.

При трансформации инерционных и приливных внутренних волн возникают *короткопериодные внутренние волны* – колебания с частотой характеристик много меньше инерционной частоты. КВВ характеризуются масштабом периодов от единиц до нескольких десятков минут [Коняев, Сабинин, 1992]. На спектре внутренних волн [Garret, Munk, 1975] короткопериодным волнам соответствует всплеск энергии на частотах, близких к частоте Вьясьяля-Брента (рисунок 1). КВВ являются фактором повышенного вертикального перемешивания и вносят существенный вклад в изменчивость гидрофизических полей на масштабах от нескольких десятков метров до нескольких километров и интервалах от единиц минут до нескольких десятков минут.

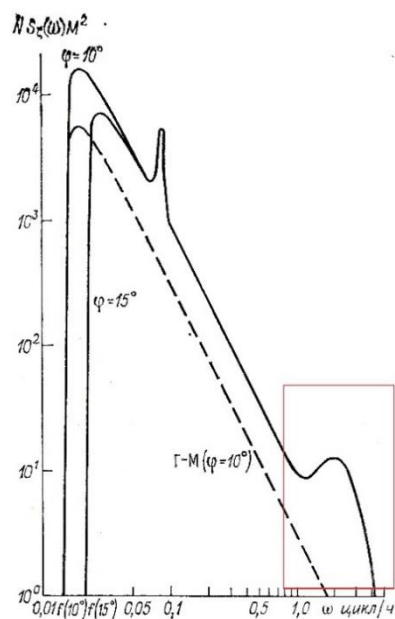


Рисунок 1 – Спектр внутреннего волнения в Мировом океане (пунктиром показан спектр Гаррета-Манка, сплошными линиями – модифицированный спектр Гаррета-Манка, выделена область, к которой относятся КВВ) [Коняев, Сабинин, 1992].

Распространение КВВ в Мировом океане. В работе [Jackson, 2004] было выполнено обобщение результатов спутниковых наблюдений, которое показало, что КВВ достаточно широко распространены в шельфовых областях Мирового океана (рисунок 2) [Jackson, 2004]. Приуроченность КВВ к шельфовым областям объясняется тем, что именно в шельфовой зоне комбинация таких факторов как стратификация, уклон дна и приливной поток отвечает условиям для генерации КВВ. Наибольшее число наблюдений КВВ приходится на экваториальные области и зоны умеренных широт, но в тёплый период года благоприятные условия для генерации КВВ складываются также в субарктических и арктических областях, поэтому КВВ распространены и в высокоширотных зонах.

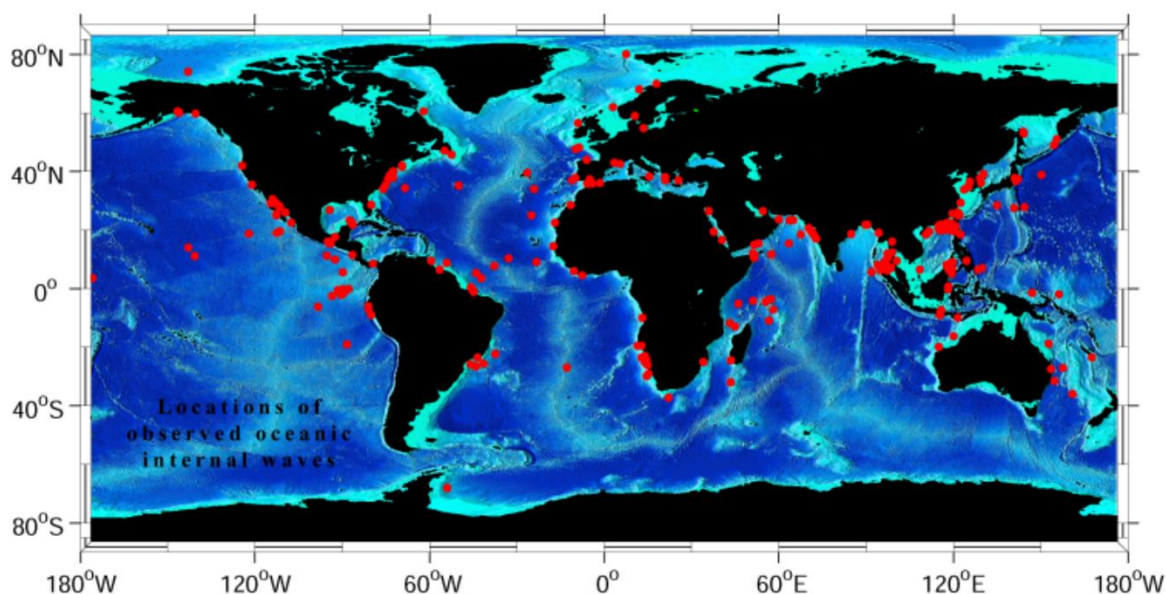


Рисунок 2 – Случаи наблюдения КВВ в Мировом океане по данным [Jackson, 2004].

Согласно [Сабинин, 2004] в поле КВВ отмечаются «горячие точки» - области в Мировом океане, где часто регистрируются КВВ больших амплитуд. В данных областях происходит сток приливной энергии в турбулентность, поэтому изучение «горячих точек» является весьма актуальным.

Механизмы генерации КВВ. Понимание процессов возникновения, распространения, и разрушения короткопериодных волн необходимо для оценки их вклада в вертикальный и горизонтальный обмен. Существуют следующие механизмы генерации КВВ:

1. Образование волн по типу запрепятствованных, которые распространяются в противоположную сторону от приливного течения, набегающего на неоднородности морского дна типа кромки шельфа или изолированного поднятия дна [Jackson et al., 2012]. Генерация КВВ наблюдается при критическом режиме приливного потока, индикатором которого может выступать внутреннее число Фруда.

2. Эволюция внутреннего прилива, при которой генерация КВВ происходит при нелинейно-дисперсионном распаде ВПВ в пакеты КВВ

[Jackson et al., 2012]. В таком случае для выявления мест генерации КВВ можно использовать критерии генерации ВПВ, например, «tidal body force» [Baines, 1982]. Очаги генерации идентифицируются по максимальному значению критерия [Azevedo et al., 2006; Pichon et al., 2013].

3. Локальная дезинтеграция субинерциальных ВПВ [Vlasenko et al., 2005; Морозов, Пака, 2010], при которой КВВ генерируются вблизи очагов генерации ВПВ за критической широтой. Для идентификации данного механизма можно также использовать критерий «tidal body force».

4. Лучевой механизм генерации, при котором взаимодействие луча энергии внутренней приливной волны первой моды с пикноклином вызывает образование КВВ [Jackson et al., 2012]. Луч приливной энергии возникает над областью критического наклона дна, отражается от морского дна и морской поверхности и взаимодействует с пикноклином на большом расстоянии от континентального шельфа.

5. Резонансная генерация, при которой КВВ образуются в узкостях или над неоднородностями рельефа дна при наличии критического или сдвигового потока [Jackson et al., 2012]. При схожести с механизмом в пункте 1, отличительной особенностью является наличие сдвигового в вертикальном плане потока, к тому же начальное возмущение формируется не вертикальным поднятием дна, а горизонтальным топографическим сужением.

6. Генерация внутренних волн речными плюмами [Jackson et al., 2012]. При распространении плюма происходит замедление потока и его переход из суперкритического режима в докритический. При этом КВВ, которые возникают при взаимодействии лидирующей кромки плюма с пикноклином, излучаются в виде свободно распространяющихся волн. Пример генерации КВВ речными плюмами продемонстрирован в работе [Osadchiev et al., 2021].

7. Генерация КВВ при взаимодействии движущегося или подверженного инерционным колебаниям меандра с мелко залегающим пикноклином [Lavrova et al., 2011]. Как известно [Chapron et al., 2020], при

взаимном геострофическом приспособлении разных по природе потоков происходит развитие вторичной циркуляции со значительными вертикальными скоростями в верхнем слое вод. При наличии приповерхностного пикноклина это может стать источником генерации КВВ. Данный механизм схож с описанным в пункте 5.

Зачастую действие описанных механизмов генерации приводит к образованию интенсивных внутренних волн (ИВВ). Такие волны характеризуются амплитудой более 5 метров, сильной крутизной и нелинейностью (отношением фазовой скорости к орбитальной больше 0,1) [Сабинин, 2004]. Сочетание значительных амплитуд и нелинейности, а также малого времени жизни приводит к высокой вероятности обрушения ИВВ, которое может приводить к высокой интенсивности локальной изменчивости вертикальной и горизонтальной структуры вод. Даже не обрушаясь, ИВВ способны во много раз усиливать вертикальное перемешивание [Зимин, 2012]. Усиление вертикального обмена, связанное с КВВ, приводит к обогащению деятельного слоя моря питательными веществами и фитопланктоном [Lucas et al., 2011; Навроцкий и др., 2012; Garwood et al., 2020], что в итоге отражается на распределении промысловых гидробионтов [Бондур и др., 2020]. Таким образом, «горячие точки» в поле КВВ могут быть потенциальными зонами повышенной биопродуктивности, поскольку в них часто регистрируются ИВВ.

Оценка возможности существования КВВ. Поскольку необходимым условием существования КВВ является наличие устойчивой стратификации и пикноклина, для оценки возможности возникновения КВВ на конкретной акватории необходимо знание вертикального распределения плотности вод на единичных гидрологических станциях, гидрологических разрезах или полигонах. Зная вертикальное распределение плотности можно также оценить верхний предел периодов КВВ, рассчитав частоту Вяйсяля-Брента. Для оценки нижнего предела периодов достаточно зная широту места рассчитать инерционную частоту. Для оценки возможных механизмов

генерации КВВ необходимо понимание приливной динамики исследуемой акватории, в частности, характера распространения приливных волн, поля приливных течений. Натурные наблюдения за приливной динамикой требуют длительных экспериментов с применением комплекса сложной измерительной аппаратуры, поэтому зачастую нереализуемы при экспедиционных исследованиях характеристик КВВ. Существуют разнообразные методы измерения характеристик КВВ, которые подразделяются на контактные и неконтактные.

Контактные методы измерения характеристик КВВ. При натурных исследованиях КВВ определение их амплитуд и периодов является минимально необходимым. В специализированных экспериментах также определяют скорость и направление распространения КВВ. Определение характеристик КВВ является непростой задачей и требует применения специальных методов и средств измерений. Среди специальных методов измерений выделяют [Степанюк, 2002]: поплавковые методы, которые позволяют напрямую регистрировать колебания пикноклина; многоканальные методы, в которых применяются устройства для измерения температуры, содержащие набор последовательно расположенных на разных горизонтах локальных преобразователей температуры; интегральные методы, в которых о характеристиках КВВ судят по изменению интегральных характеристик слоя воды; методы сканирования, в которых по временной изменчивости гидрофизических характеристик судят о характеристиках КВВ.

В настоящей работе используются следующие контактные методы

1. Учащённые STD-зондирования (являются разновидностью методов сканирования) – циклы опускания и подъёма STD-зонда с частотой близкой к частоте Вайсяля-Брента [Зимин и др., 2013]. Преимущества данного метода заключаются в доступности зондирующей аппаратуры, возможности по измерениям вертикального распределения температуры и солёности рассчитывать вертикальное распределение плотности. К недостаткам метода

можно отнести весьма высокую трудоёмкость при реализации зондирований, а также при обработке результатов измерений.

2. Многоканальный метод – измерения температурными гирляндами, представляющими собой совокупность датчиков на общем кабеле (рисунок 3). Такие датчики позволяют регистрировать температуру на многих горизонтах одновременно с малым интервалом по времени, то есть оценивать временную изменчивость вертикального распределения температуры с высоким разрешением.

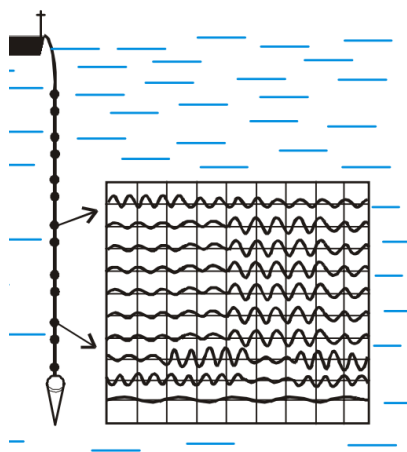


Рисунок 3– Схема измерения колебаний температуры при помощи гирлянды температурных датчиков.

Стоит упомянуть о преимуществах и недостатках контактных методов измерения характеристик КВВ. К преимуществам можно отнести: возможность получать надёжную и достоверную информацию об амплитудах КВВ, их спектральном составе. К недостаткам можно отнести: малый пространственный охват измерений (как правило измерения ведутся в одной точке акватории), а также сложность получения информации о скорости и направлении распространения КВВ.

Дистанционные методы измерения характеристик КВВ. Выделяют следующие дистанционные методы регистрации характеристик КВВ:

1. регистрация временной изменчивости положения звукорассеивающих слоёв различными методами эхолокации [Степанюк, 2002; Scotti et al., 2005];

2. регистрация поверхностных проявлений КВВ в видимом [Churnside, Ostrovsky, 2005; Robinson, 2010; Serebryany, Konstantinov, 2020; Глухов и др., 2021], и радиолокационных диапазонах [Robinson, 2010] с наземных, судовых, авиационных и космических носителей.

Съёмка при помощи космических носителей, в отличие от контактных и дистанционных наблюдений с судов и летательных аппаратов, позволяет получать характеристики КВВ одновременно на значительных по площади акваториях. В данной работе характеристики КВВ будут определяться по их проявлениям на поверхности моря в радиолокационных (РЛИ) и оптических спутниковых изображениях. Поверхностные проявления внутренних волн отображаются на РЛИ морской поверхности в виде чередующихся полос усиления и ослабления радиолокационного сигнала, образованных из-за модуляции мелкомасштабной составляющей спектра поверхностного волнения переменными течениями, создаваемыми в приповерхностном слое внутренними волнами [Alpers, 1985]. Длина таких поверхностных волн сопоставима с длиной падающего радиолокационного излучения. Вследствие этого наблюдается рассеяние Брегга – многократное усиление амплитуды сигнала обратного рассеяния. Схема, поясняющая механизм регистрации поверхностных проявлений внутренних волн на РЛИ, показана на рисунке 4. Пример проявления внутренних волн на РЛИ показан на рисунке 5.

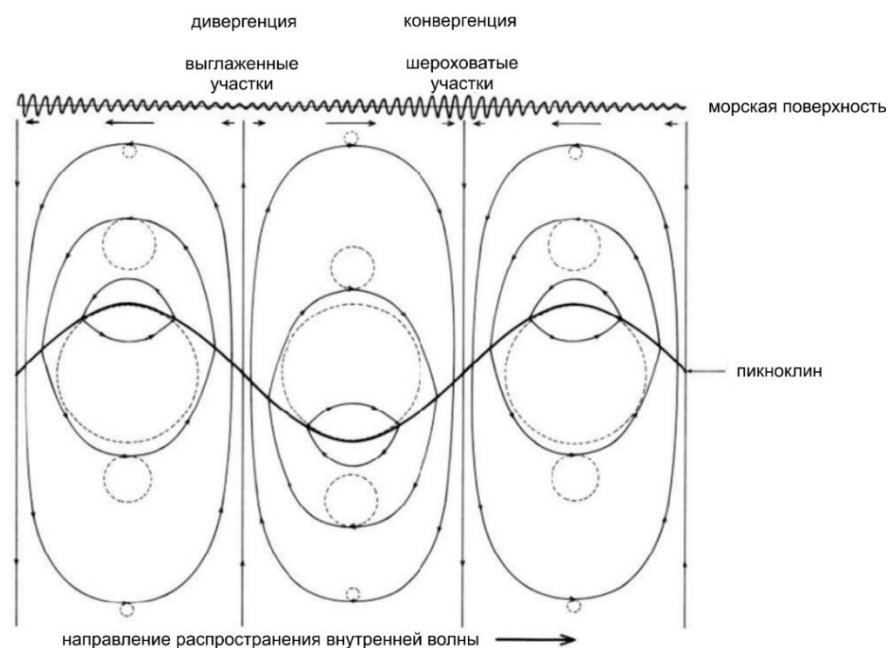


Рисунок 4 – Механизм регистрации поверхностных проявлений КВВ [Alpers, 1985].



Рисунок 5 – Пример проявления КВВ в Курило-Камчатском регионе на РЛИ Sentinel-1 от 01 июня 2019 года.

Для зондирующего излучения радиолокаторов с синтезированной апертурой атмосфера является прозрачной, поэтому преимуществом радиолокационных спутниковых данных является отсутствие влияния облачности на качество изображений. Однако увеличение скорости ветра влияет непосредственно на отображение КВВ на РЛИ морской поверхности.

Это влияние обусловлено уменьшением времени релаксации поверхностного волнения, модулирующего поверхностные проявления КВВ [Alpers, 1985].

Регистрация поверхностных проявлений внутренних волн возможна и в видимом диапазоне. Определённый угол падения солнечного излучения создаёт блики на морской поверхности, которые чётко очерчивают неоднородности, например, поверхностные проявления внутренних волн. Такие неоднородности могут быть обнаружены по данным приборов видимого диапазона потому, что с поверхностными проявлениями внутренних волн может быть связана неоднородность распределения поверхностно-активных веществ или мутности. При этом, солнечное излучение неодинаково отражается от различных участков неоднородностей, что и позволяет регистрировать поверхностные проявления КВВ [Новогрудский и др., 1978]. На рисунке 6 продемонстрирован пример поверхностных проявлений КВВ в видимом диапазоне.

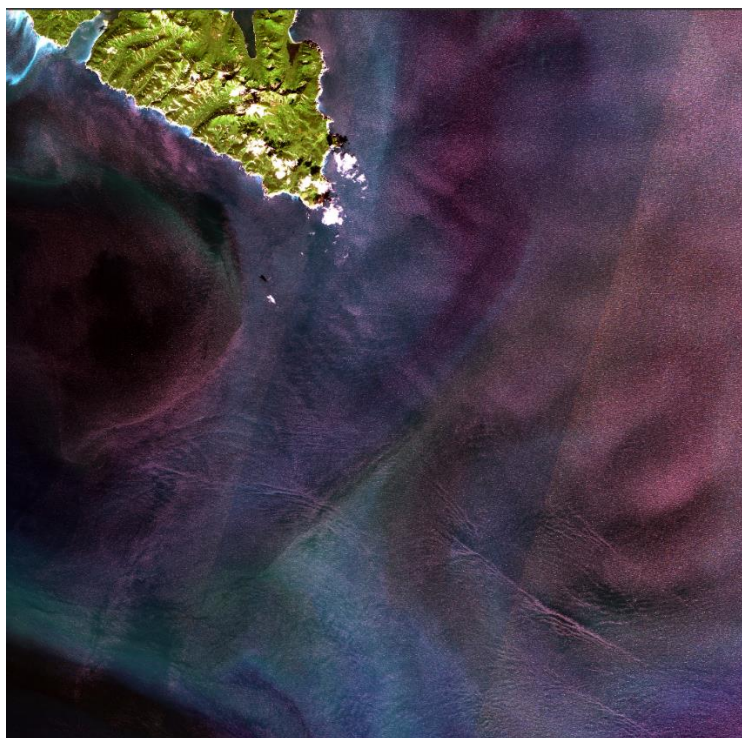


Рисунок 6 – Пример проявления КВВ около мыса Шупунский на изображении Landsat-8 от 21 августа 2018 года.

На качество изображений видимого диапазона не оказывает столь значимого влияния скорость ветра, но существенное влияние оказывает облачность и наличие атмосферной аэрозоли, что весьма ограничивает применимость таких данных в районах с высокой повторяемостью сплошной облачности.

Обзор предмета исследования демонстрирует, что 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. Такой подход показал свою эффективность, например, для описания поля КВВ в Белом море [Зимин и др., 2014]. Но для выявления механизмов генерации КВВ требуется создание метода комплексного анализа характеристик КВВ с привлечением данных реанализа и глобальной приливной модели для описания фоновой гидрологической обстановки и приливной динамики, которые широко применяются в мировой практике изучения КВВ [Shroyer et al., 2011; Purwandana et al., 2021].

1.2 Гидрологический режим Баренцева моря как объект исследования

Географическое положение и рельеф дна. Баренцево море – материковое окраинное море, самое западное из арктических морей России. Средняя глубина моря составляет 222 м, а максимальная глубина – 600 м. Наиболее глубокие районы Баренцева моря расположены в западной его части. Характерной чертой рельефа дна в Баренцевом море служит чередование крупных элементов рельефа, таких как возвышенности и желоба. Карта рельефа дна Баренцева моря показана на рисунке 7.

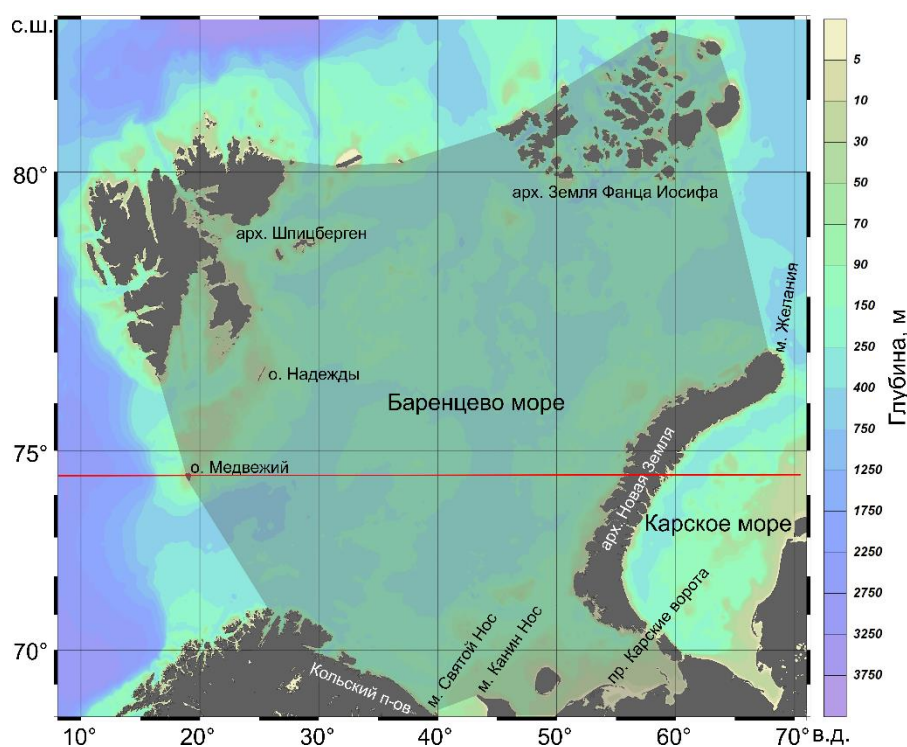


Рисунок 7 – Карта рельефа дна Баренцева моря. Полупрозрачной заливкой показана граница исследуемого региона. Красной линией показана критическая широта для полусуточного M2 прилива.

Водные массы и вертикальная структура вод. В Баренцевом море согласно [Добровольский, Залогин, 1982] формируются следующие основные водные массы (рисунок 8):

1. атлантические воды с повышенной температурой и солёностью;

- 2) арктические воды с отрицательной температурой и пониженной солёностью;
- 3) прибрежные воды со значительной амплитудой годового хода температуры и низкой солёностью;
- 4) баренцевоморские воды с низкой температурой и высокой солёностью.

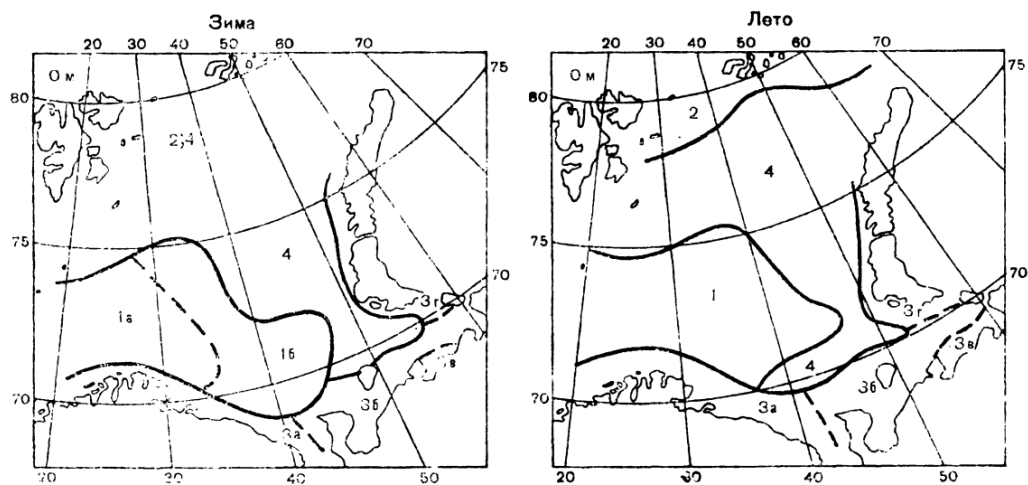


Рисунок 8 – Основные водные массы в зимний и летний период: 1 — атлантическая водная масса (а — основная, б — трансформированная); 2 — арктические воды; 3 — прибрежные водные массы (а — мурманская, б — беломорская, в — печорская, г — новоземельская); 4 — баренцевоморские воды [Гидрометеорология..., 1990].

Атлантические, арктические и прибрежные воды в основном поступают в Баренцево море извне с крупномасштабными течениями и речным стоком, а баренцевоморские воды формируются непосредственно в пределах моря под влиянием перемешивания и трансформации других водных масс. Границами водных масс Баренцева моря служат фронтальные зоны с повышенными градиентами температуры и солёности.

Для вод Баренцева моря характерна изменчивость характеристик вод не только по горизонтали, но и во времени. На рисунке 9 показан пример

изменчивости вертикального распределения температуры и плотности в юго-западной части Баренцева моря.

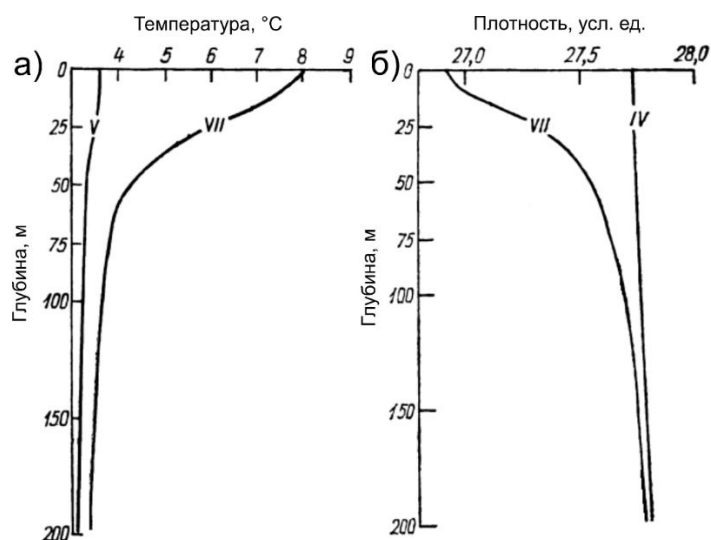


Рисунок 9 – Изменчивость вертикального распределения среднемесячных океанологических характеристик в юго-западной части Баренцева моря: а) температуры; б) условной плотности. Римские цифры на профиле обозначают номер месяца. Адаптировано из [Гидрометеорология..., 1990].

Согласно [Гидрометеорология...,1990], в холодный период года с ноября по май распределение температуры в юго-восточной части Баренцева моря близко к однородному (см. рисунок 9а, профиль для мая). В июне с началом летнего прогрева начинает формироваться термоклин. В июле – сентябре термическая стратификация наиболее ярко-выражена, верхняя граница термоклина залегает на глубине порядка 20 м, а максимальные градиенты температуры достигаются в слое 30-50 м (рисунок 9а, профиль для июля).

В холодный период года с ноября по май распределение плотности в юго-восточной части Баренцева моря близко к однородному (см. рисунок 9б, профиль для апреля). В летний период слой повышенных градиентов плотности располагается на глубинах от 30 до 50 метров (рисунок 9б, профиль для июля) и практически совпадает с сезонным термоклином, что

обуславливает возможность изучения характеристик КВВ в юго-восточной части Баренцева моря по результатам измерения колебаний температуры.

Приливы. Баренцево море характеризуется выраженной приливной динамикой, под которой будем понимать, что приливные явления индуцированы волнами из смежных регионов [Defant, 1960]. Приливы в Баренцевом море обусловлены движением атлантической приливной волны. Она поступает в море с запада и движется на восток вплоть до Новой земли. Северные районы моря находятся под влиянием арктической приливной волны. Около архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) арктическая и атлантическая приливные волны интерферируют. В основном, приливы в Баренцевом море имеют правильный полусуточный характер (рисунок 10). Взаимодействие приливных волн генерирует приливные течения в Баренцевом море. Скорости приливных течений в Баренцевом море выше, чем фоновых постоянных течений. Скорости приливных течений при средней величине прилива могут достигать в открытой части моря 10—20 см/с, в Воронке Белого моря—60—100 см/с, на юго-востоке — 30—40 см/с [Гидрометеорология...,1990].

По данным математического моделирования в Баренцевом море под влиянием баротропного прилива возникают полусуточные ВПВ, достигающие амплитуды 20 м [Kagan, Sofina, 2014]. Более половины акватории Баренцева моря находится за критической широтой ($74,5^\circ$) для доминирующего полусуточного прилива (см. рисунок 7), поэтому внутренние приливные волны полусуточного периода не могут распространяться как свободные.

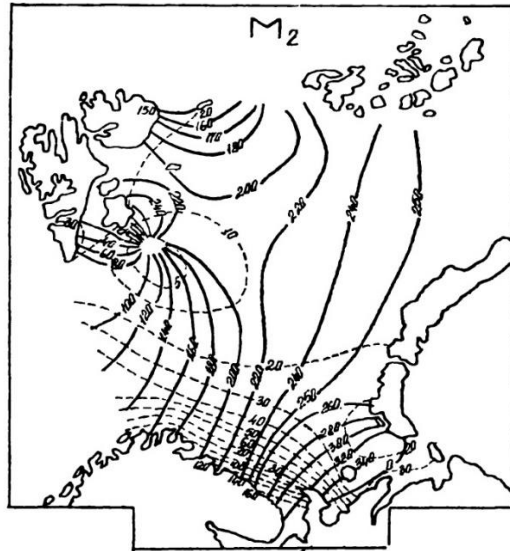


Рисунок 10 – Котидальная карта M2 составляющей прилива в Баренцевом море (сплошными линиями показаны изофазы прилива, цифрами на них показана величина фазы в градусах; пунктирными линиями показаны изоамплитуды прилива, цифрами на них показана величина прилива в сантиметрах) [Гидрометеорология..., 1990].

Состояние изученности КВВ в Баренцевом море. КВВ в Баренцевом море активно изучаются при помощи данных судовых измерений и спутниковых наблюдений. Первое обобщение радиолокационных наблюдений за поверхностными проявлениями КВВ Баренцева моря было выполнено в работе [Козлов и др., 2010]. В ней обсуждаются 250 случаев проявлений внутренних волн на 59 радиолокационных изображениях за период с июня по август 2007 года. В работе было показано, что особенности рельефа дна и приливные течения играют важную роль в генерации ВВ. Анализ последовательных снимков, показал, что в определённых местах пакеты ВВ возникали с интервалом 12 часов, который близок к периоду доминирующего полусуточного прилива M2 в Баренцевом море. Расстояние между последовательными пакетами при этом может достигать до 37 км (что соответствует скорости перемещения ВВ до 0,7 м/с). Дальнейшее обобщение архива радиолокационных данных, включающего 463 изображения за летне-

осенний период 2007 г., выявило 904 пакета ВВ на акватории Баренцева моря [Козлов и др., 2014]. Были выделены районы регулярной встречаемости проявлений ВВ, которые находятся к западу от архипелага Земля Франца-Иосифа, к северо-востоку и северо-западу от архипелага Шпицберген, на выходе из пролива Карские Ворота и у Мурманского берега Кольского полуострова (рисунок 11).

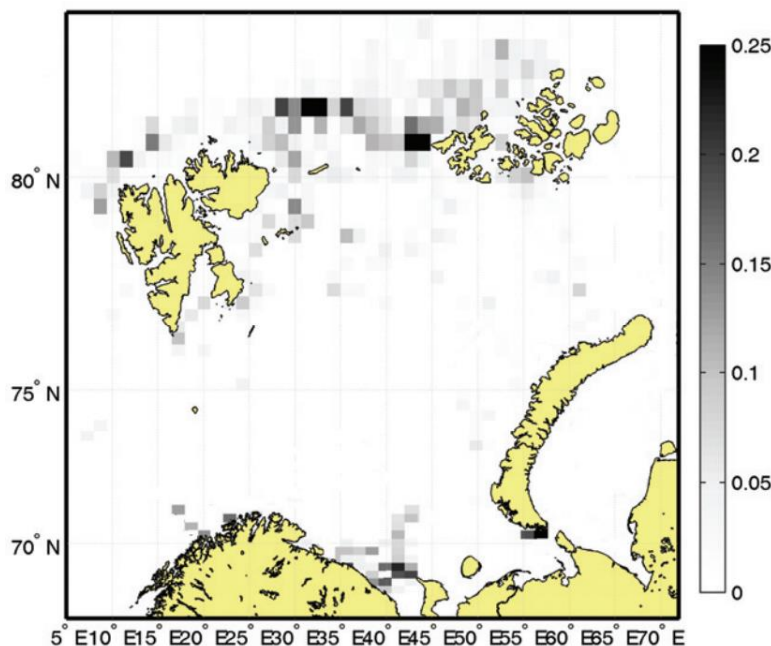


Рисунок 11 – Частота встречаемости КВВ в Баренцевом море по данным анализа РЛИ за летний период 2007 года [Козлов и др., 2014].

Отмечается, что иногда наблюдались пакеты ВВ особенно крупных размеров, сопоставимые с горизонтальными размерами интенсивных внутренних волн, зарегистрированных в других районах Мирового океана [Дикинис и др., 1999; Jackson, 2004]

В то же время данные контактных наблюдений в Баренцевом море, дающие сведения о характеристиках КВВ крайне разрознены. В фиорде Ван Майен архипелага Шпицберген наблюдались пакеты КВВ со средней амплитудой около полуметра с доминирующими периодами в несколько минут, генерация которых определялась внешним воздействием за счёт ветра

и приливов [Морозов, Марченко, 2012]. Высокочастотные ВВ и бароклинные боры на фоне значительных полусуточных ВВ с амплитудами до 20 м наблюдались также в проливе Карские Ворота между Баренцевым и Карским морями [Morozov et al., 2008; Морозов и др., 2017]. Имеются также сведения о КВВ в открытой части моря. В работе [Vlasenko et al., 2003] приводится пример записи сильных колебаний в температуре и течениях на южном склоне Шпицбергенской банки, связанных с прохождением интенсивных солитоноподобных ВВ. Измерения, проведённые в прибрежной зоне южной части Баренцева моря, выявили пакеты интенсивных солитоноподобных внутренних волн с максимальными амплитудами до 6 м [Серебряный, 2002]. Наблюдения показали, что поле интенсивных КВВ состоит из колебаний с периодами 8 – 20 мин, которые появляются цугами преимущественно во время отлива и двигаются как в сторону берега, так и от него.

Приведённый обзор физико-географических особенностей Баренцева моря демонстрирует, 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, посвящённых прямому сопоставлению характеристик КВВ, полученных в рамках подспутниковых экспериментов. При наличии в приведённых работах упоминаний о приливном характере генерации КВВ, вклад конкретных механизмов в генерацию КВВ не рассматриваются.

1.3 Гидрологический режим Курило-Камчатского региона как объект исследования

Географическое положение и рельеф дна. Под Курило-Камчатским регионом будем понимать акваторию вблизи тихоокеанского побережья островов Курильской гряды и полуострова Камчатка шириной 200 км. Исследуемый регион простирается на 2000 км от Кунаширского пролива на юго-западе до мыса Начикинского на северо-востоке. Рельеф дна Курило-Камчатского региона (рисунок 12) весьма сложен и характеризуется узким шельфом и крутым материковым склоном.

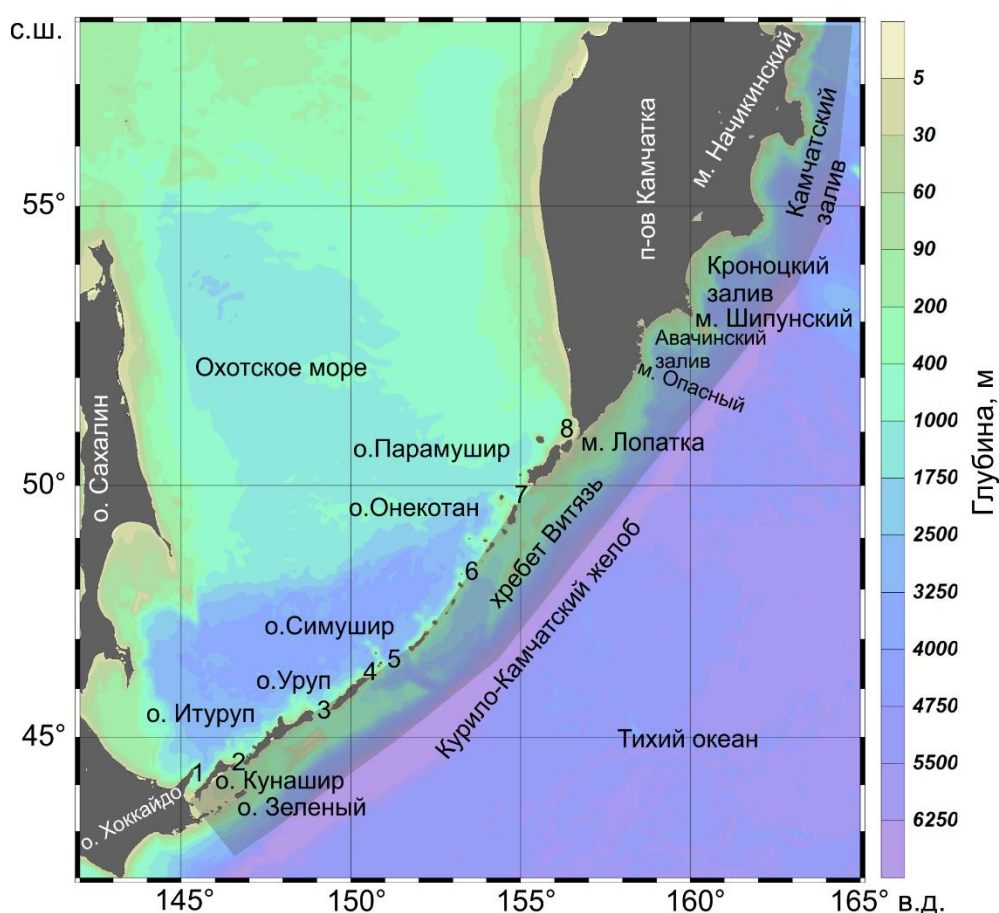


Рисунок 12 – Рельеф дна Курило-Камчатского региона. Цифрами обозначены проливы: 1 – Кунаширский, 2 – Екатерины, 3 – Фриза, 4 – Уруп, 5 – Буссоль, 6 – Крузенитерна, 7 – Четвёртый Курильский, 8 – Первый Курильский. Полупрозрачной заливкой показана граница исследуемого региона.

Юго-восточнее островов Парамушир и Онекотан расположен подводный хребет Витязь. Он отделяется от Курильской гряды междуговым прогибом и подразделяется на южное и северное плато. Глубина над поверхностью хребта колеблется от 150-200 м до 900-1000 м. На юго-восток его склон опускается к Курило-Камчатскому жёлобу, который простирается с юго-запада на северо-восток вдоль подводных склонов острова Хоккайдо, Курильских островов и южной части полуострова Камчатка. Максимальная глубина желоба составляет около 9600 м вблизи каньона Буссоль [Михайлов, 1970; Сварический и др., 1979].

Курильская гряда представляет собой порог, отгораживающий впадину Охотского моря от Тихого океана. Наиболее важны для водообмена с океаном проливы Буссоль и Крузенштерна, так как они имеют наибольшую площадь и глубину. Глубина пролива Буссоль составляет 2300 м, а глубина пролива Крузенштерна 1920 м. Глубины проливов Фриза и Четвёртого Курильского, составляют более 500 м. Глубины остальных проливов в основном не превышают 200 м, а площади незначительны [Добровольский, Залогин, 1982].

Водные массы и вертикальная структура вод. В Курило-Камчатском регионе выделяют следующие характерные типы субарктической структуры вод [Богданов, Мороз, 2000; Ростов и др., 2005] (рисунок 13):

1. тихоокеанский тип субарктической структуры — тихоокеанские воды, перенос которых обусловлен Курило-Камчатским течением;
2. тип зоны Курильских проливов — трансформированные воды, для которых характерны более низкие значения температуры и более высокие значения солёности в поверхностном слое, более мощный холодный промежуточный слой.
3. тип зоны мелководий — воды, отличающиеся практически однородным вертикальным распределением солёности и температуры.

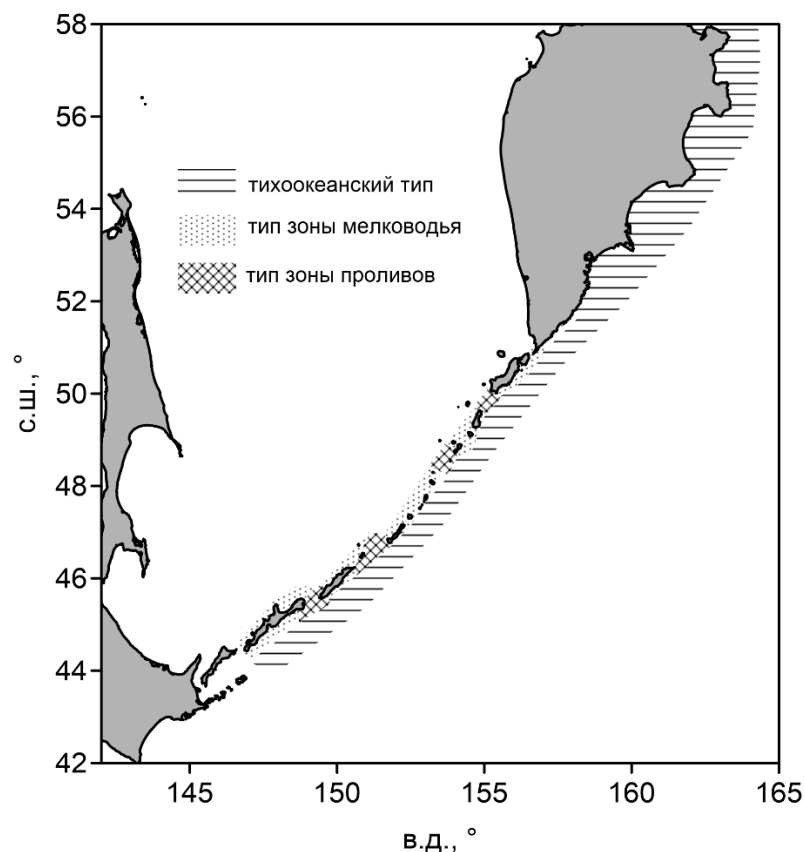


Рисунок 13 – Схема водных масс Курильской гряды. Составлено по [Богданов, Мороз, 2000; Ростов и др., 2005].

Для Курило-Камчатского региона свойственна изменчивость структуры вод не только в пространстве, но и во времени. На рисунке 14 показан пример изменчивости вертикального распределения среднемесячных значений температуры и плотности около пролива Буссоль по данным климатического атласа ЕСИМО [http://portal.esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_768¶meter=tempwater&sea=okhot&profile=true].

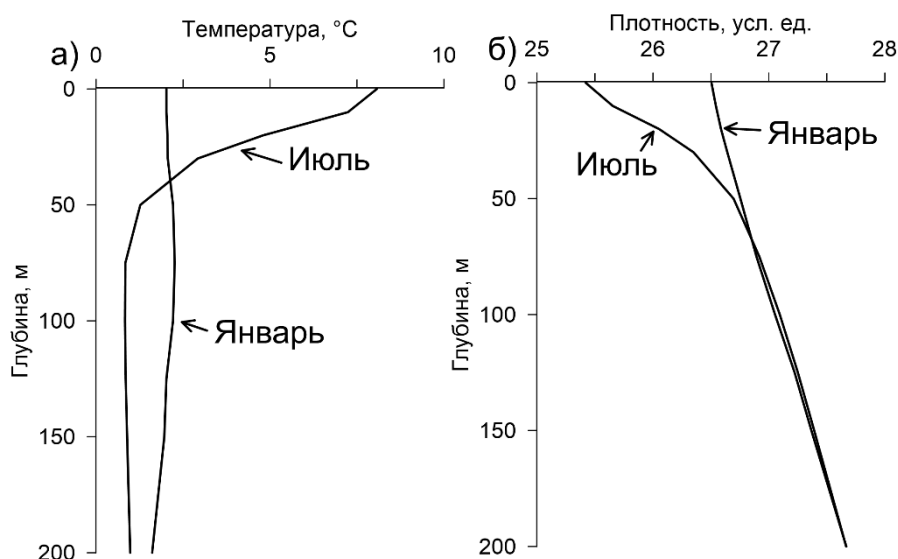


Рисунок 14 – Изменчивость вертикального распределения среднемесячных климатических океанологических характеристик около пролива Буссоль: а) температуры; б) условной плотности.

В январе вертикальное распределение температуры близко к однородному. Такое распределение характерно для зимних месяцев. Прогрев верхнего слоя и формирование термоклина начинается в апреле. Максимальные градиенты температуры в термокLINE достигаются в июле-сентябре. Слой повышенных градиентов располагается на глубинах от 20 до 50 метров (рисунок 14а, профиль для июля). Распределение плотности в январе близко к линейному (рисунок 14б) из-за того, что вклад в формирование устойчивости вод в зимние месяцы вносит солёность. В летний период с июня по сентябрь максимальные градиенты плотности достигаются в слое 20 – 50 м, их положение совпадает с положением максимальных градиентов температуры.

Существенное влияние на изменчивость гидрологической структуры вод региона оказывает Курило-Камчатское течение, выносящее холодные воды через Камчатский пролив из западной части Берингова моря.

Акватория юго-восточного побережья полуострова Камчатка является одной из энергоактивных областей Мирового океана, в которой регулярно генерируются мезомасштабные вихревые структуры. Источником генерации

вихревых структур служит меандрирование Курило-Камчатского течения. Отличительной особенностью данных структур является длительное время жизни (до нескольких месяцев), высокая скорость перемещения (до 6 см/с), а также крупные размеры (до 150 км) [Романов и др., 2009]. Пример регистрации мезомасштабных вихревых структур на акватории юго-восточного побережья Камчатки показан на рисунке 15. Такие структуры регулярно регистрируются здесь по данным гидрологических съёмок и дистанционных наблюдений. Структуры имеют спиральную форму, достигают 100-150 км в поперечнике и характеризуются перепадами температур в направлении от центра к периферии до 5°C [Ростов и др., 2005].

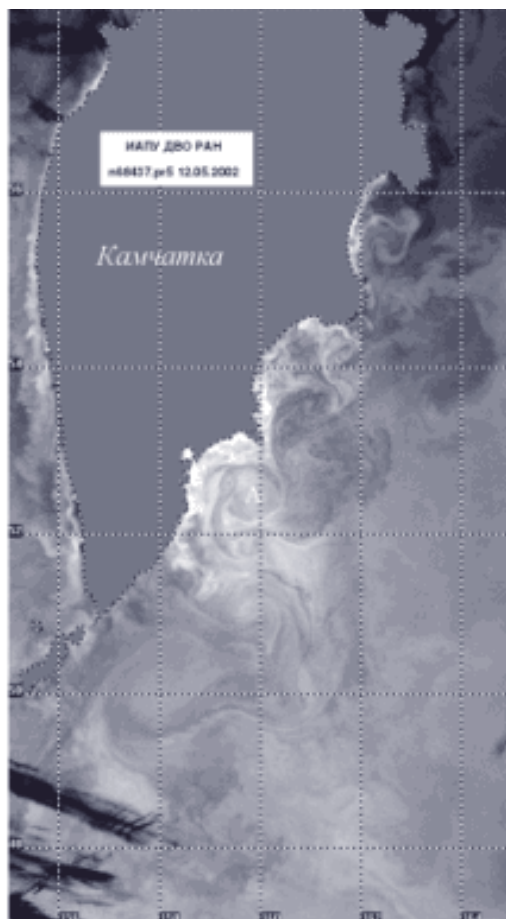


Рисунок 15 – Вихри Курило-Камчатского течения в мае 2002 года по спутниковым данным в инфракрасном диапазоне [Ростов и др., 2005].

Приливы. Курило-Камчатский регион характеризуется выраженной приливной динамикой. Приливные явления в районе Курильской гряды

формируются главным образом приливными волнами, распространяющимися из Тихого океана. Приливные волны в северо-западной части Тихого океана имеют преимущественно поступательный характер и движутся в юго-западном направлении вдоль Курильской гряды (рисунок 16).

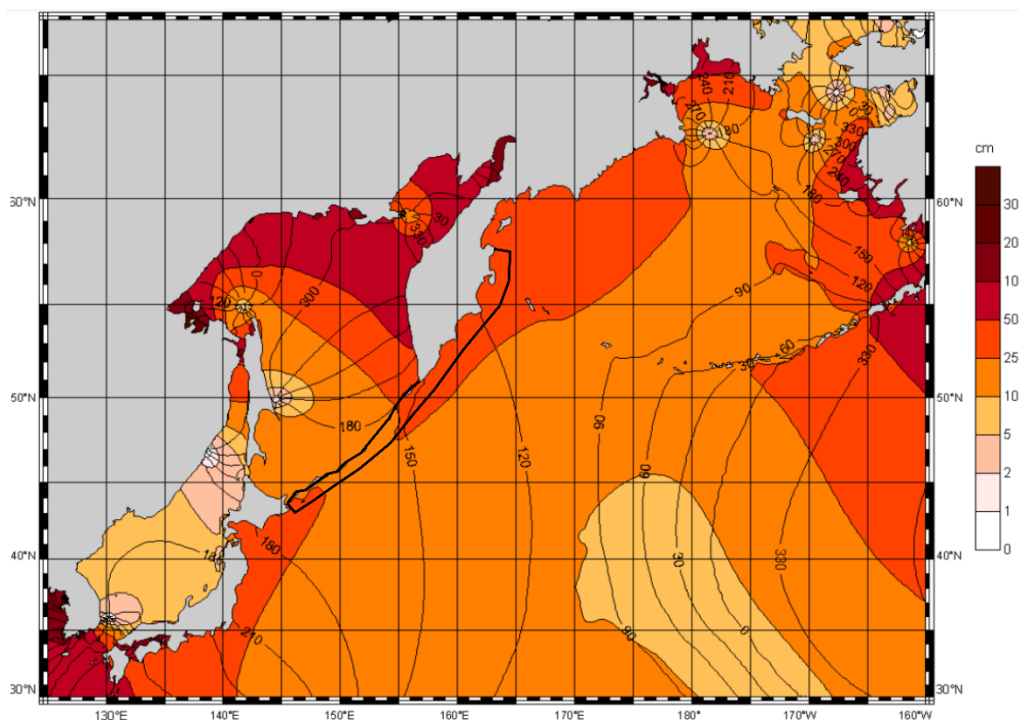


Рисунок 16 – Приливные карты для гармоника M2 в Курило-Камчатском регионе [Белоненко, Фукс, 2012]. Жирной линией показана граница исследуемого региона.

На акватории Курильской гряды преобладает суточный прилив (рисунок 17). Амплитуда приливных колебаний уровня в зоне гряды не превышает 1м. В Курильских проливах амплитуда приливных колебаний уровня увеличивается до 1,7-2,5 м. Скорости приливных течений на акватории Курильской гряды составляют в среднем 50 см/с, но в отдельных проливах могут достигать 350 см/с [Гидрометеорология..., 1998]. Под влиянием приливной волны Тихого океана на акватории тихоокеанского побережья Камчатки в летнее время возникает неправильный полусуточный прилив [Белоненко и др., 2011].

Согласно [Tanaka et al., 2014] амплитуды суточных ВПВ могут составлять в проливе Буссоль от 30 до 120 м. Курило-Камчатский регион находится за критической широтой (30°) для доминирующего здесь суточного прилива, поэтому ВПВ суточного периода не могут распространяться как свободные.

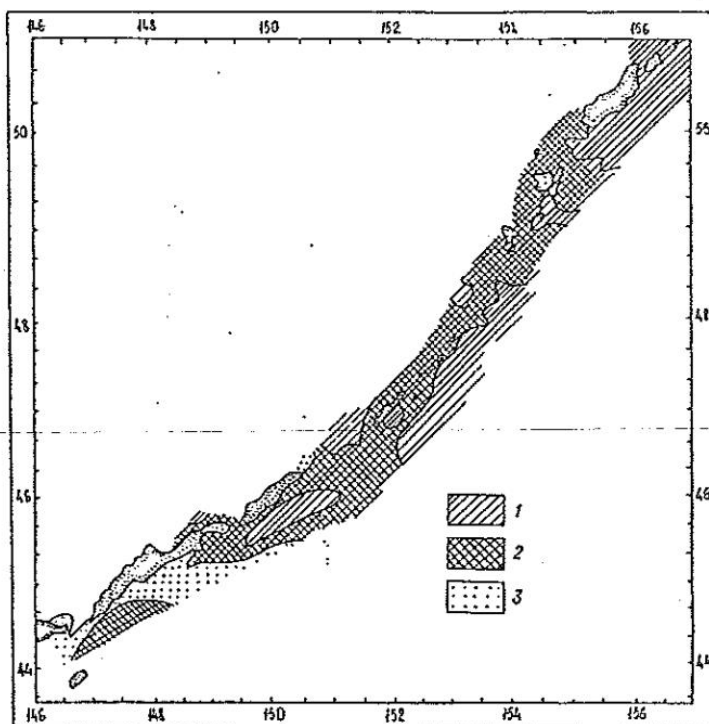


Рисунок 17 – Характер приливов Курильской гряды: 1 – смешанные с преобладанием полусуточных, 2 – смешанные с преобладанием суточных, 3 – суточные [Гидрометеорология..., 1998].

Состояние изученности КВВ в Курило-Камчатском регионе.
Современное состояние изученности короткопериодного внутреннего волнения в Курило-Камчатском регионе характеризуется наличием разрозненных по пространству исследований с применением разнообразных методик и подходов. В работах [Дикинис и др., 1999; Lavrova et al., 1999; Jackson, 2004; Mitnik, Dubina, 2012, Епифанова и др., 2019] установлено присутствие разрозненных ярко-выраженных проявлений КВВ на акватории близ Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских

островов по данным радиолокаторов Алмаз-1, ERS-1/2, ALOS, Radarsat-1/2 и Envisat ASAR, а также спектрорадиометров Terra/ASTER и Aqua/Terra MODIS. Результаты контактных наблюдений в проливах Курильской гряды и у Тихоокеанского побережья Камчатки позволили выявить КВВ с амплитудами до 8 метров, которые проявляются с приливной периодичностью [Рао, Не, 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 короткопериодных внутренних волн, взаимодействующих друг с другом, а также с меандрами Камчатского течения. Распределение КВВ по акватории залива весьма неравномерно, регистрируются они как в мелководной части залива, так и над большими глубинами. Значительное число проявлений КВВ направлено к берегу, однако существуют волны, которые направлены в открытый океан. Существование проявлений волн, направленных в океан объясняется сильной крутизной шельфового склона в Авачинском заливе. При этом, отражённый от шельфа луч внутреннего прилива выходит близко к поверхности на некотором расстоянии от границы шельфа, распадаясь на мелкие солитоноподобные волны. Фронты поверхностных проявлений КВВ имеют изогнутую структуру, что связано с рефракцией волн при взаимодействии их с меандрами Камчатского течения. Характерной особенностью КВВ в Авачинском заливе также является их наличие на достаточно больших глубинах. При этом, такие волны распространяются в направлении берега. Этот факт связан с усилением внутреннего прилива, идущего со стороны открытого океана отражённым от шельфа внутренним приливом. Также было установлено, что проявляющиеся с приливной периодичностью интенсивные внутренние волны амплитудой 5-8 м – типичное явление, как для шельфа полуострова, так и прилегающих участков материкового склона [Рао, Не, 2002; Сабинин, Серебряный, 2007].

Обзор физико-географических особенностей Курило-Камчатского региона демонстрирует, что процессы, влияющие на формирование поля КВВ (изменчивость вертикальной структуры вод, приливная динамика) изучены достаточно хорошо. При существенных отличиях в гидрологическом режиме регионы характеризуются общей чертой – субинерциальным характером ВПВ доминирующих частот, что, предположительно, должно влиять на генерацию КВВ. 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.

Обзор состояния изученности особенностей КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе показал, что существующие здесь исследования выполнялись на основе широкого спектра методических подходов, применяемых к отдельным частям рассматриваемых регионов. В соответствии с целевой установкой данной работы необходимо сравнение характеристик КВВ в исследуемых регионах, которое требует применения единого подхода к анализу результатов наблюдений. Для анализа пространственно-временной изменчивости характеристик КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе будет применяться годовой архив данных группировки спутников Sentinel 1, данные реанализа из единой базы, а также данные глобального приливного атласа. Для сравнения особенностей КВВ по результатам контактных измерений, исходные характеристики КВВ, полученные по записям разных длительностей, будут по методике экстраполяции приведены к единой длительности.

Глава 2. Исходные данные и методы их обработки

2.1 Исходные данные

Исходными данными для работы послужили 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.

Исходные данные контактных наблюдений. В Баренцевом море судовые наблюдения выполнялись в августе 2016 года около мыса Святой нос. Глубины в зоне проведения наблюдений составляли 150—200 м, при отсутствии резких перепадов. Карта рельефа дна района проведения экспедиционных работ показана на рисунке 18а. В период с 9 по 22 августа на полигоне были произведены учащённые повторяющиеся зондирования (сканирования) водной толщи от поверхности до заданного горизонта (50 м) с дрейфующего судна с помощью CTD-зондов CastAway (США) и SBE-25 (США). Один цикл сканирования «спуск-подъем» зонда занимает 1—2 мин (при глубине зондирования до 50 м). Эти измерения имели продолжительность 5—12 ч за сутки, а общее время сканирований составило 80 ч. Перед началом измерений судно всегда выходило в одну и ту же точку, показанную на рисунке 18а. Судно удалялось от исходной точки не более чем на несколько морских миль, а скорость дрейфа не превышала 0.25 узла.

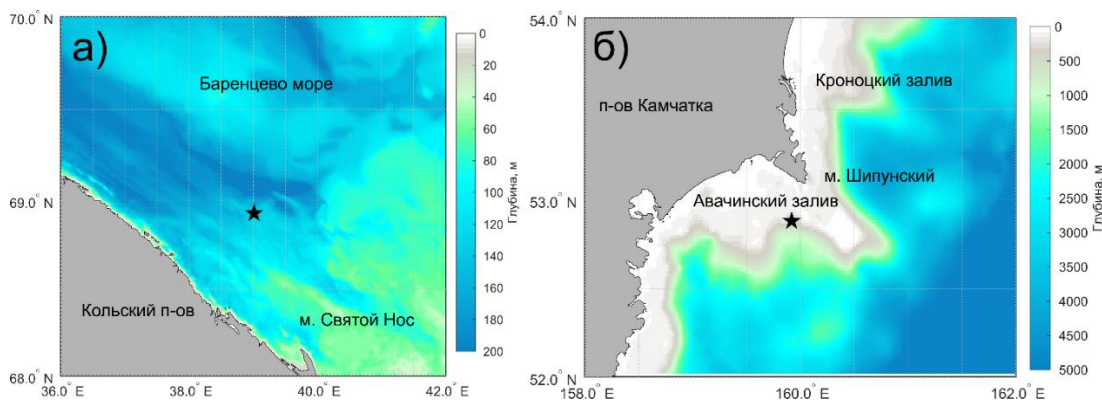


Рисунок 18 – Рельеф дна в районах проведения экспедиционных работ (символ «звезда» указывает положение точек контактных измерений характеристик КВВ): а) – в Баренцевом море; б) – в Авачинском заливе. Положение районов экспедиционных работ на картах исследуемых регионов показано на рисунках 20а и 21а.

Экспедиционные исследования в Авачинском заливе Тихого океана выполнены в августе – сентябре 2018 года на полигоне над материковым склоном близ м. Шипунского, характеризующемся глубинами от 150 до 1000 м. Карта рельефа дна Авачинского Залива с нанесённым положением точки измерений показана на рисунке 18б. Измерения выполнялись с судна, лежащего в дрейфе, скорость которого не превышала 0,5 узла. Для измерений использовалась гирлянда из 26 температурных датчиков РМЕ (Великобритания) с расстоянием между датчиками 2 м и общей длиной 50 м. Датчики регистрировали температуру с точностью $\pm 0,05$ °С. Положение нижнего конца гирлянды контролировалось с помощью датчика давления. Суммарная продолжительность измерений на составила 44 ч, при этом каждый эпизод измерений имел продолжительность от 6 до 18 ч.

Исходные данные для подспутниковых экспериментов. В рамках подспутникового эксперимента в Баренцевом море проявления КВВ регистрировались на снимках с аппаратов Sentinel 1А и 2А с

пространственным разрешением 40 м, а также с аппарата ALOS-2 PALSAR-2 с пространственным разрешением 25 м. Всего был использован 21 снимок, полностью охватывавший район в радиусе 100 км от точки измерений по пространству и перекрывающий период работ по времени. В подспутниковом эксперименте в Авачинском заливе использовались снимки Sentinel 2A и Sentinel 2B в оптическом диапазоне с пространственным разрешением 10 метров; Landsat 8 в оптическом диапазоне с разрешением 30 метров, Sentinel 1A с разрешением 20 метров. Всего было использовано 9 спутниковых изображений.

Исходные данные спутниковых наблюдений. Регистрация поверхностных проявлений КВВ осуществлялась на радиолокационных изображениях (РЛИ) Sentinel-1A/B в С-диапазоне и режимах съёмки IW с разрешением 25 м и шириной полосы обзора 250 км, и EW с разрешением 40 м и шириной полосы обзора 400 км. РЛИ Sentinel-1 имеют более высокое пространственное разрешение и ширину полосы обзора, а также меньший интервал времени между сценами одного и того же участка морской поверхности, по сравнению с данными, использованными в работах [Козлов и др., 2014; Дикинис и др., 1999; Lavrova et al., 1999; Jackson, 2004; Mitnik, Dubina, 2012]. РЛИ выбирались с использованием сервиса Европейского космического агентства Copernicus Open Access Hub [<https://scihub.copernicus.eu>].

На акваторию Баренцева моря в период с 1 декабря 2018 года по 30 ноября 2019 года приходилось 3721 РЛИ. Общее за исследуемый период покрытие Баренцева моря РЛИ показано на рисунке 19.

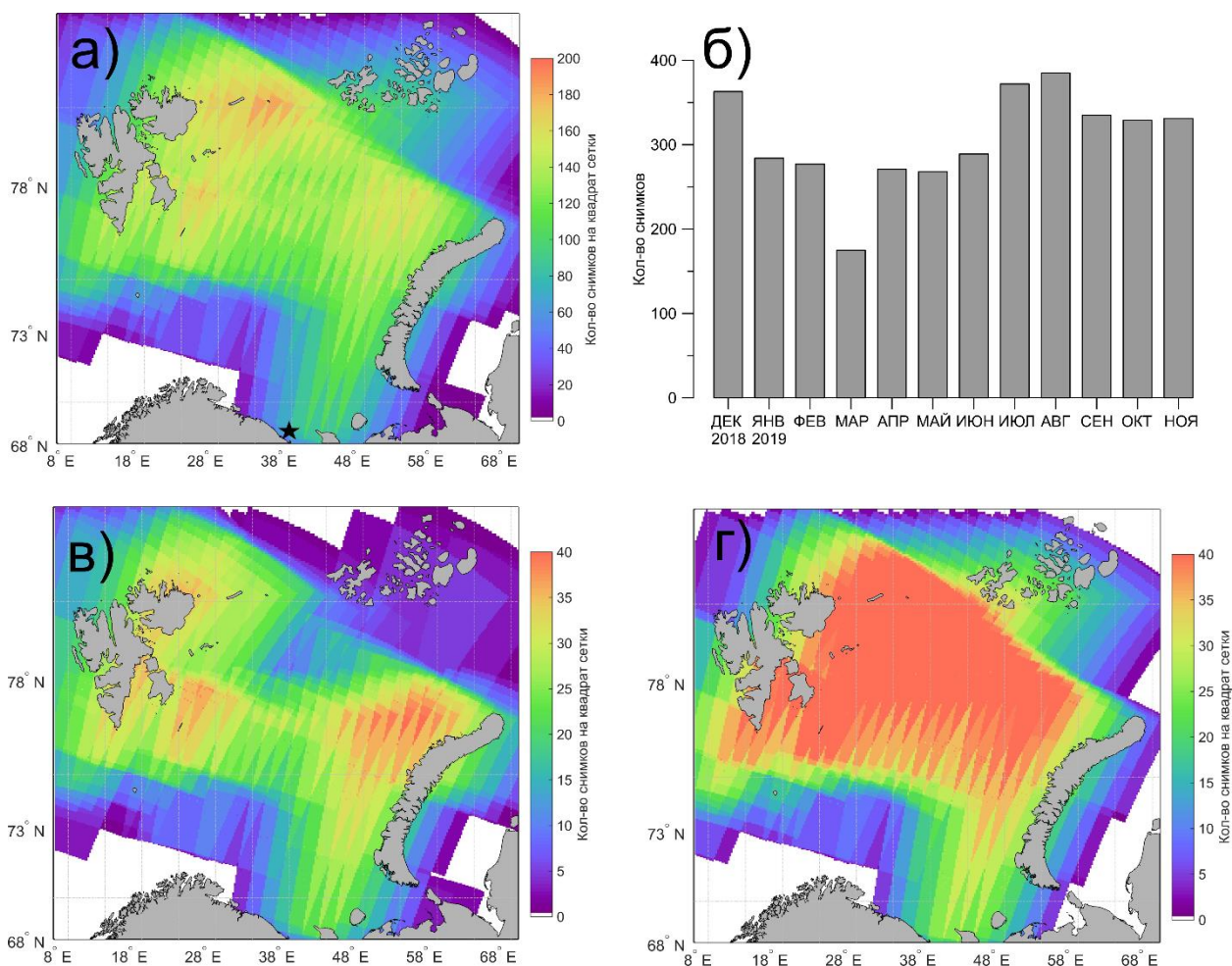


Рисунок 19 – Обеспеченность Баренцева моря РЛИ: а) покрытие акватории с декабря 2018 года по ноябрь 2019 года (символ «звезда» указывает положение районов контактных наблюдений); б) распределение количества РЛИ по месяцам; в) минимальное покрытие акватории в марте; г) максимальное покрытие акватории в августе.

Из рисунка 19а видно, что Баренцево море полностью обеспечено спутниковыми данными: области наилучшего покрытия с количеством снимков в ячейке от 160 до 200 приурочены к району восточнее арх. Шпицберген и западнее арх. Новая Земля. Малая обеспеченность РЛИ отмечается вокруг арх. Земля Франца Иосифа, а также на границах с Норвежским и Карским морями. Количество снимков здесь составляет менее 20. Минимальное число снимков приходится на март и составляет 175 (рисунок 19б). Максимальное количество снимков отмечается в августе и

составляет 362. Из рисунков 20в и 20г видно, что в месяцы наименьшего и наибольшего числа снимков, покрытие акватории меняется незначительно.

На акватории Курило-Камчатского региона в период с 1 декабря 2018 года по 30 ноября 2019 года приходилось 827 РЛИ. Покрытие Курило-Камчатского региона РЛИ показано на рисунке 20.

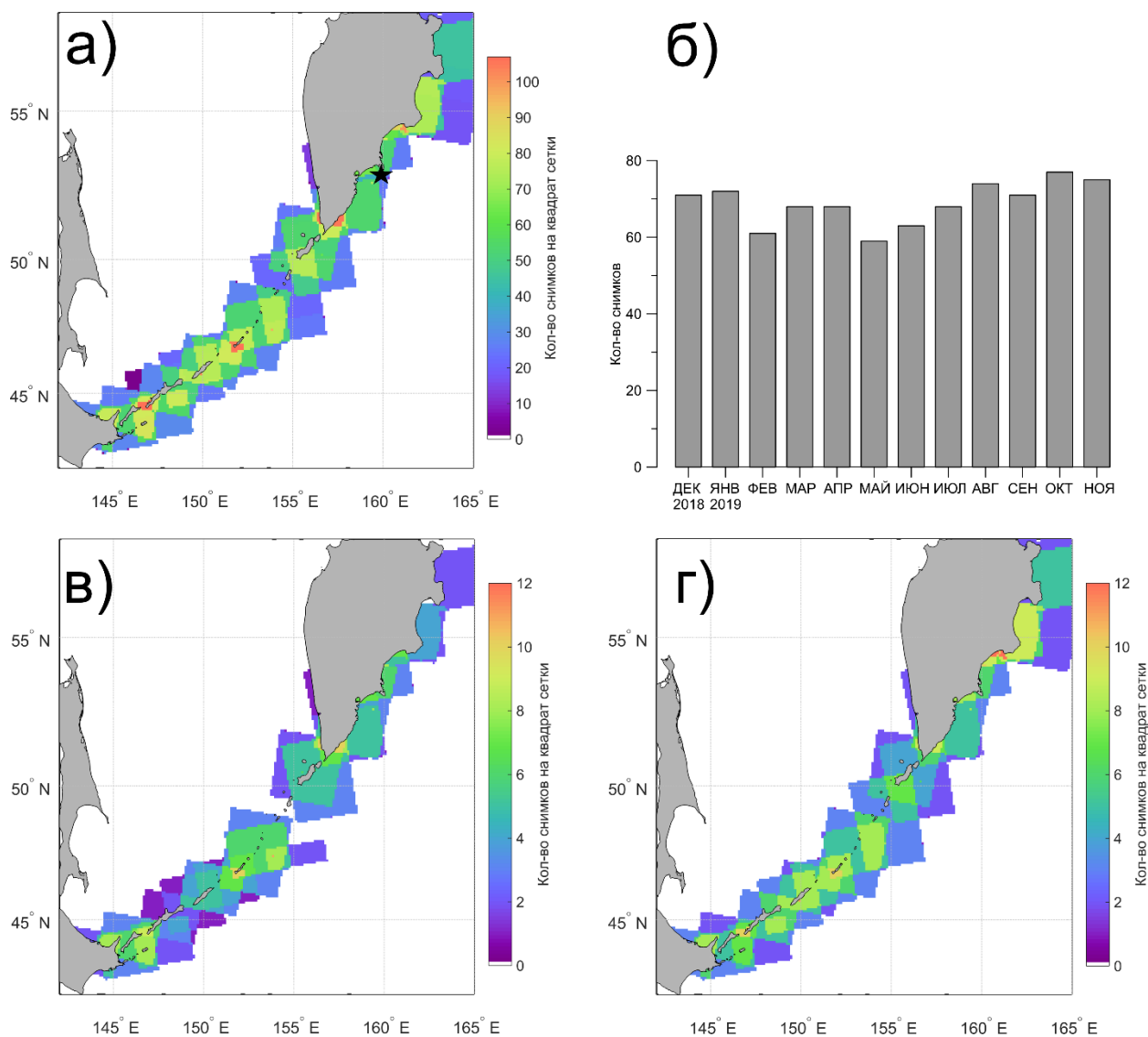


Рисунок 20 – Обеспеченность Курило-Камчатского региона РЛИ: а) покрытие акватории с декабря 2018 года по ноябрь 2019 года (символ «звезда» указывает положение районов контактных наблюдений); б) распределение количества РЛИ по месяцам; в) минимальное покрытие акватории в мае; г) максимальное покрытие акватории в октябре.

В Курило-Камчатском регионе наибольшее число снимков в ячейке (90-110) приходится на прибрежные районы, а наименьшее число снимков приходится на максимально удалённую от берега глубоководную часть региона и составляет от 2 до 20 снимков в ячейке. Рисунок 20б демонстрирует, что минимальное количество снимков отмечается в мае и составляет 60, а максимальное – в октябре и составляет 78. Рисунки 20в и 20г демонстрируют, что покрытие в мае и октябре отличается незначительно.

Дополнительные исходные данные. Для выделения мезомасштабных вихревых структур и фронтальных зон на акватории около юго-восточного побережья полуострова Камчатка использовались спутниковые изображения в видимом диапазоне со спутников Aqua/Terra MODIS и Suomi NPP [<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>], температура поверхности океана (ТПО) продукта GHRSSST с усвоением спутниковых данных [<https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/products/>], а также абсолютная динамическая топография (АДТ) продукта Copernicus с усвоением спутниковых данных [97 detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_NRT_OBSERVATIONS_008_046/INFORMATION]. Данные выбирались за период с 1 июня 2019 года по 30 ноября 2019 года.

Для выявления причин изменчивости проявлений КВВ в течение года дополнительно привлекались среднемесячные значения толщины перемешанного слоя и скорости приводного ветра за исследуемый период из реанализа [https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/INFORMATION].

Для анализа приливной динамики и механизмов генерации КВВ использовались данные о приливных колебаниях уровня моря и течениях, полученные из глобального атласа TPXO9 [Egbert, Erofeeva, 2002]. Для расчёта критериев генерации ВПВ привлекалась батиметрия ETOPO1 [<https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.dem:316>], среднемесячные поля

температуры и солёности морской воды, а также поля фоновых течений из реанализа [https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/INFORMATION].

2.2 Методы обработки данных

2.2.1. Методика расчёта амплитуд и периодов КВВ и ВПВ. Результаты сканирований и измерений гирляндами подвергались линейной интерполяции по глубине с сохранением дискретности по времени в ПО Surfer. В результате интерполяции совокупность вертикальных профилей температуры за определённый промежуток времени преобразовывалась в запись временной изменчивости вертикального смещения изотерм. Согласно [Гидрометеорология..., 1990; Богданов, Мороз, 2000; Ростов и др., 2005] на исследуемых акваториях в летнее время характеристики приповерхностного пикноклина в основном определяются параметрами сезонного термоклина, а изопикнические поверхности практически совпадают с изотермическими, поэтому на записях колебаний изотерм согласно методике [Жегулин и др., 2016] определялись амплитуды и периоды КВВ по выделенной в области термоклина изотерме (рисунок 21). В данной работе КВВ рассматривались как колебания изотерм с периодом от единиц до десятков минут и амплитудой более полуметра.

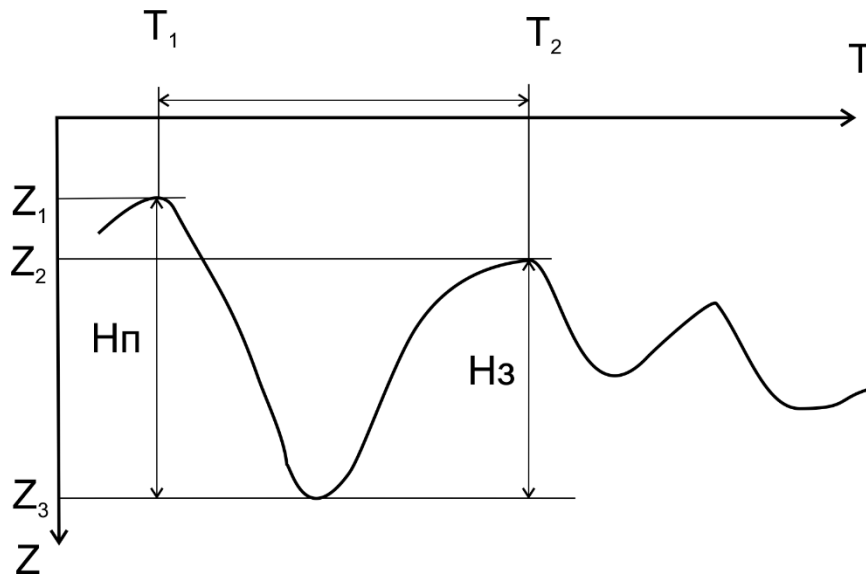


Рисунок 21 – Схема, поясняющая методику определения амплитуд и периодов внутренних волн на записях колебаний температуры. Условные обозначения см. текст

Амплитуда волны оценивается по выражению (3):

$$\eta = \frac{H_n + H_з}{4} \quad (3)$$

Где: $H_n = Z_3 - Z_1$ – высота переднего склона волны, $H_з = Z_3 - Z_2$ – высота заднего склона волны, Z_1, Z_2 – глубины залегания первого и второго локальных максимумов изотермы, Z_3 – глубина залегания локального минимума изотермы.

Период каждой волны определяется как временной интервал между соседними минимумами залегания изолинии по выражению (4):

$$T_{\text{вв}} = T_2 - T_1 \quad (4)$$

Где: $T_{\text{вв}}$ – период данной внутренней волны, T_1 – время наступления первого локального минимума изотермы, приуроченного к данной волне, T_2 – время наступления второго локального минимума изотермы, приуроченного к данной волне. По аналогичной методике определялись проявления ВПВ на записях колебаний температуры. В качестве ВПВ рассматривались колебания изотерм с периодом порядка единиц часов.

2.2.2 *Методика приведения характеристик КВВ к единому временному интервалу.* Для приведения амплитуд КВВ в Баренцевом море и Авачинском заливе, полученных по записям с различной длительностью, по методике [Иванов и др., 1991] рассчитывались ожидаемые амплитуд волн за 10 и 30 дней. Для оценки ожидаемых амплитуд внутренних волн необходимо рассчитать гистограммы повторяемости амплитуд волн и найти обеспеченность волн заданной амплитуды. Расчёт гистограмм повторяемости осуществляется по методике, описанной в [Гордеева, 2010].

После получения значений обеспеченности амплитуд волн, выполняется оценка логарифма отношения обеспеченности N к времени записи $T - \ln \frac{N}{T}$. Далее зависимость $\ln \frac{N}{T}$ от амплитуды внутренней волны η аппроксимируется линейной функцией по выражению (5) [87]:

$$\ln \frac{N}{T} = a\eta + b \quad (5)$$

Причём коэффициент a имеет смысл некоего градиента, показывающего как изменится логарифм отношения обеспеченности ко времени записи при изменении амплитуды волны на единицу дискретности, коэффициент b – свободный член. Зная коэффициент b можно переписать выражение (5) в виде выражения (6):

$$\eta_p = (\frac{N}{T_p} - b) / a \quad (6)$$

Положив в выражении (6) $N = 1$, получим амплитуду волны η_p , которая может быть превышена 1 раз за время T_p . При этом, если полученная амплитуда ожидаемой волны превышает 5 метров, то можно говорить о том, что 1 раз за время T_p ожидается ИВВ. В данной работе время T_p принимается равным 1 месяц, так как в исследуемых регионах в течение

данного времени сохраняется стабильность основных характеристик вертикальной структуры вод.

2.2.3 *Методика оценки фазовой скорости внутренних волн.* В работах [Гидрометеорология..., 1990; Богданов, Мороз, 2000] было продемонстрировано, что вертикальная структура вод в исследуемых районах близка к картине двухслойной стратификации. Тогда фазовая скорость внутренних волн может быть определена исходя из дисперсионного соотношения в приближении двухслойной стратификации [Коняев, Сабинин, 1992]:

$$c = \sqrt{\frac{g \Delta\rho}{k \rho} \frac{1}{\operatorname{cth}(kh_1) + \operatorname{cth}(k(H-h_1))}}, \quad (7)$$

где: g – ускорение свободного падения, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, ρ_2 – плотность нижнего слоя, ρ_1 – плотность верхнего слоя, $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$, h_1 – толщина верхнего слоя, H – глубина места.

В ходе контактных измерений прямо не определялась длина волны, поэтому выражение (7) нельзя использовать для определения фазовой скорости в представленном виде. В исследуемых районах длина волны, определённая по спутниковым данным, приблизительно в 5 превышает глубину места, что позволяет переписать выражение (7) в приближении мелкой воды [Коняев, Сабинин, 1992]:

$$c = \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{h_1(H-h_1)}{h_1 + (H-h_1)}}, \quad (8)$$

Аналогичный подход применялся в работе [Зимин и др., 2014].

2.2.4 *Методика оценки нелинейности КВВ.* По методике из [Серебряный, 1985] рассчитывались параметр нелинейности α (9),

дисперсии β (10), а также параметр Урселла σ^2 (11), показывающий вклад нелинейности и дисперсии в КВВ:

$$\alpha = \frac{3}{2}c \frac{1-h_1/h_2}{h_1}, \quad (9)$$

где: h_2 - толщина нижнего слоя,

$$\beta = \frac{ch_1h_2}{6}, \quad (10)$$

$$\sigma^2 = \frac{\alpha}{\beta}\eta(\lambda/2)^2, \quad (11)$$

где: η - амплитуда КВВ. Для расчёта использовалась средняя и максимальная наблюдаемая амплитуда КВВ. Если параметр Урселла меньше 12, то дисперсия преобладает над нелинейностью, если больше 12, то нелинейность над дисперсией.

2.2.5 Методика расчёта спектра КВВ. В ПО Statistica производился расчёт спектра вертикальных смещений изотермы, выделенной в области термоклина, который сравнивался с теоретическим распределением спектра Гаррета-Манка [Garret, Munk, 1975].

2.2.6 Методика регистрации проявлений КВВ на спутниковых снимках. Детектирование проявлений КВВ на РЛИ и оптических изображениях выполнялось визуально с использованием Sentinel Application Platform (SNAP) от Европейского космического агентства [<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>]. Для каждого проявления определялись такие характеристики как: географические координаты положения проявления, количество волн в пакете, длина дуги лидирующего гребня, средняя длина волны и направление распространения (рисунок 22).

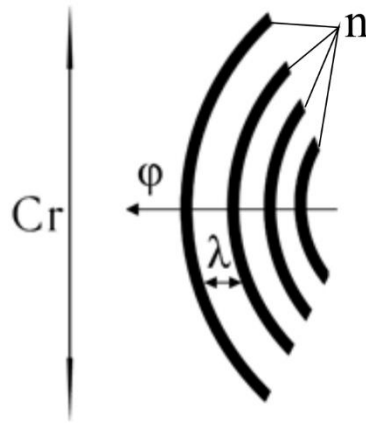


Рисунок 22 – Схема поверхностного проявления КВВ. C_r – длина лидирующего гребня, λ – длина волны, ϕ – направление распространения, n – число волн в пакете.

Характеристики проявлений КВВ заносились в базу данных. Выполнялось построение гистограмм повторяемости характеристик проявлений КВВ, карт положений лидирующих гребней и частоты встречаемости проявлений КВВ. Частота встречаемости рассчитывалась как отношение количества проявлений КВВ к количеству снимков в ячейках (В Баренцевом море с размером $1,2^\circ$ по долготе и $0,3^\circ$ по широте, в Курило-Камчатском регионе с размером $0,46^\circ$ по долготе и $0,32^\circ$ по широте). Размер ячейки был выбран исходя из соображений удобства расчётов и последующего анализа. Ячейки такого размера делят исследуемые регионы на 50 частей по широте и долготе. По картам частоты встречаемости производилось выявление «горячих точек» в поле проявлений внутренних волн, как областей, где частота встречаемости превышает фоновые оценки (которые составили 0,1 для Баренцева моря и 0,2 для Курило-Камчатского региона) как минимум в два раза. Согласно [Сабинин, 2004], «горячие точки» – это области в поле внутренних волн, где регулярно наблюдаются ИВВ. Однако спутниковые данные не позволяют получить информацию об амплитудах волн, поэтому термин "горячие точки" будет определяться как области, где проявления КВВ наблюдаются регулярно. Учитывая, что в этих

районах имеются пакеты с размерами, соответствующими проявлениям ИВВ в других регионах Мирового океана [Jackson, 2004], такая адаптация вполне согласуется с [Сабинин, 2004].

2.2.7 Методика сопоставления контактных и спутниковых наблюдений. На предварительном этапе производился отбор спутниковых изображений, время получения которых совпадает с временными рамками записей контактных наблюдений. На данных снимках выполнялся визуальный поиск проявлений КВВ, находящихся поблизости к положению судна. Если такое проявление удавалось обнаружить, выполнялось измерение на снимке расстояния от лидирующего гребня проявления до судна. По выражению (9) оценивалась фазовая скорость проявления КВВ с использованием длины волны, определяемой путём непосредственного измерения на снимке расстояния между гребнями. С учётом фазовой скорости, направления распространения и расстояния между судном и проявлением рассчитывалось время предполагаемого контакта судна с проявлением КВВ. На записях колебаний температуры в расчётное время выполнялся поиск цугов волн, которые могут соответствовать проявлению КВВ. При регистрации цугов в контактных данных производилось прямое сопоставление характеристик волн, полученных по контактным и спутниковым данным. Сравнивалась фазовая скорости, рассчитанная по выражениям (9) и (10), а также длина волны, непосредственно измеренная на спутниковом снимке, и рассчитанная с использованием среднего периода КВВ по данным контактных наблюдений по выражению $\lambda = cT$. При совпадении фазовой скорости и длины волны делался вывод о том, что в контактных данных в виде цуга КВВ зарегистрировано проявление КВВ, обнаруженное на снимке.

2.2.8 Методика регистрации мезомасштабных вихревых структур. На начальном этапе по замкнутым изолиниям в поле АДТ выполнялась идентификация мезомасштабных вихревых структур [Романов и др., 2009]. Рассчитывался градиент ТПО продукта GRHSST по методике [Konik et al.,

2021]. По максимальному градиенту определялось положение фронтальных зон, связанных с вихревыми структурами. На изображениях видимого диапазона фронтальные зоны и мезомасштабные вихри выделялись визуально по их характерным проявлениям [Лаврова и др., 2011]. Путём геометрических построений в ПО SNAP определялось положение центров вихревых структур и их диаметр по методике из [Атаджанова и др., 2017].

2.2.9 Методика сопоставления положений КВВ и мезомасштабных вихревых структур. Для выделенной акватории Курило-Камчатского региона от мыса Лопатка до мыса Опасный подсчитывалось количество мезомасштабных вихрей за каждый месяц летнего и осеннего периодов. Производилось построение и анализ композитных карт, сочетающих положение проявлений КВВ и полей спутниковых данных и данных реанализа. Определялось количество проявлений КВВ с малой кривизной лидирующих гребней и направлением распространения от вихревых структур. Считается, что такие проявления генерируются при взаимодействии движущихся или подверженных инерционным колебаниям мезомасштабных вихревых структур с пикноклином [Lavrova et al., 2011].

2.2.10 Методика анализа приливной динамики исследуемых регионов. При помощи пакета M_Map [www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html.] для Matlab производилось построение композитных карт по данным атласа TPXO9, сочетающих горизонтальное распределение амплитуды приливных колебаний уровня, котидальные линии и эллипсы приливных течений. По котидальным линиям анализировались особенности распространения поверхностного прилива, а по эллипсам выявлялись особенности поля баротропных приливных течений.

2.2.11 Методика анализа энергии прилива. Средние за приливной цикл потоки приливной энергии F_x и F_y а также скорость диссипации приливной энергии придонным трением ε [Subeesh et al., 2021] рассчитывались по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{1}{2} \rho g H a u \cos(\varphi - \varphi_u) \\
 F_y &= \frac{1}{2} \rho g H a v \cos(\varphi - \varphi_v)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

где: ρ - стандартная плотность морской воды, равная 1024 кг/м^3 , a - амплитуда приливного уровня, φ - фаза приливного уровня, u - зональная составляющая скорости приливного течения, φ_u - фаза зональной составляющей скорости приливного течения, v - меридиональная составляющая скорости приливного течения, φ_v - фаза меридиональной составляющей скорости приливного течения.

$$\varepsilon = \frac{k\rho}{T} \int_0^T (U^2(t) + V^2(t))^{3/2} dt,
 \tag{13}$$

Где: k - коэффициент донного трения, принимаемый равным $0,026$, T - приливной период, $U(t) = u \cos(\omega t - \varphi_u)$ - мгновенная зональная составляющая скорости приливного течения во время t , $\omega = 2\pi/T$ - приливная циклическая частота, $V(t) = v \cos(\omega t - \varphi_v)$ - мгновенная меридиональная составляющая скорости приливного течения во время t .

2.2.12 Методика выявления очагов генерации ВПВ. Для выявления потенциальных очагов генерации ВПВ можно рассчитывать скорость преобразования баротропной энергии в бароклинную [Gerkema et al., 2004]. Однако для её расчёта требуется представление о поле бароклиных течений, что не всегда возможно. В работе [Baines, 1982] были выведены линеаризованные уравнения движения в предположении стратифицированной вращающейся невязкой жидкости, которые описывают генерацию внутренних приливов. Разделение данных уравнений на баротропную и бароклинную составляющие позволяет получить критерий tidal body force, который описывает генерацию внутреннего прилива при взаимодействии баротропного приливного потока с рельефом дна. По сути, данный критерий описывает возникающую над континентальным склоном массовую силу плавучести, которая генерирует внутренний прилив. В

настоящей работе расчёт производился по формуле, обобщённой для трёхмерного случая согласно [Pichon et al., 2013]:

$$TBF = \frac{2\pi N^2}{\omega} \left[Q_x \frac{\partial H}{\partial x} + Q_y \frac{\partial H}{\partial y} \right], \quad (14)$$

где: N^2 - частота Вайсяля-Брента (плавучести), Q_x и Q_y - амплитуды зональной и меридиональной составляющих приливного потока, $\frac{\partial H}{\partial x}$ и $\frac{\partial H}{\partial y}$ - зональные и меридиональные градиенты глубины.

Многочисленные исследования [Sherwin et al., 2002; Merrifield and Holloway, 2002; Niwa and Hibiya, 2004; Zhao et al., 2004] демонстрируют, что ВПВ большой амплитуды распространяются из областей наибольших значений критерия tidal body force, поэтому по максимальным значениям критерия можно выявлять потенциальные очаги генерации ВПВ.

2.2.13 Методика определения интенсивности топографической генерации ВПВ. Рассчитывалось отношение наклона дна (модуля градиента глубины места) к наклону характеристик ВПВ [Vlasenko et al., 2005]:

$$\mu = dH / \left(\frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2} \right), \quad (15)$$

где: $dH = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2}$.

Топографический наклон считается докритическим, если отношение наклона дна к наклону характеристик ВПВ <1 , критическим, если отношение $=1$, и сверхкритическим, если отношение >1 . Наиболее интенсивная генерация ВПВ происходит при критическом топографическом наклоне.

2.2.14 Методика определения режима приливного течения. Для определения режима приливного течения в точках контактных наблюдений выполнялся расчёт числа Фруда [Jackson et al., 2012]:

$$Fr = \frac{V_m}{c}, \quad (16)$$

где: $V_m = \sqrt{u^2 + v^2}$.

Если число Фруда < 1 , то приливное течение характеризуется докритическим режимом. При числе Фруда ≥ 1 , приливное течение характеризуется критическим и суперкритическим режимом соответственно. Если число Фруда в районе частой встречаемости проявлений КВВ ≈ 1 , проявления КВВ имеют направление распространения от локальной неоднородности рельефа дна в сторону, противоположную приливному течению, а в данных контактных наблюдений отсутствуют проявления ВПВ, то делается вывод о запрятственном механизме генерации КВ.

2.2.15 Методика сопоставления положений проявлений КВВ с очагами генерации ВПВ. Для каждого месяца из рассматриваемого периода производилось построение композитных карт, сочетающих положение лидирующих гребней проявлений КВВ и горизонтального распределения критерия tidal body force. Выделялись очаги генерации ВПВ, как области, где значение критерия tidal body force превышает $5 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Выполнялся расчёт расстояния от лидирующих гребней проявлений КВВ до очагов генерации ВПВ. Подсчитывалось количество проявлений КВВ, находящихся на расстоянии менее 8 км (выбрано исходя из размеров сетки реанализа для расчёта критерия tidal body force) от очагов генерации ВПВ. Принималось, что за критической широтой КВВ, проявления которых находятся в очагах генерации ВПВ генерируются при локальной дезинтеграции субинерциальных ВПВ. До критической широты проявления КВВ, находящиеся вблизи очагов генерации ВПВ и на одной линии с ними генерируются при нелинейно-дисперсионном распаде ВПВ. Дополнительным подтверждением указанных механизмов генерации служит наличие в данных контактных наблюдений проявлений ВПВ.

2.2.16 Методика сопоставления положений проявлений КВВ с топографическим наклоном. Производилось построение композитных карт, сочетающих положение лидирующих гребней проявлений КВВ и горизонтального распределения топографического наклона. Определялись

области критического топографического наклона, где происходит наиболее интенсивная топографической генерации ВПВ. Производился анализ взаимного положения областей критического топографического наклона и положений проявлений КВВ. При выявлении проявлений КВВ, находящихся на одной линии с областью критического топографического наклона можно говорить о действии лучевого механизма генерации КВВ.

2.2.17 Метод количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ. На рисунке 23 показана блок-схема разработанного метода количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ. Он основан на использовании и интеграции результатов применения методик, описанных ранее.

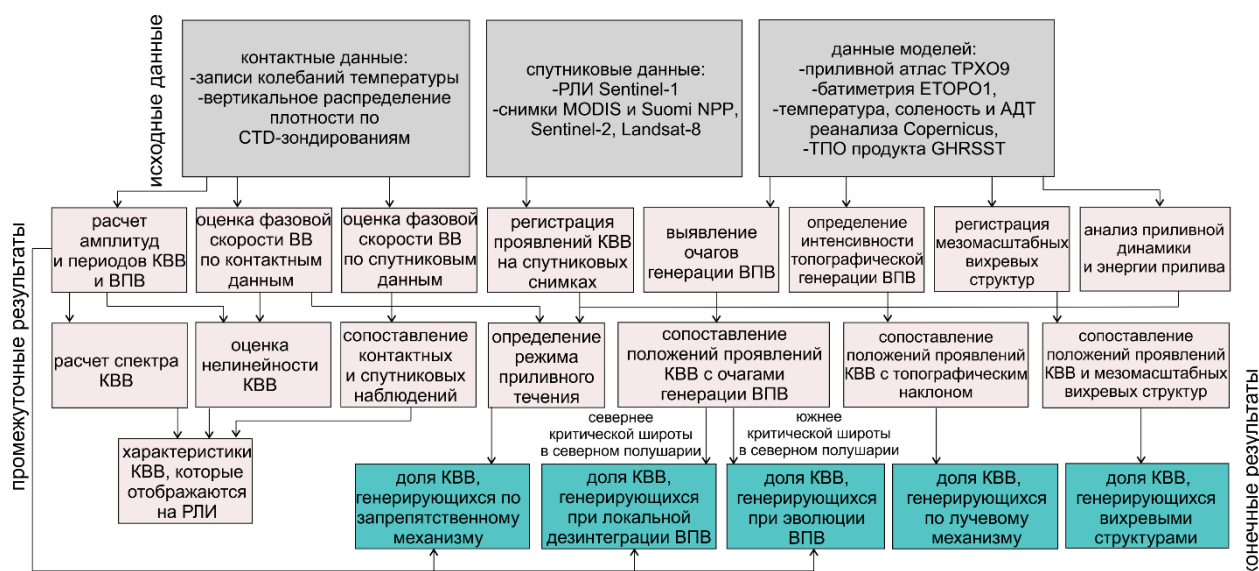


Рисунок 23 – Блок-схема метода количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ.

Начальный этап применения метода предполагает анализ результатов синхронных спутниковых и контактных наблюдений для оценки характеристик КВВ, отображающихся на РЛИ. Для этого прежде всего необходимо в соответствии с п. 2.2.1 по записям колебаний температуры рассчитать амплитуды и периоды КВВ и по пп. 2.2.3-2.2.5 рассчитать фазовую скорость, спектр и нелинейность КВВ. Затем необходимо в соответствии с п. 2.2.6 произвести регистрацию проявлений КВВ на

спутниковых изображениях, охватывающих период экспедиционных наблюдений. Наконец, необходимо в соответствии с п. 2.2.7 произвести прямое сопоставление данных контактных и спутниковых наблюдений. Результатом начального этапа исследования является представление о том, КВВ какой минимальной амплитуды отображаются в спутниковых данных.

Следующий этап применения метода предполагает анализ результатов спутниковых наблюдений и данных приливной модели с привлечением контактных данных. Прежде всего необходимо выполнить анализ приливной динамики и энергетики по пп. 2.2.10-2.2.11, регистрация мезомасштабных вихрей по п. 2.2.8, выявление очагов генерации ВПВ по п. 2.2.12, определение интенсивности топографической генерации ВПВ по п. 2.2.13, а также определение режима приливного течения в соответствии с п. 2.2.14. После чего необходимо произвести сопоставление на композитных картах положений проявлений КВВ с очагами генерации ВПВ, топографическим наклоном и мезомасштабными вихревыми структурами по пп. 2.2.9, 2.2.15, 2.2.16 с привлечением данных об амплитудах ВПВ по п. 2.2.1. Конечным результатом исследования является количественная оценка вклада различных механизмов в генерацию КВВ.

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

Разработанный метод был применён в полном объёме для районов контактных измерений в южной части Баренцева моря и в Авачинском заливе Тихого океана. Они находятся южнее критической широты для доминирующего М2 полусуточного прилива, поэтому нет ограничений на расчёт топографического критерия генерации ВПВ. При применении данного метода для всей акватории Баренцева моря и Курило-Камчатского региона

возникают ограничения, связанные с субинерциальным характером ВПВ за критической широтой, а также с необходимостью использования контактных данных для расчёта числа Фруда и анализа характеристик ВПВ. Поэтому для оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ на всей акватории исследуемых регионов будет применён сокращённый вариант разработанного метода, предусматривающий использование только спутниковых наблюдений и данных моделей.

Разработан оригинальный метод, позволяющий количественно оценивать вклад различных механизмов в генерацию КВВ. Совместный анализ на композитных картах и диаграммах спутниковых наблюдений и результатов расчётов с использованием приливной модели, а также с привлечением данных контактных измерений позволяет количественно описывать вклад запрпятственного механизма, локальной дезинтеграции субинерциальных ВПВ, эволюции ВПВ, лучевого механизма, а также вихревой динамики в генерацию КВВ.

Глава 3. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых регионах с интенсивной приливной динамикой на примере южной части Баренцева моря и Авачинского залива Тихого океана

3.1 Подспутниковый эксперимент в южной части Баренцева моря

Для выявления особенностей отображения КВВ в данных спутниковых радиолокационных наблюдений и оценки модовой структуры поля КВВ, в южной части Баренцева моря был проведён подспутниковый эксперимент, включающий в себя определение фоновой гидрологической структуры вод, характеристик поля КВВ по данным контактных и спутниковых наблюдений.

Характеристики КВВ по контактными данным. В качестве примера, на рисунке 24 показан профиль вертикального распределения температуры и плотности по данным STD-зондирования в прибрежной зоне моря.

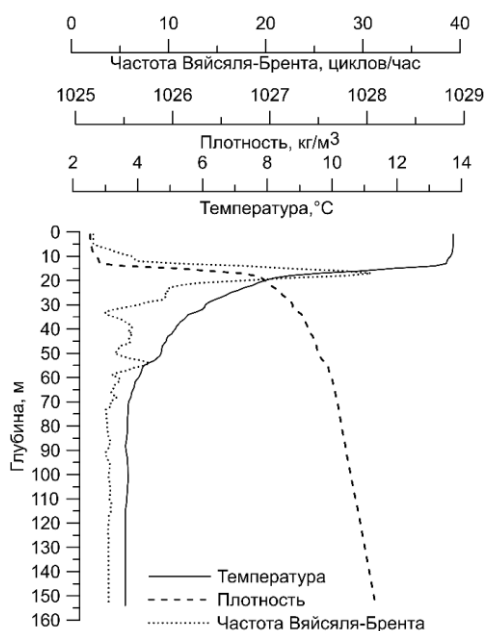


Рисунок 24 – профили вертикального распределения температуры, плотности, и частоты Вьяйсяля-Брента, полученные в рамках экспедиционных исследований по данным STD-зондирования, выполненного 9 августа 2016 года в прибрежной части Баренцева моря.

На рисунке 25 показана характерная для исследуемого района Баренцева моря пространственно-временная изменчивость температуры на станции многочасового зондирования. Колебания изотерм в термоклине охватывают слой 10—30 м. Длительность наблюдений не позволяла проследить параметры низкочастотных колебаний, однако отчётливо видно, что короткопериодные возмущения являлись доминирующими. В течение первого часа наблюдений термоклин не испытывал значительных колебаний, а начиная с 18:00 и далее в течение трёх часов в слое скачка прослеживается прохождение пакета КВВ с периодами менее 30 мин и амплитудой до 1,5 м. Согласно результатам наблюдений, интенсификация подобных возмущений в слое скачка происходила преимущественно в момент перехода от большой воды к малой, т.е. в отлив, или в период наступления малой воды. Анализ записей колебаний температуры показал, что возмущения, приуроченные к периоду отлива, проявляются на записях в виде ярко-выраженных цуговых систем.

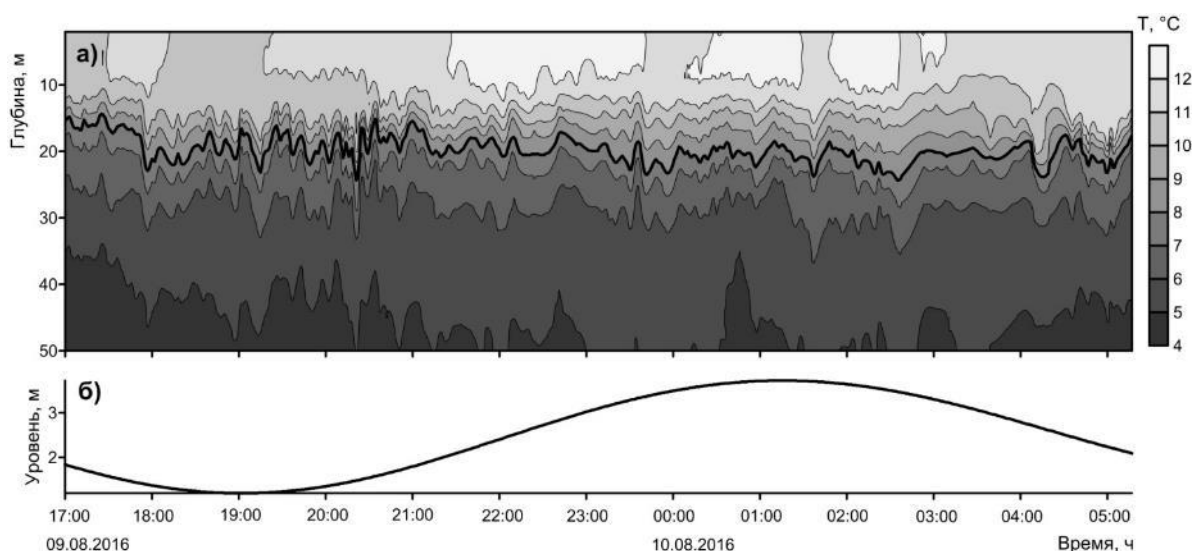


Рисунок 25 – Пример записи колебаний температуры (а) и колебаний уровня (б) с 17:00 09.08.2016 по 05:20 10.08.2016 в южной части Баренцева моря. Измерения выполнялись с помощью CTD-зонда CastAway. Выделенная линия — среднее положение термоклина по данным глубин залегания изотермы 8 °С.

За весь период наблюдений было зарегистрировано 270 КВВ (полных колебаний температуры на записях) с амплитудами от 0,5—4 м. В районе преобладало внутреннее волнение с периодом 15—20 мин, составляющее примерно 45% от общего числа наблюдений. Наиболее повторяющаяся амплитуда КВВ составила 1 м. Максимальная из зарегистрированных волн имела амплитуду 4 м и период 28 мин. Гистограмма повторяемости амплитуд КВВ показана на рисунке 26.

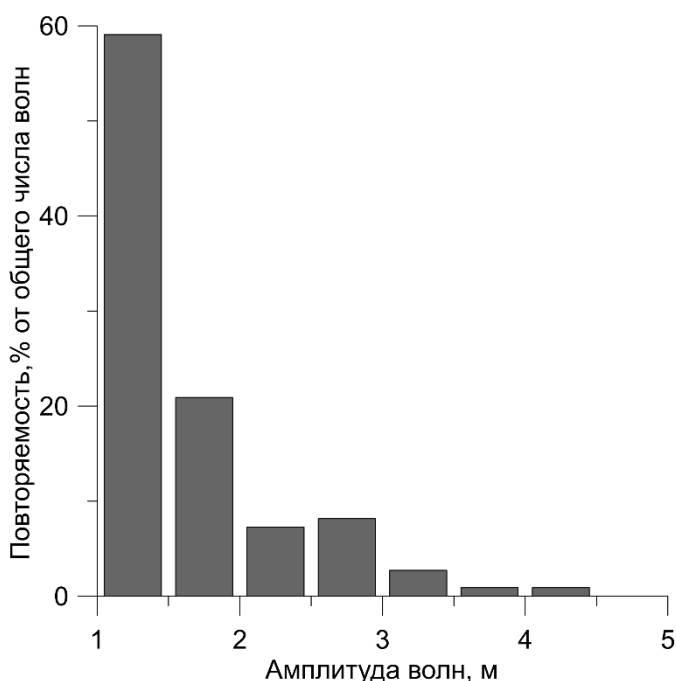


Рисунок 26 – Гистограмма повторяемости амплитуд КВВ по данным измерений в Баренцевом море

По данным STD-зондирований выявлена выраженная двухслойная фоновая стратификация, критерии которой совпадают с указанными в работе [Коняев, Сабинин, 1992]. Термоклин и пикноклин располагаются в слое 15—20 м, значения вертикальных градиентов температуры достигали 1,5 °С/м в слое скачка температуры, на профиле частоты Вяйсяля-Брента выделялся один ярко-выраженный максимум величиной в 30 циклов/час, совпадающий с положением скачка плотности (рисунок 24).

Принимая приближение о двухслойной стратификации (см. рисунок 24), можно считать, что в характеристиках измеренных короткопериодных колебаний температуры преобладают свойства первой моды внутренних волн. В пользу этого довода говорит и анализ полученных для всего ряда наблюдений зависимостей, связывающих период, длину и фазовую скорость волн. На рисунке 27а представлены зависимости периода КВВ (T) от длины волны (λ), на рисунке 27б — фазовой скорости (C_0) для случая двухслойной стратификации от длины волны. Точками на рисунке 27а отмечены экспериментальные оценки периодов КВВ. Из рисунка видно, что длины волн лежат в диапазоне 100—1400 м, а фазовые скорости — 25—50 см/с (рисунок 27б). Например, КВВ с периодом свыше 20 мин имеют длину от 500 м и более, а фазовую скорость 40—45 см/с. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.98$ указывает на то, что уравнение регрессии, приведённое на рисунке 27а, фактически полностью соответствует экспериментальным оценкам характеристик КВВ.

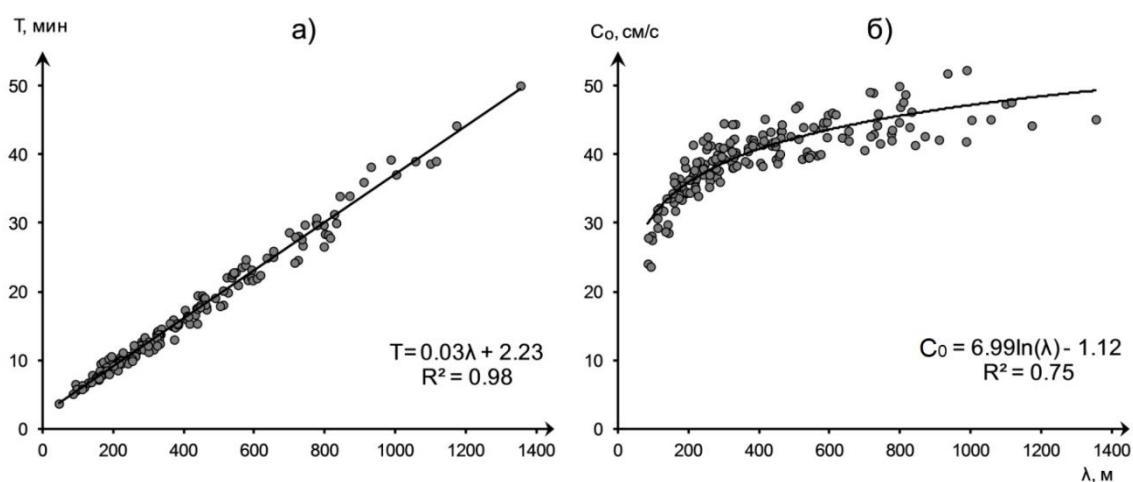


Рисунок 27 – Зависимость экспериментальных оценок периода КВВ (а) и экспериментальных оценок фазовой скорости (б) от длины волны.

Зависимость фазовой скорости от длины волны аппроксимирована логарифмической зависимостью с $R^2 = 0.75$ (рисунок 27б). Точки имеют более выраженный разброс относительно аппроксимирующей функции, чем у зависимости периода КВВ от длины волны. Это связано с тем, что при

расчёте значений фазовых скоростей не учитывается фоновое течение и дрейф судна. Стоит отметить, что для КВВ длиной менее 200 м наблюдается заметное ухудшение точности описания характеристик волн в принятом приближении.

Характеристики КВВ по данным радиолокационных наблюдений. На 20 РЛИ, соответствующих периоду судовых работ, были детектированы поверхностные проявления КВВ. В целом было зарегистрировано 82 пакета поверхностных проявлений КВВ, состоящих из нескольких волн, детальные характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики поверхностных проявлений КВВ по данным анализа РЛИ

Дата	Кол-во КВВ	Длина лидирующего гребня, км			Длина лидирующего гребня, км			Количество волн в пакете, шт		
		Макс	Мин	Среднее	Макс	Мин	Среднее	Макс	Мин	Среднее
08.08	10	42,8	6,5	25,4	1,2	0,4	0,7	10	1	3
09.08	9	46,2	8,6	21,9	1,1	0,5	0,8	4	1	2
10.08	3	27,1	17,2	23,5	0,8	0,6	0,7	2	1	2
11.08	11	76,7	9,9	30	1,2	0,4	0,7	7	1	3
17.08	5	34,5	12,1	19,4	1	0,7	0,8	3	1	2
18.08	6	54,4	19	38,1	1,2	0,8	1	6	3	4
20.08	12	58	8,5	29,1	1,9	0,5	1	7	1	3
21.08	2	18	12,3	15,2	1,3	1,3	1,3	3	1	2
22.08	24	88	5	31,2	1,6	0,3	0,8	12	1	4
23.08	11	51	11,4	25,6	1,7	0,5	0,7	5	1	3

Из таблицы видно, что количество волн в пакете КВВ варьировалось от 1 до 10, при этом часто регистрировались и одиночные проявления волн. Длина лидирующего гребня лежит в диапазоне 5—88 км, составляя в среднем 27 км. Длина волны в пакетах варьируется от 0.3 до 1.9 км, составляя в среднем 0.7 км.

Положения лидирующих гребней волн в пакете представлены на рисунке 28.

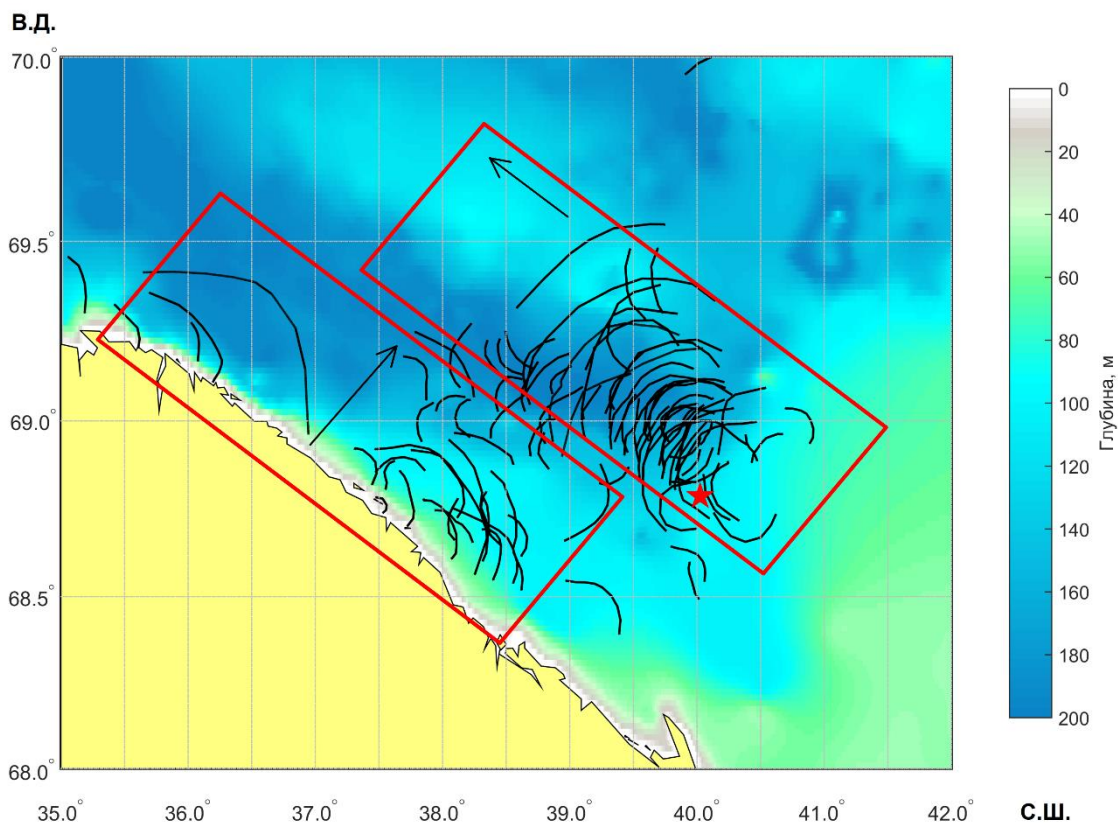


Рисунок 28 – Положения лидирующих гребней поверхностных проявлений КВВ, зарегистрированных на РЛИ за период с 8 по 23 августа 2016 года, нанесённые на карту глубин района работ. Красными рамками выделены группы проявлений, имеющих общее характерное направление распространения, указанное стрелкой. Красной звездой на карте обозначено местоположение судна в момент регистрации КВВ, проявление которых зарегистрировано в спутниковых данных.

В проявлениях волн выделялись две группы пакетов с характерными для них преобладающими направлениями распространения. Первое направление представлено большой группой пакетов, которые двигались преимущественно с юго-востока на северо-запад. Второй группе свойственно направление движения от берега, при этом часть таких волн находилась юго-западнее района судовых работ, не достигая его при распространении от

берега. Также были зарегистрированы отдельные пакеты внутренних волн, которые не имеют преимущественного направления. Несмотря на различные направления распространения волн в группах пакетов, существенного различия в их характеристиках обнаружено не было. В работе [Серебряный, 2002] сообщается, что по данным контактных измерений при помощи антенны распределённых датчиков в прибрежной зоне Баренцева моря на расстоянии около 2 км от берега также выделяются два преобладающих направления распространения пакетов волн. Однако в отличие от двух характерных направлений, выявленных при анализе спутниковых данных, в работе [Серебряный, 2002] пакеты КВВ следуют от берега и к нему. С одной стороны, в настоящей работе при использовании спутниковых данных широкого пространственного охвата выделено отличное от работы [Серебряный, 2002] характерное направление волн с юго-востока на северо-запад, а с другой стороны, волны, идущие к берегу в настоящей работе не зарегистрированы.

Сопоставление характеристик КВВ по данным контактных и спутниковых наблюдений. На РЛИ от 23 августа 17:28 зарегистрирован пакет КВВ (рисунок 29а) с длиной лидирующего гребня около 10 км, который находился на расстоянии 6 км от судна, производившего измерения. При проведении геометрических построений на снимке установлено, что проявление пакета КВВ состоит из 6 волн, со средней длиной в 500 м. Фазовая скорость поверхностного проявления по результатам расчёта составила 0.53 м/с. Учитывая расстояние до судна в момент регистрации снимка, поверхностное проявление должно достигнуть судна около 20:30. Обратившись к записи колебаний температуры по результатам измерений 23 августа (показанной на рисунке 29б), можно видеть, что в период с 20:10 до 21:15 на записи присутствует ярко-выраженный пакет КВВ с амплитудами 2,5—4 м и периодами около 15 мин.

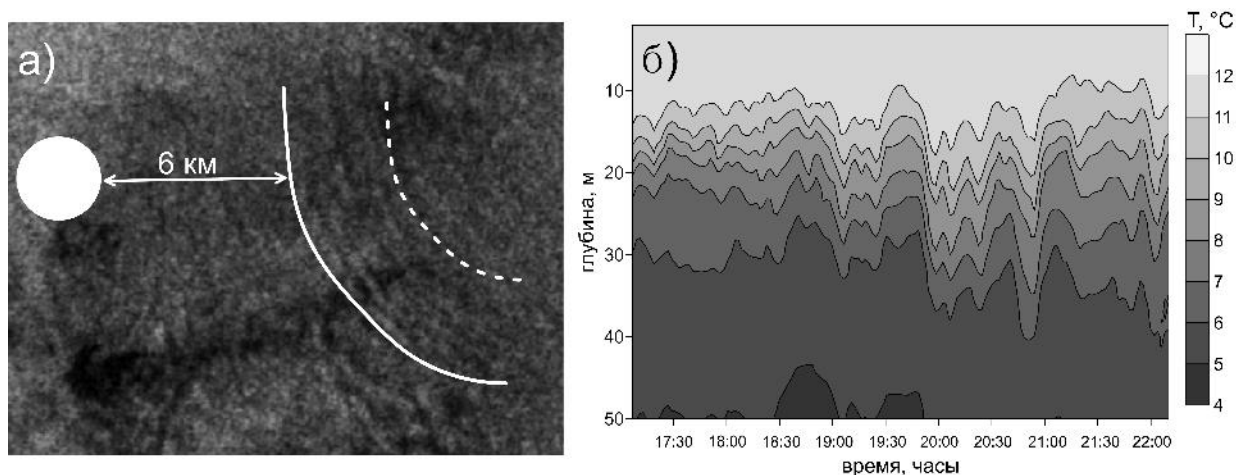


Рисунок 29 – Сопоставление данных спутниковых и контактных наблюдений: а) отконтрастированный фрагмент РЛИ с аппарата Sentinel 1А от 23 августа 2016 года, содержащий поверхностное проявление КВВ, лидирующий гребень которого выделен белой сплошной линией, а замыкающий гребень – белой пунктирной линией; белый эллипс указывает область нахождения судна во время контактных измерений; б) фрагмент записи колебаний температуры, где с 20:10 по 21:15 наблюдаются КВВ, зарегистрированные на РЛИ.

Фазовая скорость цуга внутренних волн, зарегистрированного судном в 20:10 по результатам расчёта по выражению (10) составляет 0,57 м/с, а длина волны, определённая с использованием среднего периода цуга и фазовой скорости – 480 м. Фазовая скорость, рассчитанная с использованием длины волны проявления КВВ в 500 м выражению (9), составила 0,53 м/с. Таким образом, характеристики цуга КВВ, зарегистрированного по контактными данным и проявления КВВ, зарегистрированного по спутниковым данным, весьма близки. Это позволяет с высокой степенью уверенности утверждать, что, во-первых, и по спутниковым, и по контактными данным регистрируется именно цуг внутренних волн, во-вторых, что КВВ, расположенные в пикноклине, залегающем на глубине 15 метров, с амплитудой 2,5—4 м, отчётливо регистрируются на морской поверхности в виде проявлений с длиной волны около 500 м и длиной лидирующего гребня около 15 км.

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 волновых пакетов: во-первых, КВВ 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. Цуги КВВ по контактными данным проявляются с приливной периодичностью, однако ответить на вопрос о механизмах генерации зарегистрированных КВВ можно только путём синтеза данных контактных измерений, спутниковых наблюдений и данных глобальной приливной модели в рамках разработанного метода.

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 2.5—4 м отчётливо отображаются на морской поверхности в виде пакетов волн с длинами порядка 500 м.

3.2 Поспутниковый эксперимент в Авачинском заливе Тихого океана

Для выявления особенностей отображения КВВ в данных спутниковых радиолокационных наблюдений, в Авачинском заливе был выполнен подспутниковый эксперимент, включающий в себя определение фоновой гидрологической структуры вод, характеристик поля КВВ по данным контактных и спутниковых наблюдений.

Описание гидрологической обстановки во время проведения экспедиционных работ. В ходе анализа данных STD-зондирований были выявлены долговременные изменения положения пикноклина, произошедшие за время проведения экспедиционных работ. На рисунке 30а представлены вертикальные профили плотности, полученные в различное время.

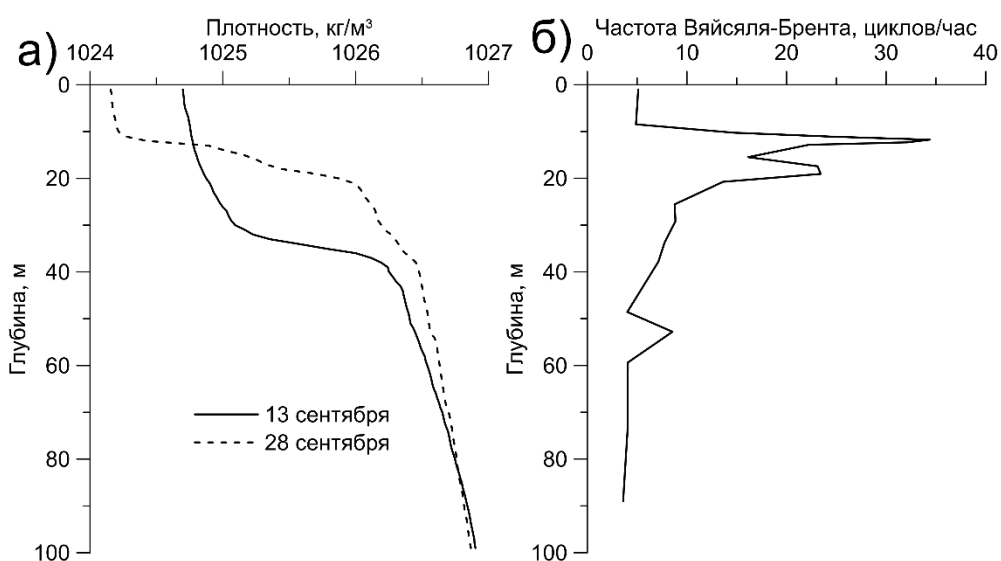


Рисунок 30 – Профили вертикального распределения гидрологических характеристик: а) – плотности б) – частоты Вэйсёля – Брента.

Из рисунка 30а видно, что во время проведения экспедиционных работ происходил подъем пикноклина. Так, на начало работ пикноклин залегал в слое от 5 до 45 м, градиент плотности в пикноклине составлял 0,08 у.е./м, а толщина верхнего слоя всего 5 м. На момент окончания работ пикноклин

залегал в слое от 10 до 20 м, градиент плотности в пикноклине составлял 0,18 у.е./м, а толщина верхнего перемешанного слоя – 10 м. Рассмотренная эволюция вертикальных профилей температуры по-видимому обуславливалась совместным действием штормового поверхностного волнения и мезомасштабных меандров Камчатского течения, зарегистрированных на космических снимках в оптическом диапазоне (рисунок 31).

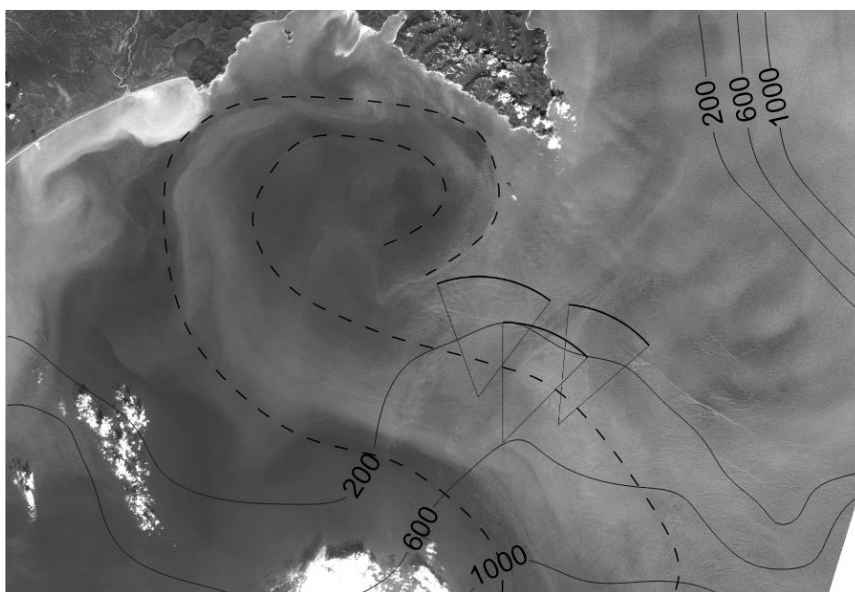


Рисунок 31 – Пример регистрации меандра Камчатского течения на спутниковом изображении Landsat-8 от 22 августа 2018 г. (штриховыми линиями на изображении обозначено положение меандра, сплошными толстыми линиями – проявления КВВ, сплошными тонкими линиями – предполагаемые места генерации КВВ).

На рисунке 30б приведены вертикальные профили частоты Вьяйсяля – Брента (ЧВБ) на момент окончания работ. Видно, что слой повышенных значений частоты Вьяйсяля – Брента простирается от 10 до 30 м. Максимальное значение ЧВБ составляет более 30 циклов в час.

Характеристики КВВ по данным контактных наблюдений. По результатам обработки записей колебаний температуры (рисунок 32) получена первичная статистика характеристик волн, а также выполнены оценки повторяемости амплитуд КВВ.

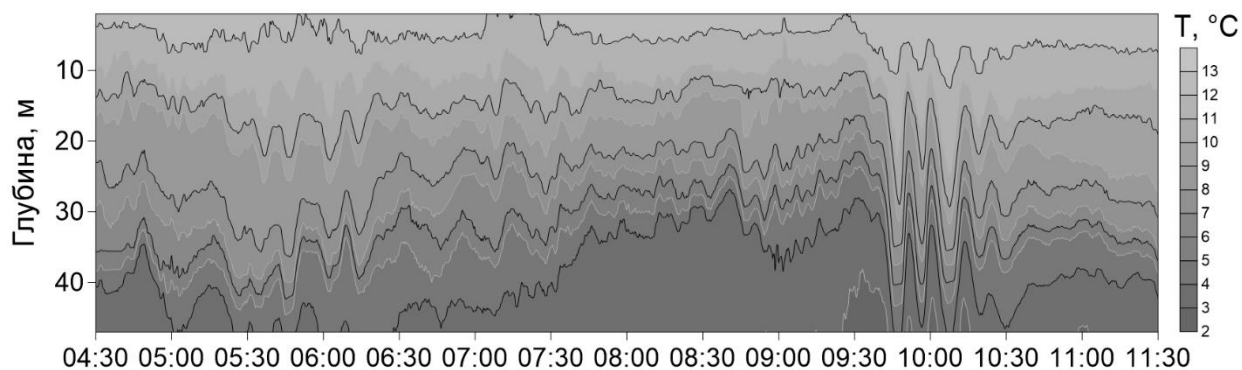


Рисунок 32 – Пример записи колебаний температуры по данным измерений гирляндой датчиков РМЕ от 16 сентября 2018 г.

Из рисунка 32 видно, что термоклин испытывал выраженные колебания с периодом в несколько часов, на которые накладываются короткопериодные колебания амплитудой от 1 до 2 м с периодами от 5 до 30 мин. Однако в конце представленной записи отмечались резкие колебания температуры, имеющие ярко выраженную цуговую структуру. Они представляют собой пакет из трёх волн амплитудой более 5 м и периодом колебаний около 10 мин, за которыми следует хвост из волн меньшей амплитуды. Среднее время прохождения цуга составляло немногим более получаса. Волны в пакете обладают признаками нелинейности, что проявляется в асимметрии их формы и значительной крутизне (более 0,1). Это позволяет отнести их к ИВВ, аналогично тому, как это сделано в [Сабинин, 2004].

Всего на записях температуры обнаружено 177 колебаний. Волны имеют средний период около 10 мин. Максимальная амплитуда волны составляет 8 м. Гистограмма повторяемости амплитуд КВВ показана на рисунке 33.

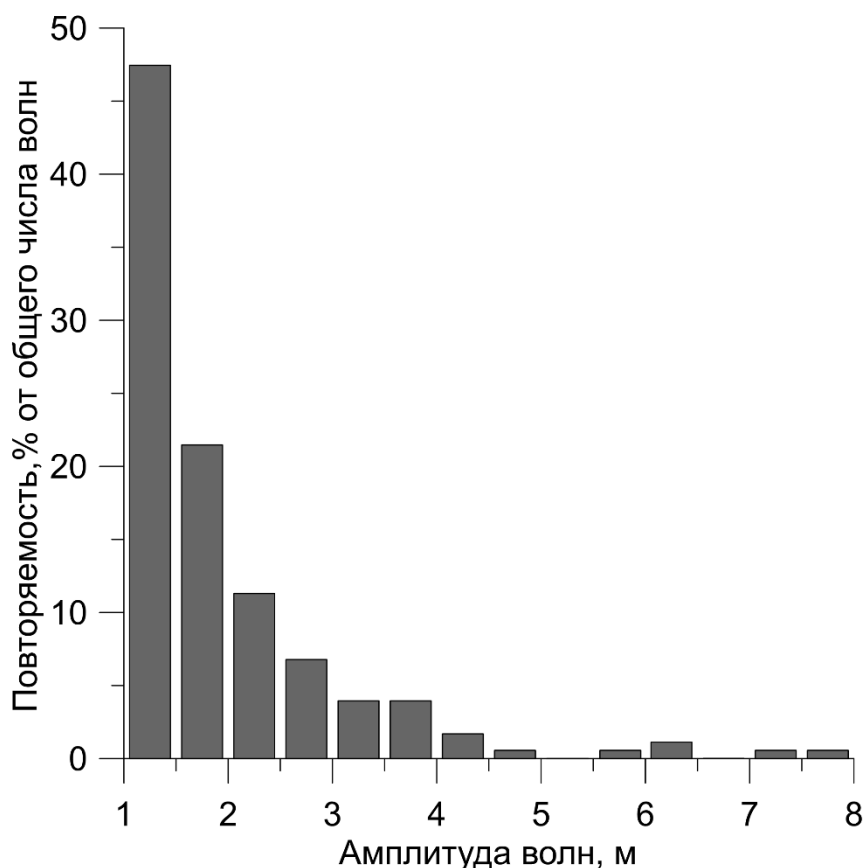


Рисунок 33 – Гистограмма повторяемости амплитуд КВВ в Авачинском заливе

Повторяемость ИВВ с амплитудами от 5 до 8 м достигает 6 % от общего числа волн, при этом КВВ с амплитудой 8 м регистрируются два раза за период наблюдений.

На рисунке 34 показано сопоставление моментов регистрации интенсивных и близких к интенсивным (сильно нелинейных волн амплитудой от 4,5 до 5 м) цугов КВВ с модельными значениями скорости и направления приливных течений в точке, ближайшей к точкам полигона, по

данным ассимиляционного продукта *The Mercator global ocean operational analysis system*.

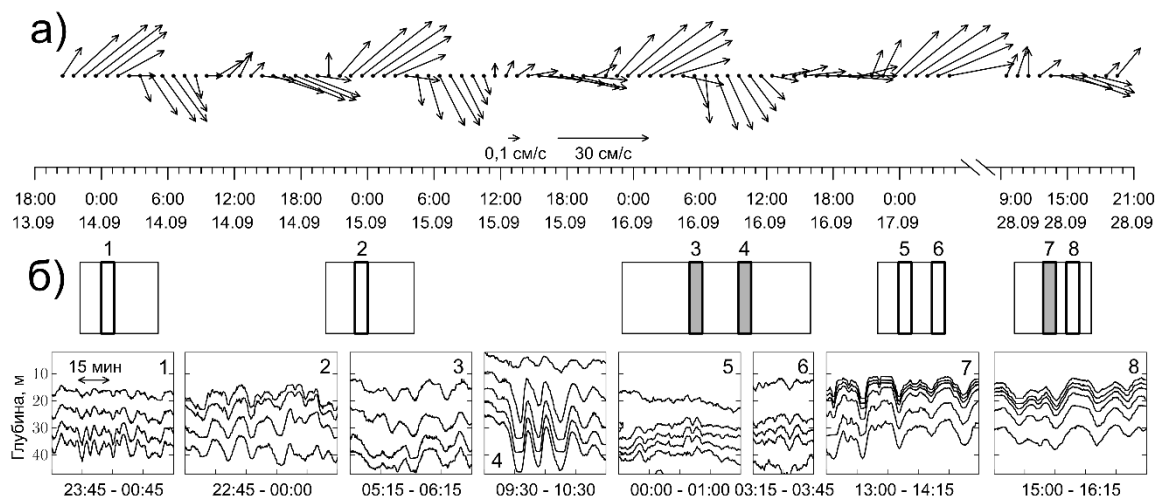


Рисунок 34 – Сопоставление записей колебаний температуры и приливных течений с 13 по 28 сентября 2018 г.: а)– график модуля и направления приливных течений; б) – Временные рамки записей колебаний температуры (вверху) и их фрагменты, иллюстрирующие цуги близких к интенсивным и интенсивных КВВ (внизу). Тонкими рамками показаны записи колебаний температуры (ось времени совпадает с графиком течений), жирными рамками (1,2,5,6,8) – моменты регистрации цугов КВВ, жирными рамками с серой заливкой (3,4,7) – моменты регистрации цугов ИВВ.

Из рисунка 34 видно, что волны, близкие к интенсивным, и ИВВ регистрируются в моменты, когда модуль приливных течений близок к максимальному. Анализ записей температуры показал, что ИВВ и близкие к интенсивным волны регистрируются с периодичностью 5–7 ч, что совпадает с результатами исследований, выполнявшихся здесь ранее [Рао, Не, 2002]. В качестве примера можно привести запись от 16 сентября (см. рисунок 32), на которой ИВВ регистрируются с периодичностью около 5 ч.

Характеристики КВВ по спутниковым данным. Сравнение характеристик КВВ по контактными и спутниковым данным. В общей сложности на 9 РЛИ зарегистрировано 72 поверхностных проявления пакетов КВВ с длиной волны в пакете от 200 до 800 м при средней длине волны в 400 м. Протяжённость лидирующего гребня в пакете КВВ варьируется от 4 до 39 км, в среднем составляя 14 км. Количество волн в пакете варьируется от 2 до 10. Зная характеристики поверхностных проявлений, можно примерно оценить площадь акватории, занятую ими. Эта площадь вычисляется как произведение длины лидирующего гребня проявления на длину волны и на количество волн в пакете. Она составила $\sim 1700 \text{ км}^2$. Учитывая, что приблизительная площадь акватории Авачинского залива 4800 км^2 , можно сказать, что проявления КВВ занимают 35 % площади акватории. Положение лидирующих гребней проявлений пакетов КВВ показано на рисунке 35а. Как видно из рисунка, наибольшее число поверхностных проявлений КВВ зарегистрировано в районе свала глубин у изобат 500–1500 м. Подавляющее число проявлений КВВ направлено к берегу. Так как работы на акватории Авачинского залива производились в условиях присутствия меандров Камчатского течения, обнаруженных на многих проанализированных спутниковых изображениях в оптическом диапазоне (см. рисунок 31), можно предположить, что в мелководном регионе к генерации КВВ приводит как взаимодействие мелко залегающего обострённого пикноклина с меандрами, так и взаимодействие приливных течений с неровностями дна. Небольшое число поверхностных проявлений зарегистрировано в районе изобат 2–3 км. Проявления КВВ в глубоководном районе не имеют ярко выраженной тенденции в направлении распространения.

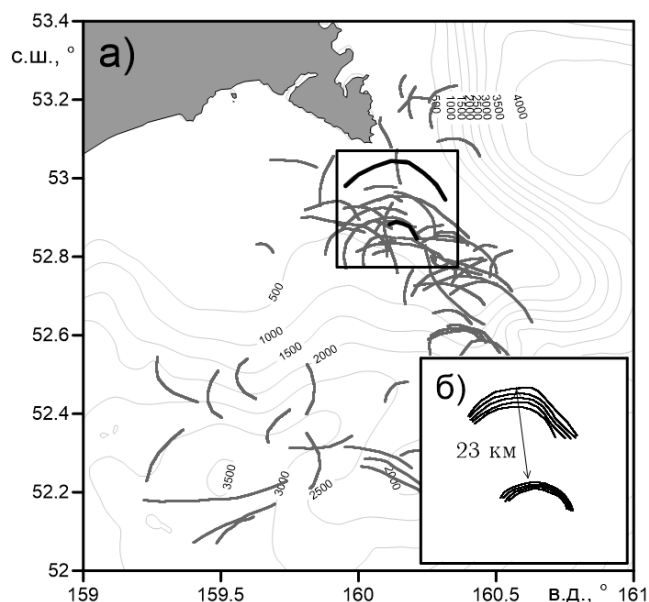


Рисунок 35 – Поверхностные проявления КВВ по результатам анализа спутниковых изображений: а) – положения поверхностных проявлений КВВ на акватории Авачинского залива (серые линии); б) – увеличенное изображение поверхностных проявлений КВВ в выделенной области (черные линии), распространяющихся с приливной периодичностью.

Фазовая скорость внутренних волн по спутниковым данным определялась с использованием длины волны, измеренной на снимке, а также с привлечением данных о вертикальном распределении плотности в точке, максимально приближенной к местоположению проявления, в соответствии с дисперсионным соотношением для внутренних волн в двухслойном приближении стратифицированной среды. Длина волн, определенная по расстоянию между соседними гребнями поверхностных проявлений, составляет 300–400 м. Для указанных значений длины волны фазовая скорость составляет около 0,6 м/с.

На снимках присутствуют сигнатуры, регулярно распространяющиеся в одном направлении – от шельфа к берегу (рисунок 35б). Если полагать, что они имеют приливной характер генерации, то, измерив на снимке расстояние между лидирующими гребнями пакетов и разделив его на время приливного цикла 12,4 ч, можно определить их фазовую скорость. Результаты расчёта

показали, что фазовая скорость двух зарегистрированных проявлений составляет около 0,6 м/с, что близко к ранее полученным оценкам по дисперсионному соотношению. Можно приблизительно оценить положение их источника генерации, проведя нормаль к касательным дуги лидирующего гребня в нескольких точках (аналогичный подход применен в работе [Зимин и др., 2014]). Геометрические построения на снимке, аналогичные приведённым на рисунке 32, показали, что нормали, проведённые к нескольким касательным дуги лидирующего гребня, сходятся в области у изобаты 500 м, где располагается бровка шельфа.

Поверхностное проявление КВВ, зарегистрированное на спутниковом изображении *Sentinel-2B* в 10:53 28 сентября 2018 г. (рисунок 36а), находится в непосредственной близости от положения судна-носителя, выполняющего контактные измерения. Расстояние от лидирующего гребня поверхностного проявления до судна-носителя составляет 7 км. Это проявление, с учетом его фазовой скорости, достигнет судна через 4 ч от момента получения снимка спутником, то есть около 15:00 28 сентября. На рисунке 36б представлена запись колебаний температуры гирляндой датчиков *PME* от 28 сентября 2018 г.

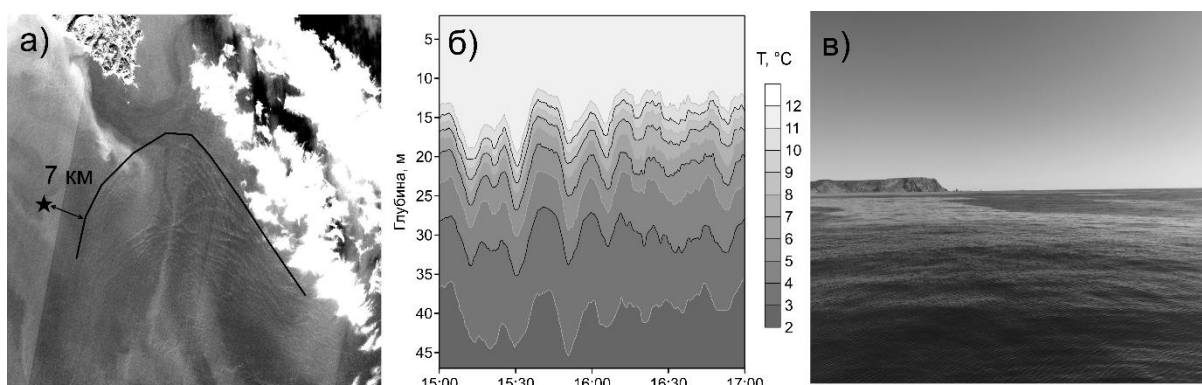


Рисунок 36 – Сопоставление результатов спутниковых, визуальных и контактных наблюдений за КВВ: а) – фрагмент изображения спутника *Sentinel-2B*, 10:53 28 сентября, 2018 г.; б) – фрагмент записи колебаний температуры, 15:00–17:00 28 сентября 2018 г.; в) – фотография сликов на поверхности Авачинского залива, 15:21 28 сентября 2018 г.

Как видно из рисунка, с 15:30 до 16:15, то есть в момент, весьма близкий к расчётному времени, регистрируется ярко выраженный цуг КВВ с амплитудами 2,5–4 м. Данные визуальных наблюдений (рисунок 36в) также подтверждают наличие в указанное время на поверхности акватории ярко выраженных сликов, что является признаком, свидетельствующим о прохождении цуга КВВ. Фазовая скорость данного проявления, определённая с привлечением контактных данных, совпадает с результатами наблюдений и расчётов, выполненных на основе выделенных последовательных пакетов. Если принять во внимание, что на записи колебаний температуры цуг волн зарегистрирован в момент наибольшего модуля приливного течения (см. рис. 34), то не вызывает сомнений приливной характер генерации обнаруженного проявления.

Анализировалось поле КВВ в Авачинском заливе по данным контактных измерений и спутниковых наблюдений. На записях колебаний температуры по данным экспедиционных исследований в Авачинском заливе 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

взаимодействии мелкого обострённого пикноклина с меандрами Камчатского течения, обнаруженными на спутниковых изображениях.

Сопоставление синхронных данных спутниковых, контактных и визуальных наблюдений выявило, что КВВ с амплитудами 2,5–4 м и длинами 300–400 м имеют отчётливые проявления на морской поверхности.

3.3 Сравнение характеристик КВВ в южной части Баренцева моря и в Авачинском заливе Тихого океана

Сравнение результатов контактных измерений. Характерные профили вертикального распределения плотности для районов измерений в юго-восточной части Баренцева моря (около мыса Святой нос) и Авачинском заливе представлены на рисунке 37а.

Распределение плотности в районах проведения измерений близко к картине двухслойной стратификации. Толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в Авачинском заливе значительно больше, чем у мыса Святой Нос (30 м против 10 м), при этом градиенты плотности в пикноклине приблизительно равны и составляют около 0,12 у.е. м⁻¹. Равенство градиентов плотности на полигонах измерений позволяет производить непосредственное сравнение характеристик КВВ, несмотря на то, что экспедиционные измерения были выполнены в разные месяцы.

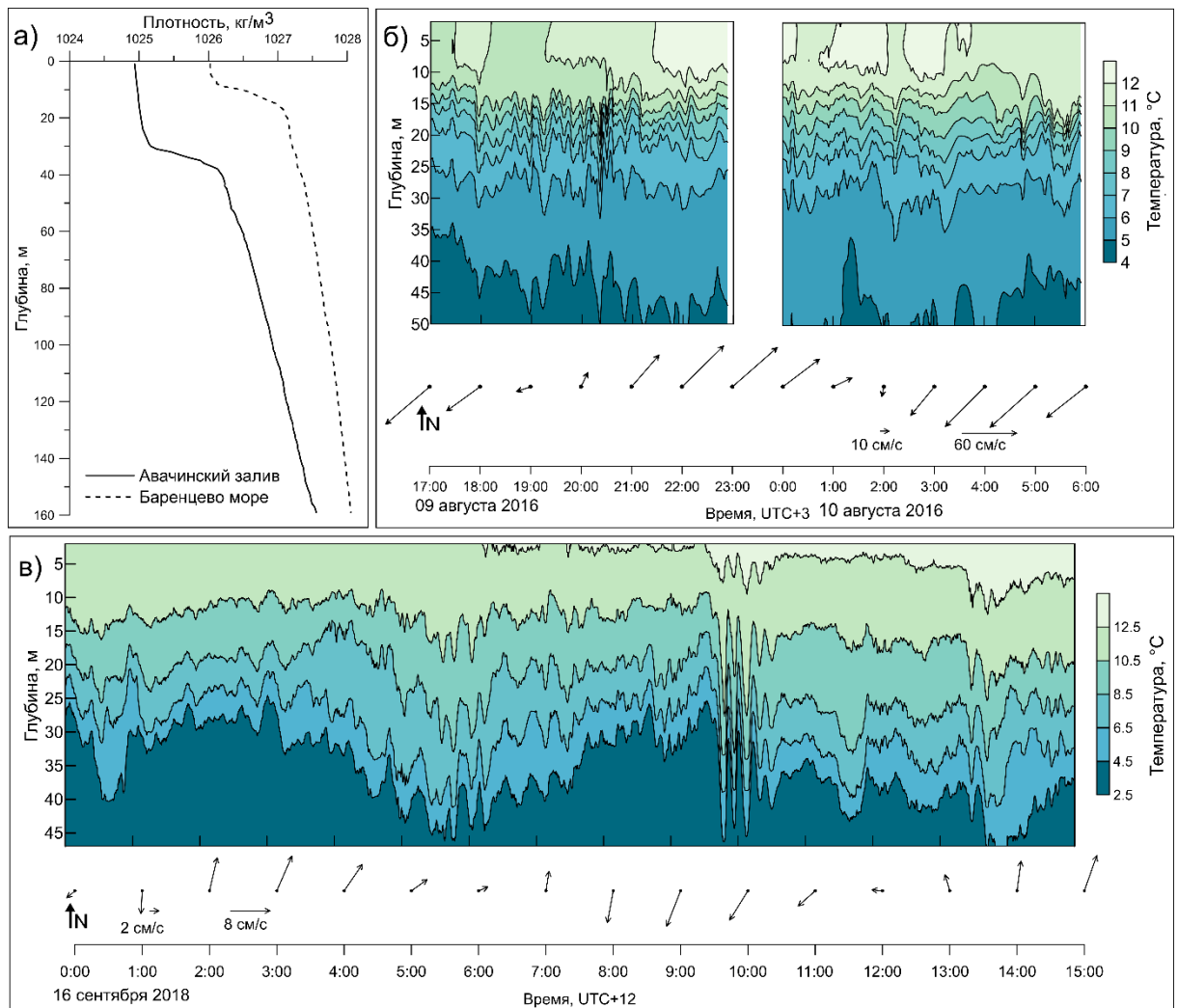


Рисунок 37 – КВВ по контактными данным: а) – Характерные профили вертикального распределения плотности по данным STD-зондирований в южной части Баренцева моря (от 09 августа 2016) и в Авачинском заливе (от 05 сентября 2018); б) – запись колебаний изотерм и ход приливных течений гармоника M2 для Баренцева моря; в) – Запись колебаний изотерм и ход приливных течений гармоника M2 для Авачинского залива.

На рисунках 37б и 37в показаны записи колебаний изотерм, совмещённые с векторной диаграммой хода приливных течений для района около мыса Святой Нос и Авачинского, соответственно. У мыса Святой Нос доминирующими являются короткопериодные колебания со средним периодом 15 минут и амплитудой до 3 метров. Полусуточная изменчивость положения изотерм наблюдается в слое 35-50 метров и слабо выражена.

Около 05:00 по локальному времени отмечается увеличение амплитуды КВВ относительно промежутка времени с 02:00 до 05:00, при этом величина приливного течения максимальна. В остальной временной промежуток связь короткопериодных колебаний с ходом вектора приливных течений слабо выражена.

В Авачинском заливе в толще воды прослеживаются длиннопериодные колебания изотерм, обусловленные полусуточной приливной динамикой. Наиболее ярко выражены колебания на глубине от 5 до 40 м. На фоне полусуточных колебаний изотерм ярко выделяются КВВ с периодом около 15 минут и амплитудой до 4 метров, которые охватывают слой от 5 до 40 м. Около 10:00 по локальному времени был зарегистрирован цуг ИВВ, состоящий из трёх волн с периодом около 10 минут. При этом первая волна в цуге имеет амплитуду 8 м, а замыкающая – 6 м. Данный цуг был зарегистрирован в фазу сильных приливных течений.

В таблице 2 показаны характеристики КВВ у мыса Святой Нос и в Авачинском заливе по данным контактных измерений.

Таблица 2. Сравнение характеристик КВВ, полученных по данным контактных наблюдений у мыса Святой Нос и в Авачинском заливе

Характеристика		Баренцево море	Авачинский залив
Наблюдаемая амплитуда, м	средняя	1,5	2
	максимальная	4	8
Ожидаемая амплитуда, м	за 10 дней	4,5	5
	за 30 дней	5	11,5
Средний период, мин		15	8
Перемежаемость, %	прилив	45	90
	отлив	45	83
Фазовая скорость, м с ⁻¹		0,57	0,65
Параметр Урселла	для сред. набл. амплитуды	5	7
	для макс. набл. амплитуды	15	28

Средний период и фазовая скорость КВВ у мыса Святой Нос и в Авачинском заливе практически совпадают. Существенные различия состоят в наблюдаемой и ожидаемой амплитуде волн. Так, у мыса Святой Нос за период наблюдений не были зарегистрированы ИВВ, а расчёт ожидаемых амплитуд волн показал, что ИВВ с амплитудой 5 м могут ожидаться 1 раз за 30 дней. Выполненные ранее измерения в данном районе [Серебряный, 2002] свидетельствуют о регистрации ИВВ амплитудой до 6 метров на расстоянии около 1 мили от берега. В настоящем исследовании измерения выполнялись мористее. В Авачинском заливе ИВВ с амплитудой до 8 метров регистрировались 6 раз за весь период наблюдений, а 1 раз за месяц может ожидаться волна с амплитудой до 12 м. Перемежаемость внутреннего волнения у мыса Святой Нос не зависит от фазы прилива и составляет 45%. В Авачинском заливе перемежаемость КВВ в фазу прилива достигает 90%, а в фазу отлива – 83%, что указывает на отсутствие зависимости характеристик КВВ от фазы прилива. Но если у мыса Святой Нос КВВ регистрируются на протяжении приблизительно половины времени измерений, то в Авачинском заливе на протяжении практически всего времени измерений. Параметр Урселла свидетельствует о том, что в волнах от 3 до 4 м у мыса Святой Нос и в Авачинском заливе дисперсия преобладает над нелинейностью. Внутренние волны амплитудой 4 м у мыса Святой Нос являются слабо нелинейными, а волны около 8 м в Авачинском заливе являются сильно нелинейными. Это указывает на высокую вероятность обрушения интенсивных волн, что может приводить к интенсификации вертикального обмена в водной толще.

Спектр, рассчитанный по вертикальным колебаниям изотерм в слое пикноклина, сравнивался с высокочастотной частью теоретического спектра Гаррета-Манка (рисунок 38).

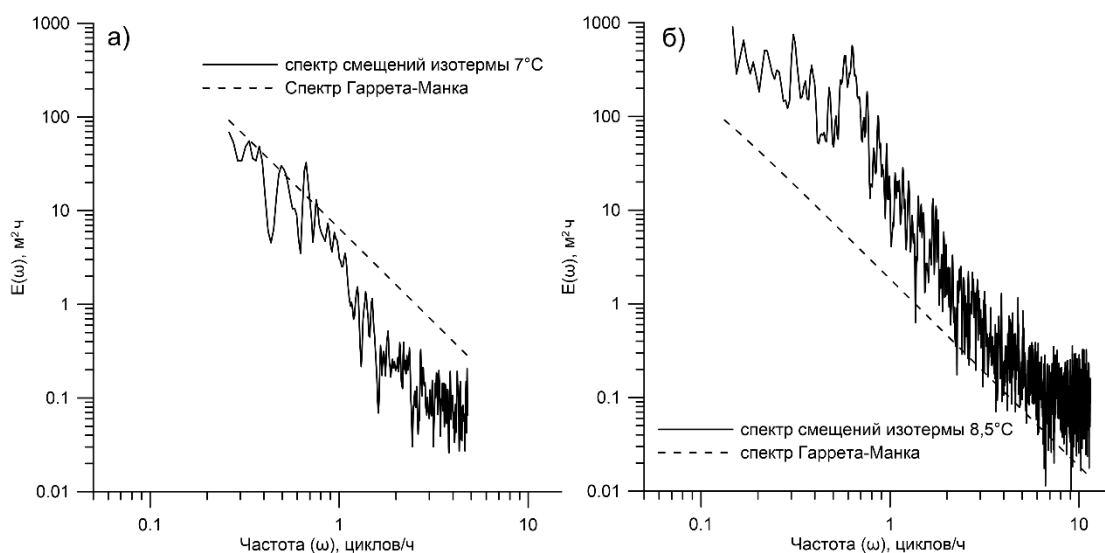


Рисунок 38 – Спектр вертикальных смещений изотерм в слое пикноклина, совмещённый с теоретическим спектром Гаррета-Манка: а) – По результатам измерений у мыса Святой Нос; б) – По результатам измерений в Авачинском заливе.

Из рисунка 38 можно видеть, что нижняя граница диапазона изменчивости частоты колебаний изотерм приблизительно одинакова в Баренцевом море и в Авачинском заливе и составляет около 0,2 цикла в час. В диапазоне частот от 0,3 до 5 циклов/час энергия колебаний в районе мыса Святой Нос ниже, чем в Авачинском заливе, при этом она не превышает энергию теоретического спектра Гаррета-Манка. В Авачинском заливе энергия колебаний практически на всех частотах выше, чем энергия спектра Гаррета-Манка. Это можно объяснить наличием в Авачинском заливе более интенсивного внутреннего волнения, а именно ВПВ с амплитудой до 10 метров и цугов КВВ с высокой перемежаемостью. Можно предположить, что в Авачинском заливе спектр колебаний термоклина в большей степени обогащается на частотах выше 1 цикла/ч вследствие диссипации ВПВ.

Сравнение характеристик КВВ по данным спутниковых наблюдений.
По данным анализа РЛИ в районе измерений у мыса Святой Нос наблюдается сложная картина проявлений цугов КВВ (см. рисунок 28). Проявления пакетов КВВ наблюдаются повсеместно в окрестностях полигона проведения экспедиционных работ. Средняя глубина, над которой

регистрируются проявления составляет 120 м, а максимальная – 200 метров. В Авачинском заливе положение проявлений КВВ приурочено к материковому склону между изобатами 200 и 800 м, а также к отмели, около м. Шипунский, то есть проявления КВВ наблюдаются не повсеместно, а на довольно узком участке акватории (см. рисунок 35). Незначительное число проявлений зарегистрировано над глубинами, превышающими 2000 м. В таблице 3 представлены характеристики зарегистрированных проявлений КВВ.

Таблица 3. Сравнение характеристик проявлений КВВ по данным спутниковых наблюдений у мыса Святой Нос и Авачинском заливе

Характеристика		м. Святой Нос	Авачинский залив
Общее количество проявлений		93	72
Кол-во волн в пакете	среднее	3	3
	максимальное	12	14
Длина волны, м	средняя	800	400
	максимальная	1900	800
Длина лидирующего гребня, км	средняя	26	14
	максимальная	50	39
Фазовая скорость, м/с		0,51	0,6

Хотя количество волн в пакете для обоих районов является одинаковым, около мыса Святой Нос по сравнению с Авачинским заливом регистрировались более крупные пакеты как по длине лидирующего гребня, так и по длине волн. Одним из объяснений этого факта может являться то, что глубина залегания пикноклина у мыса Святой Нос была значительно меньше, чем в Авачинском заливе, что определяет более благоприятные условия для отображения КВВ на морской поверхности. Фазовая скорость КВВ, рассчитанная по данным измерений длины волны на снимках с привлечением данных о вертикальном распределении плотности, в рассматриваемых районах имеет схожие значения и совпадает с результатами расчётов по данным контактных наблюдений. Это косвенно подтверждает,

что регистрируемые на морской поверхности сигнатуры действительно являются отображением КВВ.

На рисунке 39 показаны круговые гистограммы повторяемости направлений распространения проявлений КВВ в Баренцевом море и Авачинском заливе.

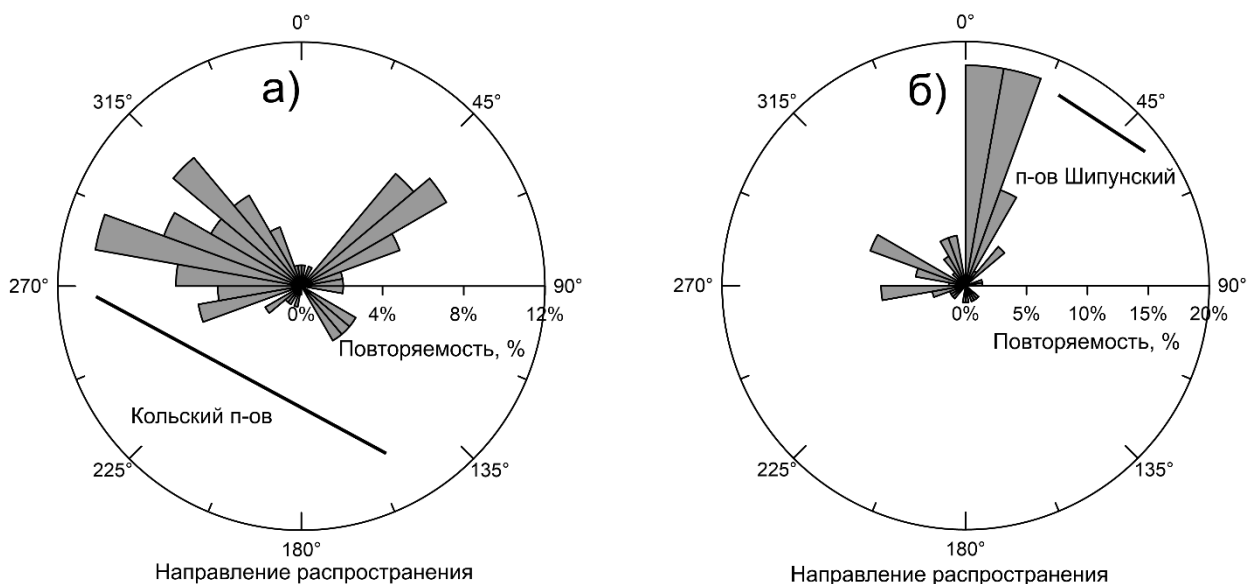


Рисунок 39 – Круговые гистограммы повторяемости направлений распространения проявлений КВВ а) у мыса Святой Нос; б) в Авачинском заливе. Жирной наклонной линией показано относительное положение береговой линии.

Около мыса Святой Нос преобладает два характерных направления распространения: вдоль берега на север-запад и от берега на северо-восток. В Авачинском заливе преобладающее большинство проявлений КВВ распространяется в практически строго на север в сторону мыса Шипунского. В каждом из рассматриваемых районов направления распространения находятся в довольно узком диапазоне изменчивости, что может предположительно свидетельствовать о доминировании одного из механизмов (источников) генерации КВВ.

Сравнение особенностей приливной динамики. Согласно [Гидрометеорология..., 1990] в южной части Баренцева моря в колебаниях уровня доминирует правильный полусуточный M2 прилив, а в Авачинском заливе – неправильный полусуточный [Белоненко и др., 2011]. Поэтому для

анализа приливной динамики в южной части Баренцева моря и Авачинском заливе будет использована гармоника M2.

На рисунке 40 показаны приливная карта (изоамплитуда и котидали колебаний уровня), приливные эллипсы и энергетические характеристики полусуточного прилива в южной части Баренцева моря.

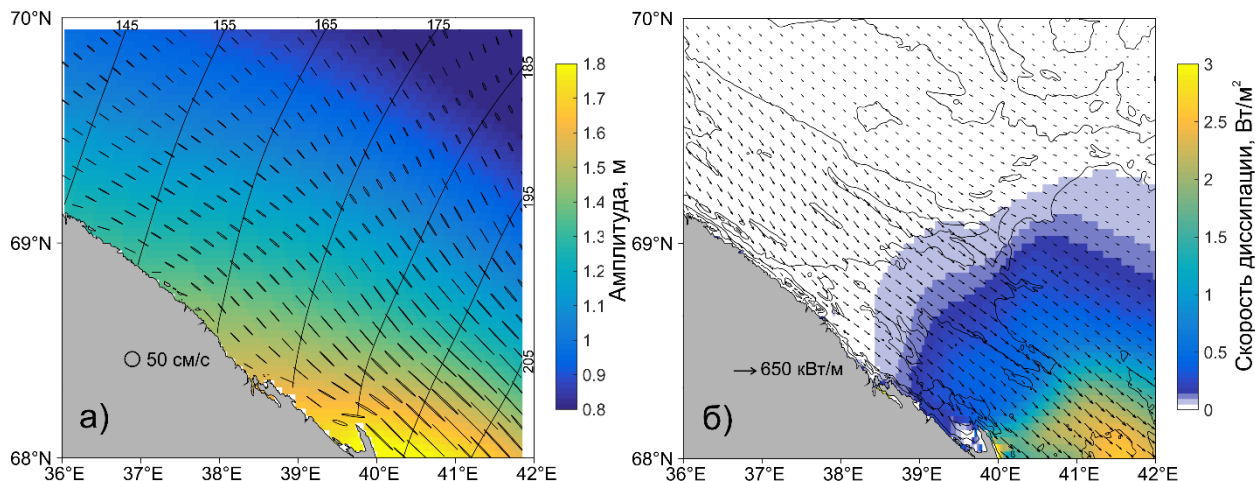


Рисунок 40 – Динамические и энергетические характеристики M2 прилива в южной части Баренцева моря: а) Изоамплитуды и котидали колебаний уровня и эллипсы приливных течений; б) Поток приливной энергии и скорость диссипации приливной энергии вследствие донного трения. Сплошные изолинии глубины проведены через 50 метров до глубины 300 м.

Структура приливной карты, преобладающее направление эллипсов и потоков энергии (рисунок 40) указывает, что приливная полусуточная волна в данной области распространяется вдоль берега, при этом берег остаётся справа. Такое распространение характерно для волн Кельвина в северном полушарии. Максимальная скорость приливных течений достигается в южной части области и составляет более 1 м/с, а в районе измерений – около 60 см/с. Учитывая, что значение фазовой скорости внутренних волн 0,57 м/с, согласно выражению (16), внутреннее число Фруда для района измерений ≈ 1 , то есть для внутреннего прилива характерен критический режим.

На рисунке 41 показаны приливная карта, приливные эллипсы и энергетические характеристики полусуточного прилива в Авачинском заливе.

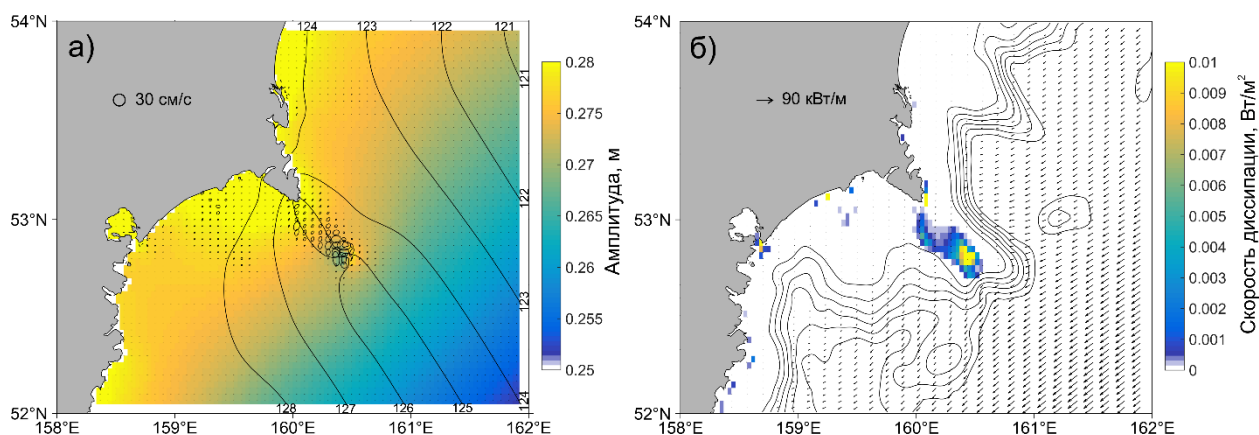


Рисунок 41 – Динамические и энергетические характеристики M2 прилива в Авачинском заливе: а) Изоамплитуды и котидали колебаний уровня и эллипсы приливных течений; б) Поток приливной энергии и скорость диссипации приливной энергии вследствие донного трения. Сплошные изолинии глубины проведены через 500 метров до глубины 3000 м.

Структура приливной карты, преобладающее направление эллипсов и потоков энергии (рисунок 41) указывает на то, что приливная полусуточная волна в Авачинском заливе, как и в Баренцевом море, является волной Кельвина. Однако на шельфе около м. Шипуский изгиб котидалей может указывать на дифракцию приливной волны. Скорости приливных течений практически всюду незначительны, лишь на шельфе около мыса Шипунский наблюдается усиление приливных течений. Их скорости здесь достигают 30 см/с. При фазовой скорости КВВ около 0,65 см/с, внутренний прилив в данной области будет характеризоваться докритическим режимом вне зависимости от фазы приливного цикла.

Сравнение механизмов генерации. Рисунок 42 демонстрирует композитные карты положений проявлений КВВ в южной части Баренцева моря и Авачинском заливе с критериями генерации внутренних волн.

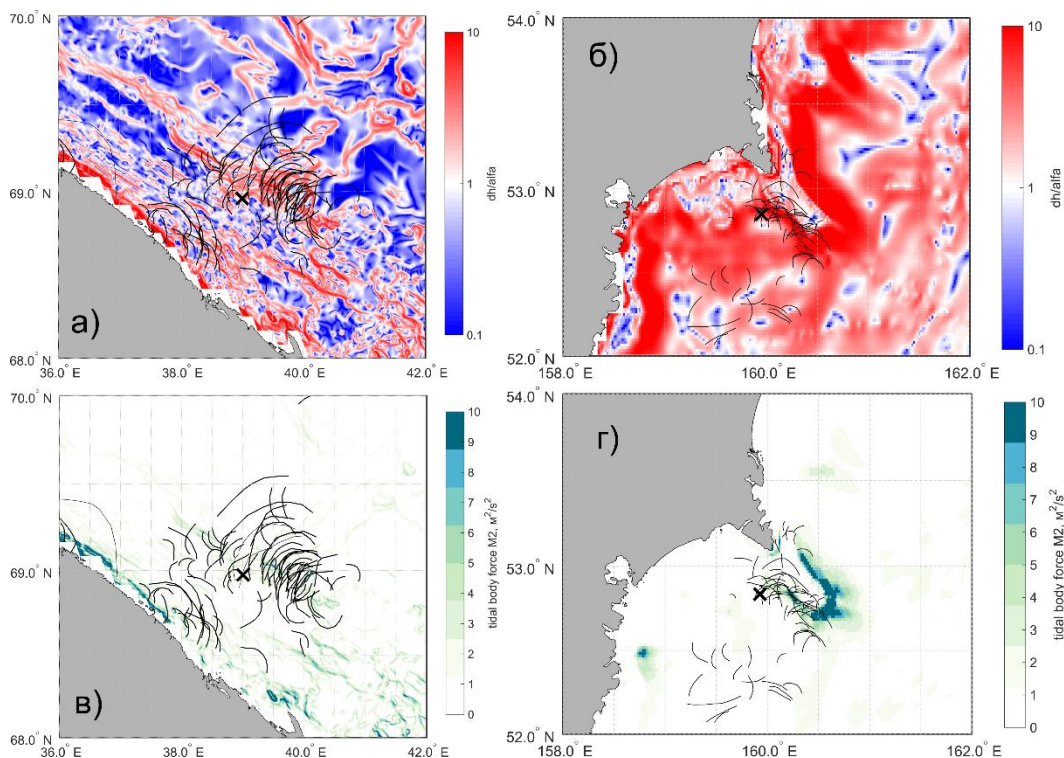


Рисунок 42 – Композитные карты проявлений КВВ с критериями генерации внутренних волн: а) отношением наклона дна к наклону характеристик ВПВ гармоника M_2 в южной части Баренцева моря; б) отношением наклона дна к наклону характеристик ВПВ гармоника M_2 в Авачинском заливе; в) *tidal body force* для гармоника M_2 в южной части Баренцева моря; г) *tidal body force* для гармоника M_2 в Авачинском заливе. Символ «х» указывает положение точек контактных измерений.

В южной части Баренцева моря группа прибрежных проявлений КВВ не связана с областью критического топографического наклона (рисунок 42а). Вдольбереговая группа проявлений расположена рядом с областью критического топографического наклона, но не на одной линии с ней. Таким образом, не удаётся выявить связь положений проявлений КВВ с областями топографической генерации ВПВ. Прибрежная группа проявлений КВВ находится на одной линии с областью повышенных значений *tidal body force* (рисунок 42в), тогда как вдольбереговая группа не связана с областями повышенных значений критерия.

В Авачинском заливе (рисунок 42б) доминирует сверхкритический топографический наклон, но выделяются локальные области критического наклона в глубоководной части залива и на шельфе полуострова Шипунский, в которых может происходить интенсивная топографическая генерация ВПВ. Крупное скопление проявлений, зарегистрированных над материковым склоном юго-восточнее мыса Шипунский (рисунок 42г), находится в области повышенных значений критерия $tidal\ body\ force$.

В южной части Баренцева моря лучевой механизм генерации, по-видимому, нереализуем из-за сложного рельефа дна с многочисленными неоднородностями при относительно малых глубинах. В Авачинском заливе, с одной стороны, нельзя исключать лучевой механизм генерации, поскольку были выявлены области критической топографии, откуда могут распространяться лучи внутреннего прилива (рисунок 42б). Но с другой стороны, острый угол между направлением распространения проявлений КВВ и изобатами (рисунок 28) указывает на то, что действие лучевого механизма маловероятно.

В окрестностях мыса Святой Нос и в Авачинском заливе нет крупных рек, поэтому механизм генерации КВВ речными плюмами нереализуем.

Как было показано ранее, вдольбереговая группа проявлений КВВ в южной части Баренцева моря не связана с районами генерации больших ВПВ. Учитывая, что данные пакеты распространяются из области локального поднятия дна в направлении, противоположном набегающему приливному течению, можно считать, что в данном случае наиболее вероятен механизм образования запрепятственных волн. В пользу данного вывода свидетельствует то, что значение числа Фруда в точке наблюдений близко к единице, а значит, приливное течение характеризуется критическим режимом. Косвенно подтверждает данный вывод отсутствие полусуточной изменчивости положения изотерм, связанной с ВПВ, на записях колебаний температуры. В работе [Морозов и др., 2008] было показано, что в проливе Карские ворота, схожем по морфометрическим условиям и приливной

динамике с рассматриваемым районом, КВВ генерируются по типу запрепятственных волн. Однако около мыса Святой Нос возможен и резонансный механизм генерации, поскольку в области, откуда распространяются пакеты проявлений, присутствует узкий подводный каньон (рисунок 28).

Прибрежная группа проявлений КВВ связана с областью повышенных значений критерия tidal body force (рисунок 42в). Можно предположить, что КВВ могут образовываться в результате эволюции ВПВ. Согласно [Серебряный, 2002], в прибрежной области были зарегистрированы полусуточные ВПВ с амплитудами от 1 до 5 м в зависимости от фазы сизигийно-квадратурного цикла, на фоне которых регистрируются короткопериодные ИВВ с амплитудами до 6 м. Короткопериодные волны интенсифицируются при переходе от большой воды к малой. Наличие ВПВ и ИВВ в данных измерений может являться дополнительным подтверждением выявленного механизма генерации КВВ в прибрежной зоне.

В Авачинском заливе подавляющая часть проявлений КВВ находится в области повышенных значений критерия tidal body force (рисунок 42г). Наиболее вероятным механизмом генерации КВВ является эволюция ВПВ в условиях нелинейности. Подтверждением данного вывода служит наличие выраженных ВПВ в записях колебаний температуры, а также докритический режим приливного течения. Однако вызывает вопрос отсутствие проявлений КВВ в области генерации ВПВ на шельфе поблизости Кроноцкого залива (см. рисунок 42г), несмотря на обеспеченность данного района спутниковыми снимками. В работе [Lavrova et al., 1999] отмечается, что в Кроноцком и Авачинском заливах в поле фоновых непериодических течений могут присутствовать критические зоны, приводящие к захвату волн. Среднемесячная скорость непериодических течений на границе шельфа в области полуострова Шипунский по данным реанализа достигает в сентябре 2018 года 70 см/с. Вполне вероятно, что данная зона может быть «барьером» для распространения внутренних волн. Что касается глубоководной части

залива, здесь регистрируется малое количество проявлений КВВ. Их положение хаотично и не связано с областями повышенных значений tidal body force (рисунок 42в). Можно предположить, что они возникают при взаимодействии меандров Камчатского течения, которые широко распространены в данном районе [Rogachev, Shlyk, 2019], с мелко залегающим пикноклином.

В разделе были продемонстрированы различия характеристик КВВ в районах с интенсивной приливной динамикой в южной части Баренцева моря и Авачинском заливе. У мыса Святой Нос в районе неоднородностей рельефа дна со средней глубиной около 100 м по контактными данным доминируют короткопериодные колебания с максимальной амплитудой 4 метра. Расчёт ожидаемых амплитуд волн показал, что 1 раз за месяц может наблюдаться ИВВ с амплитудой 5 м. В Авачинском заливе, где присутствует узкий мелководный шельф и крутой материковый склон, на фоне полусуточных внутренних волн регистрируются ИВВ с амплитудой до 8 метров, а один раз в месяц можно ожидать ИВВ с амплитудой до 12 м. В Авачинском заливе короткопериодные колебания имеют более высокую энергию, чем в окрестностях мыса Святой Нос, и превышают энергию теоретического спектра Гаррета-Манка.

Как в южной части Баренцева моря, так и в Авачинском заливе направления распространения проявлений КВВ находятся в довольно узком диапазоне изменчивости, что может указывать на доминирование одного из приливных механизмов генерации 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. В юго-восточной части Баренцева моря наиболее вероятно образование КВВ при обтекании приливным потоком неоднородностей рельефа дна по типу запрепятственных волн. В Авачинском заливе вероятен другой механизм генерации КВВ, а именно эволюция ВПВ.

В рамках применения разработанного метода был выполнен анализ композитных карт и диаграмм, позволивший выявить механизмы генерации КВВ. Однако практически невозможно охватить контактными данными всю акваторию исследуемых регионов, поэтому в следующей главе будет представлен вариант применения метода, предусматривающий сопоставление спутниковых наблюдений, данных реанализа и глобальной приливной модели. С помощью него будут выявлены механизмы генерации КВВ на всей акватории Баренцева моря и Курило-Камчатского региона, а также оценён относительный вклад различных механизмов в генерацию КВВ.

Глава 4. Сезонная изменчивость короткопериодных внутренних волн в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе по спутниковым данным

4.1 Внутренние волны в Баренцевом море по спутниковым данным

В результате анализа РЛИ в Баренцевом море с декабря 2018 года по ноябрь 2019 года было зарегистрировано 733 проявления КВВ, проявляющихся на морской поверхности в период с начала июня по середину сентября 2019 года. На рисунке 43 показаны гистограммы повторяемости характеристик зарегистрированных проявлений КВВ.

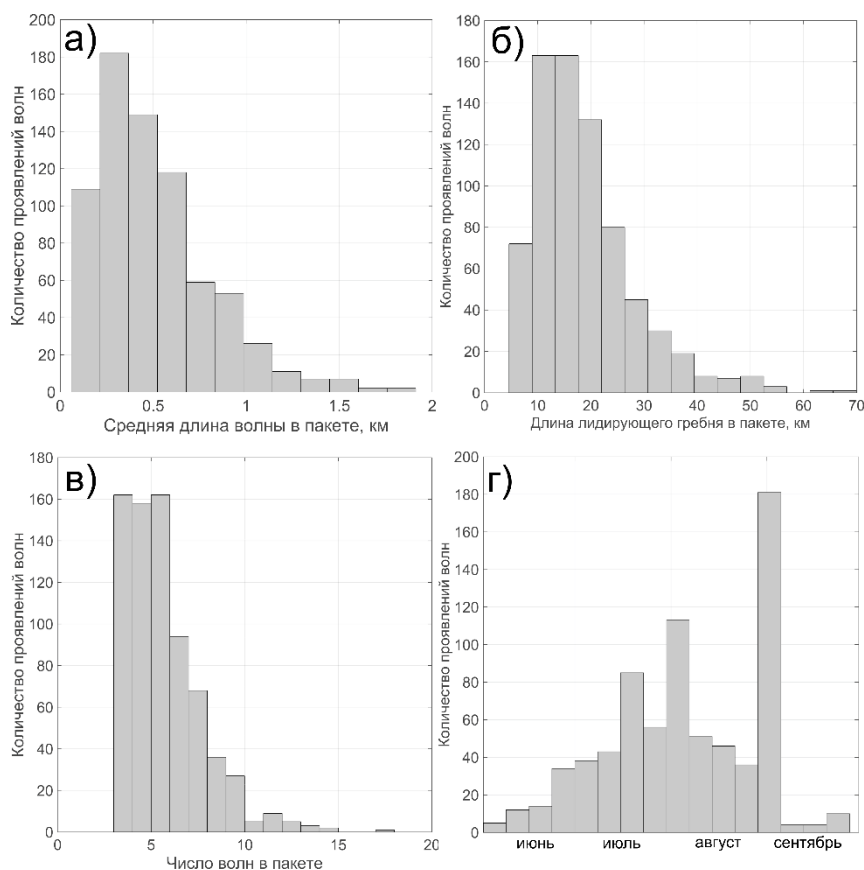


Рисунок 43 – Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ в Баренцевом море: а) длины волны; б) длины лидирующего гребня; в) количества волн в пакете; г) количества волн по датам.

В Баренцевом море регистрировались проявления с длиной волны от 80 до 1900 м. В среднем длина волны составляла 500 м. Наибольшей повторяемостью характеризовались проявления с длиной волны около 350 м (рисунок 43а). Длина лидирующего гребня проявлений КВВ варьировалась от 3 до 70 км, составляя в среднем 18 км. Наиболее часто регистрировались проявления КВВ с длиной лидирующего гребня от 10 до 18 км (рисунок 43б). Пакеты проявлений КВВ содержали от 3 до 18 волн. Среднее число волн в пакете составляло 6. Наиболее часто регистрировались пакеты с 3-6 волнами (рисунок 43в). Количество проявлений КВВ сильно варьируется в течение исследуемого периода, что видно из рисунка 43г. 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. Схожая временная изменчивость числа зарегистрированных проявлений отмечалась в работе [Козлов и др., 2011]: минимум числа проявлений регистрировался в июне, а максимум в августе.

На рисунке 44 показано пространственное положение лидирующих гребней и частота встречаемости проявлений КВВ за весь исследуемый период

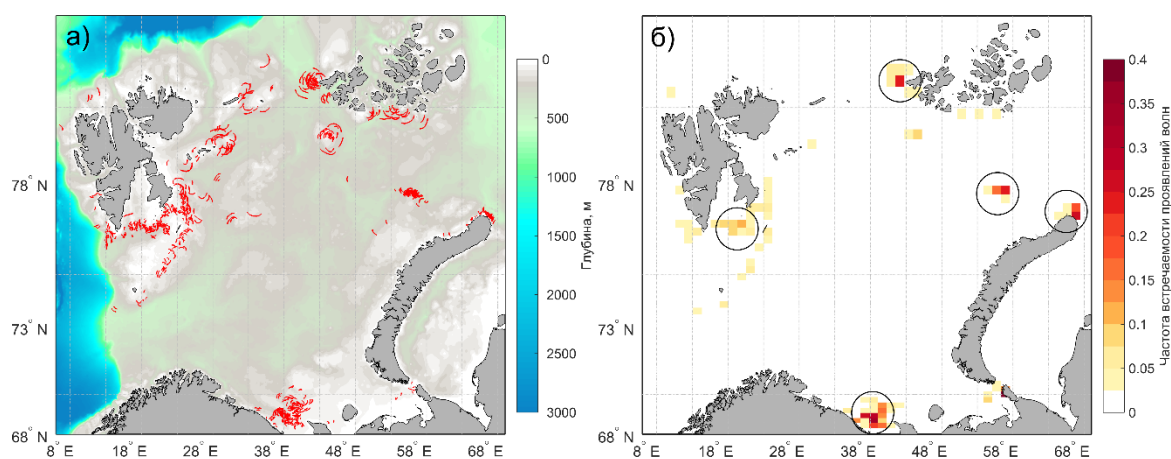


Рисунок 44 – Пространственное положение проявлений КВВ за весь исследуемый период: а) лидирующие гребни; б) частота встречаемости (черные окружности указывают положение «горячих точек»).

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. Наибольшей частотой встречаемости характеризуются области западнее о. Надежды, западнее ЗФИ, северо-западнее Новой Земли, у м. Желания, а также у м. Святой Нос. Частота встречаемости в данных областях превышает фоновую и составляет от 0,1 до 0,4, что позволяет классифицировать эти области как «горячие точки» в соответствии с принятой методикой. 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. Положение «горячих точек», выделенных у арх. ЗФИ и у м. Святой Нос совпадает с результатами анализа РЛИ Envisat ASAR за летне-осенний период 2007 года [Козлов и др., 2014]. Однако в настоящей работе были выделены «горячие точки» западнее о. Надежды, северо-западнее Новой Земли и у м. Желания, которые не выделяются в работе [Козлов и др., 2014].

В таблице 4 приведено распределение характеристик проявлений КВВ по месяцам.

Таблица 4. распределение характеристик проявлений КВВ в Баренцевом море по месяцам.

Характеристика		Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Кол-во волн в пакете	минимум	3	3	3	3
	среднее	6	5	6	7
	максимум	11	14	15	18
Длина волны	минимум	120	120	80	80

Характеристика		Июнь	Июль	Август	Сентябрь
в пакете, м	среднее	470	650	570	450
	максимум	1400	1900	1700	1900
Длина лидирующего гребня, км	минимум	5	7	5	4
	среднее	15	23	15	17
	максимум	37	55	70	41

Таблица 4 демонстрирует, что характеристики КВВ, также, как и число проявлений, сильно варьируют в течение исследуемого периода. Наибольшей изменчивости подвержены средние и максимальные характеристики, в то время как изменчивость минимальных характеристик незначительна. В июле пакеты проявлений КВВ в среднем содержат меньше всего волн – 5. Больше всего волн (7) в среднем содержат пакеты в сентябре. Наименьшее максимальное число волн в пакете составляет 11 и регистрируется в июне. Наибольшее максимальное число волн в пакете регистрируется в сентябре и составляет 18. Минимум средней длины волны наблюдается в сентябре и составляет 470 м. Максимум средней длины волны составляет 650 м и наблюдается в июле. Наименьшая максимальная длина волны (1400 м) характерна для июня, а наибольшая (1900) – для августа и сентября. Минимальная средняя длина лидирующего гребня в 15 км характерна для июня и августа, а максимальная в 17 км – для сентября. Наибольшая максимальная длина гребня отмечается в июне и составляет 37 км. Наибольшая максимальная длина гребня составляет 70 км и регистрируется в августе.

Помимо значительной временной изменчивости была зарегистрирована и значительная пространственная изменчивость характеристик проявлений

КВВ. На рисунке 45 показаны карты пространственного распределения длины волны по месяцам.

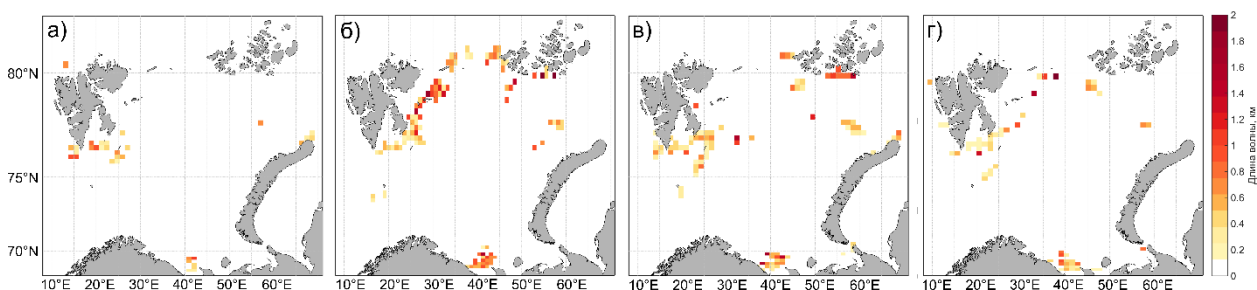


Рисунок 45 – Пространственное распределение длины волны проявлений КВВ: а) в июне; б) в июле; в) в августе; г) в сентябре.

Рисунок 45 демонстрирует, что в июне максимальная длина волны не превышала 1400 метров и наблюдалась южнее Шпицбергена и около Кольского полуострова. В июле максимальная длина в 1700 м наблюдалась около юго-западного побережья Шпицбергена и южнее ЗФИ. В августе максимальная длина волны наблюдалась около Кольского полуострова и южнее ЗФИ. В сентябре максимум длины волны регистрировался юго-западнее Шпицбергена.

На рисунке 46 показаны карты частоты встречаемости проявлений КВВ по месяцам.

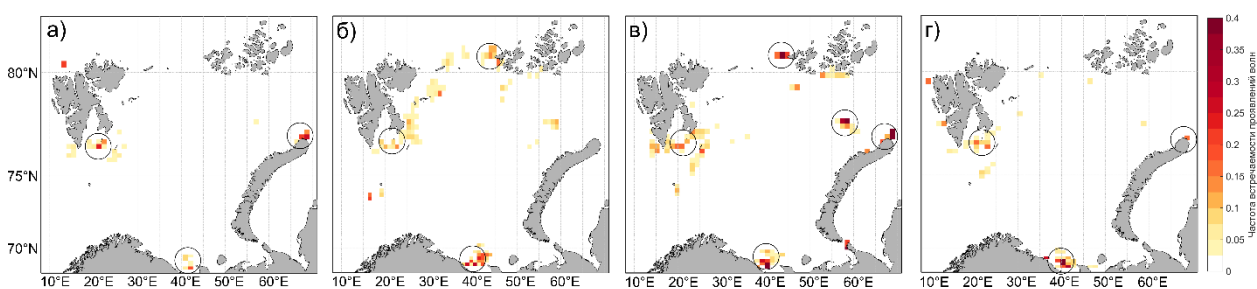


Рисунок 46 – Частота встречаемости проявлений КВВ: а) в июне; б) в июле; в) в августе; г) в сентябре.

Из рисунка 46 видно, что положение основных выделенных «горячих точек» сильно варьируется от месяца к месяцу. Так, в июне «горячие точки» выделяются только у о. Надежды, у м. Желания и у м. Святой Нос. В июле

«горячие точки» у м. Святой нос и о. Надежды сохраняются, проявляется «горячая точка» у ЗФИ, однако не регистрируется область высокой частоты встречаемости у м. Желания. В августе регистрируются все «горячие точки», характерные для исследуемого периода в целом (см. рисунок 44). В сентябре не выделяются «горячие точки» у ЗФИ и западнее Новой Земли. Сильно варьирует и частота встречаемости проявлений КВВ в областях «горячих точек». В таблице 5 показано распределение частоты повторяемости проявлений КВВ в областях «горячих точек»

Таблица 5. Распределение частоты повторяемости проявлений КВВ в областях «горячих точек» (частота встречаемости/число проявлений).

«Горячая точка»	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Западнее ЗФИ	-/-	0.25/14	0.4/26	-/-
о. Надежды	0.25/7	0.2/45	0.3/87	0.25/8
западнее Новой Земли	0.05/16	0.05/19	0.4/28	0.05/15
м. Желания	0.3/8	-/-	0.4/14	0.15/5
м. Святой нос	0.2/8	0.3/19	0.4/56	0.4/31

Из таблицы 5 видно, что для всех «горячих» точек максимум частоты встречаемости наблюдается в августе. Для точек западнее ЗФИ и Новой земли, а также у м. Святой Нос максимальная частота встречаемости составляет 0,4. У о. Надежды частота встречаемости составляет 0,3. В августе наблюдается также и максимальное количество проявлений в области «горячих точек», однако при сопоставимой частоте встречаемости, количество проявлений от точки к точке сильно разнится. Так, минимальное число проявлений наблюдается у м. Желания, а максимальное – у о. Надежды. Сопоставимые значения частоты встречаемости при разном числе проявлений объясняются разным качеством покрытия рассматриваемых

акваторий. У о. Надежды наблюдается максимальное число РЛИ, в то время как на остальные точки приходится в 2 – 3 раза меньше РЛИ.

Были представлены результаты анализа пространственно-временной изменчивости характеристик поверхностных проявлений КВВ в Баренцевом море. 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. 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 западнее о. Надежды, западнее ЗФИ, северо-западнее Новой Земли, у м. Желания, а также у м. Святой Нос. 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.

4.2 Внутренние волны в Курило-Камчатском регионе по спутниковым данным

За период с 1 декабря 2018 года по 30 ноября 2019 года было детектировано 1876 проявлений КВВ. На рисунке 47 продемонстрированы гистограммы повторяемости характеристик зарегистрированных проявлений.

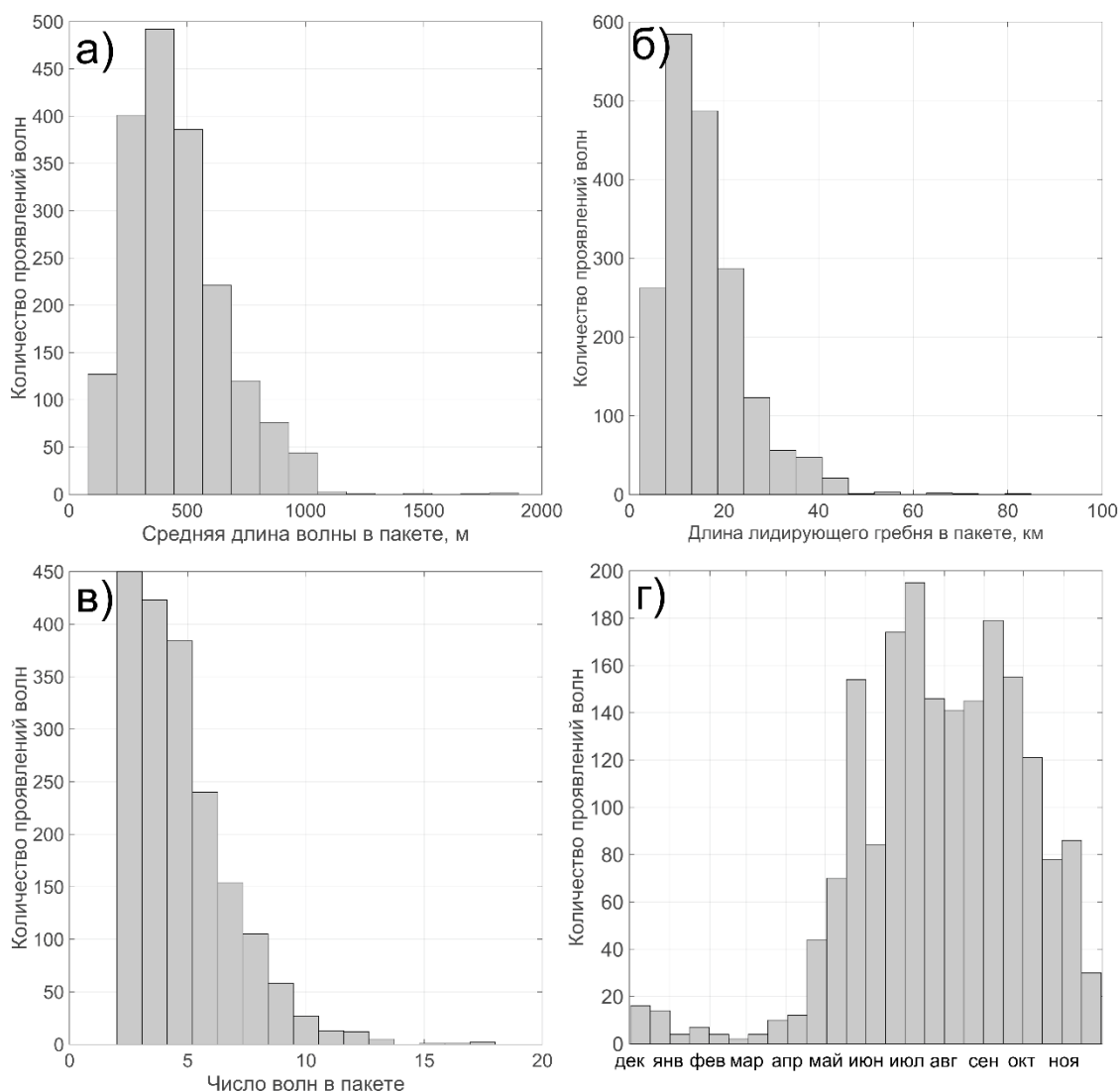


Рисунок 47 – Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ:

а) средней длины волны в пакете; б) длины лидирующего гребня; в) числа волн в пакете; г) количества волн по датам.

Длина волны проявлений КВВ варьировала от 80 до 1900 метров, составляя в среднем 550 м. Наибольшую повторяемость имели волны с

длиной около 400 метров (рисунок 47а). Длина лидирующего гребня менялась в пределах от 2 до 85 км, составляя в среднем 18 км. Наиболее часто регистрировались пакеты с длиной лидирующего гребня около 10 км (рисунок 47б). За весь исследуемый период регистрировались пакеты, содержащие от 2 до 18 волн. Наиболее часто наблюдались пакеты с 2-4 волнами (рисунок 47в). Из рисунка 47г видно, что минимальное количество проявлений КВВ было зарегистрировано во второй половине февраля. Максимум числа проявлений приходился на вторую половину июля. Схожая сезонная изменчивость количества проявлений КВВ была установлена ранее по спутниковым данным для шельфа Южно-Китайского, Восточно-Китайского и Жёлтого морей [Alpers et al., 2005; Ho et al., 2009]. Где количество зарегистрированных проявлений КВВ в зонах их частой встречаемости максимально в июле-августе и минимально с октября по апрель.

На рисунке 48 показано пространственное положение лидирующих гребней проявлений КВВ, зарегистрированных за исследуемый период.

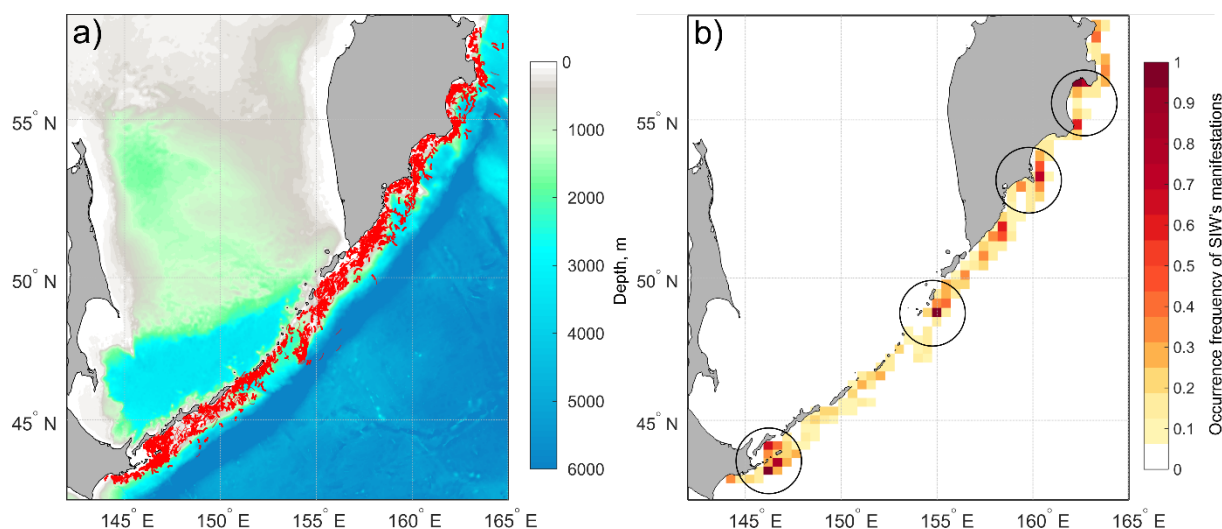


Рисунок 48 – Карты пространственного распределения: а) лидирующих гребней проявлений КВВ за весь исследуемый период; б) частоты встречаемости проявлений КВВ за год (окружностями отмечены области наибольшей частоты встречаемости)

Из рисунка 48а видно, что подавляющее большинство проявлений КВВ сконцентрировано в шельфовой зоне и над материковым склоном. Лишь минимальное число проявлений регистрируется над большими глубинами. Из карты пространственного распределения частоты встречаемости проявлений КВВ за весь исследуемый период (рисунок 48б) 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. В указанных областях частота встречаемости проявлений отличается от фоновой в 5 раз (0,9 – 1,2 против 0,2 – 0,3), что позволяет называть эти области «горячими точками» в поле проявлений КВВ.

В таблице 6 приведено распределение характеристик проявлений КВВ по сезонам.

Таблица 6. Характеристики проявлений КВВ по сезонам для Курило-Камчатского региона в целом за 2019 год

Характеристика		Зима	Весна	Лето	Осень
Кол-во проявлений		47	255	924	649
Кол-во волн в пакете	мин.	3	3	2	2
	средн.	5	6	5	5
	макс.	10	12	18	16
Длина волны в пакете, м	мин.	140	120	90	100
	средн.	570	430	440	470
	макс.	960	980	1900	990
Длина лидирующего гребня, км	мин.	4	3	2	3
	средн.	20	15	15	17
	макс.	45	45	73	85

Количество зарегистрированных проявлений сильно варьирует в течение года: минимальное число проявлений регистрируется с января по

март, а максимум наблюдается с июля по сентябрь. Летом регистрируется в 20 раз больше проявлений, чем зимой. Во все сезоны года проявления КВВ содержат минимум по 2 – 4 волны в пакете, а в среднем по 5 волн в пакете. Максимальное количество волн в пакете подвержено большей изменчивости, чем минимальное и среднее число волн. В зимний и весенний период проявления КВВ содержат максимально 10 – 12 волн в пакете, а в летний и осенний период – от 16 до 18 волн в пакете. В течение всего года минимальная и средняя длина волны меняются незначительно. Максимум длины волны в зимний, весенний и осенний периоды составляет около 1000 м, а в летний период достигает 1900 метров. Минимальная длина лидирующего гребня во все сезоны года составляет 2 – 4 км. Средняя длина лидирующего гребня варьируется в пределах от 15 до 20 км. В зимний и весенний период самые крупные проявления КВВ имели длину лидирующего гребня 45 км, а в летний и осенний период от 73 до 85 км. Стоит отметить, что изменчивость геометрических характеристик проявлений КВВ от сезона к сезону менее ярко выражена по сравнению с изменчивостью количества проявлений.

На рисунке 49 продемонстрирована пространственно-временная изменчивость длины волны проявлений КВВ.

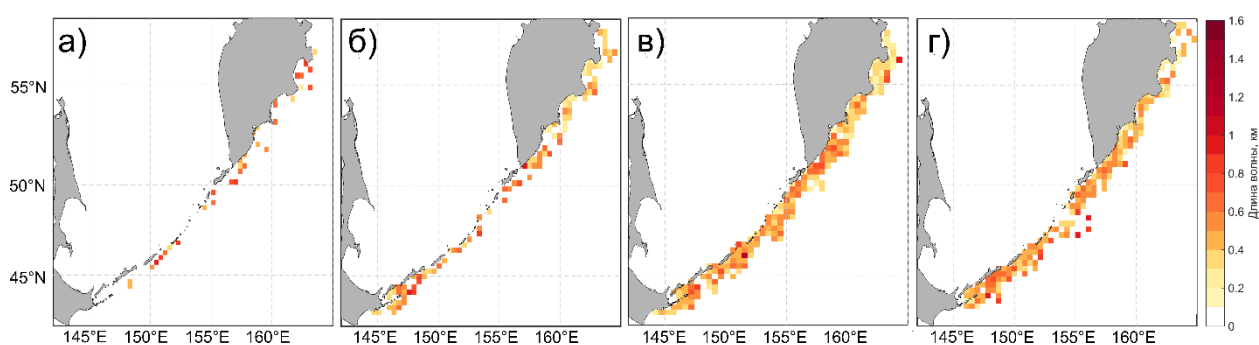


Рисунок 49 – Пространственное распределение длины волны проявлений КВВ: а) в зимний период; б) в весенний период; в) в летний период; г) в осенний период.

Зимой (рисунок 49а) подавляющее большинство проявлений КВВ характеризуется длиной волны около 1000 м. Весной (рисунок 49б) наименьшие длины волн в 200 м регистрируются в Камчатском и Кроноцком заливах, а наибольшие – юго-восточнее острова Итуруп. В летний период (рисунок 49в) минимум длин волн располагается в Кроноцком заливе. Здесь длина волны составляет около 300 м. Максимальное значение длины волны, превышающее 1600 м, регистрируется юго-восточнее пролива Итуруп. Осенью (рисунок 49г) минимальные длины волн в 300 м наблюдаются южнее пролива Крузенштерна, а максимальные в 1700 м – у острова Зеленый. В целом из рисунка 46 можно видеть, что в течение всего исследуемого периода длина волны на акватории тихоокеанского побережья Камчатки меньше, чем на акватории Курильской гряды.

Карты частоты встречаемости проявлений КВВ по сезонам года представлены на рисунке 50.

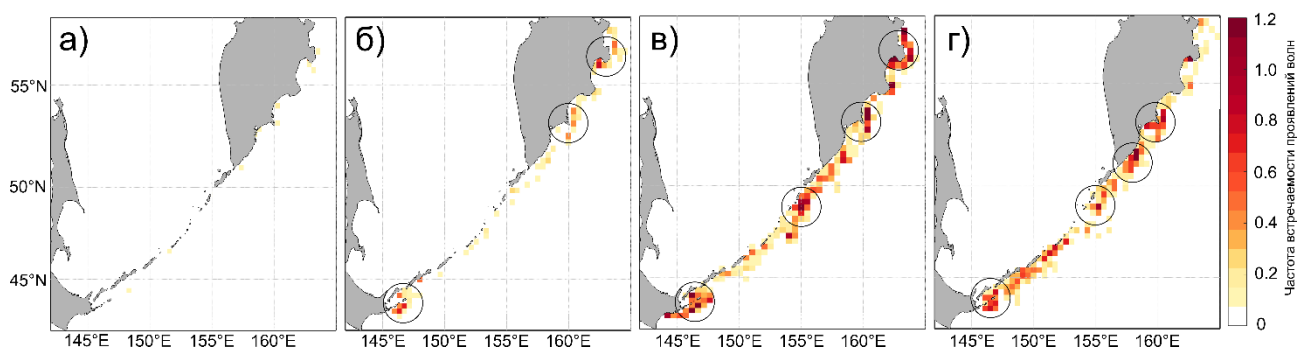


Рисунок 50 – Карты пространственного распределения частоты встречаемости проявлений КВВ: а) зимний период; б) весенний период; в) летний период; г) осенний период.

Из рисунка 50а видно, что зимний период характеризуется низкой встречаемостью КВВ (около 0,1) на акватории исследуемого региона. Зимой регистрируются отдельные разрозненные проявления около островов Итуруп и Онекотан, а также вдоль побережья Камчатки. В весенний период (рисунок 50б) наибольшие значения частоты встречаемости (0,6 – 0,8) регистрируются около островов Зелёный и Кунашир, около мыса Шипунский и в Камчатском

заливе. В остальной части региона доминирует частота встречаемости 0,2 – 0,3. В летний период наибольшая частота встречаемости (1 – 1,2) регистрируется около островов Кунашир и Зеленый, над хребтом Витязь, около м. Шипунский, а также в Камчатском и Озерном заливах. В осенний период максимальная частота встречаемости (0,8 – 1,2) регистрируется около островов Кунашир и Зелёный, над хребтом Витязь, около юго-восточного побережья Камчатки, а также у м. Шипунский. Таким образом, отмечается значительная сезонная изменчивость пространственного положения областей повышенной частоты встречаемости проявлений КВВ в Курило-Камчатском регионе. «Горячие точки» у островов Кунашир и Зелёный, над хребтом Витязь, у м. Шипунский и в районе Камчатского залива, характерные для всего года в целом, проявляются практически во все сезоны года. Эти области (см. рисунок 48б) занимают около 20% от площади региона. В них суммарно за весь год регистрируется около 1000 проявлений КВВ, что составляет около 53% от всех зарегистрированных проявлений. Была проанализирована сезонная изменчивость максимальной частоты встречаемости и количества зарегистрированных проявлений в областях «горячих точек». Эти характеристики представлены в таблице 7.

Таблица 7. Сезонная изменчивость характеристик проявлений КВВ в областях «горячих точек» (частота встречаемости/кол-во проявлений)

«Горячая точка»	Зима	Весна	Лето	Осень
Кунашир	-	0,7/81	1,2/207	0,9/103
Хребет Витязь	-	0,2/19	1,2/268	0,2/92
м. Шипунский	0,1/7	0,5/49	1,2/157	1/93
Камчатский залив	0,1/4	0,7/23	1,2/72	1/13

Как видно из таблицы 7, максимальная частота встречаемости и количество проявлений КВВ для всех «горячих точек» наблюдается в летний сезон. Минимум частоты встречаемости и количества проявлений приходится на весенний период для областей у о. Кунашир и над хребтом

Витязь. Для областей у м. Шипунский и в Камчатском минимум частоты встречаемости регистрируется зимой. Количество волн в области «горячих точек» весьма рознится, несмотря на равную частоту встречаемости проявлений КВВ в летний сезон. Максимальное число проявлений КВВ (268) в летний период было зарегистрировано над хребтом Витязь. Минимальное число проявлений летом (72) наблюдалось в Камчатском заливе. Во всех «горячих точках» наблюдаются схожие тенденции в сезонной изменчивости частоты встречаемости даже при различном числе зарегистрированных проявлений КВВ.

Были получены сведения об изменчивости характеристик поверхностных проявлений КВВ в Курило-Камчатском регионе в течение года. Показано, что в областях у о. Кунашир, над Хребтом Витязь, у м. Шипунский и в Камчатском заливе 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.

4.3 Сравнение результатов спутниковых наблюдений

Сравнение характеристик проявлений КВВ. В таблице 8 приведены характеристики проявлений КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе.

Таблица 8. Сравнение характеристик проявлений КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе.

Характеристика	Баренцево море	Курило-Камчатский регион
Число проявлений КВВ	733	1876
Среднее кол-во волн в пакете	6	5
Максимальное кол-во волн в пакете	18	18
Средняя длина волны, м	520	450
Максимальная длина волны, м	2100	1900
Средняя длина лидирующего гребня, км	18	15
Максимальная длина лидирующего гребня, км	70	84

Средние и максимальные число волн в пакете и длина волны отличаются в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе незначительно. Средняя длина лидирующего гребня в Баренцевом море больше, чем в Авачинском заливе, а максимальная длина лидирующего гребня в Курило-Камчатском регионе на 14 км больше, чем в Баренцевом море. Это может указывать на наличие более высоких и нелинейных

внутренних волн. Сильно рознятся и общее число зарегистрированных проявлений КВВ. В Баренцевом море зарегистрировано по крайней мере в два раза меньше проявлений КВВ. Как уже отмечалось ранее, в Баренцевом море проявления КВВ были зарегистрированы только с июня по сентябрь 2019 года, в то время как в Курило-Камчатском регионе – в течение всего года.

На рисунке 51 показаны положения лидирующих гребней проявлений КВВ в Баренцевом море и Авачинском заливе за весь исследуемый период.

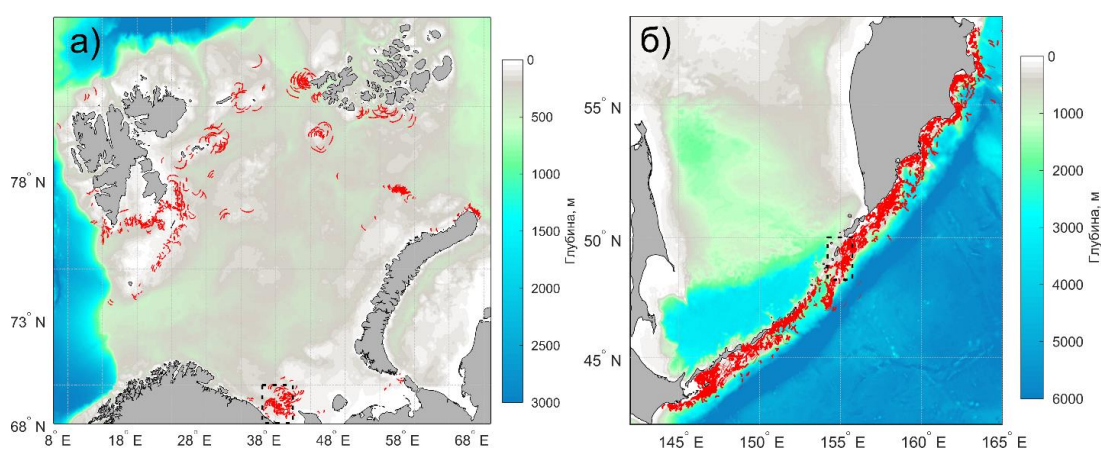


Рисунок 51 – Положение лидирующих гребней проявлений КВВ: а) в Баренцевом море; б) в Авачинском заливе. Пунктирными прямоугольниками показаны области анализа изменчивости количества проявлений КВВ по месяцам.

Из рисунка 51 видно, что в Курило-Камчатском регионе проявления КВВ были зарегистрированы практически на всей исследуемой акватории. Проявления чаще всего регистрировались над шельфом и над материковым склоном, лишь около 1 % проявлений регистрируется над Курило-Камчатским желобом. В Баренцевом море зарегистрированы изолированные скопления проявлений в зоне локальных неоднородностей рельефа дна.

Влияние стратификации на изменчивость характеристик КВВ. И в Баренцевом, и в Курило-Камчатском регионе была отмечена временная изменчивость числа зарегистрированных проявлений КВВ. В Баренцевом

море наиболее такая изменчивость наиболее ярко проявляется в «горячей точке» у мыса Святой Нос», а в Курило-Камчатском регионе – в горячей точке над хребтом Витязь. Для выяснения причин значительной изменчивости проявлений КВВ в данных областях был выполнен анализ изменчивости числа проявлений КВВ и толщины ВКС по месяцам. Для м. Святой Нос была выбрана область, ограниченная по долготе от 38° в.д. до 42° в.д. и по широте от 68° с.ш. до 70° с.ш. Для области над хребтом Витязь была ограничена область по долготе от 154° в.д. до 156° в.д. и по широте от 48° с.ш. до 50° с.ш. (см. рисунок 51). На рисунке 52 показаны гистограммы годового хода количества проявлений КВВ с графиком толщины ВКС (отражает положение верхней границы сезонного пикноклина), скорости приводного ветра, а также максимальной частоты Вьяйсяля-Брента.

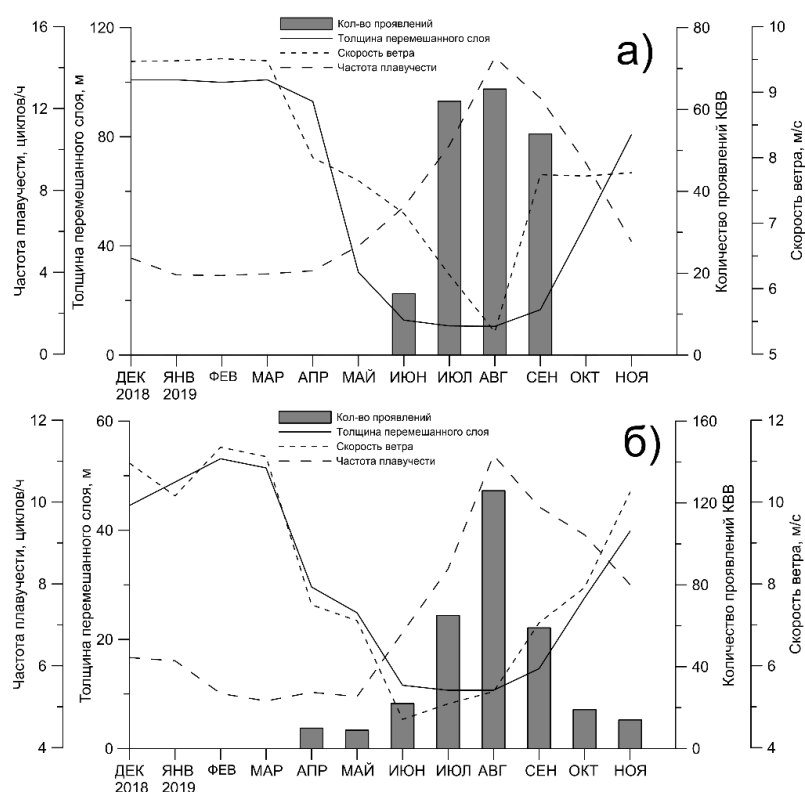


Рисунок 52 – Гистограммы годового хода количества проявлений КВВ с графиком толщины ВКС, скорости приводного ветра, а также максимальной частоты Вьяйсяля-Брента от поверхности до дна: а) в Баренцевом море; б) в Авачинском заливе.

Рисунок 52а демонстрирует, что в период с декабря 2018 года по май 2019 года проявления КВВ около м. Святой Нос не регистрировались. При этом, с декабря 2018 года по март 2019 года толщина ВКС была максимальна и составляла 90 м, а частота Вьяйсяля-Брента составляла около 4 циклов/час. С апреля по июнь наблюдается постепенное уменьшение толщины ВКС до 16 м, и одновременное возрастание частоты Вьяйсяля-Брента до 6 циклов/час. При этом в июне было зарегистрировано минимальное число проявлений КВВ. С июня по сентябрь толщина ВКС менялась незначительно, а частота Вьяйсяля-Брента продолжала расти до максимума в 14 циклов/час в августе, с последующим спадом до 12 циклов/час к сентябрю. С июля по сентябрь около м. Святой Нос регистрировалось от 50 до 65 проявлений КВВ в месяц. В период с октября по ноябрь отмечалось увеличение толщины ВКС до 80 м и уменьшение частоты Вьяйсяля-Брента до 6 циклов/час в ноябре, при этом проявления КВВ не регистрировались. Таким образом, в периоды, когда толщина ВКС составляла более чем 20 м, проявления КВВ у м. Святой Нос не регистрировались. Однако в период, когда условия для отображения проявлений КВВ на морской поверхности были благоприятными (толщина ВКС слабо менялась и составляла около 16 м), количество зарегистрированных проявлений КВВ изменялось от 20 в июне до 65 в августе. Тогда же менялось максимальное значение частоты Вьяйсяля-Брента. Его наибольшее значение приходится на август и совпадает с максимумом проявлений КВВ.

Из рисунка 53б видно, что в период с декабря 2018 года по март 2019 года проявления КВВ над хребтом Витязь не регистрировались. В это же время, перемешанный слой имел максимальную толщину 45-50 метров, а частота Вьяйсяля-Брента составляла 5–6 циклов/час. С апреля по июнь наблюдается постепенное уменьшение толщины ВКС до 11 м, и одновременное возрастание частоты Вьяйсяля-Брента до 8 циклов/час. В этот период регистрируется рост числа проявлений КВВ. С июня по август толщина ВКС не изменялась, а частота Вьяйсяля-Брента продолжала расти до

максимума в 11 циклов/час. При этом продолжался рост количества проявлений КВВ. С увеличением толщины ВКС до 40 м и уменьшением частоты Вьяйсяля-Брента до 8 циклов/час в ноябре, отмечается постепенное уменьшение числа зарегистрированных проявлений. Таким образом, наблюдается тенденция к обратной зависимости между глубиной залегания верхней границы пикноклина и количеством зарегистрированных проявлений КВВ. Однако в период, когда условия для отображения проявлений КВВ на морской поверхности были благоприятными (толщина ВКС не менялась и составляла 11 м), количество зарегистрированных проявлений КВВ изменялось от 25 в июне до 130 в августе. В то же время значительно менялось максимальное значение частоты Вьяйсяля-Брента. Как и около м. Святой Нос, его наибольшее значение приходится на август и совпадает с максимумом проявлений КВВ. Максимальные значения частоты Вьяйсяля-Брента в столбе воды от поверхности до дна характеризуют остроту пикноклина. То есть в зимнее время, когда градиенты плотности малы, а толщина перемешанного слоя велика, складываются неблагоприятные условия для отображения КВВ на морской поверхности.

Исходя из рисунков 52а и 52б, наблюдается высокая корреляция между временной изменчивостью толщины ВКС и приводного ветра. Увеличение скорости ветра влияет не только на заглубление верхней границы сезонного пикноклина, но и непосредственно на отображение КВВ на морской поверхности. То есть изменчивость ветра может быть дополнительным фактором, приводящим к уменьшению частоты встречаемости поверхностных проявлений КВВ в Курило-Камчатском регионе и полному их отсутствию в Баренцевом море в холодный период года с октября по май. Однако ни толщина ВКС, ни скорость приводного ветра не оказывают непосредственного влияния на генерацию КВВ, а лишь определяют возможность отображения КВВ на морской поверхности.

Сравнение механизмов генерации. Выше было показано, что в регионах контактных наблюдений может действовать как механизм генерации КВВ по

типу запрепятственных волн, так и механизм генерации КВВ при эволюции ВПВ. Генерация запрепятственных волн происходит в областях критического режима приливного течения, когда число Фруда равно 1. Такие области будут иметь локализованную структуру относительно резких изменений топографии дна [Stashchuk, Vlasenko, 2021]. Действительно, согласно расчётам для Курильской гряды [Itoh et al., 2014], критический режим приливного потока локализован в зоне мелководных Курильских проливов (глубины до 200 м) и в области хребта Витязь южнее о. Онекотан. Здесь наблюдается усиление скоростей приливного потока и уменьшение скорости внутренних волн в районах поднятия дна. При этом кинетическая энергия концентрируется на неоднородностях дна, что приводит к усилению внутренних волн. По спутниковым данным там наблюдается практически повсеместные проявления КВВ (рисунок 48а). На остальной части акватории не наблюдается критических режим приливных течений, однако регистрируются проявления КВВ.

Учитывая, что доминирующие приливные волны примерно на половине акватории Баренцева моря и на всей акватории Курило-Камчатского региона являются субинерциальными, внутренние приливные волны не могут распространяться как свободные. Возможным механизмом генерации КВВ на рассматриваемых акваториях представляется механизм локальной дезинтеграции субинерциальных ВПВ в пакеты КВВ. При этом области генерации ВПВ будут близки или даже совпадать с очагами генерации КВВ. Для оценки положения очагов генерации ВПВ был использован критерий *tidal body force*. Для расчёта критерия в Баренцевом море использовались составляющие приливного потока для гармоник M2 из атласа TRXO9, так как данная гармоника является доминирующей. Для расчёта в Курило-Камчатском регионе использовались значения составляющих приливного потока гармоник K1, так как по результатам предварительного анализа модуль приливного потока данной гармоники

является максимальным практически на всей акватории из всех суточных гармоник.

На рисунке 53 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.

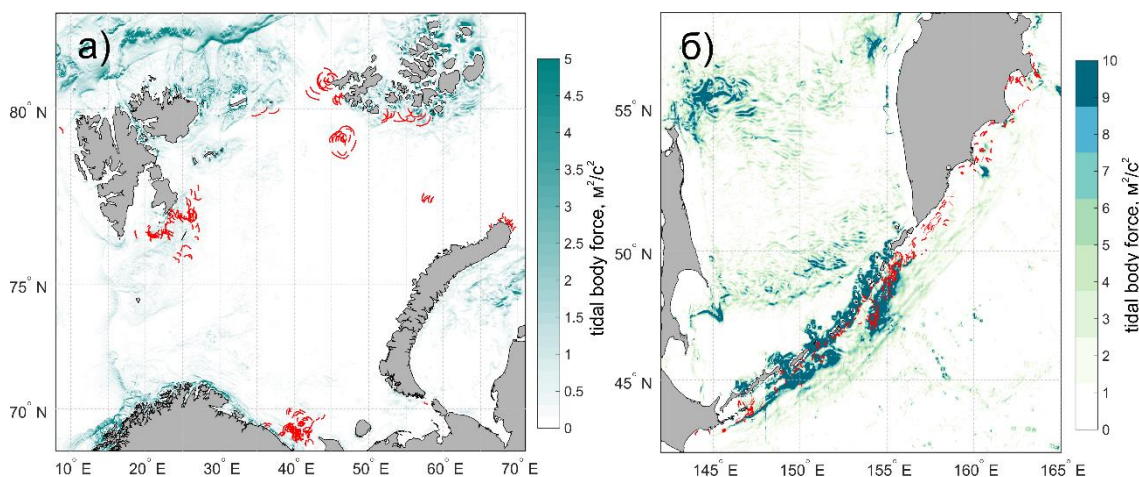


Рисунок 53 – Композитные карты, сочетающие горизонтальное распределение интегрированного по глубине критерия tidal body force для и положения лидирующих гребней проявлений КВВ в августе 2019 года: а) гармоники M2 в Баренцевом море; б) гармоники K1 в Курило-Камчатском регионе.

И в Баренцевом море, и в Курило-Камчатском регионе области «горячих точек» большей частью близки к потенциальным очагам генерации полусуточных и суточных ВПВ, соответственно. Исключение составляют области западнее Новой Земли, южнее ЗФИ, а также на шельфе Камчатского полуострова. В разделе 3.3 было продемонстрировано, что в области Авачинского залива образование КВВ связано с эволюцией волны M2. Другим возможным механизмом генерации КВВ на шельфе Камчатского полуострова может выступать взаимодействие мелкого пикноклина с меандрами Камчатского течения, которые широко распространены на

акватории близ юго-восточного побережья Камчатки [Романов и др., 2009; Rogachev, Shlyk, 2019].

Из рисунка 53а видно, основные скопления КВВ в Баренцевом море регистрируются в областях, где значения критерия tidal body force максимальны и составляют $3-5 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Рисунок 53б 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 ($1 - 2 \text{ м}^2/\text{с}^2$) и составляют от 5 до $10 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Области повышенных значений критерия являются потенциальными очагами генерации ВПВ. Для Баренцева моря и Курило-Камчатского региона был выполнен расчёт расстояний от лидирующих гребней проявлений КВВ до очагов потенциальной генерации внутренних приливных волн для всех месяцев, когда регистрируются проявления КВВ. На рисунке 54 показаны диаграммы количества проявлений, находящихся на расстоянии менее 8 км (выбрано исходя из размеров сетки реанализа Copernicus для расчёта критерия tidal body force) от очагов генерации ВПВ.

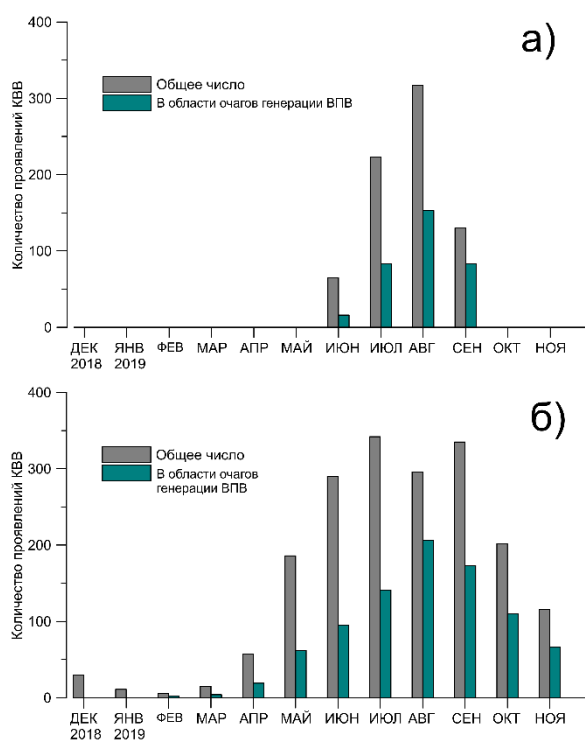


Рисунок 54 – Диаграммы количества проявлений КВВ в области очагов генерации ВПВ: а) в Баренцевом море; б) в Курило-Камчатском регионе.

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 Вьяйсяля-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. Однако около Кольского полуострова в Баренцевом море, где ещё не сказывается влияние критической широты, может действовать механизм генерации по типу запрепятствованных волн, что было показано в разделе 5.1.

Связь положений проявлений КВВ и мезомасштабных вихрей. По результатам анализа полей АДТ 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. Было выполнено сопоставление положений проявлений КВВ и мезомасштабных вихревых структур.

На рисунке 55 продемонстрирован случай регистрации проявлений КВВ в области мезомасштабной вихревой структуры и фронтальной зоны 21 июня.

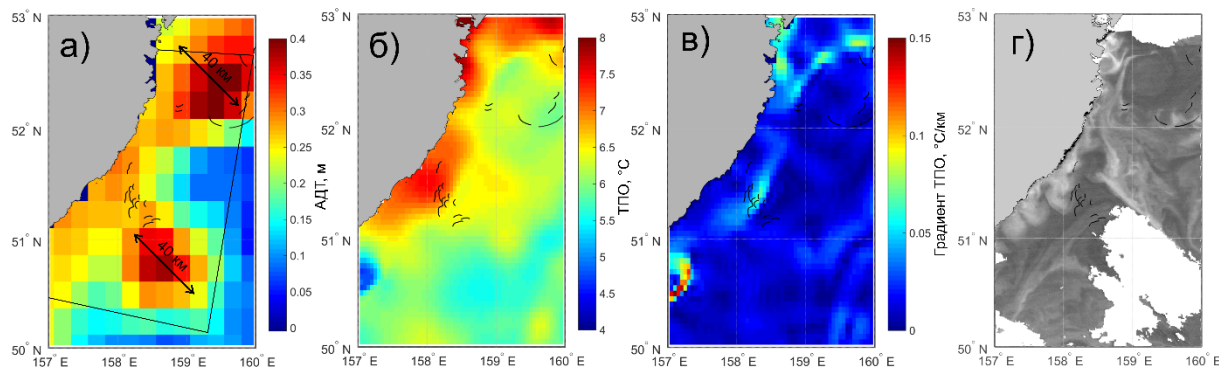


Рисунок 55 – Композитные карты положений проявлений КВВ с полями: а) абсолютной динамической топографии; б) ТПО; в) градиента ТПО; г) яркости зелёного канала спутникового изображения Suomi NPP. Жирной линией показана область наибольшего количества мезомасштабных вихрей в месяц.

Из рисунка 55а видно, что в поле АДТ в северо-восточной и в юго-западной части акватории присутствовали мезомасштабные вихревые структуры диаметром около 40 км. Указанные структуры находят своё проявление в поле ТПО и его градиента (рисунки 55 б и в). В поле яркости зелёного канала спутника Suomi NPP находит своё 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.

Было произведено сравнение характеристик проявлений КВВ в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе. Было продемонстрировано, что основные характеристики проявлений имеют сопоставимые значения, но максимальная длина лидирующего гребня в Курило-Камчатском регионе на 14 км больше, чем в Баренцевом море, что может указывать на большую нелинейность КВВ в Курило-Камчатском регионе.

Было показано, что поле проявлений КВВ в Баренцевом море характеризуется локальными скоплениями над неоднородностями рельефа дна, в то время как в Курило-Камчатском регионе проявления КВВ регистрируются практически по всей акватории.

Сопоставление изменчивости количества проявлений КВВ в области «горячих точек» с годовым ходом толщины перемешанного слоя, скорости приводного ветра и максимальной в слое от поверхности до дна частоты Вэйсяля-Брента показало, что проявления КВВ в Баренцевом море регистрируются при толщине перемешанного слоя менее 20 метров, при частоте Вэйсяля-Брента более 6 циклов в час, и при скорости ветра менее 7 м/с. В Курило-Камчатском регионе максимум числа проявлений КВВ регистрируется при минимальной толщине перемешанного слоя в 11 м и частоте Вэйсяля-Брента 11 циклов в час. Отсутствие проявлений КВВ на РЛИ в зимний период связано с заглублением пикноклина, а также усилением приводного ветра, влияющими на отображение волн на морской поверхности.

При помощи критерия «tidal body force» было продемонстрировано, что в областях потенциальных очагов генерации ВПВ находится до 70% проявлений КВВ, что указывает на механизм генерации КВВ, как результат локальной дезинтеграции субинерциальных ВПВ суточного и полусуточного периодов.

В Курило-Камчатском регионе на акватории от мыса Лопатка до мыса Опасный важную роль в генерации КВВ играет мезомасштабная вихревая динамика, связанная с неустойчивостью крупномасштабного Курило-Камчатского течения, поскольку суммарно для летнего и осеннего периода в области мезомасштабных вихрей находится 70% проявлений на данном участке акватории.

Таким образом, применение разработанного в рамках диссертационного исследования метода позволило не только выявить районы частой встречаемости проявлений КВВ в исследуемых регионах, но и произвести количественную оценку вклада различных механизмов в генерацию КВВ.

Заключение

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 (см. Приложение).

Список литературы

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

Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Колдунов В.В., Май Р.И., Рубченя А.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р. Атлас изменчивости уровня северо-западной части Тихого океана. Санкт-Петербург: СМИО Пресс, 2011. 303 с.

Белоненко Т.В., Фукс В.Р. Опыт картирования характеристик уровня северо-западной части Тихого океана на основе спутниковой информации. IV(2) Сахалинский научно-инженерный форум «Мореходство и морские науки. 2012 Т.12. С.166-181.

Богданов К.Т., Мороз В.В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 2000. 152 с.

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Внутренние волны на материковом и островном шельфах открытого океана: сравнительный анализ на примере наблюдений на Нью-Йоркском и Гавайском шельфах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 694–702.

Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В. Регистрация Косяков рыб, привлекаемых солитонами интенсивных внутренних волн // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 2. С. 94-98. DOI 10.31857/S2686739720060031.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.1. Баренцево море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. // Л.: Гидрометеоиздат. 1990, 281 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.9. Охотское море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. // Л.: Гидрометеоздат. 1998, 318 с.

Глухов В.А. Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. № 3. С. 86-97.

Гордеева С.М. Практикум по дисциплине статистические методы обработки гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ. 2010. 48 с.

Гордеева С.М., Сафрай А.С., Ткаченко И.В. Влияние климатических изменений термохалинной структуры Баренцева моря на интенсивность внутренних приливных волн // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-история, 2014. С. 211–213.

Дикинис А.В., Иванов А.Ю. и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом "Алмаз-1" / под ред. Л.Н. Карлина. М.: ГЕОС, 1999. 119 с.

Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: МГУ. 1982. 192 с.

Епифанова А.С., Рыбин, А.В., Моисеенко Т.Е., Куркина О.Е., Куркин А.А., Тюгин Д.Ю. База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 395–403.

Жегулин Г.В., Зимин А.В., Родионов А.А. Анализ дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры внутренних волн в Белом море по экспериментальным данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 4. С. 47-59.

Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 55-64.

Зимин А.В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натуральных наблюдений. // Океанология. 2012. Т.52, №1. С.16-25.

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.

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.

Иванов В.А. Частота повторяемости интенсивных внутренних волн. / Иванов В.А., Е.Н. Пелиновский, Т.Г. Талипова // Доклады АН СССР. 1991. Т.318, №6. С.1470 – 1471.

Каган, Б.А., Тимофеев А.А., Софьина Е.В. Сезонная изменчивость поверхностного и внутреннего м² приливов в Северном Ледовитом океане // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 703-714.

Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Сандвен С. Некоторые результаты исследования внутренних волн в Баренцевом море методами радиолокационного зондирования из космоса. Проблемы Арктики и Антарктики. № 3 (86). 2010. С. 60-69.

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. Т. 11, №4. 2014. С. 338-345.

Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. Л.: Гидрометеиздат. 1992. 269 с.

Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011.— 480 с.

Михайлов О.В. Некоторые новые данные о рельефе дна Курило-Камчатского желоба // Труды ИО АН СССР. 1970. Т. 86. С. 72-76.

Морозов Е. Г., Козлов И. Е., Щука С. А., Фрей Д. И. Внутренний прилив в проливе Карские ворота // Океанология. 2017. Т.57, № 1. С. 13–24.

Морозов Е.Г., Марченко А.В. Короткопериодные внутренние волны в арктическом фиорде (Шпицберген) // Известия РАН. Сер. ФАО. 2012. Т. 48, № 2, С. 453-460.

Морозов Е. Г., Пака В.Т. Внутренние волны в высокоширотном бассейне // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 709-715.

Мусаева И.В., Алиев А.Б., Исригова Т.А., Абдусаматов А.С., Шихшабекова Б.И., Кадиев А.К., Гусейнов А.Д., Алиева Е.М., Гаджиев Х.А. Рыбный промысел: улов рыбы и добыча других водных биоресурсов //информационный бюллетень. – Махачкала: ФГБОУ ВО Дагестанский ГАУ, 2020. – 64 с.

Навроцкий В.В., Ляпидевский В.Ю., Павлова Е.П. Внутренние волны и их биологические эффекты в шельфовой зоне моря // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2012. Т.6. С. 22–31.

Новогрудский Б.В. и др. Исследование океана из космоса. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 52 с.

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.

Романов А. А., Шевченко Г.В., Цой А.Т. Идентификация мезомасштабных вихревых структур на Юго-Восточном шельфе Камчатки по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 80-89.

Ростов И. Д., Рудых Н. И., Дмитриева Е. В. [и др.]. Электронный атлас гидрофизических характеристик района юго-восточной части полуострова Камчатка // Океанология. 2005. Т. 45. № 4. С. 629-633.

Сабинин К.Д. Интенсивные внутренние волны в Мировом Океане / Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А. // Океанология. 2004. Т.44, №6. С.805-810.

Сабинин К.Д. Серебряный А.Н. Горячие точки в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т.53. №3. С.410-436.

Сваричевский А.С., Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Новые данные по геоморфологии южной части Курильского глубоководного желоба // Структура осадочных отложений Курило-Камчатского желоба. Южно-Сахалинск: ДВНЦ АН СССР. 1979. С.37-50

Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря // Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И. В. Лавренова, Е. Г. Морозова. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 363 с.

Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря. Океанология. 1985. Т.25, №5. С.744-751.

Серебряный А.Н. Воздействие внутренних волн больших амплитуд на буксируемый гидродинамический заглубитель. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т.9, №2. С.39-45.

Степанюк И.А. Методы измерений характеристик морских внутренних волн. СПб: изд. РГГМУ, 2002. 138 с.

Талипова Т. Г., Куркина О. Е., Терлецкая Е. В., Куркин А.А., Рувинская Е.А. Моделирование внутренних волн в прибрежной зоне Баренцева моря // Экологические системы и приборы. 2014. № 3. С. 26–38.

Тюгин Д.Ю., Наумов А.А., Куркина О.Е., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Динамические эффекты в придонном слое, индуцированные аномальными внутренними волнами // Экологические системы и приборы. 2014. № 1. С. 20-28.

Alpers W., He Ming-Xia, Zeng Kan, Guo Ling-Fei and Li Xiao-Ming. The distribution of internal waves in the East China Sea and the Yellow Sea studied by multi-sensor satellite images // Proceedings of IEEE International Geoscience and

Remote Sensing Symposium. 2005. P. 4784-4787. doi: 10.1109/IGARSS.2005.1526742.

Alpers, W. Theory of radar imaging of internal waves. *Nature*. 1985. V.314. P. 245–247.

Azevedo, A., da Silva, J.C.B., New, A.L. On the generation and propagation of internal solitary waves in the southern Bay of Biscay // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2006. V.53. Is.6. P.927-941. DOI: 10.1016/j.dsr.2006.01.013.

Baines, P.G. On internal tide generation models // *Deep Sea Res. Part A*. 1982 V.29 (3) P. 307–338. doi: 10.1016/0198-0149(82)90098-X.

Barton B.I., Lenn Y.D., Lique C. Observed Atlantification of the Barents Sea Causes the Polar Front to Limit the Expansion of Winter Sea Ice // *Journal of Physical Oceanography*. 2018. V. 48. N. 8. P. 1849-1866.

Callaghan T.V., Bergholm F., Christensen T.R., Jonasson C., Kokfelt U., & Johansson M. A new climate era in the sub-Arctic: Accelerating climate changes and multiple impacts // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. N. 14. DOI:10.1029/2009gl042064

Chapron, B., Kudryavtsev, V.N., Collard, F., Rascle, N., Kubryakov, A.A. and Stanichny, S.V. Studies of Sub-Mesoscale Variability of the Ocean Upper Layer Based on Satellite Observations Data // *Physical Oceanography*/ V. 27(6). P. 619-630. doi:10.22449/1573- 160X-2020-6-619-630.

Churnside J.H., Ostrovsky L.A. Lidar observation of a strongly nonlinear internal wave in the Gulf of Alaska // *Int. J. Remote Sens.* 2005. V. 26. № 1. P. 167-177.

Colosi, J. A., Beardsley, R. C., Lynch, J. F., Gawarkiewicz, G., Chiu, C.-S., and Scotti, A. Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer // *Shelfbreak Primer study, J. Geophys. Res.* V. 106(C5). P. 9587– 9601. doi:10.1029/2000JC900124.

Defant, A. *Physical Oceanography*. Oxford: Pergamon Press, 1961. Vol. 2, 598 p.

Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. Oceanic Atmos. Technol.* V. 19. P. 183 – 204. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2.

Garret C.G.R., Munk W.H. Space-time scales of internal waves // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 180. N. 3. P.291-297.

Garwood, J.C., R.C. Musgrave, and A.J. Lucas. Life in internal waves // *Oceanography.* 2020. V. 33(3). P. 38–49.

Gerkema, T., Lam, F.-P.A., Maas, L.R.M., 2004. Internal tides in the Bay of Biscay: conversion rates and seasonal effects // *Deep-Sea Research II.* V. 51. P. 2995–3008.

Heathershaw, A. D. Observations of internal wave current fluctuations at the shelf edge and their implications for sediment transport // *Continental Shelf Res.* 1985. V. 4 P. 485–493.

Ho, C., Su F., Kuo N., Tsao C. and Zheng Q. Internal wave observations in the northern South China Sea from satellite ocean color imagery // *OCEANS 2009-EUROPE.* 2009. P.1-5. doi: 10.1109/OCEANSE.2009.5278324.

Itoh, S., Tanaka, Y., Osafune, S., Yasuda, I., Yagi, M., Kaneko, H., Konda, S., Nishioka, J., & Volkov, Y.N. Direct breaking of large-amplitude internal waves in the Urup Strait. *Progress in Oceanography.* 2014 V.126 P.109-120.

Jackson C. R. *An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties.* Alexandria: Global Ocean Associates. 2004, 560 p. URL: https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html (дата обращения: 02.03.2022).

Jackson, C.R., J.C.B. da Silva, and G. Jeans. The generation of nonlinear internal waves // *Oceanography.* 2012. V. 25(2). P.108–123.

Kagan, B., Sofina E. Surface and internal semidiurnal tides and tidally induced diapycnal diffusion in the Barents Sea: A numerical study // *Continental Shelf Research.* 2014. Vol. 91. P. 158-170.

Konik, A. A., Zimin A.V., Kozlov I.E. Spatial and temporal variability of the polar frontal zone characteristics in the Barents Sea in the first two decades of

the XXI century // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. V. 14. N. 4. P. 39-51. DOI 10.7868/S2073667321040043.

Kurekin A., Peter E. Land and P. I. Miller. Internal Waves at the UK Continental Shelf: Automatic Mapping Using the ENVISAT ASAR Sensor // *Remote. Sens.* 2020. V. 12. 2476.

Lavrova O. Y., Sabinin K. D., Badulin S. I., Radar observation of internal wave and current interactions // *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99.* 1999. V.1. P. 159-161. doi: 10.1109/IGARSS.1999.773433.

Lavrova, O.Y., Mityagina, M.I. & Sabinin, K.D. Study of internal wave generation and propagation features in non-tidal seas based on satellite synthetic aperture radar data // *Dokl. Earth Sc.* 2011. V. 436. P. 165–169.

Lucas, A.J., P.J.S. Franks, and C.L. Dupont. Horizontal internal-tide fluxes support elevated phytoplankton productivity over the inner continental shelf. // *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments.* 2011. V. 1(1). P. 56–74.

Merrifield, M.A., Holloway, P.E. Model estimates of M2 internal tide energetics at the Hawaiian Ridge // *Journal of Geophysical Research.* 2002. V. 107 (C8). 3179.

Mitnik L. M. and V. A. Dubina. Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril Straits area // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich.* 2012. P. 7632-7635. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351860.

Morozov E.G., Paka V.T., Bakhanov V.V. Strong internal tides in the Kara Gates Strait // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L16603.

Morozov E. G. *Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling: A Global View* // Springer, 2018. – 304 p.

Nakamura, T. et al. Large-amplitude internal waves observed in the Kruzenshtern Strait of the Kuril Island Chain and possible water transport and mixing // *Continental Shelf Research.* 2010. N. 6. P. 598–607.

Navrotsky V., Pavlova E. Internal waves space structure in shelf zones of the far eastern seas // *Pacific oceanography.* 2010. N.1. P.65 – 76.

Niwa, Y., Hibiya, T. Three-dimensional numerical simulation of M2 internal tides in the East China Sea // *Journal of Geophysical Research*. 2004. V. 109. C04027.

Osadchiev A. Internal waves as a source of concentric rings within small river plumes / A. Osadchiev, R. Sedakov, A. Gordey, A. Barymova // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. N. 21.

Pao, H. P. and He, Q. Generation and Transformation of Intense Internal Waves on Shelves. // The University of Maryland, COAA Scientific Workshop, Collage Park, July 13, 2002.

Pichon, A., Morel, Y., Baraille, R., & Quaresma, L. Internal tide interactions in the Bay of Biscay: Observations and modelling // *Journal of Marine Systems*. 2013. V.109. P. S26-S44.

Purwandana, A., Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P. Observation of internal tides, nonlinear internal waves and mixing in the Lombok Strait, Indonesia // *Continental Shelf Research*. 2021. V.216. 104358.

Quaresma, S., Vitorino, J., Oliveira, A., da Silva, J. Evidence of sediment resuspension by nonlinear internal waves on the western Portuguese mid-shelf // *Marine Geology*. 2007. V. 246 (2–4). P. 123-143.

Rippeth, T. P., Lincoln, B. J., Lenn, Y.-D., Green, J. A. M., Sundfjord, A., & Bacon, S. Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography. *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. P. 191–194.

Robinson, I.S. *Discovering the Ocean from Space. The Unique Applications of Satellite Oceanography*. London: Springer. 2010. 638 p. doi:10.1007/978-3-540-68322-3

Rogachev, K.A., Shlyk, N.V. Characteristics of the Kamchatka Current Eddies // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2019 V. 44 P. 416–423.

Scotti, A., Butman, B., Beardsley, R. C., Alexander, P. S., & Anderson, S. A Modified Beam-to-Earth Transformation to Measure Short-Wavelength Internal Waves with an Acoustic Doppler Current Profiler // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005. V. 22(5). P. 583-591.

Serebryany A.N., Konstantinov O.G. New data on internal waves on the sea shelf based on combined monitoring with a panoramic camera and ADCP // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. V. 17. N. 6. P. 122-126.

Serreze M.C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // Philosophical transactions: mathematical, physical and engineering science. 2015. V. 373. N. 2045. P. 20140159.

Sherwin, T.J., Vlasenko, V.I., Stashchuk, N., Jeans, D.R.G., Jones, B. Along-slope generation as an explanation for some unusually large internal tides // Deep-Sea Research I. 2002. V. 49. P. 1787–1799.

Shroyer, E.L., Moum, J.N., & Nash, J.D. Nonlinear internal waves over New Jersey's continental shelf // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116. C03022

Small, J., Hallock, Z.R., Pavey, G., & Scott, J.C. Observations of large amplitude internal waves at the Malin Shelf edge during SESAME 1995 // Continental Shelf Research. 1999. V. 19. P. 1389-1436.

Stashchuk N and Vlasenko V. Internal Wave Dynamics Over Isolated Seamount and Its Influence on Coral Larvae Dispersion // Front. Mar. Sci. 2021. V.8. 735358. doi: 10.3389/fmars.2021.735358

Stastna, M., and Lamb, K. G. Sediment resuspension mechanisms associated with internal waves in coastal waters // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C10016. doi:10.1029/2007JC004711.

Subeesh M.P., Unnikrishnan A.S., Francis P.A. Generation, propagation and dissipation of internal tides on the continental shelf and slope off the west coast of India // Continental Shelf Research. 2021. V. 214. 104321.

Tanaka, Y., I.Yasuda, S.Osafune, T.Tanakab, J.Nishiokad, and Y. N.Volkove. Internal tides and turbulent mixing observed in Bussol Strait // Prog. Oceanogr., 2014. V. 126. P.98-108.

Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // *Deep Sea Res. Part I*. 2003. V. 50. N. 2. P. 317–338.

Vlasenko, V., Stashchuk, N., Hutter, K. *Baroclinic Tides: Theoretical Modelling and Observational Evidence*. New York: Cambridge University Press, 2005. 351 p. DOI: 10.1017/CBO9780511535932.

Yamanouchi T., & Takata K. Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences - Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016) // *Polar Science*. 2020. P. 100548. DOI:10.1016/j.polar.2020.100548

Zhao, Z., Klemas, V., Zheng, Q., Yan, X.-H. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. L06302.

Приложение. Многолетний массив РЛИ Sentinel для Курило-Камчатского региона

В таблице 1 приведено количество РЛИ Sentinel-1 для Курило-Камчатского региона с 2014 по 2021 год.

Таблица 1. Распределение количества РЛИ Sentinel-1 по годам

Год	Количество РЛИ
2014	486
2015	537
2016	514
2017	916
2018	905
2019	1091
2020	1033
2021	1037

Приведенная таблица демонстрирует, что с момента начала работы спутников группировки Sentinel накопился обширный массив РЛИ, покрывающих Курило-Камчатский регион. При этом отмечается тенденция к увеличению количества снимков от года к году.