

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанологии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

# «ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРИПОЛЯРНЫХ И ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЯХ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

Исполнитель: Свергун Егор Игоревич, студент группы ПО-М17-1-8 Научный руководитель: д.г.н., профессор, Аверкиев Александр Сергеевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«\_\_\_»\_\_\_\_20\_\_г.

Санкт-Петербург

# Содержание

Список используемых сокращений	3
Введение	4
Глава 1. Короткопериодные внутренние волны и особенности	
гидрологических условий в исследуемых районах	8
1.1. Короткопериодные внутренние волны как предмет исследования	8
1.2 Физико-географическая характеристика объектов исследования	11
Глава 2. Материалы и методы	36
2.1 Материалы, используемые в настоящей работе	36
2.2 Методика обработки данных контактных измерений	40
2.3 Методика оценки ожидаемых высот внутренних волн	44
2.3 Методика оценки эффектов в придонном слое, вызванных	
экстремальными внутренними волнами	46
3. Особенности короткопериодных внутренних волн в приполярных и	
дальневосточных морях по данным экспериментальных исследований	48
3.1 Особенности короткопериодных внутренних волн в Белом море	48
3.2 Особенности короткопериодных внутренних волн в Баренцевом море.	53
3.3 Особенности короткопериодных внутренних волн в Охотском море	57
3.4 Особенности короткопериодных внутренних волн в Авачинском	
заливе	61
3.5 Оценки динамических эффектов, вызванных экстремальными	
короткопериодными внутренними волнами в придонном слое	66
Заключение	69
Список используемой литературы	71

# Список используемых сокращений

ВВ – внутренние волны;

КВВ – короткопериодные внутренние волны;

СТD – от англ.: conductivity, temperature, depth – электропроводность, температура, глубина. В русскоязычной литературе можно встретить такой вариант расшифровки: соленость, температура, давление;

ИВВ – интенсивные внутренние волны;

ВПВ – внутренняя приливная волна;

ВКС – верхний квазиоднородный слой;

ПО – программное обеспечение;

РГГМУ – Российский государственный гидрометеорологический университет;

СПбГУ – Санкт-Петербургский Государственный университет

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

П.П. Ширшова Российской академии наук;

#### Введение

Совершенствование морской транспортной сети и разработка новейших нефтегазоносных месторождений Арктики и Дальнего востока играют устойчивого экономического развития Российской ключевую роль для Указанные мероприятия невозможно осуществлять без Федерации [1]. совершенствования гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности. В спектр задач гидрометеорологического обеспечения входит ледовая разведка, прогноз ледовой обстановки, анализ и прогноз морского волнения [2], то есть работа с процессами, происходящими на морской поверхности. Однако процессы, протекающие в деятельном слое моря, также могут вызывать неблагоприятные эффекты. Примером тому могут служить короткопериодные внутренние волны, принимающие вид интенсивных внутренних волн, которые отличаются высотой, превышающей 10 метров, сильной крутизной и нелинейностью [3]. Накопленный экспериментальный опыт показывает, что динамические эффекты от интенсивных внутренних волн [4], затрудняют подводную навигацию ограничивают управляемость подводных необитаемых аппаратов [5], способны размывать донный грунт [6], что может приводить к потере проектной устойчивости гидротехнических сооружений на шельфе [7]. Результаты натурных экспериментов показывают, что для шельфовых районов приливных морей характерна высокая интенсивность локальной изменчивости гидрофизических полей, посредством которой происходит передача энергии приливных процессов OT короткопериодному внутреннему волнению [8]. Результаты современных численных экспериментов [9] показывают, что происходящие в настоящем глобальные изменения климата приводят к существенным изменениям в циркуляции и вертикальной структуре вод в приполярных бассейнах, что, в свою очередь, может приводить к увеличению числа мод и росту амплитуд

внутренних волн. Таким образом, изучение интенсивных внутренних волн с целью получения их ожидаемых характеристик является весьма актуальной задачей в условиях современного меняющегося климата.

Появление во второй половине XX века спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой позволило обнаружить поверхностные проявления короткопериодных внутренних волн во многих районах Мирового океана. Результаты многолетних исследований при помощи радиолокаторов синтезированной апертурой позволили выявить районы наибольшей встречаемости короткопериодного внутреннего волнения [10, 11, 12]. В Белом море внутренние волны регистрируются в теплое время года на южной границе пролива Горло и вокруг Соловецких островов; в Баренцевом море – около северного берега Кольского полуострова, южнее архипелага Шпицберген, западнее Земли Франца Иосифа, у пролива Карские ворота; в Охотском море – в шельфовой зоне острова Сахалин, в Курильских проливах; у Тихоокеанского побережья Камчатки – в Кроноцком и Авачинском заливах.

Несмотря на очевидные преимущества космических радиолокаторов с синтезированной апертурой, а именно всепогодность и широкий охват акваторий Мирового океана, физическая природа зондирования поверхности океана при радиолокаторов определить помощи не позволяет ПО радиолокационным изображениям такие важные характеристики, как высоты и В шельфовых районах периоды внутренних волн. арктических И дальневосточных морей проводились судовые экспедиционные исследования. По данным длительных измерений в Белом, Баренцевом и Охотском морях установлено, что для их шельфовых зон характерно наличие интенсивного внутреннего волнения, которое зачастую проявляется приливной С периодичностью [11, 13, 14]. Частое проявление интенсивных внутренних волн В исследуемых морях делает необходимым понимание возможной максимальной ожидаемой внутренних обеспечения высоты волн ДЛЯ безопасности экономической деятельности. Однако продолжительность буйковых судовых измерений ограничена, И весьма ЧТО делает

затруднительным прогноз характеристик интенсивных волн, поскольку задача прогноза является многофакторной [15], так как характеристики волн зависят от особенностей стратификации вод, атмосферной циркуляции, величины прилива. При наличии массива высот короткопериодных внутренних волн по данным контактных наблюдений, можно оценить ожидаемые за некоторый период времени высоты волн, например, за месяц. При этом полагается, что различные волнообразующие факторы нивелируют свое действие, и оценка ожидаемых высот короткопериодных волн сводится к решению однофакторной задачи экстраполяции функции распределения наблюдаемых высот волн [16].

Как было сказано ранее, интенсивные внутренние волны вызывают динамические эффекты в придонном слое [6]. В нашей стране эффекты влияния внутренних волн на устойчивость морских сооружений не регламентируются и не рассматриваются в практике инженерных изысканий [17, 18]. Хотя существуют теоретические проработки этой проблемы [6, 19] в которых описываются динамические эффекты, возникающие под влиянием интенсивных внутренних волн. Результаты указанных теоретических исследований предполагают в качестве одного из предикторов для расчета придонных эффектов использовать амплитуду внутренних волн. Таким образом, информация об ожидаемых высотах короткопериодных внутренних волн позволяет оценить возможные динамические эффекты в придонном слое, возникающие при распространении внутренних волн, a также проанализировать их потенциальную опасность для рукотворных объектов.

Целью данной работы является обобщение сведений о характеристиках короткопериодных внутренних волн в шельфовых районах арктических и дальневосточных морей по результатам морских экспедиционных исследований и оценка возможных экстремальных динамических эффектов в придонном слое связанных с ними. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Обработать результаты контактных наблюдений за внутренними волнами в шельфовых районах Белого, Баренцева, Охотского морей и Авачинского залива Тихого океана.

2. Оценить характеристики короткопериодных внутренних волн, такие как высоты, периоды и фазовые скорости.

3. Оценить ожидаемые экстремальные высоты короткопериодных внутренних волн за месяц.

4. Оценить динамические эффекты в придонном слое, вызванные ожидаемыми экстремальными интенсивными внутренними волнами.

Данная работа состоит из введения на 4 страницах, 3 глав на 61 страницах, заключения на 2 страницах, списка использованной литературы из 55 наименований, из них на русском языке – 48, на английском языке – 7.

# Глава 1. Короткопериодные внутренние волны и особенности гидрологических условий в исследуемых районах

### 1.1. Короткопериодные внутренние волны как предмет исследования

Внутренние волны (ВВ) являются колебаниями частиц жидкости, выведенных некоторой силой из своего положения равновесия в устойчиво стратифицированной по плотности морской среде. Внутренние волны существуют в пикноклине – слое повышенного градиента плотности, который является для них волноводом. Колебания частиц жидкости в пикноклине возникают в результате взаимодействия 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 [20].

Спектр внутреннего волнения непрерывен и весьма обширен [21]. С уменьшением частоты внутренних волн, их энергия уменьшается, однако на спектре имеются всплески энергии, один из которых приурочен к области *короткопериодных внутренних волн* (КВВ) (рисунок 1), которые характеризуются масштабом периодов от десятков минут до единиц часов [20].

Диапазон изменчивости частот внутренних волн ограничен сверху частотой Вяйсяля-Брента, которая описывается выражением (1):

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

Где: *N* – частота Вяйсяля-Брента, *ρ* – плотность воды, *g* – ускорение свободного падения, *z* – глубина.

Если частота внутренних волн ниже, чем частота Вяйсяля-Брента, то такие волны могут существовать во всей толще моря и возможно их изучение при помощи стандартных методов измерений (таких как CTD-зондирование). КВВ, частота которых приближается к частоте Вяйсяля-Брента, тяготеют к ядру

пикноклина, который имеет довольно малую, по сравнению с глубиной моря, толщину. Поэтому для изучения КВВ применяются специальные методы измерений, такие, как например СТD-сканирование (представляет собой совокупность учащенных до 1 – 2 минут СТD-зондирований), или измерения при помощи так называемых гирлянд температурных датчиков, которые позволяют измерять температуру на многих горизонтах одновременно [22]. Подробнее указанные методы будут рассмотрены в следующей главе.



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) [20]

Источником генерации КВВ может являться дезинтеграция внутреннего прилива на шельфовом склоне морей [23], взаимодействие мелко залегающего турбулизированным [23], взаимодействие пикноклина с полем ветра пикноклина с термическими фронтами [24]. В Арктических и дальневосточных приливных морях находит наибольшее распространение генерация КВВ при взаимодействии внутреннего полусуточного прилива с шельфовым материковым склоном, а также при взаимодействии распространяющихся внутренних приливных волн с неоднородностями рельефа дна [8, 11, 14, 25].

Зачастую в приливных морях КВВ принимают вид интенсивных внутренних волн (ИВВ). Такие волны характеризуются высотой более 10 метров, сильной крутизной и нелинейностью. Сочетание значительной высоты и нелинейности, а также малого времени жизни приводит к высокой обрушения ИВВ, вероятности которое может приводить К высокой интенсивности локальной изменчивости вертикальной и горизонтальной структуры вод. Даже не обрушаясь, ИВВ способны во много раз усиливать вертикальное перемешивание [26]. Таким образом, ИВВ вносят существенный вклад в локальную изменчивость гидрофизических параметров и вертикальное перемешивание вод.

## 1.2 Физико-географическая характеристика объектов исследования

### Физико-географическая характеристика Белого моря

Географическое положение, морфометрия, и рельеф дна. Белое море – внутреннее море, расположенное на северо-западе Российской Федерации, окруженное с юга окраиной европейской части России, а с севера – Кольским полуостровом. Водной граница Белого моря является линия Мыс Канин Нос – Мыс Святой нос, которая отделяет Белое море от Баренцева. Площадь поверхности Белого моря составляет около 90 тыс. км<sup>2</sup>, объем 6 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина 67 м, наибольшая глубина 350 м. Берега, проливы и заливы Белого моря имеют собственные географические названия. Карта географических названий объектов Белого моря показана на рисунке 2.

Рельеф дна Белого моря весьма сложен и разнообразен. Наибольшую глубину, превышающую 300 метров, имеет Бассейн и Кандалакшский залив, а наименьшую глубину имеет северная часть моря, где глубины не превышают 50 метров. Дно Горла Белого моря представляет собой желоб, который простирается вдоль пролива. Наиболее плавные изменения глубины характерны для Онежского и Двинского заливов, а наиболее резкие – для Соловецких Салм и Кандалакшского залива. Карта рельефа дна Белого моря приведена на рисунке 2 [27].



Рисунок 2 – Батиметрия и названия географических объектов Белого моря [28]

Вертикальная структура вод и фронтальные зоны. В летнее время года в Белом море выделяется три характерных района, отличающихся стратификацией район Бассейна Кандалакшского вод: И залива, сильной стратификацией характеризующийся вод, район Горла, где наблюдаются перемешанные воды, район Двинского и Онежского заливов, где происходит взаимодействие вод Белого моря со стоком речных вод. Карта положения районов моря с различной стратификацией показана на рисунке 3.



Рисунок 3 – Районирование Белого моря по вертикальной структуре вод (1 – стратифицированные воды, 2 – квазиоднородные воды, 3 – воды заливов)

Воды Бассейна характеризуются наличием ярко выраженного верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), который простирается до глубины 10 метров. Слой скачка плотности располагается на глубинах от 10 до 30 метров. Ниже слоя скачка располагается слой глубинных вод, который характеризуется практически неизменными в течение года характеристиками. Здесь наблюдается отрицательная температура воды. Таким образом, район Бассейна и Кандалакшского залива характеризуется наличием трехслойной вертикальной структуры вод.

Ветро-волновое перемешивание вод Горла Белого моря приводит к сглаживанию профилей температуры и солености. В данном районе наблюдается практически равномерное вертикальное распределение температуры и солености. Значения температуры на поверхности и у дна различаются менее чем на 0,2°C. Значения поверхностной и придонной солености различаются менее чем на 0,6‰.

Воды Двинского и Онежского заливов Белого моря характеризуются наличием двухслойной структуры: верхний слой является распресненным и более теплым, чем нижний, более соленый и холодный. Такая структура вод связана со стоком рек в вершины заливов.

Границами вышеназванных районов Белого моря являются фронтальные зоны. В Белом море выделяют четыре основных гидрологических фронта: шельфово-приливной Горловский фронт на южной границе Горла Белого моря, который отделяет стратифицированные воды Бассейна и однородные воды Горла; шельфово-приливной Соловецкий фронт, отделяющий воды Бассейна и воды Онежского залива; стоковый Двинский фронт, отделяющий воды Бассейна и Двинского залива; стоковый Онежский фронт, расположенный в Онежском заливе вблизи устья реки Онега. Положение основных фронтов Белого моря показано на рисунке 4.

Стоковые фронты в Белом море возникают вследствие стока рек Онега и Северная Двина. Преимущественно, данные фронты прослеживаются в поле солености. Градиенты солености в них могут достигать 0,4 ‰/км. Стоковые фронты также характеризуются наличием градиента температуры, который возникает вследствие того, что речные стоки выносят более теплые воды. Градиент температуры в стоковых фронтах может достигать 0,17°С/км.



Рисунок 4 – Основные гидрологические фронты Белого моря [29]

Горловский шельфово-приливной фронт разделяет перемешанные воды горла и стратифицированные воды Бассейна. Данный фронтальный раздел наиболее ярко выражен летом. Здесь градиенты температуры могут достигать 1°С/км. Временная изменчивость положения данного фронта определяется изменчивостью вод Горла и Бассейна. Соловецкий шельфово-приливной фронт разделяет стратифицированные воды Бассейна и перемешанные воды Соловецкого архипелага. На его изменчивость в значительной мере оказывает влияние приливное перемешивание и конвергенция приливного потока в узкостях [27].

**Приливы.** Приливы в Белом море ярко выражены. Приливная волна из Баренцева моря распространяется по Воронке и доходит до Мезенского залива. Такая приливная волна, двигаясь перпендикулярно входу в залив Горло генерирует приливные волны, распространяющиеся вдоль Горла в Бассейн. В Бассейне приливные волны отражаются от Летнего и Карельского берегов и следуют обратно в Бассейн. Интерференция приливных волн создает стоячую волну, имеющую правильный полусуточный характер (рисунок 5). Движение приливной волны создает в Белом море приливные течения. В Горле скорости течений И 250 см/с, приливных велики составляют порядка В Кандалакшском заливе  $-30\div35$  см/с, в Онежском заливе  $-80\div100$  см/с. В Бассейне скорости приливных течений сопоставимы с фоновыми и достигают 15 см/с. Структура приливной циркуляции в Белом море достаточно сложна. Приливные течения характеризуются наличием круговоротов И разнонаправленных потоков. В основном, направления потоков приливной циркуляции определяется морфометрией моря.



Рисунок 5 – Котидальная карта приливов в Белом море (сплошными линиями показаны изофазы прилива, римскими цифрами на них обозначены моменты наступления изофаз по Гринвичу; пунктирными линиями показаны изоамплитуды прилива, арабскими цифрами на них указано значения амплитуды в сантиметрах) [27]

Особенности короткопериодных внутренних волн. По данным спутниковых наблюдений, поверхностные проявления короткопериодных внутренних волн в Белом море наиболее часто регистрируются в районе Западной Соловецкой салмы и южнее пролива Горло. Поверхностные проявления внутренних волн встречаются на каждом десятом спутниковом снимке в Западной Соловецкой салме и на каждом четвертом снимке в районе южнее пролива Горло (рисунок 6) [10].



Рисунок 6 – Повторяемость поверхностных проявлений внутренних волн в Белом море по данным космических радаров за летний период 2007 года [10]

Генерации КВВ в указанных районах способствует вырождение внутренних приливных волн, которые возникают в данных районах вследствие того, что достаточно мощный поток приливной энергии ориентирован в поперечном направлении относительно склонов глубоководных впадин. Причем районы характеризуются вышеназванные критическим топографическим наклоном (отношение наклона дна к наклону характеристик приливных внутренних волн равно единице), что и является необходимым условием наиболее интенсивной генерации внутренних приливных волн [30]. анализ данных натурных и спутниковых Совместный наблюдений за районах [31] указанных позволяют внутренними волнами в выявить

особенности временной изменчивости короткопериодного внутреннего волнения в Белом море. По данным экспедиционных наблюдений выявлено, что внутренние волны проявляются с приливной периодичностью, причем в основном вследствие взаимодействия приливной волны с неоднородностями рельефа дна. При выходе приливной волны на мелководные участки западных прибрежных районов могут генерироваться интенсивные короткопериодные внутренние волны высотой до 18 метров. Генерации внутренних волн в вышеуказанных районах также способствует ярко выраженная трехслойная структура вод в летний период и близость приливно-шельфовых фронтов. На представлено сопоставление данных измерений рисунке 7 колебаний пикноклина с приливными колебаниями уровня, которое показывает, что генерация внутренних волн происходит с приливной периодичностью.



Рисунок 7 – Сопоставление колебаний температуры в термоклине с приливными колебаниями уровня (показаны внизу точками) по данным экспедиционных исследований летом 2010 года [29]

### Физико-географическая характеристика Баренцева моря

Географическое положение, морфометрия и рельеф дна. Баренцево море – материковое окраинное море, самое западное из арктических морей России. На юге границей Баренцева моря служат берега Кольского полуострова и берега, расположенные восточнее полуострова Канин. Остальные границы моря – водные, проведенные по условным линиям, которые закреплены международными договорами.

Площадь поверхности моря составляет 1 млн. 424 тыс. км<sup>2</sup>, объем моря равен 316 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина 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 возвышенностей и желобов. Рельеф дна Баренцева моря весьма сложен и разнообразен. Карта рельефа дна Баренцева моря показана на рисунке 8.



Рисунок 8 – Карта рельефа дна Баренцева моря [28]

Вертикальная структура вод. Вертикальная структура вод Баренцева моря в летнее время определяется распространением тёплых атлантических вод. В связи с этим, существует несколько районов Баренцева моря, отличающихся вертикальным распределением температуры (рисунок 9).

На юго-западе моря температура достаточно плавно уменьшается с глубиной. В районе данном тёплые атлантические воды могут распространяться углублениям ПО дна, что приводит К повышению температуры приводного слоя.

Северо-восточная часть моря характеризуется тем, что в летнее время, температура воды понижается от поверхности до глубин около 40 метров, где сохраняются отрицательные значения температуры. Далее, с глубиной температура повышается. Максимум температуры наблюдается в придонном слое и связан с распространением атлантических вод. Можно сказать, что северо-восток Баренцева моря характеризуется наличием холодного промежуточного слоя на глубине от 40 до 100 метров. Холодный промежуточный слой также прослеживается в районе Центральной впадины. Механизм его формирования в летнее время также связан с поступлением атлантических вод

Мелководный район юго-восточной части Баренцева моря характеризуется наличием в летнее время верхнего квазиоднородного слоя, распространяющегося до глубины порядка 12 метров. Далее наблюдается резкий скачок температуры и последующее ее уменьшение до дна. Типичные профили температуры для вышеописанных районов показаны на рисунке 10.

Акватория Баренцева моря характеризуется слабо выраженной стратификацией, что способствует развитию ярко выраженного верхнего квазиоднородного слоя. В целом, ВКС прослеживается до глубин порядка 20 метров. Наиболее выраженная стратификация присутствует в юго-восточной части моря. Здесь, как было сказано выше, ВКС прослеживается до глубин порядка 12 метров [32].



Рисунок 9 – Водные массы Баренцева моря летом: 1 – атлантические воды, 2 – арктические воды, 3 – прибрежные воды, 4 – баренцевоморские воды [32]



Рисунок 10 – Типичные для различных районов моря вертикальные профили температуры летом: a) – юго-западная часть моря, б) – северо-восточная часть моря, в) – центральная часть моря, г) – юго-восточная часть моря [32]

**Приливы.** 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 арктическая И атлантическая приливные волны интерферируют. В основном, приливы в Баренцевом море имеют правильный полусуточный характер (рисунок 11). Взаимодействие приливных волн генерирует приливные течения в Баренцевом море. Скорости приливных течений в Баренцевом море выше, чем фоновых. Наибольшее значение скоростей приливных течений наблюдается в поверхностном слое и на Самые мелководье. большие скорости течений наблюдаются ВЛОЛЬ Мурманского берега Кольского полуострова и составляет порядка 160 см/с [33].



Рисунок 11 — 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) [32]

Особенности короткопериодных внутренних волн. Как было показано выше, рельеф дна Баренцева моря достаточно неоднороден. Поэтому, в Баренцевом море существуют районы, где КВВ проявляются чаще, чем в остальных районах моря. По данным анализа радиолокационных изображений практически регулярно поверхностные проявления BB выявлено, что регистрируются у свала глубин между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, у пролива Карские ворота, у Воронки Горла Белого моря, у северного берега Кольского полуострова. В указанных районах внутренние волны проявляются примерно на каждом 5 снимке. Карта повторяемости проявлений внутренних волн на акватории Баренцева моря показана на рисунке 12 [10].



Рисунок 12 – Повторяемость поверхностных проявлений внутренних волн в Баренцевом море по данным космических радаров за летний период 2007 года [10]

В работе [34] указывается, что очаги генерации внутренних приливных волн (ВПВ) в Северном ледовитом океане локализованы вблизи 23 континентального склона и масштабных неоднородностей донной топографии. Здесь, как и в Белом море, ВПВ диссипируют, порождая короткопериодные волны, однако, диссипация энергии внутренних волн в Северном ледовитом океане, а в частности в Баренцевом море, происходит на значительном от источника расстоянии (до 300 км).

Экспедиционные наблюдения [8] позволили выявить, что в прибрежной зоне, около Мурманского берега Кольского полуострова имеет место другой механизм генерации: в этом районе КВВ генерируются сильными приливными течениями, взаимодействующими с неровностями дна у островов и береговой черты. В данном районе также могут возникать интенсивные короткопериодные внутренние волны, которые проявляются при переходе от большой воды к малой. На рисунке 13 показана запись колебаний температуры в термоклине, на которой зарегистрирован цуг ИВВ.



Рисунок 13 – Пример наблюдения цуга интенсивных внутренних волн по данным экспедиционных наблюдений около Мурманского берега Кольского полуострова [8]

Оценки среднего частотного спектра колебаний термоклина позволяют выявить преобладающие периоды внутренних волн. Такой спектр показан на рисунке 14. На нем можно выделить два характерных пика – ВВ полусуточного периода и ВВ с периодом 2 – 3 часа. На фоне таких достаточно медленных колебаний термоклина удалось выявить цуги интенсивных короткопериодных внутренних волн. Двухмерный спектральный анализ позволил выявить направление цугов КВВ: в отлив они движутся в сторону открытого моря, а в

прилив – в сторону берега. В целом, наблюдаемые в ходе проведенной экспедиции внутренние волны типичны для шельфовой зоны многих морей.



Рисунок 14 – Спектр колебаний термоклина по данным экспедиционных наблюдений у Мурманского берега Кольского полуострова [8]

### Физико-географическая характеристика Охотского моря

Географическое положение, морфометрия и рельеф дна. Охотское море является окраинным морем смешанного окраинно-материкового типа, расположенным на Дальнем востоке России. Площадь поверхности моря составляет 1603 тыс. км<sup>2</sup>, объем 1318 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина 821 м, наибольшая глубина 3916 м. Охотское море почти повсюду имеет естественные рубежи и только на юго-западе от Японского моря его отделяют условные линии: м. Южный — м. Тык и в проливе Лаперуза м. Крильон — м. Соя. Юговосточная граница моря идет от м. Носяппу (о. Хоккайдо) через Курильские острова до м. Лопатка (Камчатка), при этом все проходы между о. Хоккайдо и Камчаткой включаются в Охотское море.

Рельеф дна Охотского моря весьма сложен и неоднороден. Северная часть моря представляет собой материковую отмель, ширина которой колеблется от 100 до 200 миль. С западного края моря расположена островная отмель Сахалина, с восточного края — материковая отмель Камчатки. Шельф занимает около 22% площади дна. Остальная, большая часть моря находится в пределах материкового склона (от 200 до 1500 м), на котором выделяются отдельные подводные возвышенности, впадины и желоба. Южная часть моря является наиболее глубокой и существенно контрастирует с северной, мелководной частью. Рельеф дна Охотского моря показан на рисунке 15 [33].



Рисунок 15 – Рельеф дна Охотского моря [28]

Вертикальная структура вод. Охотскому морю свойственно наличие субарктической структуры вод, характеризующейся наличием холодного промежуточного слоя летом. В Охотском море вертикальная структура вод определяется наличием основных водных масс. Различают поверхностную, охотоморскую, промежуточную, и глубинную тихоокеанскую водные массы. Поверхностная водная масса прослеживается от поверхности до горизонтов 30-40 метров. Охотоморская водная масса летом проявляется в виде холодного горизонтами 40-150 промежуточного слоя, залетающего между М. Характеризуется наличием отрицательных температур в центральной части моря и у берегов Сахалина. Промежуточная водная масса формируется в основном за счет опускания вод по склонам дна, в пределах моря располагается от 150 до 700 м. Распространена Эта водная масса распространена повсеместно, кроме северо-западной части моря и берегов Сахалина, где охотоморская

водная масса доходит до дна. Глубинная тихоокеанская водная масса представляет собой воды теплой прослойки Тихого океана, поступающую в Охотское море на горизонтах ниже 800—2000 м и проявляется в виде теплого промежуточного слоя. Таким образом, вертикальная структура вод в Охотском море отличается пространственной неоднородностью, обусловленной наличием сильно различающихся по характеристикам водных масс [35].

**Приливы.** Приливы в Охотском море возникают под влияние приливной волны из Тихого океана. Выделяются два основных типа приливов: суточные и смешанные. Наибольшее распространение имеют суточные приливы. Они наблюдаются на Курильских островах, у западного берега Камчатки. Смешанные приливы наблюдаются на северном и северо-западном побережьях моря, у берегов Острова Сахалин. Распределение характера приливов показано на рисунке 16.

В Охотском море хорошо выражены приливные течения. Здесь регистрируются полусуточные, суточные и смешанные приливные течения. Скорости приливных течений различны — от нескольких сантиметров до 4 м/с. Вдали от берегов скорости течений невелики (5—10 см/с). В проливах, заливах и у берегов скорости приливных течений значительно возрастают, например, в Курильских проливах они доходят до 2—4 м/с [33].



Рисунок 16 – Распределение характера приливов в Охотском море: 1 – суточные, 2 – неправильные суточные, 3 – неправильные полусуточные, 4 – полусуточные [36]

Особенности короткопериодных внутренних волн. В Охотском море КВВ регистрируются по данным космических радаров во многих Курильских проливах, на восточном берегу острова Сахалин, в заливах Анива и Сахалинском [37, 38, 39]. Карта встречаемости короткопериодных внутренних волн в Охотском море показана на рисунке 17. Основным источником генерации КВВ в Охотском море является взаимодействие внутренней приливной волны с шельфом, а также взаимодействие вод Тихого океана с охотоморскими водами [40]. Данные измерений показывают, что в шельфовой зоне Охотского моря регистрируются ИВВ высотой до 11 метров. Пример регистрации интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне Охотского моря у берегов острова Сахалин показан на рисунке 18. В шельфовых районах моря также зачастую регистрируются солитоноподобные внутренние волны. [38].



Рисунок 17 – Положение КВВ, зарегистрированных в Охотском море, по данным [41]



Рисунок 18 – Пример записи интенсивных солитоноподобных внутренних волн у берегов острова Сахалин [38]

### Физико-географическая характеристика Авачинского залива

Географическое положение, морфометрия и рельеф дна. Авачинский залив расположен в северо-западной части Тихого океана у юго-восточного берега полуострова Камчатка. Площадь Авачинского залива составляет 2400 кв. км. Авачинский залив имеет входные мысы Шипунский (на северо-востоке) и Поворотный (на юго-западе). Рельеф дна Авачинского залива имеет сложную неоднородную структуру. Так, северная часть залива представляет собой слабонаклонную плоскую поверхность в интервалах глубины 50-100 м. После 150-200 м наблюдается резкий уклон и перегиб в рельефе, который далее уходит в Тихий океан. Максимальная глубина залива составляет около 1000 м [42]. Карта рельефа дна Авачинского залива показана на рисунке 19



Рисунок 19 – Карта рельефа дна Авачинского залива [28]

Вертикальная структура вод и фронтальные зоны. Вертикальная структура вод в Авачинском заливе достаточно сложна: до глубин около 50 метров наблюдается верхний однородный слой. Характерной особенностью Авачинского залива является ярко выраженный термоклин. От 50 до 300 метров наблюдается холодный промежуточный слой. После холодного наблюдается глубинный промежуточного слоя однородный слой, простирающийся до дна. Вертикальное распределение температуры на разрезе, проведенном через центральную часть залива, показано на рисунке 20. На вертикальную структуру вод Авачинского залива оказывают сильное влияние меандры Камчатского течения, которые влияют на перемешивание вод, характеристики верхнего однородного слоя и холодного промежуточного слоя [43].



Рисунок 20 – Распределение температуры на разрезе вдоль оси Авачинского залива в летнее время [43]

**Приливы.** Приливы в Авачинском заливе обусловлены влиянием приливной волны Тихого океана. Под ее влиянием в Авачинском заливе в летнее время возникает неправильный полусуточный прилив. По мере роста склонения Луны увеличивается суточные неравенства приливов, характер приливов вырождается в суточный. Приливные течения характеризуются изменчивостью направлений и скоростей. На поверхности залива скорость приливных течений достигает 35 см/с во время полной воды и уменьшается до 10 см/с при малой воде. Придонные приливные течения имеют направление, противоположное поверхностным и характеризуются скоростью 10-12 см/с [43].

Особенности короткопериодных внутренних волн. В летнее время в шельфовой зоне Авачинского залива по данным космических радиолокаторов с синтезированной апертурой часто регистрируются поверхностные проявления КВВ. Характер распределения ярко выраженных проявлений КВВ на поверхности Авачинского залива показан на рисунке 21.



Рисунок 21 – Распределение поверхностных проявлений КВВ на акватории Авачинского залива. Жирными линиями показаны цуги КВВ, изолиниями показана глубина в километрах [11]

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, отраженный 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 отраженным от шельфа внутренним приливов. То есть на шельфе Авачинского залива имеет место приливной резонанс.

В Авачинском заливе КВВ регистрируются и по данным контактных экспедиционных измерений. На рисунке 22 показан фрагмент записи наблюдений за внутренними волнами.



Рисунок 22 – Фрагмент записи контактных наблюдений за КВВ в Авачинском заливе. Цифрами обозначены интенсивные волны [11]

Результаты измерений указывают, что в шельфовой зоне Авачинского залива регистрируются короткопериодные внутренние волны, характеризующиеся максимальной высотой до 17 метров, с периодами от 15 до 45 минут [11].

#### 2.1 Материалы, используемые в настоящей работе

В настоящей работе используются данные контактных наблюдений, полученные в ходе экспедиционных работ.

Исследования в Белом море произведены в июле-августе 2010 года на полигоне в Западной Соловецкой Салме (1), в июле 2012 года на полигоне в проливе Горло (2), в июле 2014 года на полигоне в Двинском заливе (3). Измерения выполнены СТД-зондами СТД-90М (Германия) и SBE-25 (США). Работы произведены с заякоренного судна. Продолжительность непрерывных измерений на каждом полигоне варьируется от 25 до 36 часов. Положение полигонов измерений показано на рисунке 23.



Рисунок 23 – Положение полигонов измерений в Белом море. Цифры см. текст

Работы в Баренцевом море произведены в августе 2016 года на полигоне около остова Харлов (4), в августе 2017 года на полигоне около мыса Териберский (5). Измерения выполнены СТД-зондами SBE-25, CastAway
(США) и гирляндой температурных датчиков РМЕ (Великобритания). Работы выполнены с судна, лежащего в дрейфе. Продолжительность эпизодических записей составляет от 5 до 15 часов в сутки. Длительность измерений на полигоне около острова Харлов составляет 80 часов, на полигоне около мыса Териберский – 64 часа. Положение полигонов измерений показано на рисунке 24.



Рисунок 24 – Положение полигонов измерений в Баренцевом море. Цифры см. текст

Работы в Охотском море произведены в сентябре 2017 года на полигоне около мыса Свободный (6) и на полигоне над бровкой шельфа около Курильской котловины (7). Измерения выполнены СТД-зондом SBE-25 и гирляндой температурных датчиков РМЕ. На полигоне МС измерения выполнены с заякоренного судна. Над бровкой шельфа около Курильской судна, произведены дрейфе. котловины записи с лежащего В Продолжительность эпизодических записей составляет от 6 до 18 часов в сутки. Длительность измерений на полигоне около мыса Свободный составила 66 часов, на полигоне над склоном Курильской котловины – 37 часов. Положение полигонов измерений показано на рисунке 25.



Рисунок 25 – Положение полигонов измерений в Охотском море. Цифры см. текст

Экспедиционные исследования в Авачинском заливе Тихого океана произведены в августе – сентябре 2018 года на полигоне над материковым склоном близ мыса Шипунский (8), а также на полигоне над склоном Курило-Камчатского желоба (9). Измерения выполнены при помощи гирлянды температурных датчиков РМЕ, с расстоянием между датчиками 2 метра. Суммарная продолжительность измерений у мыса Шипунский составляет около 50 часов, над склоном Курило-Камчатского желоба – 100 часов. При этом каждый эпизод измерений имеет продолжительность не менее 8 часов. Положение полигонов измерений показано на рисунке 26.



Рисунок 26 – Положение полигонов измерений в Авачинском заливе. Цифры см. текст

### 2.2 Методика обработки данных контактных измерений

Технология проведения экспедиционных работ существенно отличается на различных полигонах. Так, в Белом и Баренцевом морях в 2010-2016 годах использовался метод СТД-сканирования. В Баренцевом и Охотском море, а также в Авачинском заливе в 2017-2018 годах использован метод измерений гирляндой температурных датчиков. Различна и методика обработки результатов измерений.

Сущность метода СТD-сканирования заключается в проведении учащенных СТD-зондирований с заякоренного судна, при глубине места на полигоне менее 80 метров, или с дрейфующего судна, при больших глубинах места наблюдения. Измерения выполнялись от поверхности до глубин около 45-50 метров, а при меньших глубинах – до дна. Один цикл сканирований, то есть время одного зондирования, составляет 1 – 2 мин.

Непосредственно после окончания CTD-сканирований производится считывание данных из внутренней памяти измерительного прибора. Далее, по выходным характеристикам измерительного прибора, при помощи ПО, прибором, рассчитываются поставляемого В комплекте С физические характеристики, такие как глубина, температура и соленость. Т.к. СТД-зонд во время сканирований находится в водной толще беспрерывно, без выключений, в его памяти сохраняются данные измерений во время всех подъемов и спусков. Такие данные малопригодны для построения высокоразрешающих записей колебаний температуры. Результаты измерений подвергаются обработке с целью удаления записей во время подъёмов зонда. Ввиду того, что подъем и опускание производятся мгновенно, измерений зонда не данные интерполируются в регулярную сетку в ПО Surfer методом крайкинга. При этом интерполяция данных производится с шагом по времени и вертикальной соответствующим разрешающей способности зондирующей координате, аппаратуры. После чего, в том же ПО выполняется построение записей колебаний изолиний температуры.

Технология производства измерений гирляндой температурных датчиков заключается в помещении ее в водную толщу в область пикноклина. Перед началом каждого эпизода измерений гирляндой температурных датчиков с судна-носителя выполнялось рекогносцировочное СТД-зондирование для определения глубины залегания пикноклина. По результатам такого зондирования корректировалось положение гирлянды датчиков по вертикали. Гирлянда имеет длину 50 метров, расстояние между датчиками составляет 2 метра, гирлянда производит измерения с дискретностью 10 секунд.

После окончания эпизода измерений, из внутренней памяти гирлянды при помощи ПО, поставляемого в комплекте с измерителем, производится собой считывание данных измерений. Они представляют значения температуры, находящиеся в узлах регулярной сетки с координатами Время-Глубина. После считывания производится данных построение высокоразрешающих записей колебаний температуры в ПО Surfer. Ввиду того, что данные находятся в регулярной сетке, отпадает необходимость применения интерполяции в регулярную сетку. Производится лишь интерполяция с целью получения изолиний температуры.



Пример записи колебаний температуры показан на рисунке 27.

Рисунок 27 – Пример записи колебаний температуры (Баренцево море, с 17:07 23.08.2016 по 23:37 23.08.2016). Измерения выполнялись с помощью СТД-зонда Аway. Положение термоклина обозначено жирной линией.

Общей особенностью для всех рассмотренных полигонов являлось наличие ярко выраженной двухслойной структуры вод. В качестве примера на рисунке 27 показан вертикальный профиль температуры и плотности по данным зондирования на полигоне около мыса Свободный в Охотском море.



Рисунок 28 – Вертикальный профиль температуры и плотности на полигоне около мыса Свободный в Охотском море по данным СТД-зондирования 28.09.2017 г.

На всех полигонах верхний квазиоднородный слой толщиной 10-30 метров отделен от нижележащих вод относительно тонким и ярко выраженным слоем скачка, при этом положение термоклина и пикноклина совпадало. Поэтому, по вертикальным вариациям положения изотермы на записях колебаний температуры, выделенной в области термоклина (на рисунке 27 такая изотерма выделена жирным), можно оценить высоту каждой волны, проходящей через полигон.

Высота волны оценивается как средняя величина между высотами переднего и заднего ее склона по выражению (2) [44]:

$$H_{66} = \frac{H_n + H_3}{2}$$
(2)

Где:  $H_{ee}$  – высота внутренней волны,  $H_n = Z_3 - Z_1$  – высота переднего склона волны,  $H_3 = Z_2 - Z_1$  – высота заднего склона волны,  $Z_1$  – глубина залегания локального максимума изотермы, приуроченного к данной внутренней волне,  $Z_3$ ,  $Z_2$  – глубины залегания первого и второго локального минимумов изотермы, приуроченного к данной волне, соответственно.

Период каждой волны определяется как временной интервал между соседними минимумами залегания изолинии по выражению (3) [44]:

$$T_{66} = T_2 - T_1 \tag{3}$$

Где:  $T_{ee}$  — 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,

Согласно единой методике расчета, рассматривались волны с периодами от 5 до 60 минут и высотами более 2 метров. Схема, поясняющая методику расчета высоты и периода внутренней волны показана на рисунке 29.



Рисунок 29 – Схема, поясняющая методику определения высоты и периоды внутренних волн на записях колебаний температуры. Условные обозначения см. текст

#### 2.3 Методика оценки ожидаемых высот внутренних волн

Для оценки ожидаемых высот внутренних волн необходимо сначала рассчитать гистограммы повторяемости высот волн и найти обеспеченность волн заданной высоты. Расчет гистограмм повторяемости осуществляется по классической методике, описанной в [45]. Для начала необходимо определить количество интервалов, необходимое для расчета гистограммы повторяемости. Число интервалов  $k_{max}$  определяется по формуле (4):

$$k_{\max} = 5 \lg n \tag{4}$$

Где *п* – длина ряда.

После чего необходимо рассчитать размах интервала  $\Delta X_k$  по выражению (5):

$$\Delta X_{k} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{k_{\max}}$$
(5)

Где *H<sub>max</sub>* и *H<sub>min</sub>* – соответственно, максимальное и минимальное значение высоты внутренней волны в ряду.

Далее, используя полученные по формуле (5) размахи, необходимо рассчитать границы интервалов, путем прибавления размаха интервала к минимальному значению  $X_{min}$ , а затем последовательного прибавления размаха к каждому предыдущему полученному значению границы интервала. После этого необходимо рассчитать середину интервала, как среднее между соседними границами. Далее необходимо посчитать, сколько значений высот внутренних волн попало в каждый интервал. Таким образом находится повторяемость высот внутренних волн. После чего необходимо рассчитать обеспеченность высот внутренних волн, как число волн, попавших в данный интервал и число волн, превышающих данный интервал.

После получения значений обеспеченности высот волн, выполняется оценка логарифма отношения обеспеченности N к времени записи T на данном полигоне –  $\ln \frac{N}{T}$ . Далее зависимость  $\ln \frac{N}{T}$  от высоты внутренней волны

*Н* аппроксимируется линейной функцией для каждого полигона по выражению (6) [16]:

Причем коэффициент *а* имеет смысл некого градиента, показывающего как изменится логарифм отношения обеспеченности ко времени записи при изменении высоты волны на единицу дискретности, коэффициент *b* – свободный член. Зная коэффициент *а* можно переписать выражение (6) в виде выражения (7) [16]:

Положив в выражении (7) N = 1, получим высоту волны  $H_p$ , которая может быть превышена 1 раз за время  $T_p$ . При этом, если полученная высота ожидаемой волны превышает 10 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.

Оценка качества полученных значений ожидаемых высот волн производится путем расчета ожидаемых за время наблюдений высот волн и сравнения полученных значений с реально наблюдаемыми высотами волн. Если расхождения в оценках не превышает 1 метр, то полученные значения ожидаемых высот внутренних волн считаются достоверными.

### 2.4 Методика оценки эффектов в придонном слое, вызванных экстремальными внутренними волнами

Как показано было сказано ранее, вертикальное распределение плотности вод, в районах полигонов с высокой степенью точности соответствует двухслойному. Это позволяет оценивать фазовую скорость внутренних волн первой моды по выражению (8) [46]:

$$c = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{d(D-d)}{d+(D-d)}}$$
(8)

Где:  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  - отношение разности плотностей слоя выше и ниже пикноклина к их среднему, *d* - толщина слоя выше пикноклина, *D* - глубина места.

Согласно [6], вариации придонного давления, вызванные внутренними волнами, рассчитываются в соответствии с выражением для двухслойного приближения (9):

$$P' = \frac{\pi\eta}{h_2} \rho_0 c^2 \tag{9}$$

Где: P' – вариации давления в придонном слое, вызванные внутренними волнами,  $\eta$  – амплитуда внутренней волны,  $h_2$  – толщина слоя под пикноклином,  $\rho_0$  – средняя по вертикали плотность воды, c – фазовая скорость внутренних волн, определяемая по выражению (8).

Скорость придонного течения, по [6] вызванного внутренними волнами, рассчитывается в соответствии с выражением (10):

$$u_2 = c \frac{\eta}{h_2 + \eta} \tag{10}$$

Полученные оценки вариаций придонного давления сравниваются с типичными значениями волнового давления на гидротехнические сооружения от поверхностных волн, после чего делается вывод об опасности динамических эффектов от ИВВ для гидротехнических сооружений.

Зная скорость придонного течения, можно, используя свод правил о расчете нагрузок на гидротехнические сооружения [17], оценить грунт какой 46

крупности будет размываться придонным течением заданной скорости. Далее производится анализ опасности размыва грунта заданной крупности для гидротехнических сооружений.

### Глава 3. Особенности короткопериодных внутренних волн в приполярных и дальневосточных морях по данным экспериментальных исследований

### 3.1 Особенности короткопериодных внутренних волн в Белом море

По результатам обработки данных контактных измерений на полигонах в Белом море по методике, подробно описанной в предыдущей главе, построены записи колебаний температуры, пример которых представлен на рисунке 30.



Рисунок 30 – Примеры записей колебаний температуры по данным контактных измерений на полигонах в Белом море: а) в Западной Соловецкой Салме 8.08.2010 года с 18:00 до 02:00, б) в проливе Горло 31.07.2012 года с 10:00 до 17:30, в) в Двинском заливе 25.07.2014 года с 13:30 до 17:30

Анализ полученных записей показывает, что полигоны в Белом море различаются как по гидрологической обстановке, так и по характеру проявления КВВ. Из рисунка 30 видно, что в Западной Соловецкой Салме пикноклин расположен на горизонтах от 10 до 20 метров, в то время как на остальных полигонах слой скачка сосредоточен у горизонта 10 метров. Внутренние волны в Западной Соловецкой Салме регистрируются практически постоянно. Временная перемежаемость внутреннего волнения, как отношение времени наблюдения КВВ к общему времени записи, составляет здесь около 80%. В проливе Горло КВВ регистрируются эпизодически, с большими перерывами, временная перемежаемость внутреннего волнения составляет около 50%. В Двинском заливе временная перемежаемость внутреннего 70%. Существенно волнения составляет около различны И высоты наблюдаемых на полигонах КВВ.

По результатам обработки записей колебаний температуры, полученных в ходе измерений в Белом море, рассчитаны высоты и периоды КВВ, зарегистрированных на полигонах. Первичные статистические характеристики высот и периодов КВВ представлены в таблице 1.

Полигон	Кол-во,	Высота	Высота КВВ, м		Период КВВ, минуты		
	ШТ	Средн.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	
Западная Соловецкая	92	6	18	18	1	72	
Салма	72	0	10	10	-	12	
Пролив Горло	114	2,5	8	13	3	42	
Двинской залив	50	2,5	7	16	6	32	

Таблица 1. Первичные статистические характеристики высот и периодов КВВ, зарегистрированных на полигонах в Белом море

Примечание: В данной таблице и далее жирным шрифтом выделены высоты интенсивных внутренних волн Как видно из таблицы 1, характеристики волн на полигонах Белого моря существенно различаются. В Западной Соловецкой Салме зарегистрировано 92 внутренние волны со средней высотой в 6 метров. Максимальная высота КВВ здесь составляет 18 метров. Период КВВ колеблется от 4 до 72 минут при среднем значении в 18 минут. В проливе Горло зарегистрировано 114 КВВ с максимальной высотой в 8 метров, и средней высотой в 2,5 метра. Период волн на данном полигоне колеблется от 3 до 42 минут, составляя в среднем 13 минут. В Двинском заливе зарегистрировано 50 КВВ с максимальной высотой в 2,5 метра 13 минут. В двинском заливе зарегистрировано 50 КВВ с максимальной высотой в 2,5 метра 13 минут. В двинском заливе зарегистрировано 50 КВВ с максимальной высотой в 7 метров при среднем в 2,5 метра. Период волн здесь варьируется от 6 до 32 минут, составляя в среднем 16 минут.

По данным обработки записей колебаний температуры построены гистограммы повторяемости высот КВВ, показанные на рисунке 31.



Рисунок 31 – Гистограммы повторяемости высот волн на полигонах Белого моря: a) – в Западной Соловецкой Салме, б) – в проливе Горло, в) – в Двинском

### заливе

Как видно из показанных гистограмм, на всех полигонах наибольшую повторяемость имеют КВВ минимальной высоты. Сильно выделяется полигон в Западной Соловецкой Салме, на котором регистрируются ИВВ, повторяемость которых достигает 13% от общего числа зарегистрированных волн. Экстремальные же ИВВ с высотой 18 метров регистрируются в 2% случаев. На рисунке 32 показан пример регистрации ИВВ в Западной Соловецкой Салме.



Рисунок 32 – Пример регистрации ИВВ в Балом море на полигоне в Западной Соловецкой Салме в июле 2010 года

ИВВ в Западной Соловецкой Салме регистрируются в виде цуга из 3-4 волн, при этом высоты волн в цуге ранжированы от первой волны цуга. Такое распространение ИВВ характерно для многих районов Мирового океана [11]

По результатам оценки высот волн и построения гистограмм повторяемости, по выражениям (6) и (7) произведен расчет ожидаемых за месяц высот КВВ. Результаты расчета приведены в таблице 2.

	Высота КВВ, м					
Полигон	Ожидаемая	Ожидаемая за время	Реально			
	за 1 месяц	наблюдений	наблюдаемая			
Западная Соловецкая	28	18	18			
Салма	20	10	10			
Пролив Горло	8	9	8			
Двинской залив	11	7	7			

Таблица 2. Результаты расчета ожидаемых высот КВВ в Белом море

Как видно из таблицы 2, в Западной Соловецкой Салме следует ожидать экстремальное для Белого моря интенсивное внутреннее волнение. Следует отметить, что волна высотой 28 метров составляет половину от глубины места на данном полигоне. Также интенсивное внутреннее волнение следует ожидать в Двинском заливе. Стоит отметить, что полученные оценки хорошо согласуются с данными натурных наблюдений: расхождение зарегистрированных и рассчитанных за время измерений высот КВВ не превышает 1 метра.

Таким образом, характеристики КВВ на полигонах в Белом море существенно различаются. В Западной Соловецкой Салме КВВ регистрируются практически постоянно, достигают больших высот от 10 до 18 метров. Повторяемость такого волнения достигает 13%. На полигонах в проливе Горло и Двинском заливе КВВ регистрируются эпизодически. Максимальная высота КВВ на указанных полигонах достигает 8 метров. За 1 месяц в Западной Соловецкой Салме ожидается КВВ экстремальной высоты в 28 метров. На остальных полигонах ожидаются КВВ с высотами от 8 до 11 метров. Таким образом, совокупность морфологических и гидрологических особенностей Западной Соловецкой Салмы, таких как крутой шельфовый склон и ярко выраженная двухслойная структура вод с резким пикноклином, обуславливает наличие экстремальных КВВ.

## 3.2 Особенности короткопериодных внутренних волн в Баренцевом море

По результатам обработки данных натурных измерений на полигонах в Баренцевом море построены записи колебаний температуры, пример которых представлен на рисунке 33.



Рисунок 33 – Примеры записей колебаний температуры по данным контактных измерений на полигонах в Баренцевом море: а) около острова Харлов 13.08.2016 года с 08:00 до 14:00, б) около мыса Териберский 24.08.2017 года с 23:00 до 06:00

Анализ полученных записей колебаний температуры позволяет сделать вывод о том, что КВВ на полигонах в Баренцевом море имеют схожий характер регистрации. Пикноклин на полигонах располагается на горизонтах от 20 до 30 метров. Перемежаемость внутреннего волнения на полигонах высокая и составляет около 90%. Стоит отметить, что волны у мыса Териберский, в целом, имеют меньший период, чем у острова Харлов.

Результаты обработки записей колебаний температуры на полигонах в Баренцевом море позволили обнаружить значительное число КВВ, первичные статистические характеристики которых приведены в таблице 3.

Таблица 3. Первичные статистические характеристики высот и периодов КВВ, зарегистрированных на полигонах в Баренцевом море

Полигон	Кол-во,	Высота КВВ, м		Период КВВ, минуты		
	ШТ	Средн.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.
Остров Харлов	110	3	9	20	5	70
Мыс Териберский	380	3	6	9	3	63

Из таблицы 3 видно, что на полигоне около острова Харлов зарегистрировано 110 КВВ с максимальной высотой 9 метров при среднем значении в 3 метра. Период КВВ на данном полигоне варьирует от 5 до 70 минут, составляя в среднем 20 минут. Около мыса Териберский обнаружено 380 КВВ со средней высотой 3 метра и максимальной высотой 6 метров. Период КВВ на данном полигоне колеблется от 3 до 63 минут при среднем значении в 9 минут. На рисунке 34 представлены гистограммы повторяемости высот КВВ.



Рисунок 34 – Гистограммы повторяемости высот волн на полигонах в Баренцевом море: а) около острова Харлов, б) у мыса Териберский

Как видно по гистограммам, подавляющее большинство волн имеют высоту от 2 до 3 метров, при этом значения повторяемости резко падают при увеличении высоты волн. В работе [8] отмечается, что у Кольского полуострова, в непосредственной близости от полигонов, описанных в настоящей работе, регистрируются ИВВ с высотами до 12 метров. Несоответствие результатов экспедиций, рассматриваемых в настоящей работе, с предыдущими исследованиями можно объяснить удаленностью полигонов измерений в 2016 – 2017 годах от берега, в то время как предыдущие измерения производились авторами в непосредственной близости к берегу, где, как показывает карта рельефа дна, приведенная в 1 главе, намного больше уклон дна.

По данным расчета высот КВВ и гистограмм повторяемости, используя выражения (6) и (7) рассчитаны ожидаемые за 1 месяц высоты КВВ на полигонах в Баренцевом море. По результатам расчета ожидаемых высот КВВ составлена таблица 4.

	Высота КВВ, м					
Полигон	Ожидаемая	Ожидаемая за время	Реально			
	за 1 месяц	наблюдений	наблюдаемая			
Остров Харлов	10	8	8			
Мыс Териберский	8	5	5			

Таблица 4. Результаты расчета ожидаемых высот КВВ в Баренцевом море

Из таблицы 4 видно, что результаты расчета хорошо подтверждаются реально наблюдаемой картиной КВВ. Интенсивное внутреннее волнение следует 1 раз в месяц ожидать на полигоне у Острова Харлов. Указанные оценки хорошо согласуются с данными математического моделирования в работе [47], где показано, что на шельфе Баренцева моря в районе острова Харлов возможно наличие интенсивных солитоноподобных волн.

Таким образом, КВВ на полигонах в Баренцевом море регистрируются практически постоянно. Средние характеристики КВВ на полигонах весьма схожи. Однако на полигоне у острова Харлов максимальная зарегистрированная высота КВВ выше, чем около мыса Териберский. За 1 месяц на полигонах следует ожидать КВВ с высотами 8-10 метров. Установлено, что результаты экспериментов в Баренцевом море полностью обуславливаются удаленностью полигонов от берега.

## 3.3 Особенности короткопериодных внутренних волн в Охотском

море

По результатам контактных измерений на полигонах в Охотском море построены записи колебаний температуры, пример которых представлен на рисунке 35.



Рисунок 35 – Примеры записей колебаний температуры по данным контактных измерений на полигонах в Охотском море: а) около мыса Свободный 22-23.09.2017 года с 19:40 до 11:40, б) над склоном Курильской котловины 22.09.2017 года с 05:15 до 12:30

Анализ полученных записей позволяет сделать вывод о том, что полигоны в Охотском море существенно различны как по гидрологической

обстановке, так и по характеру проявления КВВ. Пикноклин на полигоне у мыса Свободный залегает на горизонтах 20-30 метров, а над склоном Курильской котловины – на горизонтах 30-40 метров. КВВ около мыса свободный регистрируются практически постоянно, перемежаемость внутреннего волнения здесь достигает 90%. Над склоном Курильской котловины КВВ регистрируются эпизодически, около 60% от общего времени измерений. Существенно различаются и высоты регистрирующихся волн.

Обработка записей колебаний температуры на полигонах в Охотском море позволила выделить основные статистические характеристики КВВ, которые приведены в таблице 5.

Таблица 5. Первичные статистические характеристики высот и периодов КВВ, зарегистрированных на полигонах в Охотском море

Полигон	Кол-во,	Высота КВВ, м		Период КВВ, минуты			
	ШТ	Средн.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	
Курильская	219	3	7	15	2	45	
котловина	-17	5	,	10	_		
Мыс Свободный	150	3	12	12	3	33	

На полигоне надо склоном Курильской котловины зарегистрировано 219 КВВ со средней высотой в 3 метра и максимальной высотой в 7 метров. Период зарегистрированных волн колеблется от 2 до 45 минут, в среднем составляя 15 минут. У мыса Свободный зарегистрировано 150 внутренних волн с максимальной высотой 11 метров при среднем значении в 3 метра. Период КВВ на данном полигоне варьирует от 3 до 33 минут, составляя в среднем 12 минут.

На рисунке 36 показаны гистограммы повторяемости высот КВВ на полигонах в Охотском море.



Рисунок 36 – Гистограммы повторяемости высот КВВ на полигонах в Охотском море: а) около мыса Свободный, б) – над склоном Курильской котловины

По гистограммам видно, что наибольшую повторяемость имеют КВВ минимальной высоты. Это справедливо для обоих полигонов. На полигоне у мыса Свободный повторяемость ИВВ с высотами 10-12 метров составляет 2% от общего числа наблюдений. ИВВ распространяются здесь в составе цуга из 3 волн, при этом наибольшую высоту имеет первая волна в цуге. Результаты, полученные по данным обработки записей колебаний температуры на полигоне у мыса Свободный, подтверждают более ранние исследования, в которых указывается о наличии ИВВ в районе мыса Свободный [38]

По KBB, данным оценки высот зарегистрированных В ходе повторяемости, экспериментов, также оценки гистограмм используя а выражения (6) и (7), произведен расчет ожидаемых за 1 месяц высот КВВ. В таблице 6 приведены результаты расчета ожидаемых высот КВВ на полигонах в Охотском море.

	Высота КВВ, м					
Полигон	Ожидаемая	Ожидаемая за время	Реально			
	за 1 месяц	наблюдений	наблюдаемая			
Курильская	9	8	7			
котловина		C C				
Мыс Свободный	15	12	12			

Таблица 6. Результаты расчета ожидаемых высот КВВ в Охотском море

Как видно из таблицы, результаты расчета хорошо согласуются с реальными характеристиками КВВ. У мыса Свободный один раз в месяц ожидается ИВВ высотой 15 метров. Стоит отметить, что это значение не сильно превышает реально наблюдаемую на полигоне максимальную высоту ИВВ. Этот факт можно объяснить, если обратиться к гистограмме повторяемости, приведенной на рисунке 36. По ней видно, что повторяемость сильно уменьшается при увеличении высоты КВВ.

Таким образом, на полигонах в Охотском море характеристики КВВ существенно различны. На мелководном полигоне у мыса Свободный, где имеет место сильный уклон дна и ярко выраженная стратификация вод, КВВ регистрируются практически постоянно, при этом их высоты могут достигать 12 метров. Повторяемость таких волн составляет 2% от общего числа волн. На мелководном полигоне над склоном Курильской котловины, где стратификация не так ярко выражена, эпизодически регистрируются волны с высотами до 7 метров. На полигоне у мыса Свободный ожидаются 1 раз за месяц волны с высотой до 15 метров, а над склоном Курильской котловины – лишь до 9 Результаты экспериментальных исследований на метров. мелководном полигоне подтверждают и расширяют представление о характеристиках КВВ, полученных по данным исследований прошлых лет.

# 3.4 Особенности короткопериодных внутренних волн в Авачинском заливе

По результатам контактных измерений на полигонах в Авачинском заливе построены записи колебаний температуры, пример которых представлен на рисунке 37.



Рисунок 37 – Примеры записей колебаний температуры по данным контактных измерений на полигонах в Охотском море: а) около мыса Свободный 22-23.09.2017 года с 19:40 до 11:40, б) над склоном Курильской котловины 22.09.2017 года с 05:15 до 12:30

Анализ записей колебаний температуры позволяет сделать вывод о том, что на полигонах в Авачинском заливе, несмотря на схожую гидрологическую обстановку, характер регистрации КВВ существенно отличается. Пикноклин на полигонах залегает на горизонтах от 20 до 40 метров. Около мыса Шипунский КВВ регистрируются практически постоянно. Перемежаемость внутреннего волнения достигает здесь 90%. Над склоном Курило-Камчатского желоба перемежаемость внутреннего волнения составляет 70%. Сильно различаются и высоты регистрирующихся волн. Около мыса Шипунский цуги значительных по высоте волн и ИВВ регистрируются часто, на каждой второй записи. Над склоном Курило-Камчатского желоба значительные волны регистрируются на каждой четвертой записи, а ИВВ вообще не регистрируются.

В таблице 7 приведены основные статистические характеристики КВВ, выявленные по результатам обработки записей колебаний температуры на полигонах в Авачинском заливе.

	Таблица 7	. Первичные	статистические	характеристики	высот и	периодов
KBB,	, зарегистри	ированных на	полигонах в Ав	ачинском заливе		

Полигон	Кол-во,	Высота КВВ, м		Период КВВ, минуты		
	ШТ	Средн.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.
Мыс Шипунский	177	4	16	10	3	32
Курило-Камчатский желоб	405	4	9	11	2	34

Около мыса Шипунский зарегистрировано 177 КВВ с максимальной высотой 16 метров, средней высотой 4 метра. Период КВВ здесь колеблется от 3 до 32 минут при среднем значении 10 минут. Над склоном Курило-Камчатского желоба зарегистрировано 405 внутренних волн с высотами до 9 метров при среднем значении в 4 метра. Стоит отметить, что на данном полигоне зарегистрировано наибольшее число КВВ, вследствие самой большой суммарной продолжительности измерений. Периоды КВВ на данном полигоне лежат в пределах от 2 до 34 минут, составляя в среднем 11 минут.

На рисунке 38 показаны гистограммы повторяемости КВВ на полигонах в Авачинском заливе.



Рисунок 38 – Гистограммы повторяемости КВВ на полигонах в Авачинском заливе: а) – около мыса Шипунский, б) – над склоном Курило-Камчатского желоба

Как видно из рисунка 38, гистограммы повторяемости на полигонах в Авачинском заливе весьма схожи: наибольшую повторяемость имеют волны максимальной высоты, затем повторяемость довольно плавно, по сравнению с предыдущими рассмотренными полигонами, снижается при увеличении высоты КВВ. Однако на полигоне около мыса Шипунский регистрируются ИВВ с высотами от 10 до 16 метров, составляющие 4% от общего числа зарегистрированных КВВ. Пример регистрации ИВВ показан на рисунке 39.



Рисунок 39 – Пример регистрации ИВВ в Авачинском заливе Тихого океана на мелководном полигоне в сентябре 2018 года.

У мыса Шипунский ИВВ регистрируются в составе цуга из 3-4 волн в периоды отлива, что согласуется с результатами экспедиционных исследований у берегов Камчатки, полученными ранее [11].

По результатам оценки высот КВВ и их гистограмм повторяемости, с использованием выражений (6) и (7) произведен расчет ожидаемых высот КВВ, результаты которого сведены в таблицу 8.

	Высота КВВ, м					
Полигон	Ожидаемая	Ожидаемая за время	Реально			
	за 1 месяц	наблюдений	наблюдаемая			
Мыс Шипунский	23	16	16			
Курило-Камчатский желоб	13	9	9			

Таблица 8. Результаты расчета ожидаемых высот КВВ в Авачинском заливе

Как видно из таблицы, результаты расчетов ожидаемых высот КВВ согласуются с реально наблюдаемыми высотами КВВ. Один раз за месяц на

полигонах ожидается интенсивное внутреннее волнение, причем на полигоне около мыса Шипунский ожидаются экстремальные, для всех рассмотренных ранее полигонов, волны, сопоставимые с таковыми в Западной Соловецкой Салме. Стоит отметить, что поведение характеристик повторяемости ИВВ схожее с таковым на мелководном полигоне Авачинского залива, учитывая опыт экспериментальных исследований, наблюдается только в Белом море в проливе Западная Соловецкая Салма. При этом, несмотря на выявленный приливной характер проявления ИВВ, как и в Западной Соловецкой Салме [25], имеется существенное различие между полигонами по гидрологической обстановке и морфометрии дна.

Таким образом, выявлены существенные различия в характеристиках KBB на полигонах в Авачинском заливе. У мыса Шипунский КВВ регистрируются практически постоянно, достигают высот 16 метров, а 1 раз за месяц ожидаются КВВ с высотой в 23 метра. Над склоном Курило-Камчасткого желоба КВВ регистрируются эпизодически, достигают высот в 9 метров, а 1 раз за месяц ожидается КВВ высотой в 13 метров. Удаленность от берега полигона Курило-Камчатского желоба обуславливают над склоном различия В характеристиках КВВ. Результаты экспериментов у мыса Шипунский подтверждают и уточняют характеристики КВВ, полученные по данным прошлых исследований.

# 3.5 Оценки динамических эффектов, вызванных экстремальными короткопериодными внутренними волнами в придонном слое

Результаты, главе, полученные В предыдущей показывают, что экстремальные интенсивные внутренние волны ожидаются в Западной Соловецкой Салме Белого моря, около мыса Свободный в Охотском море, на полигонах в Авачинском заливе. Расчет придонных эффектов от ожидаемых представляет особый интерес на указанных выше полигонах с ИВВ экстремальными ожидаемыми высотами волн. Однако на глубоководном полигоне над склоном Курило-Камчатского желоба в Авачинском заливе, ввиду ограничений двухслойного приближения и большой глубины места, расчет придонных характеристик не имеет практического смысла. Для трех полигонов с экстремальными ожидаемыми КВВ, указанных выше, произведен расчет динамических эффектов в придонном слое с использованием выражений 8-10, результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3. Динамические эффекты в придонном слое, индуцируемые внутренними волнами с максимальными ожидаемыми высотами

№ полигона		Входные характеристики				Па	и м/с	Кмм
(рис. 23-26)	<i>h</i> ,м	с, м/с	<i>h</i> <sub>2</sub> , м	η, Μ	ρ <sub>0</sub> , кг/куб.м	, 11a	<i>u</i> <sub>2</sub> , <i>w c</i>	<b>IX</b> , IVIIVI
1	28	0,46	25	14	1020,48	379	0,17	0,4
6	15	0,55	58	7,5	1026,05	126	0,07	0,3
8	23	0,62	120	11,5	1026,62	118	0,05	0,2

Примечание: К, мм – крупность размываемого придонным течением грунта

По результатам расчета выявлено, что на полигоне в Западной Соловецкой Салме ИВВ экстремальной ожидаемой высоты вызовет вариации придонного давления около 0,4 кПа. Около мысов Свободный и Шипунский,

вариации придонного давления близки и составляют около 0,1 кПа. Типичные значения волнового давления на вертикальные стенки гидротехнических сооружений колеблются в пределах от 3 до 20 кПа [48]. Придонное давление от экстремальных внутренних волн на исследуемых полигонах сопоставимо с воздействием поверхностной высотой несколько волны сантиметров. Сравнивая полученные оценки вариаций придонного давления от ИВВ с типичными значениями волнового давления от поверхностных волн, можно сделать вывод, что вариации придонного давления, вызванные прохождением ИВВ с экстремальной высотой, не окажут существенного воздействия на опоры морских гидротехнических сооружений, даже при совместном действии поверхностного и интенсивного внутреннего волнения.

Скорости придонного течения, вызываемые ИВВ экстремальной высоты на исследуемых полигонах, колеблются от 5 до 17 см/с. В [17] вводится понятие неразмывающей скорости придонного течения – такой скорости, которая не приводит к размыву грунта некоторой крупности. В соответствии с [17], придонное течение, генерируемое внутренней волной экстремальной высоты в Белом море, способно приводить к размыву грунта крупностью до 0,4 мм, а течение в Охотском море и Авачинском заливе будет размывать грунт крупностью до 0,3 мм. То есть воздействие течений, индуцируемых экстремальными внутренними волнами на илистые и песчаные грунты, способно приводить к их размыву. Если принять во внимание, что скорость приливных течений, например, в Западной Соловецкой Салме могут достигать 60 см/с [25], и предположить, что такие течения действуют регулярно и совместно с эффектами от ИВВ, то тогда, в соответствии с [17], можно ожидать размытие грунта крупностью до 8 мм, то есть мелкого каменистого грунта. Учитывая, что на шельфе исследуемых морей широко распространены вышеуказанные грунты, совместное действие приливов и ИВВ, которые также появляются с приливной периодичностью, приводит к высокой вероятности размыва грунта вблизи опор гидротехнических сооружений. Чтобы в

дальнейшем обеспечить безопасную эксплуатацию морских гидротехнических сооружений на шельфе Белого и Охотского морей, а также Авачинского залива, инженерные изыскания перед гидротехническим строительством должны включать исследования характеристик КВВ.

Вывод по главе. В результате комплексного анализа характеристик КВВ, полученных ПО результатам контактных измерений установлено, что шельфовых и глубоководных районов исследуемых морей характерно существенное различие в характеристиках КВВ. В мелководных шельфовых районах, по сравнению с глубоководными, КВВ регистрируются чаще и занимают большую долю в общем времени измерений. Высоты КВВ в мелководных шельфовых районах значительно выше, и только в данных районах регистрируются ИВВ. Также в шельфовых районах исследуемых морей ожидаются экстремальные ИВВ. Расчет эффектов в придонном слое от экстремальных ИВВ показал, что, действуя совместно с интенсивными приливными течениями, придонные эффекты от ИВВ создают опасную вероятность размыва грунта под гидротехническими сооружениями.

#### Заключение

В ходе работы, в общей сложности, обработано порядка 900 часов записей колебаний температуры в области термоклина на 9 полигонах на акваториях Белого, Баренцева, Охотского морей, выделенных ранее по данным дистанционных наблюдений. На записях, полученных в летние сезоны 2010 -2018 годов было идентифицировано более полутора тысяч внутренних волн высотами от 2 до 18 метров. Путем экстраполяции гистограммы повторяемости высот волн произведен расчет ожидаемых за один месяц высот КВВ.

В результате работы показано, что в районе Западной Соловецкой Салмы Белого моря, около мыса Свободный в Охотском море, вблизи мыса Шипунский в Авачинском заливе Тихого океана, ИВВ с высотами более 10 метров имеют высокую повторяемость. Один раз месяц в условиях сохранения существующих параметров вертикальной структуры вод в районе Западной Соловецкой Салмы может достигать высоты 28 метров, около мыса Свободный – 15 метров, около мыса Шипунский в Авачинском заливе Тихого океана – 23 метра. Представленные оценки справедливы в целом для прибрежной части арктических и дальневосточных морей России, однако, в отдельный местах, например, вблизи фронтальных разделов, эти характеристики могут заметно дальнейшего Поэтому, важной задачей отличаться. исследования представляется получение продолжительных записей колебаний термоклина на полигонах с целью верификации полученных разных результатов И усовершенствования используемой методики

По результатам обработки обширного массива данных экспедиционных наблюдений в Белом Баренцевом и Охотском морях, в Авачинском заливе Тихого океана сформировано представление о наблюдаемых и ожидаемых высотах короткопериодных внутренних волн. По результатам оценки эффектов В придонном слое, создаваемых ожидаемыми динамических экстремальными ИВВ, показано, что вариации придонного давления не будут оказывать существенного воздействия на морские сооружения. Придонное

течение, индуцируемое ИВВ, может достигать 17 м/с и способно размывать илистые и песчаные грунты. В случае совместного действия приливного течения и ИВВ может наблюдаться размытие мелкого каменистого грунта, размером до 8 мм.

Полученные оценки характера влияния ИВВ на транспорт морских наносов показали, что его необходимо учитывать при проведении изысканий перед гидротехническим строительством на мелководных участках шельфа с ярко выраженной стратификацией вод, особенно в приливных морях для обеспечения последующей безопасности сооружаемых объектов. В перспективе дальнейших исследований намечается внедрение методики оценки фазовой скорости КВВ и динамических эффектов в придонном слое, индуцируемых ими, по данным реального непрерывного вертикального распределения плотности. Это позволит более точно оценивать возникающие от ИВВ динамические эффекты.

Результаты настоящей работы представлены на заседаниях Студенческого научного общества океанологического факультета РГГМУ в 2017-2019 годах, всероссийских молодежных конференциях «Комплексные исследования Мирового океана» В 2017-2019 годах, международном симпозиуме «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере» в 2018 году, всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» в 2018 году. Результаты настоящей работы опубликованы в двух статьях в рецензируемом журнале «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», а также в пяти сборниках тезисов конференций:

Результаты настоящей работы опубликованы в двух статьях в рецензируемом журнале «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» [49, 50], а также в пяти сборниках тезисов конференций [51 – 55]

Автор благодарен Зимину Алексею Вадимовичу, доктору географических наук, профессору СПбГУ, главе лаборатории СПбФ ИО РАН за предоставленную возможность участия в экспедиционных исследованиях.

### Список используемой литературы

1. Грамберг И. С. Арктический шельф – будущее нефтегазовой промышленности России / Грамберг И. С., Супруненко О. И. // Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии). СПб.: Наука, 2000. С. 133-144.

2. Абузяров З.К. Оперативное океанологическое обеспечение / Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. // М.: ИГ-СОЦИН, 2009. 287 с.

3. 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.

4. Родионов А.А. Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ. / Родионов А.А., Семенов Е.В., Зимин А.В. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т.5, №2. С.89-108.

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

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

7. Fraser N. Surfing an oil rig. Energy Rev. 1999. V. 20. No. 4.

8. Лавренов И.В. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Лавренов И.В., Морозов Е.Г. // СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 363 с.

9. Гордеева С.М. Влияние климатических изменений термохалинной структуры Баренцева моря на интенсивность внутренних приливных волн / Гордеева С.М., Сафрай А.С., Ткаченко И.В. // Труды XII Всероссийской

конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-история. 2014. С. 211–213.

10. Козлов И.Е. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений / Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Шапрон Б., Мясоедов А.Г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т.11, № 4. С. 338–345.

 Сабинин К.Д. Горячие точки в поле внутренних волн в океане / Сабинин К.Д. Серебряный А.Н. // Акустический журнал. 2007. Т53, №3, С.410-436.

12. Горшков К.А. Анализ эволюции интенсивных внутренних волн в Японском и Охотском морях с использованием спутниковых данных радиолокатора с синтезированной апертурой и радиометров // Дубина В.А., Ермошкин А.В, Соустова И.А., Троицкая Ю.И. // Труды Государственного океанографического института. 2011. № 213. С. 234-243.

13. Зимин А.В. Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах / Зимин А.В., Родионов А.А., Жегулин Г.В. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т.6, №3 С.19-33.

14. Navrotsky V., Pavlova E. Internal waves space structure in shelf zones of the far eastern seas. Pacific oceanography, V. 5, No. 1, 2010, pp. 65 – 76.

15. Талипова Т.Г. Статистика и прогноз интенсивных внутренних волн. // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование. 1999. Т.1. С.204-219.

16. 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.

17. Свод правил СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» // Москва. 2012.
 116 с.
18. Клюйков Е. Ю. Инженерная океанология. Учебное пособие // СПб.: Изд. РГГМУ, 1999. 294 с.

19. Song Z.J. Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses. Song Z.J., Teng B., Gou Y. Applied Ocean Res. 2011. V. 33. P.120-129.

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

21. Garret C.G.R., Munk W.H. Space-time scales of internal waves. J. Geophys. Res. 1975. Vol.180, No 3, p.291-297.

22. Степанюк И.А. Методы измерений характеристик морских внутренних волн. СПб.: изд-во РГГМУ. 2002. 134 с.

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

24. Сабинин К.Д., Назаров А.А., Сериков А.Н. О связи цугов короткопериодных внутренних волн с рельефом термоклина в океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 4. С. 416-425.

25. Зимин А.В. Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение полусуточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря // Океанология Т. 53. №. 3. 2013. С. 293-303.

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

27. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.2. Белое море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.

28. Батиметрия GEBCO – электронные данные. Режим доступа: https://www.gebco.net/ - свободный. Дата обращения 10 апреля 2019 года.

73

29. Зимин А.В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море. Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук. Санкт-Петербург. На правах рукописи. 2016. 365 с.

30. Каган Б.А., Тимофеев А.А. Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т.41, №4. С.550-556.

31. Зимин А. В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 104–120.

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

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

34. Каган Б.А., Тимофеев А.А., Софьина Е.В. Сезонная изменчивость поверхностного и внутреннего М2 приливов в Северном ледовитом океане. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т.46, №5. С.703-714.

35. Круц А.А., Лучин В.А. Вертикальная структура толщи вод Охотского моря // Известия ТИНРО. 2013. Т. 175. С. 234–253.

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

37. Mitnik L. M., Dubina V. A. Spatial-temporal distribution and characteristics of internal waves in the Okhotsk and Japan Seas studied by ERS-1/2 SAR and Envisat ASAR // Proc. Envisat Symposium 2007. P. 23-27.

38. Наговицын А.П., Пелиновский Е.Н. Наблюдения солитонов внутренних волн в прибрежных водах Охотского моря. // Метеорология и гидрология. 1988. Т. 4. С. 124–126.

39. Nakamura, T., Awaji, T., Hatayama, T., Akimoto, K., Takizawa, T., Koho, T., et al. The generation of large-amplitude unsteady lee waves by subinertial tidal

flow: A possible vertical mixing mechanism in the Kuril Straits. //Journal of Physical Oceanography. 2000. V. 30. P. 1601–1621.

40. Куркин А.А. внутренние волны в Охотском море: наблюдения, моделирование и анализ / Куркин А.А., Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Талалушкина Л.В., Гиниятуллин А.Р // Моря России: методы, средства и результаты исследований 2018. С. 56.

41. Атлас для работы с базой данных наблюдений внутренних волн – электронные данные. Режим доступа: https://lmnad.nntu.ru/ru/igwatlas\_map/ - свободный. Дата обращения 10 апреля 2019 года.

42. Мартыненко, В. Камчатский берег: историческая лоция // Петропавловск-Камчатский: Дальневост. кн. изд-во, Камч. отд-ние. 1991. 190 с.

43. Атлас гидрофизических характеристик района юго-восточной части полуострова Камчатка. Режим доступа: http://pacificinfo.ru/data/cdrom/6/index.html - свободный. Дата обращения 10 апреля 2019 года.

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

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

46. Зимин А.В. и др. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. / Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е., Шапрон Б., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Мясоедов А.Г., Коллар Ф. // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 41–55.

47. Талипова Т.Г., Терлецкая Е.В., Куркин А.А., Рувинская Е.А. Моделирование внутренних волн в прибрежной зоне Баренцева моря // Экологические системы и приборы. 2014. №3. С.34-43.

75

48. Лещенко С.В. Гидродинамические нагрузки от морских волн на горизонтальные элементы причалов с волногасящими камерами / Лещенко С.В., Макаров К.Н. // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 144-151.

49. 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

50. 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, № 2. С. 66-72

51. Зимин А.В., Свергун Е.И., Атаджанова О.А. Прогноз повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом море // Комплексные исследования Мирового океана материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2017. С. 243-244. – публикация в сборнике тезисов конференции.

52. Зимин А.В., Родионов А.А., Романенков Д.А., Ататджанова О.А., Свергун Е.И., Коник А.А. Субмезомасштабные процессы и явления в приливных арктических морях // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики Труды XIV Всероссийской конференции. 2018. С. 32-35.

53. Зимин А.В., Родионов А.А., Свергун Е.И. Оценка ожидаемых высот внутренних волн в российских морях по данным экспедиционных исследований // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики Труды XIV Всероссийской конференции. 2018. С. 202-203.

54. Зимин А.В., Романенков Д.А., Ататджанова О.А., Свергун Е.И., Коник А.А. Субмезомасштабные процессы и явления в приливных арктических морях (Белом, Баренцевом и Карском) // Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018 Сборник трудов Международного симпозиума. Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Московский университет им. С.Ю. Витте. 2018. С. 147-150.

76

55. Свергун Е.И., Зимин А.В. Характеристики короткопериодных внутренних волн в Баренцевом и Охотском морях по данным экспедиционных исследований в августе-сентябре 2017 года // Процессы в геосредах. Специальный выпуск. Материалы III Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-2018). 2018. №17. С.315-317.