

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский
океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук**

На правах рукописи



Москвитин Александр Анатольевич

**РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И
ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ
АКВАТОРИЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ О. САХАЛИН**

1.16.17 – «Океанология»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор физико-математических наук,
член-корреспондент
Зайцев Андрей Иванович

Владивосток – 2026

Оглавление

ГЛАВА 1. КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ	13
1.1 Введение.....	13
1.2 Позиционная автоматизированная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС).....	14
1.2.1 Тактико-технические характеристики ПАГИС	16
1.2.2 Описание и принципы работы системы	18
1.3 Автономный регистратор течений водного потока.....	21
1.4 Погружной зонд для измерения электропроводимости.....	25
1.5 Безэкипажный корабль (БЭК) повышенной остойчивости для применения в прибрежной зоне.	27
1.6 Устройство бесконтактного измерения нагонных волн в лабораторных условиях.	30
1.7 Волнограф	40
1.8 Выводы ко первой главе	43
ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОХОТСКОМ МОРЕ.....	46
2.1 Введение.....	46
2.2 Гидрологические исследования в Курильском проливе.....	46
2.3 Влияние размера пролива на гидрологический режим в озерах лагунного типа.	55
2.4 Изменение гидрологических характеристик озера лагунного типа в следствии антропогенного воздействия на устье пролива.	66
2.5 Исследование распределения солености в озере лагунного типа.....	70
2.6 Натурные измерения водообмена озера лагунного типа с морем.	73
2.7 Вывод к второй главе.....	81
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА ВБЛИЗИ МЫС СВОБОДНЫЙ (ОСТРОВ САХАЛИН).....	84
3.1 Введение.....	84

3.2 Обобщенные вероятностные распределения высот волн по результатам измерений на мысе Свободный	90
3.2.1 Физические параметры, ведущие к изменению вероятностных свойств высот волн	95
3.2.2 Вариативность распределений высот волн по натурным данным в зависимости от ключевых физических параметров	99
3.3 Выводы	107
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОХОТСКОМ МОРЕ	110
4.1 Введение	110
4.2 Полевое обследование и численное моделирование штормового нагона 15 ноября 2019 года на юге острова Сахалин	111
4.2.1 Полевое обследование штормового нагона 2019 года	114
4.2.2 Моделирование штормового нагона 2019 года	116
4.3 Оценка воздействия опасных волновых процессов в заливе Мордвинова (остров Сахалин)	127
4.4 Выводы к четвертой главе	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Охотское море является уникальным объектом Мирового океана. Характеризующееся суровыми климатическими условиями, сильными сезонными колебаниями и уникальными процессами, влияющими на его водный баланс, циркуляцию и экосистемы. Воды Охотского моря обладают уникальным объемом биологических ресурсов и их разнообразием, делая его одним из самых продуктивных морей Мирового океана, играя ключевое значение в становлении активно развивающегося дальневосточного региона.

Активное развитие региона приводит к все большей антропогенной нагрузке на прибрежные акватории Охотского моря и их территории. Это накладывает строгие обязательства направленные на сохранение устойчивости его экосистем, прогнозирования изменений, выработки упреждающих мер и рекомендаций, направленных на минимизацию ущерба как от не контролируемой деятельности человека, так и в следствии опасных природных явлений.

Сохранение экосистем Охотского моря и поддержание его баланса – это сложнейшая задача, требующая комплексных мер со стороны государства, бизнеса, осуществляющего хозяйственную деятельность в его водах, и международного научного сообщества.

Для решения подобных задач необходимо организовать всесторонние систематические научные исследования, в основе которых должны лежать натурные исследования с применением современных технических средств измерений различных параметров морской среды, прошедших метрологическое освидетельствование.

Достоверно измеренные данные, полученные в процессе натурных исследований, являются базисом для построения моделей поведения

экосистем, численного моделирования и прогнозирования изменений в обозримом будущем.

Степень разработанности темы исследования.

Гидрофизические исследования Охотского моря имеют довольно длительную историю. Экспедиции первых российских мореплавателей составили первые описания Охотского моря, заложив основу понимания сезонных изменений ледового покрова и батиметрии. Однако период активных систематических исследований начался в начале 30-х годов и проводился до начала 90-х годов, позже активность исследований значительно упала и носило скорее эпизодический характер.

В настоящее время исследования гидрофизических характеристик Охотского моря носит скорее периодический характер, и является недостаточным, охватывая в основном локальные направления и акватории. Исследование глобальных гидрофизических полей и термохалинных структур практически не проводятся.

Научные организации, внесшие вклад в изучение Охотского моря:

- Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН);
- Тихоокеанский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО);
- Институт океанологии имени П.П. Ширшова АН СССР;
- Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ДВНИГМИ);
- Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова (ГОИН);
- Московский государственный университет (МГУ);
- Тихоокеанский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института рыбного хозяйства (ВНИРО);

- Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ ДВО РАН);

Цель исследования.

Цель диссертации состоит в развитии технических средств для исследований гидрофизических процессов в прибрежных акваториях Охотского моря.

Задачи исследования.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать и адаптировать измерительную систему для регистрации гидрофизических характеристик на заданных горизонтах;
2. Используя систему измерения гидрологических характеристик провести натурные исследования в акватории Охотского моря, включая проливы Курильских островов;
3. Разработать и адаптировать измерительные приборы регистрации солености водной среды и скорости водного потока;
4. Адаптировать безэкипажный корабль для проведения гидрографических работ в прибрежной зоне;
5. Используя авторские разработки, выполнить комплексные исследования по оценке водообмена озера лагунного типа Тунайча с Охотским морем;
6. Разработать регистратор гидростатического давления «Волнограф» и адаптировать измерения поверхностного волнения. Выполнить исследования в прибрежных акваториях Охотского моря;

Научная новизна.

- Разработана и испытана позиционная автоматизированная измерительная станция «ПАГИС», измерения различных параметров водной среды в сложных гидрологических условиях в разное время года, в том числе в ледный период.

- С помощью авторских измерительных систем: ПАГИС, погружной зонд, автономный регистратор течений, выполнена научно-исследовательская работа по оценке водного баланса в озере лагунного типа Тунайча.
- Разработан вариант устройства «Волнограф» с тремя равноудаленными датчиками придонного давления, синхронизированных от одного тактируемого источника, для регистрации пространственного распределения поверхностных волн.
- Выполнена адаптация безэкипажного корабля (БЭК) повышенной устойчивости для применения в прибрежной зоне. Данное решение было использовано для проведения гидрографических работ.
- Представлена и протестирована авторская разработка для бесконтактного измерения нагонных одиночных волн на наклонный берег в опытно-экспериментальном бассейне.
- Проведено полевое и численное исследование штормового нагона, случившегося 15 ноября 2019 года в г. Корсакове на юге Сахалина.
- Выполнено комплексное исследование гидродинамического воздействия на пролив Красноармейский, соединяющая озеро Тунайча с Охотским морем (залив Мордвинова).

Практическая значимость работы.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена созданием нового аппаратного комплекса для проведения натурных измерений гидрофизических, гидрохимических параметров водной среды.

Разработаны методики проведения измерений в сложных климатических условиях. В процессе выполнения исследовательских работ получен большой объем данных, которые являются уникальными для этих районов исследований.

Выполнена численная оценка литодинамических процессов на побережье Охотского моря (залив Мордвинова) в районе пролива

Красноармейский. Выработаны рекомендации по защите прибрежной инфраструктуры.

Личный вклад соискателя.

Соискателем была проведена работа по поиску и анализу научной литературы области исследований, сформулированы задачи исследования.

В ходе проектирования аппаратного измерительного комплекса автор непосредственно отвечал за выбор схемотехнических решений, изготовление электронных блоков, принимал непосредственное участие в разработке алгоритмов работы приборов, организации и проведения натурных испытаний.

Так же автор учувствовал во всех натурных исследованиях аппаратного комплекса, проводимых в различных акваториях Охотского моря (у берегов острова Сахалин, а также вдоль Курильской гряды).

Положения, выносимые на защиту:

- Разработан и апробирован аппаратный измерительный комплекс, для исследования различных гидрофизических параметров с высокой точностью в прибрежных, морских акваториях;
- С применением разработанного измерительного комплекса проведены натурные измерения, которые позволили получить уникальные данные;
- Проведено численное моделирование с применением данных полученных в ходе проведения натурных исследований, результаты моделирования сопоставимы с результатами наблюдений;

Степень достоверности результатов исследования.

Результаты всех совокупно проведенных натурных исследований проводились с применением разработанного аппаратного комплекса прошедшего метрологическое освидетельствование на базе СКБ САМИ ДВО РАН. Процесс проведения измерений основывался на отработанных методиках и нормативных документах. Результаты исследований

анализировались и сравнивались с результатами других научных организаций, проводивших научные работы в исследуемых акваториях, в разные периоды. Полученные результаты сопоставимы. Достоверность проведенных исследований с применением разработанной технической базой подтверждается в тексте диссертационной работы.

Апробация работы.

Результаты научной работы были доложены на:

1. XX научная школа «Нелинейные волны – 2022». Тема доклада: «Данные долговременных измерений волн у о-ва Сахалин». 7-13 ноября 2022 года, Нижний-Новгород.
2. «КОГРАФ-2022» - Всероссийский форум по графическим информационным технологиям и системам. Тема доклада: «Использование баз данных предметно-специфических признаков и спектральных характеристик в существующих сервисах обработки спутниковых данных». 18-21 апреля 2022 года. Нижний-Новгород.
3. «Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов IV Всероссийской научной конференции с международным участием». Тема доклада: «Элементы информационной системы прибрежных рисков острова Сахалин, связанных с природными катастрофами». 6-10 сентября 2021 года, Южно-Сахалинск.
4. «КОГРАФ-2020» - 30-я Всероссийская научно-практическая конференция по графическим информационным технологиям и системам. Тема доклада: «Оценка воздействия опасных волновых явлений в заливе Мордвинова (о-в Сахалин). 2020 год, Нижний-Новгород.
5. «Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием». Тема доклада: «Осуществление экологического мониторинга с

помощью измерительной станции «ПАГИС»». 27-31 мая 2019 года, Южно-Сахалинск.

6. XIII симпозиум Физика геосфер. «Натурные исследования распределения солености по акватории озера Тунайча». 11-13 сентября 2023 года, Владивосток.

Так же результаты работы вошли в состав отчетов:

1. Комплексной экспедиции «Восточный бастион – Курильская гряда», организованной Русским географическим обществом, Российской академией наук и министерством обороны в 2019 году.
2. НИР «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем»

Публикации.

Материалы представленной диссертации изложены результаты научной деятельности выполненных соискателем лично и в соавторстве. 15 научных публикаций, опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. 2 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, 6 работ опубликованы в сборниках трудов по итогам конференций, получены 3 свидетельства о регистрации программных продуктов.

Полный список опубликованных научных статей и свидетельств о регистрации программных продуктов Москвитина А.А. отображен в приложении А – Список публикаций диссертанта.

Структура и объем диссертации.

Составленная диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы и одного приложения.

Список литературы включает в себя 127 позиций, в том числе 35 на иностранном языке. Диссертационная работа изложена на 162 страницах и включает в себя 84 рисунка, 6 таблиц и 25 формул.

Благодарности

Огромную благодарность выражаю своему научному руководителю директору СКБ САМИ ДВО РАН, доктору физико-математических наук, член-корреспонденту РАН Зайцеву Андрей Ивановичу за неоценимый вклад, поддержку и помощь на протяжении всей научной деятельности приведшей к написанию данной диссертационной работы; отдельную благодарность выражаю своему научному руководителю по аспирантуре проректору по научной работе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессору, доктору физико-математических наук Куркину Андрей Александровичу за поддержку и наставления, доктору физико-математических наук, профессору Пелиновскому Ефим Наумовичу;

Персонально хочу поблагодарить командира 57 Района Гидрографической Службы Тихоокеанского флота, капитана 3 ранга Ляткина Дениса Александровича за помощь в организации морских экспедиций; так же отдельную благодарность выражаю капитану большого гидрографического катера БГК-2153 «Алексей Анашкин» Тихонову Игорь Александровичу и всему экипажу, за неоценимую помощь в обеспечении проведения натурных исследований в акваториях Охотского моря, в частности островов Курильской гряды.

В отдельности хочу выделить начальника экспедиционного отряда СКБ САМИ ДВО РАН Корытко Андрей Семеновича, как пример стойкости, надежности и взаимовыручки, без которого не обходятся ни одни морские работы и испытания; здесь же хочу поблагодарить всех причастных к экспедиционным работам по сбору натурных данных с применением технических средств измерения представленных в данной работе: Моисеенко

Евгений Алексеевичу, Ким Алексей Ивановичу, Крюкову Александру Викторовичу, Ким Валерий Александровичу, Эндо Андрей Ековичу, Сидоренко Артем Игоревичу, Шамиеву Валерий Александровичу, Никитину Сергей Ивановичу;

Также хочу подчеркнуть, что на протяжении всего жизненного пути главной опорой и поддержкой в тяжелые моменты являются близкие люди. Хочу выразить огромную благодарность Москвитиной Анне Сергеевне, Москвитину Анатолию Петровичу, Титовой Наталье Сергеевне, Москвитиной Анастасии Михайловне и Москвитиной Алисе Александровне, за то, что направляли меня в этот непростой и ответственный период моей жизни;

ГЛАВА 1. КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

1.1 Введение

Разработка измерительных приборов для изучения морской среды – это фундаментальная задача, от которой зависит экономическое развитие, научный прогресс и стабильность всей экосистемы в целом. Изучение и понимание процессов, протекающих в океанах, невозможно без регистрации и накопления данных натурных измерений. Их сбор, анализ и интеграция в системы прогнозирования, моделирования и принятия решений, позволяют решать глобальные задачи такие как:

- Экологический мониторинг;
- Климатическое прогнозирование и моделирование;
- Безопасность мореплавания;
- Навигация;
- Сохранение биоразнообразия;
- Снижение ущерба от опасных природных явлений;
- Экономика и управление ресурсами;

Будущее океанов зависит от способности человека эффективно накапливать, анализировать и применять эти данные для сохранения и поддержания его экосистем.

Краеугольным камнем ограничивающим эффективность проводимых исследований при проведении гидрофизических работ различных морских и прибрежных акваторий, выступает приборная база, которая должна решать целый комплекс технических, эксплуатационных, программных и экономических решений.

С технической точки зрения при проведении морских работ, приборная база должна быть устойчива не только к сложным климатическим условиям на поверхности моря, но и обеспечивать защиту от экстремальных параметров

в толще морской среды. К таким параметрам безусловно относятся давление (особенно при работах на больших глубинах), также коррозионная стойкость, механическая прочность (критично при работе в зоне прибоя, когда прибор подвержен сильному динамическому воздействию), стойкость к обрастанию и т.д.

В данной главе рассмотрены технические средства измерения, разработанные при участии автора диссертации и прошедшие апробацию, в акваториях Охотского, Японского морей, а также в озерах лагунного типа. Их верификация и использование в инженерных проектах и экспедициях приводится ниже. Описание разработанных технических средств опубликованы и неоднократно представлялись на российских и международных конференциях и выставках (Зайцев, и др., 2013; Малашенко, и др., 2014; Кокорина, и др., 2022; Москвитин, и др., 2022; Москвитин, 2023; Ким, и др., 2023; Москвитин, 2023; Слюняев, и др., 2023; Костенко, и др., 2019; Кокорина, и др., 2022).

1.2 Позиционная автоматизированная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС)

Позиционная автоматизированная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС) (рисунок 1.1) — это многофункциональная мобильная платформа для оперативного мониторинга водной среды, предназначенная для проведения долговременных, регулярных измерений гидрофизических, гидрохимических параметров водной среды путем многократного вертикального профилирования в автоматическом режиме.

Эта измерительная платформа позволяет доставлять измерительные инструменты на заданные горизонты с высокой точностью, от поверхности до дна. Производить регистрацию и накопление измеренных параметров, и передачу их в автоматическом режиме в центр сбора и обработки информации.

Для повышения эффективности обследования обширных акваторий, несколько комплектов измерительных станций могут быть объединены в

общую информационно-измерительную сеть оперативного контроля гидрофизических полей (рисунок 1.2).

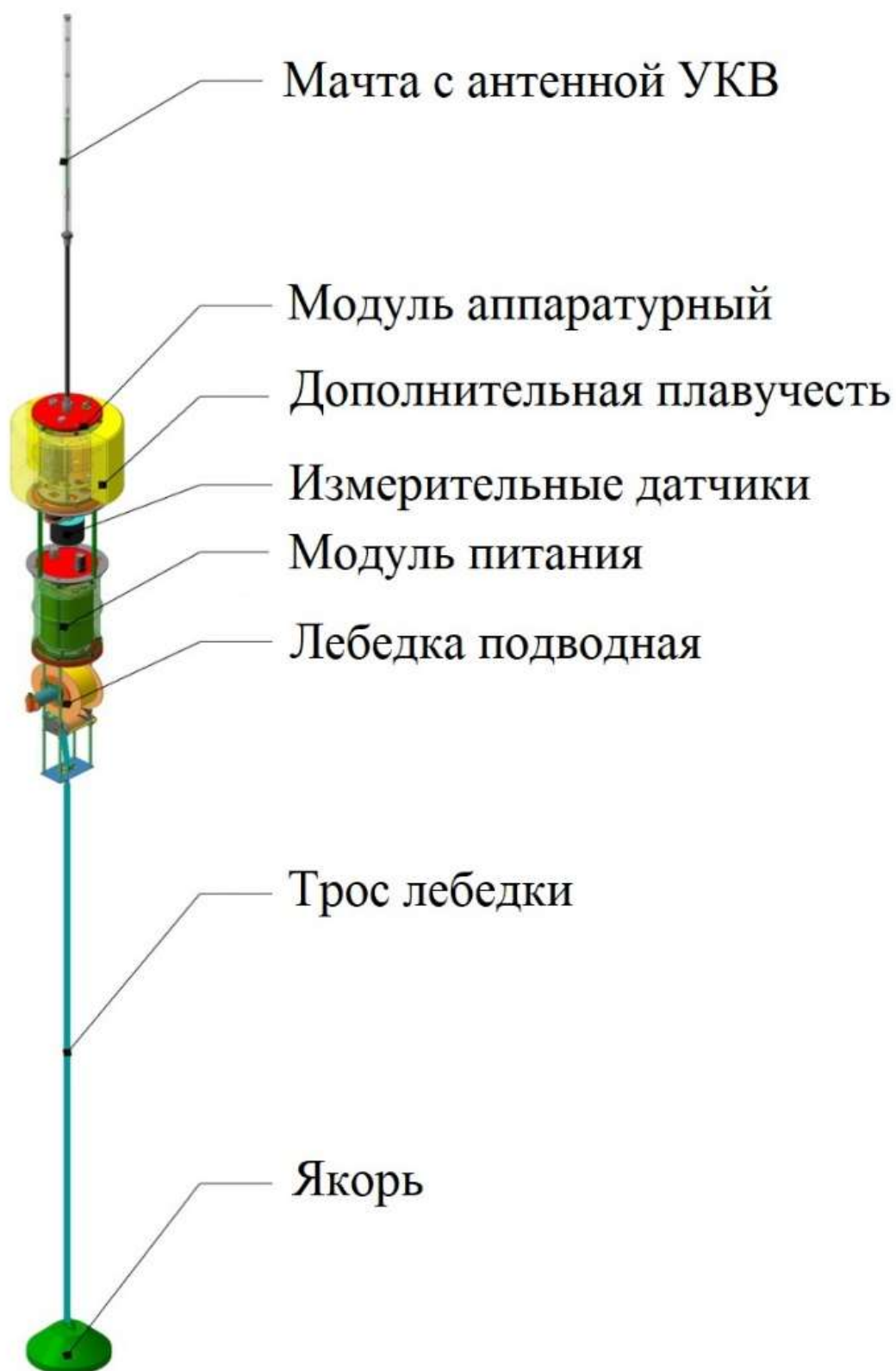


Рисунок 1.1 - ПАГИС. Вид общий

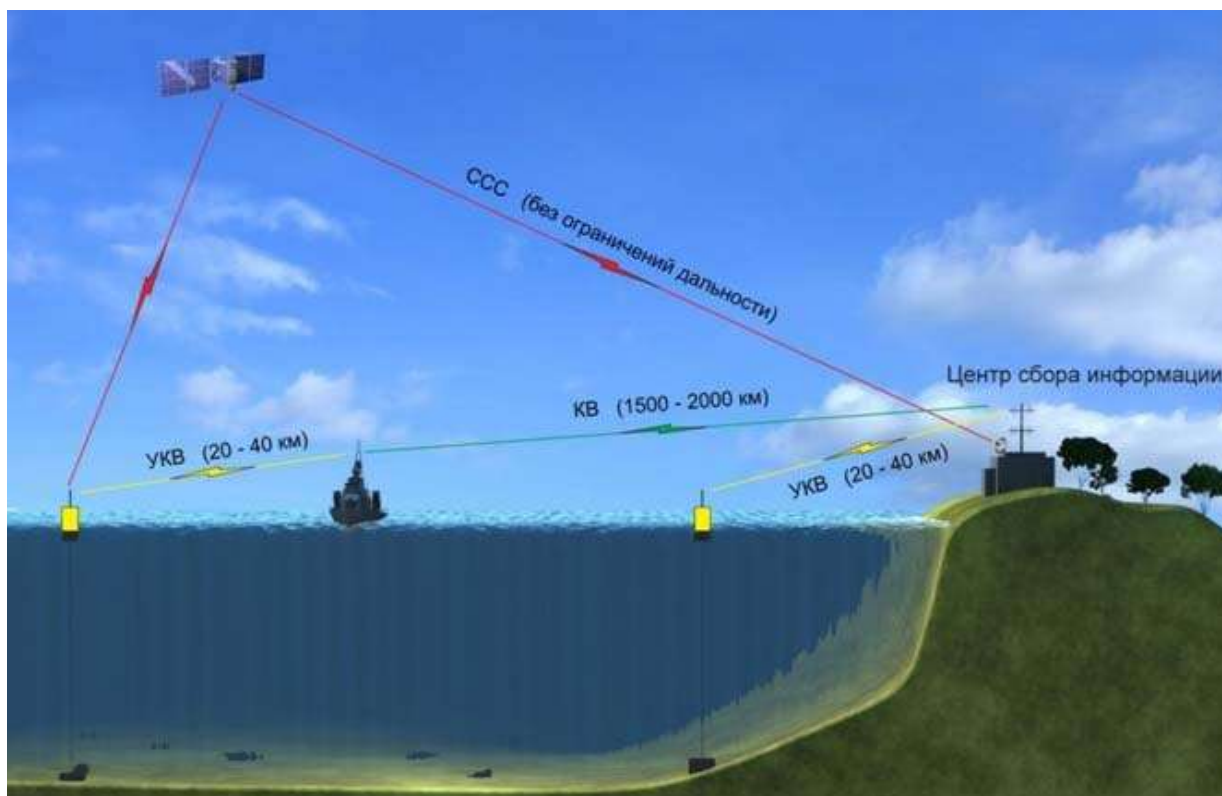


Рисунок 1.2 - Общий вид развернутой системы на позиции

1.2.1 Тактико-технические характеристики ПАГИС

1) Габариты и вес станции:

- в транспортном положении 400х400х2000 мм;
- в рабочем положении 400х400х3500 мм;
- вес станции на воздухе 54 кг;
- положительная плавучесть в воде 10 кг;

2) Связь со станцией (в зависимости от комплектации):

- радиоканал (позволяет передавать накопленную информация на расстояние до 40 км в условиях прямой радиовидимости);

- Спутниковая связь (например, через терминал спутниковой связи «ГОНЕЦ»¹);

- Акустический канал связи;

3) Глубина постановки до 200м (в текущей попоколении лебедки.);

Точность выхода на горизонт измерений 0,1% от максимального значения рабочей глубины станции (для 200 метров составляет 20 см);

4) Максимальное количество циклов измерений при энергии источника питания 3800 Ватт*часов составит 200 циклов на 200 метров; общее время нахождения в режиме ожидания 240 суток;

5) Допустимая скорость течения в районе установки 0,6 – 1,0 узел;

Базовый состав измерительных датчиков может меняться, максимальное количество измерительных датчиков 9 шт. (зависит от комплектации).

Базовый комплект датчиков перечислен в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Базовый состав измерительных датчиков

1	Датчик кислорода Oxygen Optode 4835 (диапазон 0...500 мкМ; разрешение <1 мкМ; точность <8 мкМ);
2	Датчик течения Doppler Current Sensor 4420 (диапазон 0...300 см/с; разрешение 0,1 мм/с; средняя точность ±0,15 см /с);
3	Датчик температуры Temperature Sensor 4060 (диапазон -4...+36 °С; разрешение 0,001 °С; точность ±0,03 °С)
4	Датчик давления Pressure Sensor 4117B (давление 0...4000 кПа (400 м); разрешение <0,0001 % FSO; точность ±0,02 % FSO)
5	Гамма-спектрометр МДГ-01 (диапазон регистрируемых энергий: 0,1...3,0 МэВ);
6	Флуоресцентный датчик полициклических ароматических углеводородов EnviroFlu-NC-VA-500.0 (диапазон 0...500 мкг/л; разрешение 0,1 мкг/л полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) в наименьшем диапазоне; воспроизводимость 2,5 % от измеряемого значения).

¹ «ГОНЕЦ» - Российская многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС), построенная на базе низкоорбитальных космических аппаратов (КА). Основным назначением МСПСС «Гонец» является передача данных и предоставление услуг подвижной спутниковой связи абонентам в глобальном масштабе.

При установке дополнительных датчиков, также можно определять такие параметры, как содержание: хлорофилла, растворенной органики, фенола, формальдегида, ионов хлорида, фторида, аммония, марганца, и др.

1.2.2 Описание и принципы работы системы

Одним из главных преимуществ измерительной платформы ПАГИС является его эксплуатационная мобильность. Габариты станции позволяют устанавливать ее с маломерных судов без применения грузоподъемных устройств, в заданной точке акватории (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Постановка измерительной станции с маломерного судна

К другим особенностям станции относится лебедка (Малашенко, и др., 2009), так в режиме всплытия в целях экономии энергии механизм лебедки разблокируется, и станция всплывает за счет положительной плавучести.

Постановка станции производится с разблокированной лебедкой. Якорь-балласт погружается на дно, разматывая трос лебедки, Сама станция остается на поверхности. Также измерения можно проводить, как на открытой воде, так и в зимний период, когда водоем покрыт льдом. Для этого мачта с антенной связи снимается и заменяется на эквивалент, который располагается в прочном корпусе, а отверстия под мачту глушится специальной заглушкой. (рисунок 1.4).

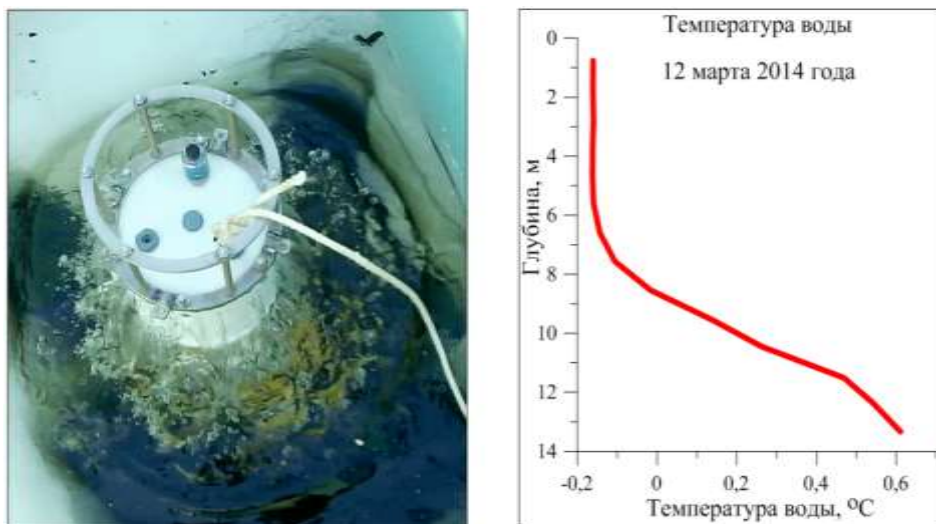


Рисунок 1.4 – Проведение работ в зимний период со льда.

Программа работы станции может быть заложена заранее или изменяться дистанционно по радиоканалу из центра сбора и обработки информации, который может располагаться, как на берегу, так и на маломерном судне.

Выполнение рабочей программы начинается по команде «Старт» с поста приема информации. По этой команде происходит включение лебедки на намотку троса, и станция начинает погружение. При достижении, по показаниям датчика давления глубины парковки (может быть выбрана оператором, для обеспечения безопасной глубины), барабан лебедки останавливается и блокируется, где станция остается до времени начала измерительного галса. Для выполнения измерительного галса, барабан лебедки разблокируется, и станция под действием положительной плавучести всплывает на поверхность. После всплытия показания датчика давления обнуляются для компенсации изменения атмосферного давления, и станция погружается до первого горизонта измерения. После достижения горизонта измерения лебедка выключается, и производится опрос измерительных датчиков. Для погружения на следующий горизонт включается лебедка на погружение. После опроса измерительных датчиков на последнем горизонте, станция, в соответствии с заложеной программой, либо всплывает на

поверхность для сеанса связи и потом погружается на уровень парковки в ожидании следующего галса, либо сразу перемещается на уровень парковки.

Аналогичным образом выполняются последующие галсы. В процессе выполнения рабочего режима ведется постоянный опрос датчиков напряжения, тока и затекания для контроля возникновения аварийных ситуаций и при их возникновении станция всплывает на поверхность и передает в центр сбора и обработки информации сообщение об аварийной ситуации, при получении ответа станции отключает модуль питания.

Для размещения измерительных датчиков, модули аппаратный и питания разнесены относительно друг друга с помощью стоек. Гамма-спектрометр и датчик определения нефтепродуктов размещены в компенсирующей поплавке, охватывающей модуль питания, параллельно станции.

Апробация измерительной станции ПАГИС

Результаты полученных измерений, проводимых начиная с 2013 по настоящее время, неоднократно подтверждали заявленные тактико-технические характеристики станции, которые были опубликованы в работах в соавторстве с соискателем (Зайцев, и др., 2013; Малашенко, и др., 2014). Она применялась во время работ комплексной экспедиции Русского географического общества «Восточный бастион – Курильская гряда» проходившей в 2019 году на Курильских островах, при поддержке Министерства обороны Российской Федерации (Москвитин, и др., 2022; Москвитин, и др., 2023). Также станция применялась при выполнении НИР «Комплексное обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем» (Москвитин, и др., 2022).

1.3 Автономный регистратор течений водного потока

Автономный регистратор течений – устройство, предназначенное для измерения скорости течения водного потока в заданном слое, основанного на эффекте Доплера.

Для измерения скорости течений водотоков рек и озер, впадающих в озеро Тунайча, а также скорости течений водных масс в проливе Красноармейский, при водообмене озера с морем, применялся доплеровский датчик течений AANDERAA ZPulse® Doppler Current Sensor 4420 (рисунок 1.5) (Хylem, 2019). На его основе было разработано и изготовлено измерительное устройство. Автономный регистратор течений прошел метрологическое освидетельствование на базе СКБ САМИ ДВО РАН и апробацию во время проведения полевых работ в мае и ноябре 2022 года.



Рисунок 1.5 - Внешний вид датчика AANDERAA ZPulse® Doppler Current Sensor 4420

В основе метода измерений скорости водного потока лежит эффект Доплера. Четыре ортогонально расположенных пьезокерамических преобразователя посылают короткие акустические посылки в виде узконаправленных лучей, эти же преобразователи фиксируют сигналы, отраженные от находящихся в воде взвешенных частиц. В качестве взвешенных частиц, как правило, выступают пузырьки воздуха в воде,

планктон и частицы твердых взвесей. Полученный при этом сдвиг частоты используются для расчета X и Y , а с учетом показаний встроенного компаса с трехосевой компенсацией наклона – Северной и Восточной составляющих скорости течения. По набору измерений рассчитывается среднее значения составляющих и векторно-осредненная абсолютная скорость течения. Ввиду того что акустические датчики не имеют движущихся частей, а зондирование происходит на расстоянии от 0,4 до 1,0 м от датчика это позволяет исключить влияние помех, создаваемых локальной турбулентностью и обрастанием, обеспечивая вывод данных в реальном времени в физических величинах.

Точность измерений пропорциональна квадратному корню из величины, равной количеству акустических посылок за интервал времени. Для получения высокой точности измерений за короткий промежуток времени, например, за 1 минуту, необходимо, по возможности, выбирать более высокую частоту акустических посылок. Использование мультимчастотной технологии в ZPulse® Doppler Current Sensor позволяет вдвое повысить точность по сравнению с одночастотными датчиками.

Измерительный прибор был выполнен в двух вариантах:

В первом варианте прибор был выполнен с выносным измерительным датчиком, который соединялся с корпусом автономного регистратора через герметичный разъем посредством длинного кабеля. Такой вариант исполнения прибора применялся для обследования малых рек и протоков (рисунок 1.6), впадающих в озеро. Сам датчик крепился на небольшой опоре в виде треноги с закрепленной вертикальной штангой.



Рисунок 1.6 - Измерение расходов воды на реке Дальняя

Для больших водотоков, применялся автономный регистратор течений, который состоял из датчика AANDERAA ZPulse® Doppler Current Sensor 4420 (Хулем, 2019), регистратора и аккумуляторной батареи, установленных в прочный корпус (рисунок 1.7).

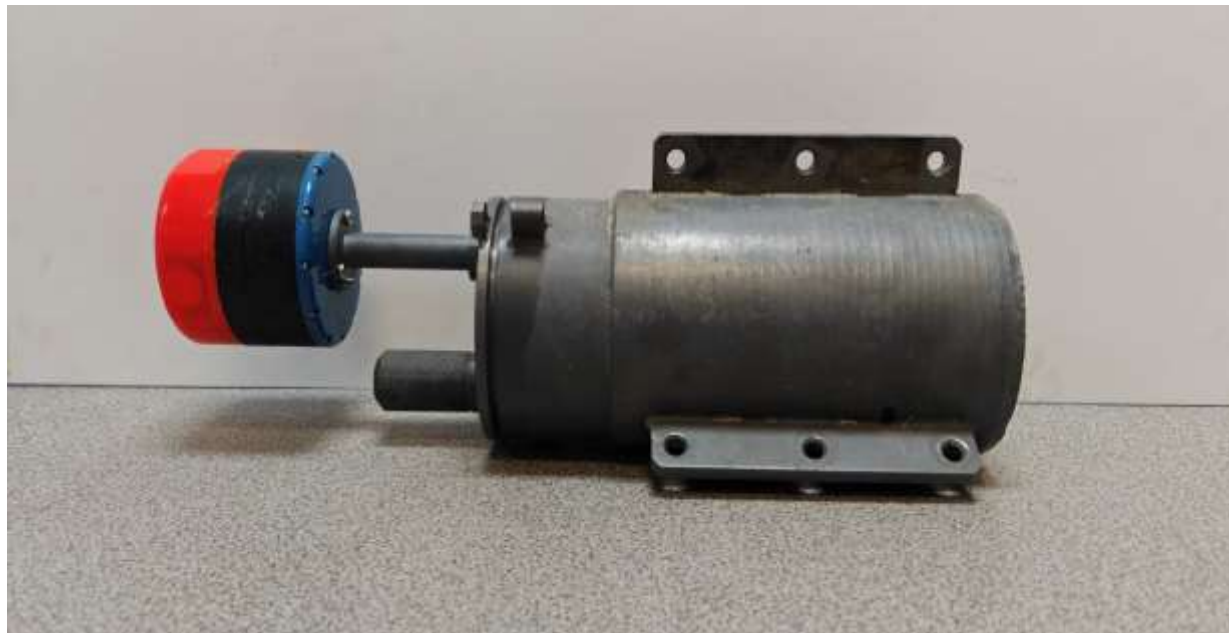


Рисунок 1.7 - Общий вид автономного регистратора течений

В качестве устройства регистрации и накопления измеренных данных использовалась отладочная плата на базе микроконтроллера ATmega328P с модулем часов реального времени DS3231, картой памяти SDcard и

конвертором уровней RS-232. Структурная схема устройства изображена на рисунке 1.8.

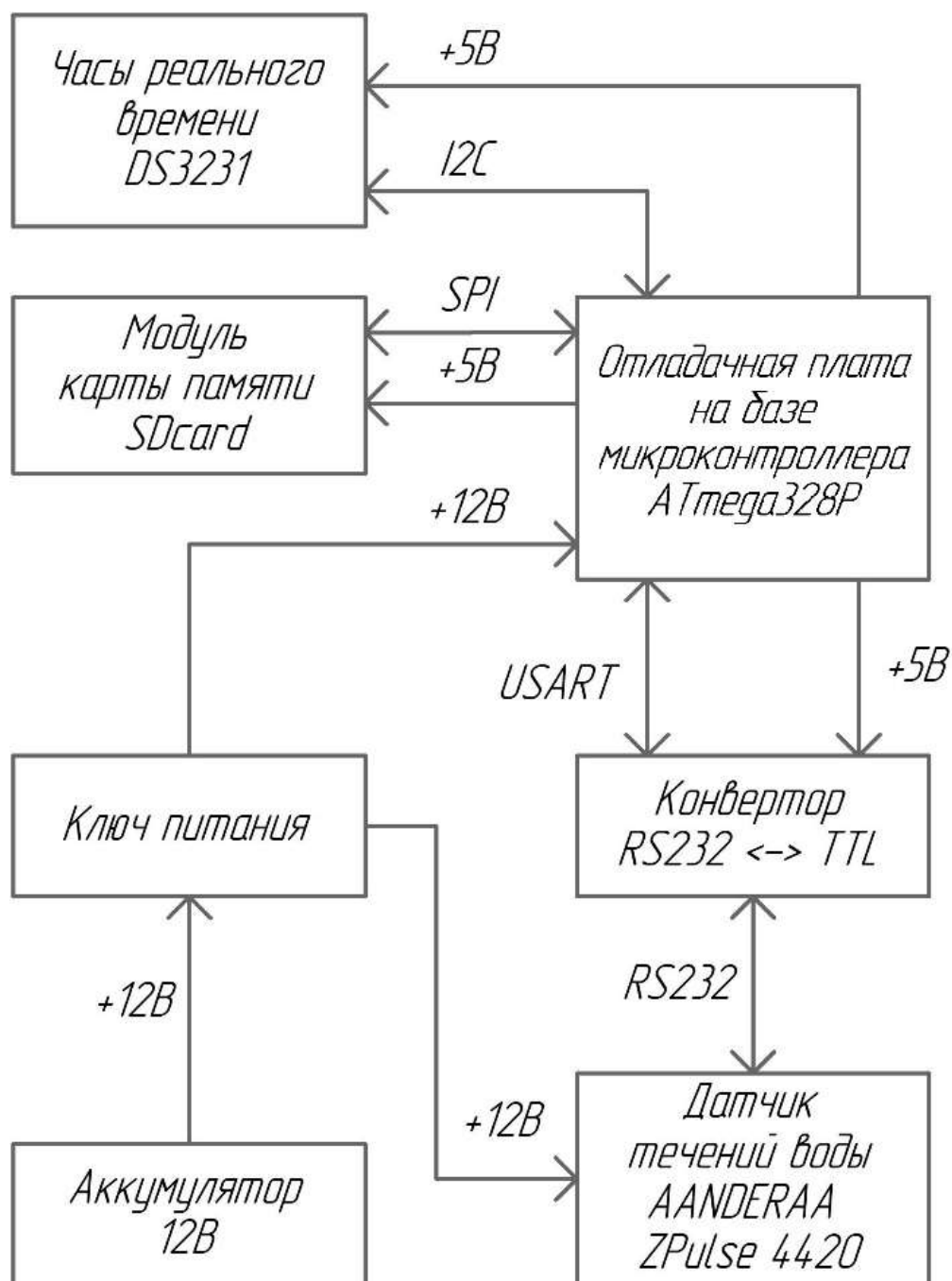


Рисунок 1.8 - Структурная схема автономного регистратора течений

Таблица 1.2. Основные характеристики датчика AANDERAA ZPulse® Doppler Current Sensor 4420.

Скорость течения: (векторное усреднение).		
Диапазон измерений:		0-300 см/сек;
Разрешение:		0,1 мм/сек;
Точность:	Абсолютная:	±0,15 см/сек;
	Относительная:	±1% от отсчета;
	Статистическая (СКО):	0,3 см/сек;
Направление течения:		
Диапазон измерения:		
Разрешение:		
Точность:	±5° при углах наклона от 0° до 15°	
	±7,5° при углах от 15° до 35°	
Угол наклона датчика:		
Диапазон:	0 – 35°	
Разрешение:	0,01°	
Точность:	±1,5°	
Компас:		
Разрешение:	0,01°	
Точность:	±1,5°	
Акустическая частота:		1,9 – 2 МГц
Акустическая мощность:		25 Вт в импульсе 1 милиСек
Угол раскрытия луча:		2 град. (главный луч)
Рабочее напряжение:		6 – 14 В постоянного тока
Протокол RS232/RS422:		9600 boud, 8 data bits, No parity, 1 stop bit, Xon/Xoff
Максимальная длина кабелей:		RS232 - 15м; RS422 - 1000м

1.4 Погружной зонд для измерения электропроводимости

Измерение электропроводности соленой воды является одним из ключевого параметра для измерения нескольких фундаментальных физических свойств воды. Для соленой воды способность проводить электрический ток в основном зависит от температуры и количества неорганических растворенных твердых частиц.

Погружной зонд регистрации электропроводимости – предназначен для регистрации и накопления данных о электропроводимости и температуры воды, собран на базе датчика AANDERAA Conductivity Sensor 4319.

В качестве устройства регистрации и накопления измеренных данных использовалась плата с микроконтроллером ATmega328P, с модулем часов реального времени DS3231, картой памяти SDcard и конвертором уровней RS-232.

Датчик проводимости соленой воды от AANDERAA Conductivity Sensor 4319 — это компактный, полностью интегрированный датчик для измерения проводимости морской воды с интегрированным датчиком температуры и с цифровыми интерфейсами AiCaP, CANbus, RS-232. Который использует индуктивный принцип измерения проводимости, что позволяет получить более стабильные измерения без использования электродов, которые легко загрязняются и могут изнашиваться в агрессивных условиях морской воды.

Это означает, что с помощью датчика AANDERAA можно получить наиболее достоверную информацию о солености воды и скорости звука, имея данные о проводимости, глубине и температуре. Основные характеристики датчика приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Основные характеристики датчика электропроводности, температуры (солености, плотности) Conductivity 4319

Измеряемые характеристики		
Проводимость:	Диапазон измерения:	0-7,5 S/m
	Разрешение:	0,0002 S/m
	Точность:	±0,005 или ±0,0018 S/m
Температура:	Время отклика:	(90 %) <3 сек
	Диапазон измерений:	от -5 °C до +40 °C
	Точность:	±0,1 °C
	Время отклика:	(63 %) <10 сек



Рисунок 1.9 - Погружной зонд проводимости. Вид общий

1.5 Безэкипажный корабль (БЭК) повышенной остойчивости для применения в прибрежной зоне.

Предназначен для удаленного обследования береговой линии и дна акватории, мониторинга параметров водной среды. Управление БЭК осуществляется по радиоканалу с берегового компьютера. Программное обеспечение позволяет в реальном времени отображать все подключенные к нему датчики, а также аккумулировать показания эхолота с привязкой к координатам, времени и датчику движения. Схематичный вид внешних модулей БЭК представлен на рисунке 1.10.

Основные технические характеристики:

1. Длина корабля: 3.6 м
2. Ширина корабля на мидель-шпангоуте: 0.49 м
3. Ширина корабля по габариту: 0.8 м
4. Осадка корабля: 0.35 м
5. Общая масса корабля в зависимости от комплектации: до 300 кг
6. Скорость корабля: до 20 узлов
7. Радиус сигнала радиосвязи: до 2 км
8. Рабочая частота эхолота: от 170 до 220 kHz
9. Разрешение по расстоянию эхолота: 3,6 см

- 10.Количество лучей эхолота: от 10 до 512 по выбору оператора
- 11.Угол обзора эхолота: от 10° до 120° по выбору оператора
- 12.Максимальная глубина использования эхолота: до 200 метров
- 13.Автономность работы: до 24 часов

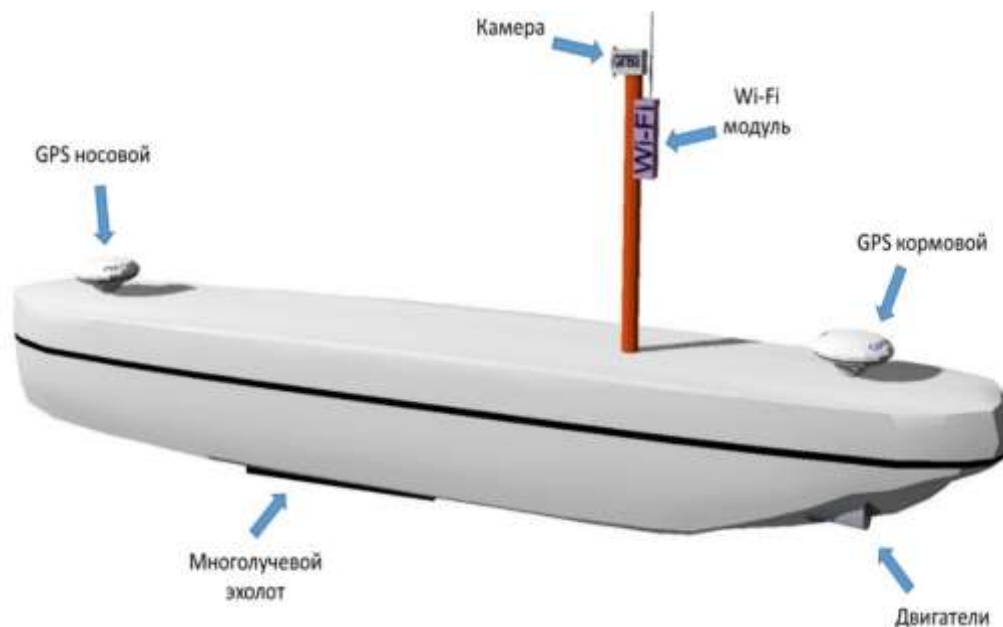


Рисунок 1.10 - Схематичное представление внешних модулей БЭК

Во время выполнения составной части НИР «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем», с применением БЭК были выполнены гидрографические исследования в районе мыса Бауэра (рисунок 1.11)



Рисунок 1.11 – Проведение гидрографических работ в районе мыса Бауэра

По материалам выполненных гидрографических работ по съемке рельефа дна в проливе Красноармейский с применением безэкипажного корабля составлен отчетный планшет в масштабе 1:5000 (рисунок 1.12).

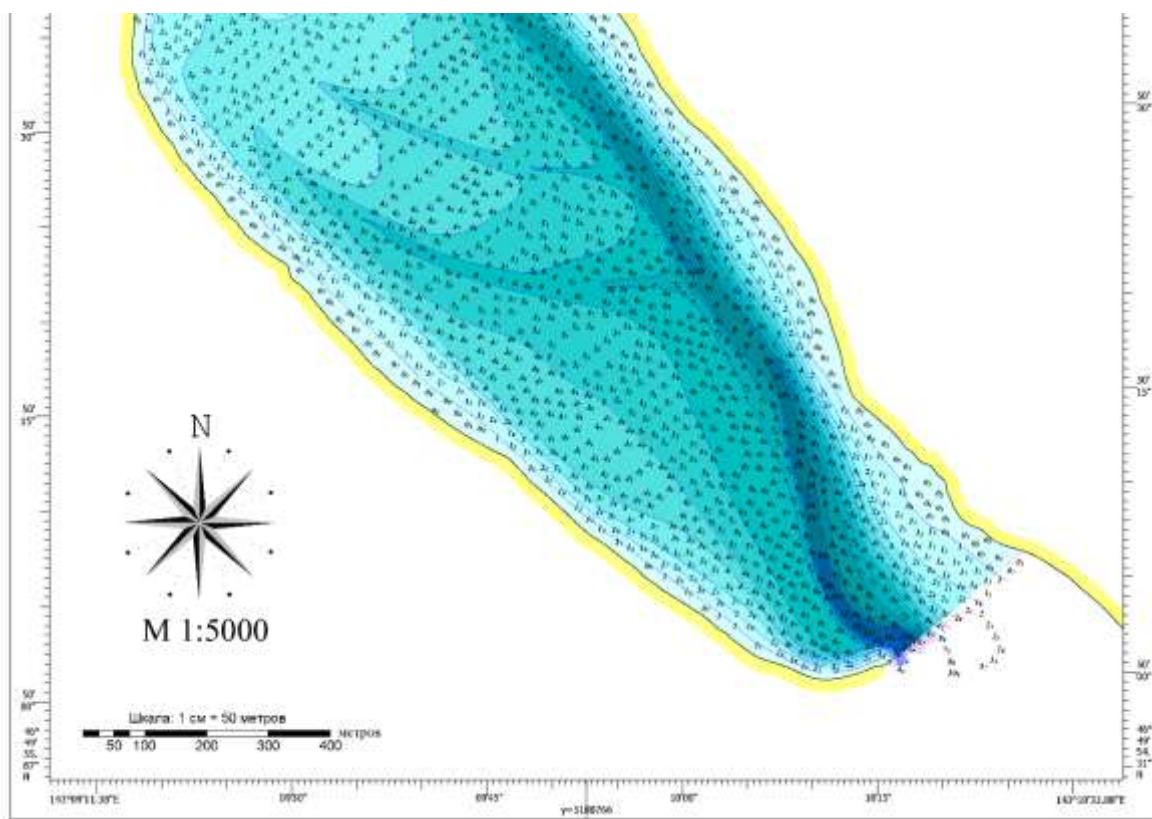


Рисунок 1.12 - Карта глубин пролива Красноармейский в масштабе 1:5000

1.6 Устройство бесконтактного измерения нагонных волн в лабораторных условиях.

Один из самых распространенных способов регистрации уровня жидкости в лабораторных условиях это использование струнных датчиков. (Рисунок 1.13) Проводился эксперимент по воздействию цунами на речные структуры, поднимающимся по реке (Hydraulic model experiment for tsunami, 2004).



Рисунок 1.13 - Расположение струнных датчиков
(Hydraulic model experiment for tsunami, 2004)

Данный метод позволяет регистрировать параметры генерируемой волны в экспериментальном бассейне, но дает малую дискретность при регистрации длины нагонных волн на береговые откосы, так как дискретность зависит от количества установленных датчиков. Ещё один пример, где применялись струнные датчики — это эксперимент по апробации с теоретической моделью, основанной на точных решениях нелинейных уравнений мелкой воды для наклонного пляжа, который проводился в 2012 года. Лабораторная установка имела участок длиной порядка 250 м, с постоянной глубиной, которой поддерживалась на протяжении всего

эксперимента на уровне 3.5м с участком наклона 1:6 (рисунок 1.14). Для регистрации создаваемых накатных волн на наклонный пляж они использовали емкостные датчики струнного типа в количестве 18 шт. Так же для регистрации данных использовались 2 видеокамеры (Denissenko, et al., 2013).

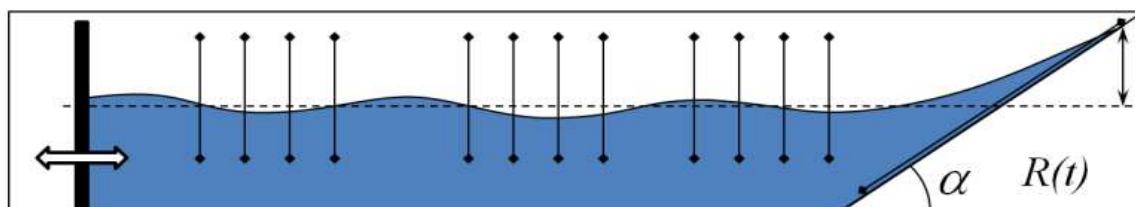


Рисунок 1.14 - Схема испытательного желоба

Одним из альтернативных методов является бесконтактное измерение емкости (Geethmani, et al., 2018), который с каждым годом набирает все большую популярность, благодаря высокому разрешению и точности измерений, низкому энергопотреблению, а также простоте изготовления чувствительного элемента. К еще одним из плюсов можно отнести то, что конструкция датчика не зависит от условий окружающей среды, таких как влажность и температура, что позволяет минимизировать помехи. Ввиду того, что сам чувствительный элемент не имеет прямого контакта с жидкостью, он защищен от окислов и коррозии, что положительно сказывается на долговечности. Стандартные методы измерения уровня жидкости имеет слабую надежность, из-за большой чувствительности к внешним воздействиям, таким как рука человека. Альтернативный подход к традиционной методике измерения уровня жидкости создает барьер для максимального соотношения сигнал/шум.

Описание метода измерения уровня воды

Основной характеристикой конденсатора является его емкость, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд. В обозначении конденсатора фигурирует значение номинальной емкости, в то время как реальная емкость может значительно меняться в

зависимости от многих факторов. Реальная емкость конденсатора определяет его электрические свойства. Из определения емкости, заряд на обкладке пропорционален напряжению между обкладками $q = CU$, где C – коэффициент пропорциональности, а U – напряжение.

Ёмкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая (рисунок 1.15), расположенных на расстоянии d друг от друга, в системе СИ выражается формулой (1.1) (Texas Instruments, 2021):

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1.1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды, заполняющая пространство между пластинами (в вакууме равна единице), ε_0 - электрическая постоянная, численно равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

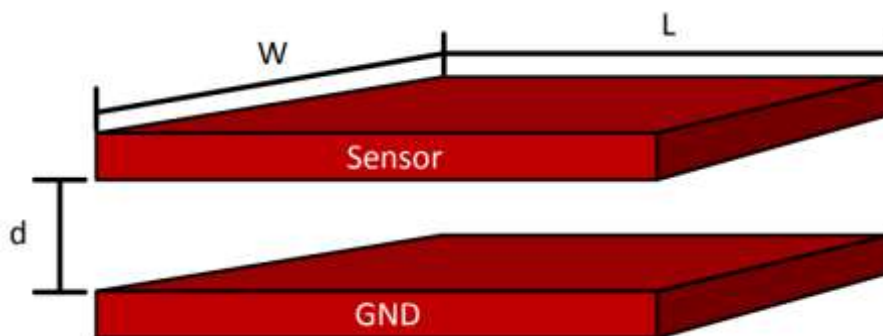


Рисунок 1.15 - Плоский конденсатор

Обкладки заряженного плоского конденсатора несут равный, но в тоже время противоположный заряд. Линии электрического поля начинаются от обкладки, заряженной высоким потенциалом напряжения, а заканчиваются на обкладке с низким напряжением (рисунок 1.16).

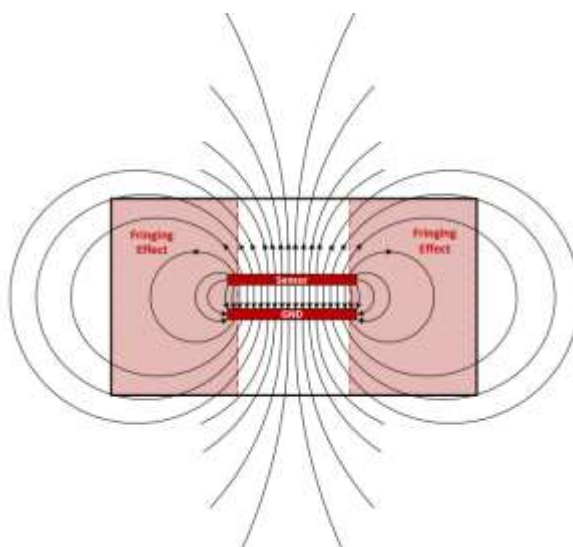


Рисунок 1.16 - Траектория линий электрического поля плоского конденсатора

Принцип емкостного измерения уровня жидкости

Принцип емкостного измерения уровня жидкости основан на принципе измерения конденсатора. Емкостными датчиками может служить любой металл или проводящий проводник, обладающий диэлектрической проницаемостью отличной от воздушной среды. Электроды и стенки бассейна образуют конденсатор с параллельными обкладками, емкость которого зависит от уровня воды (рисунок 1.17).

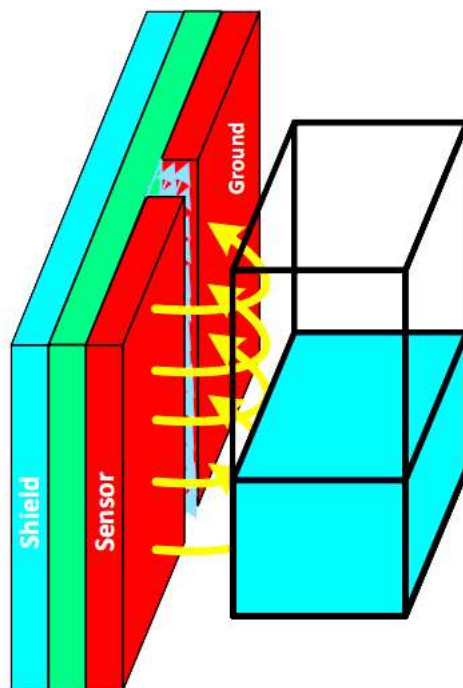


Рисунок 1.17 - Датчик уровня жидкости

Описание работы FDC1004

Микросхема FDC1004 производства Texas Instruments (FDC1) представляет собой 4х канальный преобразователь электрических величин емкости в цифру с высоким разрешением (рисунок 1.18). Каждый канал имеет полный диапазон измерения емкости ± 15 пФ с разрешающей возможностью 0,5 фФ и возможностью смещения емкости датчика до 100 пФ, которая может быть сконфигурирована программно или же с помощью внешнего конденсатора. Большая емкость смещения позволяет использовать датчики на удалении. В микросхеме имеется возможность калибровки усиления и смещения, а также активные экранирующие драйверы, которые могут значительно уменьшить электромагнитные помехи и внешние воздействия на датчики. В принцип работы заложено схема переключаемых конденсаторов для передачи заряда от электрода датчика к 24 разрядному дельта-сигма аналого-цифровому преобразователю. По завершению преобразования,

результат подвергается цифровой фильтрации. В качестве интерфейса связи присутствует I2C с программируемой скоростью от 10 до 400 кГц. Микросхема питается от напряжения 3,3 В и потребляет в режиме ожидания 29 мкА, а в активном 750 мкА.

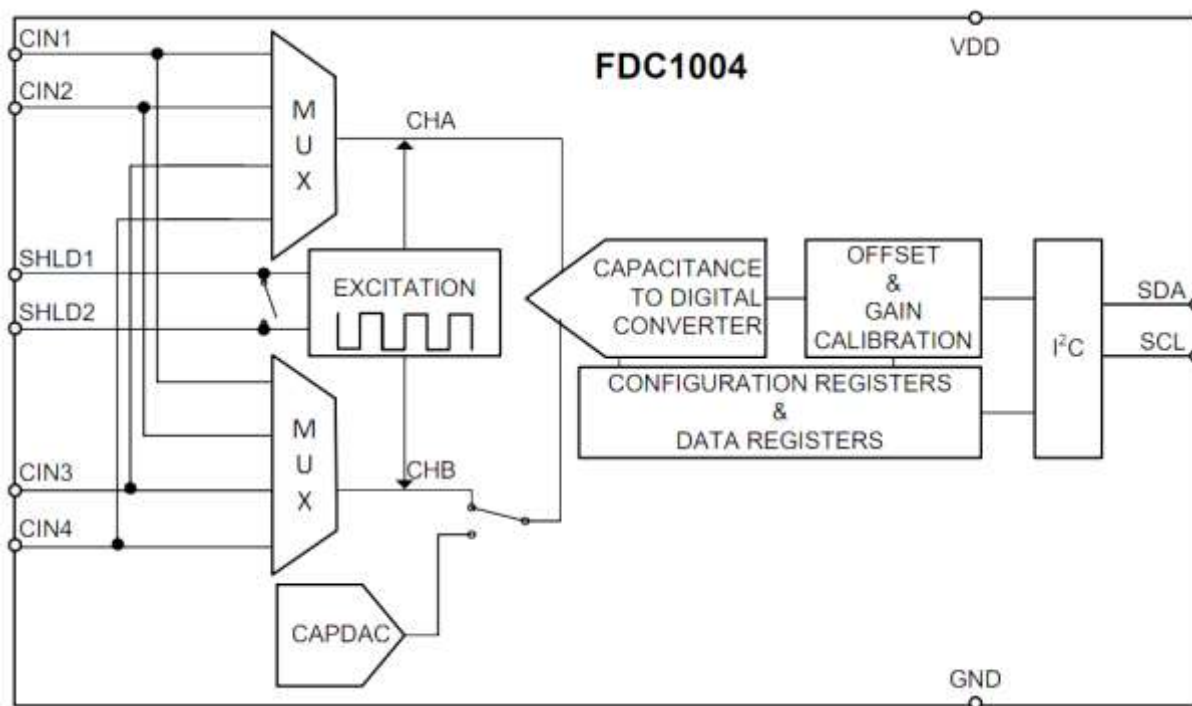


Рисунок 1.18 - Функциональная схема FDC1004

Благодаря не большим габаритам FDC1004, микросхема доступна в 10 контактном корпусе WSON и VSSOP. Печатная плата (рисунок 1.19) получилась довольно компактная, из обвязки микросхемы на плате присутствует линейный преобразователь с 5В на 3,3В, так как микроконтроллер питается от USB порта, а преобразователь FDC1004 от 3,3В, по этой же причине добавлена стандартная схема согласования уровней шины данных I2C на полевых транзисторах.

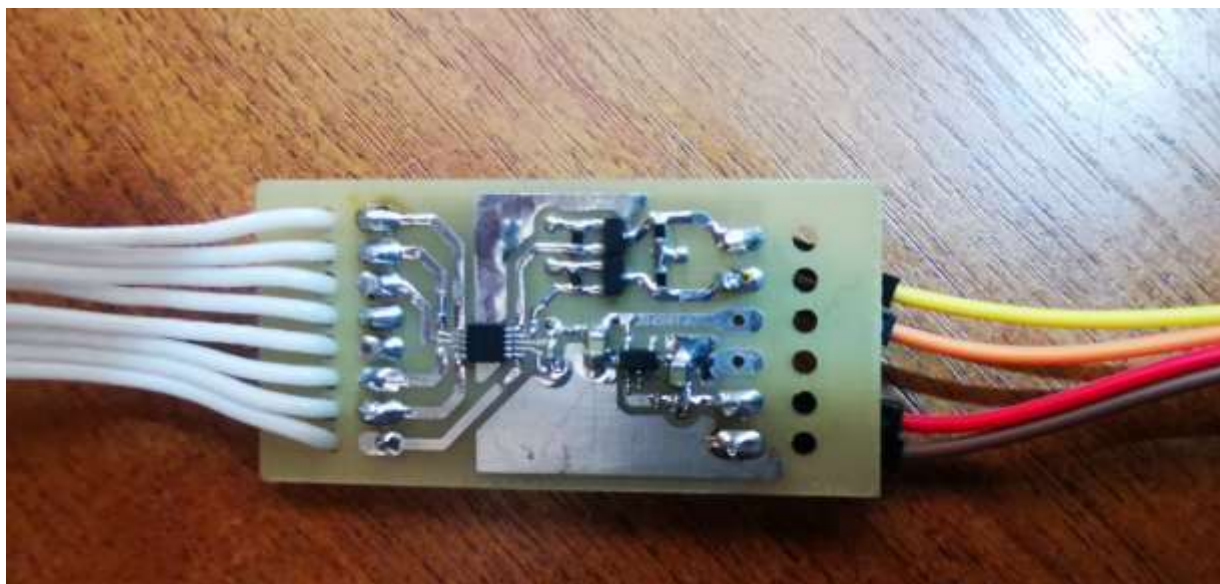


Рисунок 1.19 - Печатная плата FDC1004

Емкостной датчик

За основу емкостного датчика уровня, взять датчик Texas Instruments TIDA-00317, чертежи и схемы которого есть в открытом доступе (Texas Instruments, 2021). Сам тестовый датчик выполнен на 2х стороннем фольгированном текстолите толщиной 1 мм и толщиной фольги 18 мкм. На датчике расположены 2 одинаковые обкладки для измерения уровня жидкости и 2 обкладки эталоны среды (рисунок 1.20).



Рисунок 1.20 - Вид печатной платы датчика уровня жидкости

Схема подключения датчика:

CIN1 - Электрод уровня жидкости

CIN2 - RL – reference liquid (эталон жидкости).

CIN3 - RE – reference environmental (эталон окружающей среды)

CIN4 - не подключен

Прошивка для микроконтроллера базировалась на базовом примере из библиотеки ProtoCentral_fdc1004_breakout с Github (Texas Instruments, 2021) для среды разработки Arduino IDE. Основной задачей, которой было выводить в последовательный порт значения измеренной емкости в пикофарадах со скоростью 115200 бод.

Лабораторный эксперимент

Основная цель данного эксперимента – прописать сгенерированную одиночную волну разработанным прототипом устройства измерения уровня жидкости с помощью бесконтактного емкостного датчика.

Первым этапом необходимо было выяснить насколько стабильно показывает датчик уровня, для этого в экспериментальном бассейне поочередно был отрегулирован уровень для минимального и максимального уровня жидкости (рисунок 1.21)

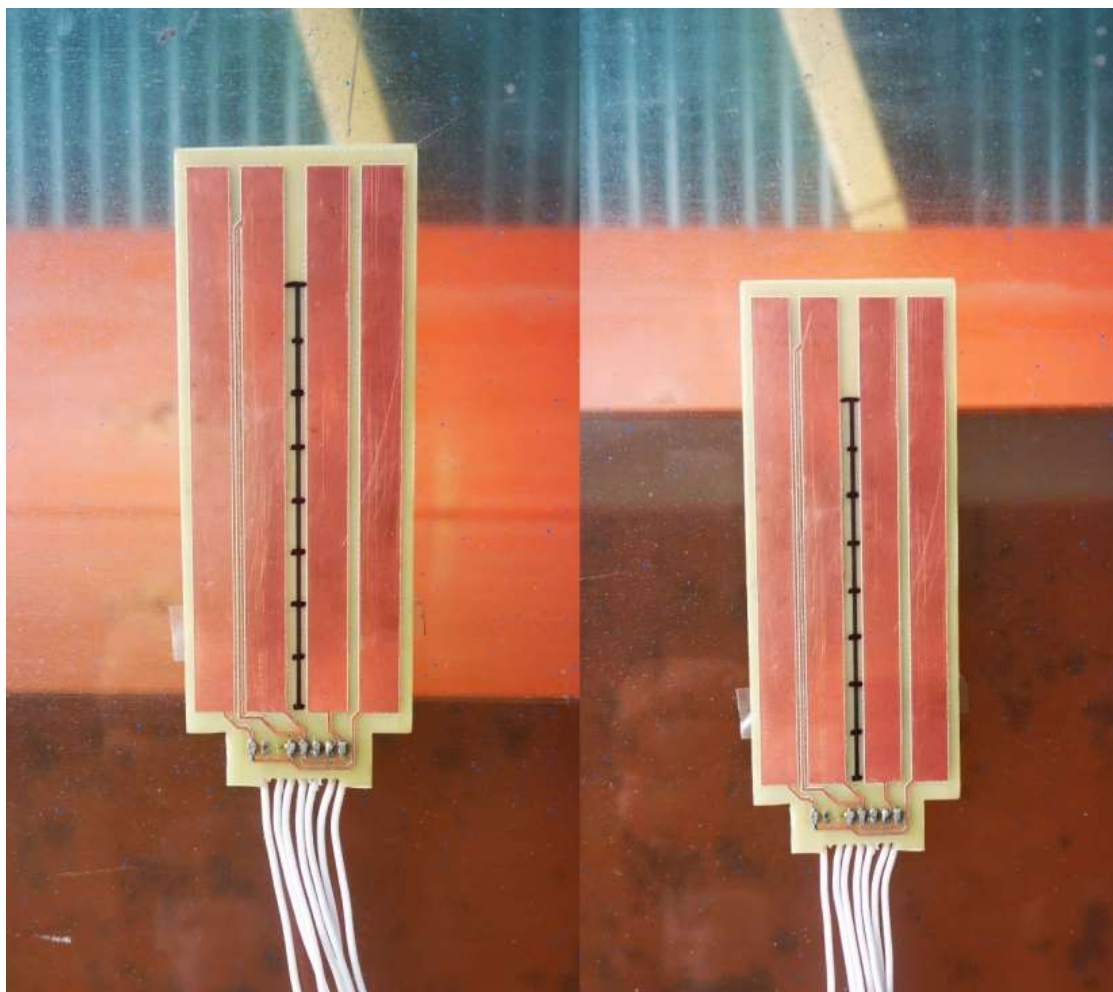


Рисунок 1.21 - Крайние положения датчика уровня

Набрана статистика измерений порядка 500 выборок в каждом положении, которая показала, довольно стабильный результат, отклонение значений в пределах сотых долей пико фарад.

Следующим этапом необходимо было прописать сгенерированную одиночную волну в опытно-экспериментальном бассейне (рисунок 1.22), но ввиду того, что на момент эксперимента наш бассейн не был оснащен плоскостью, имитирующей наклонный берег. Бесконтактный емкостной датчик был расположен на боковой стенке экспериментального бассейна, что вполне вписывалось в рамки данного эксперимента.

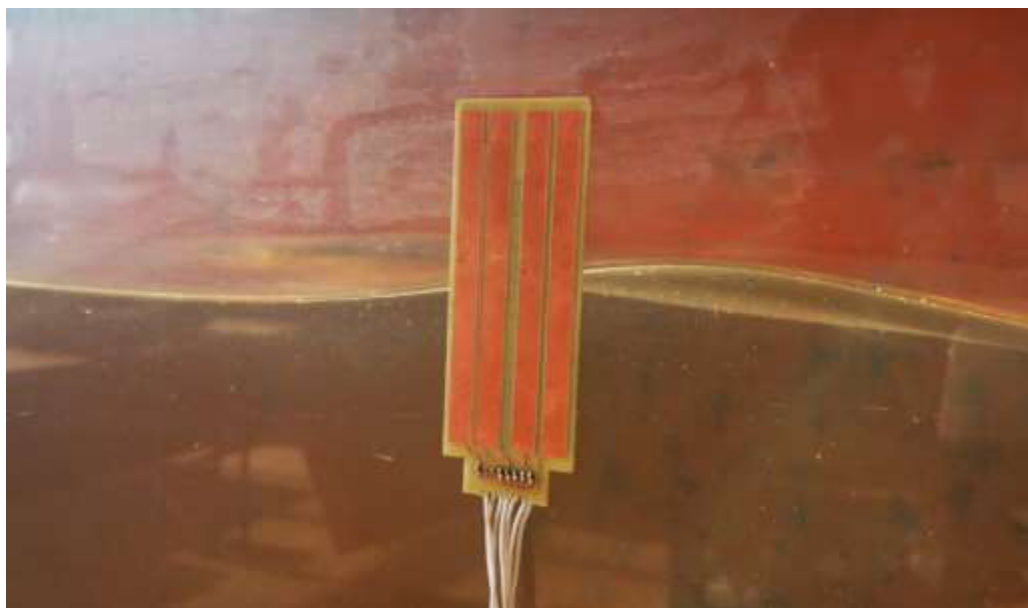


Рисунок 1.22 - Одиночная волна, сгенерированная в опытно-экспериментальном бассейне

После чего уровень жидкости был выставлен на середине датчика и сгенерировано несколько одиночных волн, наиболее удачный результат отображен на графике, где совмещены графики стабильности показаний минимальных и максимальных измерений, а также одиночной волны (рисунок 1.23).

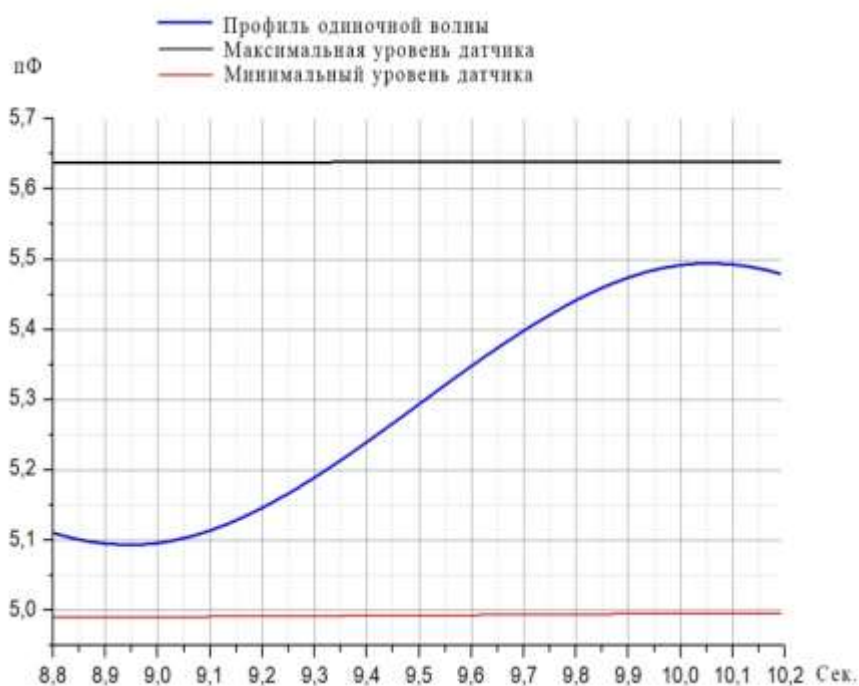


Рисунок 1.23 - Наложение мин. и макс. уровня жидкости и одиночной волны.

1.7 Волнограф

Устройство «Волнограф» - предназначено для регистрации и накопления долговременных измерений поверхностного волнения моря, методом измерения придонного давления. Измерительный прибор разработан в СКБ САМИ ДВО РАН при непосредственном участии автора, основываясь на опыте измерений поверхностных волн другими Российскими учеными (Кабатченко, и др., 2007; Кузнецов, и др., 2014; Лухнов, и др., 2006). Общий вид устройства представлен на рисунках 1.24, 1.25, в двух исполнениях корпусов, металлическом из нержавеющей стали и пластиковом, который отличается простотой изготовления и дешевизной.



Рисунок 1.24 - Волнограф. Вид общий.
(корпус из нержавеющей стали).

Устройство производит непрерывное измерение двух параметров, давления и температуры, значение последнего также используется для температурной компенсации, как самого датчика давления, так и для компенсации кварцевого резонатора, отвечающего за формирование временных промежутков. Структурная схема устройства представлена на рисунке 1.26. В качестве датчика температуры применяется терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, обеспечивающий точность измерения температуры $0,1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от -10°C до $+30^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 1.25 – Волнограф. Внутреннее устройство.
(Пластиковый корпус).

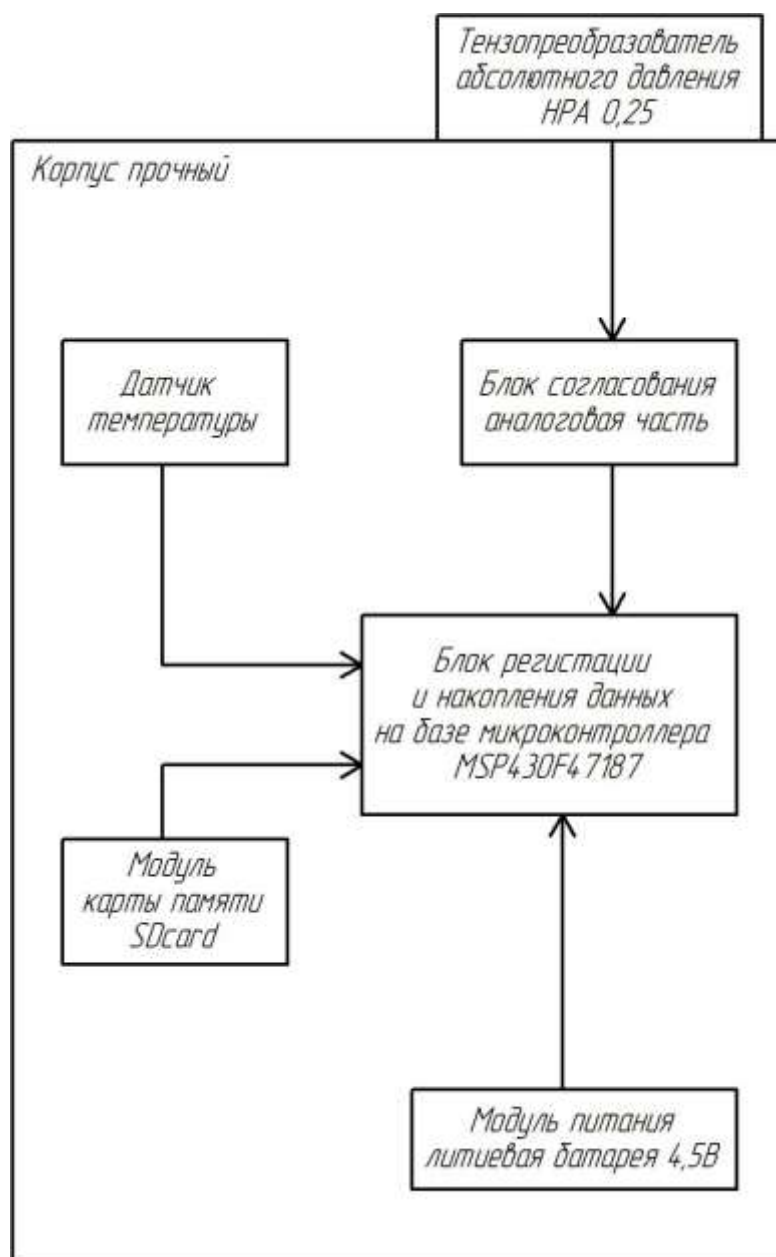


Рисунок 1.26 - Структурная схема «Волнограф».

Таблица 1.4 - Основные характеристики устройства «Волнограф»

Глубина постановки:	от 5 до 15 м;
Частота дискретизации:	до 8 Гц;
Автономность:	до 1 года (в зависимости от элементов питания);

Таблица 1.4 - Основные характеристики устройства «Волнограф»
продолжение:

Материал корпуса:	Нержавеющая сталь, полипропилен;
Характеристики измерительного элемента:	
Датчик:	Тензопреобразователь абсолютного давления НРА 0,25-11-V-МА-L;
Разрешающая способность:	0,01%
Нелинейность (FS)	$\pm 0,2\%$
Вариация (FS)	0,1%
Повторяемость выходного сигнала (FS)	$\pm 0,1\%$
Погрешность от воздействия температуры окружающей среды (FS/1°C)	$\pm 0,05\%$
Диапазон рабочих давлений:	0..0,25 МПа
Диапазон температур:	От -45°C до +200 °C
Материал корпуса:	Титан

1.8 Выводы ко первой главе

В первой главе представлены измерительные комплексы, в разработке и испытаниях которых автор диссертации принимал непосредственное участие.

- Представлена позиционная автоматизированная измерительная станция «ПАГИС». Данная разработка адаптирована для измерения гидрофизических и гидрохимических параметров водной среды на заданных горизонтах. Проведены измерения различных параметров водной среды в сложных гидрологических условиях в разное время года, в том числе в ледный период. Получены уникальные данные для охотоморского региона.

- Разработан погружной зонд для измерения электропроводимости и температуры. С помощью авторских измерительных систем выполнена научно-исследовательская работа по оценке водного баланса в озере лагунного типа Тунайча. Проведен большой объем гидрографических работ. Выполнен комплекс работ по измерению распределения солености по всей акватории озера. Для оценки сезонной изменчивости, эта работа была проведена в два этапа, в весенний и осенние периоды. Получено распределение солености и температуры по всей акватории озера. Результаты измерений вошли в состав отчета НИР «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем». Данные отчета используются для работы межведомственной комиссии Сахалинской области по экологической проблеме озера Тунайча.

- Представлено устройство «Волнограф», предназначенное для регистрации и накопления долговременных измерений поверхностного волнения моря. Данные измерений охватывают периоды сильных штормовых нагонов и становление ледового покрова в отдельных заливах Охотского моря. Под руководством профессора, доктора физико-математических наук Слюняева А.В. разработан вариант устройства с тремя равноудаленными друг от друга измерительными датчиками тактируемых от одного тактируемого источника, применяемое для регистрации объемных волн. Результаты измерений использовались для выявления зависимости вероятностного распределения высот волн.

- Разработан автономный регистратор течений водного потока, который применялся для исследования объемов воды, проникающих через пролив в озеро лагунного типа во время сильных штормовых нагонов в сложных климатических условиях. Выполнены исследования расхода воды и скорости течений водотоков в приустьевой части, впадающих в озеро Тунайча в период основных фаз водного режима.

- Выполнена адаптация безэкипажного корабля (БЭК) повышенной остойчивости для применения в прибрежной зоне. Данная платформа была использована для проведения гидрографических работ в части съемки рельефа дна юго-восточной части пролива Красноармейский соединяющий Охотское море (залив Мордвинова) с озером лагунного типа Тунайча в дистанционном режиме. Данные измерений были использованы в НИР «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем».

- Представлена авторская разработка для бесконтактного измерения волновых характеристик в лабораторных условиях. Рассматривается метод регистрации нагонных одиночных волн на наклонный берег в опытно-экспериментальном бассейне с помощью бесконтактного емкостного датчика, прототип которого был разработан на базе емкостно-цифрового преобразователя FDC1004 производства Texas Instruments и микроконтроллера ATmega328p на базе Arduino Nano. Был проведен эксперимент в опытно-экспериментальном бассейне на базе СКБ САМИ ДВО РАН, с небольшими уровнями волн. Эксперимент показал работоспособность прототипа.

- Разработано устройство «Волнограф», для регистрации и накопления долговременных измерений поверхностного волнения моря, методом измерения придонного давления.

ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОХОТСКОМ МОРЕ

2.1 Введение

Натурные исследования гидрофизических процессов, протекающих в водах Мирового океана, являются основополагающим фундаментом океанографии, позволяющий изучать океан в его естественной среде. Данные полученные при натурных исследованиях являются базисом любых научных гипотез, математических моделей, технологий. Они несут неоценимый вклад в понимание процессов взаимодействия геосфер в целом.

В данной главе представлены результаты натурных исследований, полученных автором в ходе проведения множества экспедиций, научно-исследовательских работ, а также в процессе апробации новых научно-измерительных приборов, описанных в первой главе данной диссертационной работы, в период с 2012 по 2024 года.

Основными целями при проведении гидрофизических исследований в Охотском море было изучение интенсивности водообмена моря с прилегающими береговыми акваториями и водами Тихого океана посредством связывающих их проливов, влияние их размера и глубин на интенсивность водообмена, влияние антропогенного воздействия на экологический баланс всей системы с применением новых технических средств измерительной техники.

2.2 Гидрологические исследования в Курильском проливе

В данном разделе приводятся результаты научных исследований выполненных диссертантом по данным натурных измерений полученных в ходе экспедиции НИС «Академик Александр Виноградов» рейс №12 с 01.06. по 29.08.1988 г, а также экспедиции «Восточный бастион – Курильская гряда», организованной Русским географическим обществом, Российской академией наук и министерством обороны в 2019 году. Автор принимал непосредственное участие в экспедиции от СКБ САМИ ДВО РАН.

Цепь Курильских островов на границе Охотского моря является районом активного водообмена с Тихим океаном. Основными проливами, через которые происходит смешивание вод Охотского моря и океана, являются: Буссоль (с глубиной 2318 м), Крузенштерна (1920 м), а также проливы Фриза и Четвертый Курильский, глубина, которых составляет около 600 м.

Районы активного водообмена характеризуются высокой динамичностью и интенсивностью изменения гидрологических характеристик, пространственной неоднородностью их полей, сложностью гидрологических условий. Интенсивные приливные явления, сложный рельеф дна, изрезанность береговых линий, резко меняющиеся гидрометеорологические условия создают специфическую картину структуры вод в акваториях, прилегающих к районам проливов.

Естественным следствием сложности гидрологических условий и активности динамических природных процессов рассматриваемого района является высокая биологическая продуктивность водной среды вблизи островной дуги. Район Курильских островов можно отнести к активно осваиваемой промысловой судоходной части Мирового океана.

Опубликовано достаточно большое количество статей и монографий, посвященных процессам формирования поверхностного однородного слоя в океане. В научной литературе представлен ряд исследований акватории Охотского моря и Курильских островов, многие из которых начали проводиться еще со второй половины прошлого века (Морошкин, 1966; Леонов, 1960; Богданов, 1968). В течение последних десятилетий при помощи зондирующей аппаратуры и судовых наблюдений получен значительный объем данных по вертикальному распределению солености и температуры в северо-западной части Тихого океана. Охотское море играет важную роль в поддержании глобального термохалинного конвейера в северной части Тихого

океана и формировании промежуточных вод (Богданов, и др., 1998; Warner, et al., 1996; Talley, et al., 2001; Файман, и др., 2021).

Общая циклоническая циркуляция вод в Охотском море, сезонный характер изменений в водообмена моря с океаном описаны в литературе, но характеристики процессов, проходящих в Курильских проливах, изучены недостаточно. Вопросы формирования экстремальных гидрологических условий в конкретных проливах, изменчивости структуры вод на фоне динамики атмосферных и приливных процессов важны и актуальны для обеспечения безопасного мореходства и хозяйственной деятельности.

Полученные данные содержали значения гидрологических характеристик (температура, соленость, условная плотность, частота Вайсяля-Брента, скорость звука), полученные в точках измерения при различных значениях глубин, как вдоль всей протяженности пролива, так и в перпендикулярном направлении с выходом на охотоморскую и тихоокеанскую стороны (рисунок 2.1).

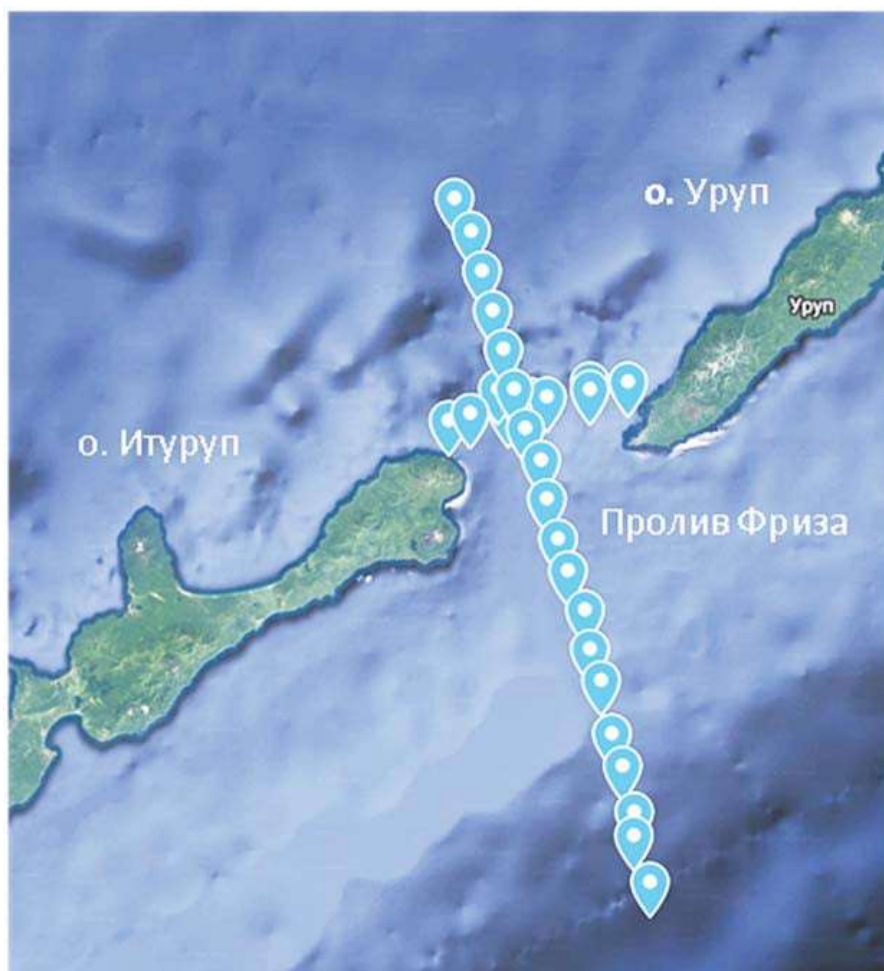


Рисунок 2.1- Схема расположения гидрологических станций в проливе Фриза

Подводный рельеф проливов Курильской гряды весьма разнообразен и сложен. Наиболее глубоководными проливами являются Буссоль, Четвертый Курильский, Крузенштерна и Фриза. На их долю приходится почти 80 % площади поперечного сечения всех главных проливов Курильской гряды. Согласно классификации Н.Н. Зубова (Зубов, 1956) все Курильские проливы являются поперечными (пересекающими подводные складки земной коры), и короткими, то есть двумерными: у них можно различать только глубину, ширину и площадь поперечного сечения. Проливы Буссоль, Четвертый Курильский, Крузенштерна и Фриза принадлежат к глубоководным (океаническим), а все остальные – к мелководным (проливам материковой отмели).

При изучении гидрологических условий проливов и влияния их глубины на формирование водных масс в прилегающих районах необходимо обращать

внимание на степень сообщения пролива с океаном – наличие порога и его глубину, которая позволяет обеспечивать водообмен как поверхностными, так и глубинными водами. Пролив Фриза относится к группе Курильских проливов, имеющих порог, причем порог этот находится в океане на подходе к проливу.

Согласно некоторым исследованиям (Гладышев, и др., 2004; Gladyshev, et al., 2000), тихоокеанские воды попадают в Охотское море через пролив Фриза сравнительно редко (частота наблюдения составляла 20%). Этот факт связан со значительной трансформацией вод, течения Ойясио по мере продвижения в юго-западном направлении в результате смешивания с охотоморскими водами, выходящими из Курильских проливов. Тихоокеанские воды настолько сильно смешиваются с охотоморскими в проливах, что при заходе в Охотское море по своим термохалинным характеристикам становятся гораздо ближе к последним.

В исследованиях А.Ф. Плахоника (Плахотник, 1953) приводятся данные водообмена через Курильские проливы в летнее время. Результирующий перенос через пролив Фриза составляет $1,15 \times 10^6$ м³/сек в направлении из Охотского моря в океан. Авторы схем водообмена в районе Курильской гряды отмечают наличие сезонной и межгодовой изменчивости. Наиболее интенсивный вынос морских вод через проливы Буссоль и Фриза происходит в холодную половину года. Летом вынос ослаблен, что приводит к уменьшению расходов течения Ойясио (Морошкин, 1966).

Основные черты гидрологии Курильского района складываются в результате перемешивания водных масс Охотского моря и Курило-Камчатской впадины. Согласно К.В. Морошкину (Морошкин, 1966) в Охотском море и в части Тихого океана вблизи Курильских островов выделяют три типа вертикальной структуры вод: охотоморскую, тихоокеанскую структуры и Курильскую разновидность субарктической структуры. Каждая из них весной, летом и осенью состоит из поверхностной

водной массы, холодного и теплого промежуточных слоев, и глубинных вод. В Охотском море между холодными и теплыми слоями отмечается промежуточная водная масса, которая возникает при перемешивании в проливах верхних слоев вод океана и моря.

В целом воды Тихого океана и Охотского моря, прилегающие к Курильскому району, состоят из пяти водных масс, имеют по вертикали сходную структуру и при устойчивом возрастании солености с глубиной обнаруживают на глубинах два максимума и два минимума температуры. При этом они существенно отличаются в границах отдельных масс и значениях температуры и солености (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Термохалинная структура вод в проливе Фриза

Слой	H , м	$T_{\leftarrow}$, C	S , ‰
Поверхностный	0 – 30	4 – 14	33,1 – 33,7
Холодный промежуточный (охотоморская вода)	30 – 400	1,7	34,0
Промежуточная водная масса Охотского моря	400 – 900	1,2	33,6 – 33,9
Теплый промежуточный	900 – дно	2,3	34,3
Глубинная водная масса	—	—	—

Основные черты гидрологического строения структуры вод в проливе Фриза наглядно иллюстрируется на рисунках 2.2 и 2.3. По мере подхода к проливу температура на поверхности падает, а соленость возрастает. Холодный промежуточный слой опускается глубже. Теплый промежуточный слой в океане формируется примерно на 300 м выше, чем в море. Структура воды в проливе имеет отличия, направленные в сторону выравнивания вертикального распределения термохалинных индексов и изменения границ отдельных водных масс. Наибольшими вертикальными градиентами плотности в проливе характеризуется верхний 100-метровый слой.

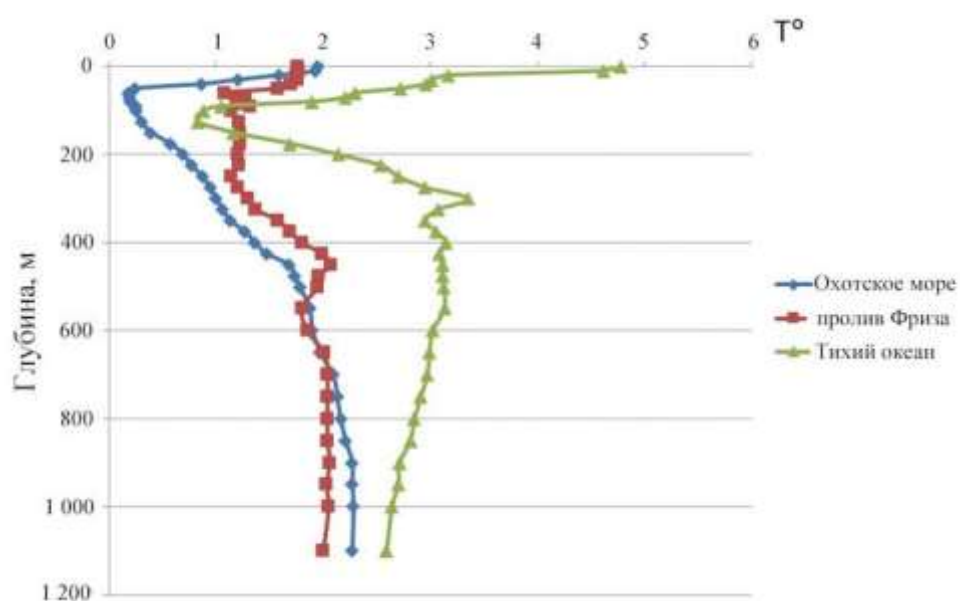


Рисунок 2.2 - Профили измерения температуры по глубине в Охотском море, в проливе Фриза и Тихом океане

Также были рассмотрены изменения гидрологических характеристик и по ширине пролива. На рисунке 2.4 показано распределение условной плотности σ_t по всей ширине пролива, изопикны построены по осредненным данным, измеренным в семи точках, распределенных по ширине пролива от о. Итуруп до о. Уруп. В поверхностном слое наблюдается менее плотная вода вблизи о. Итуруп. На противоположном берегу на поверхности более плотные воды.

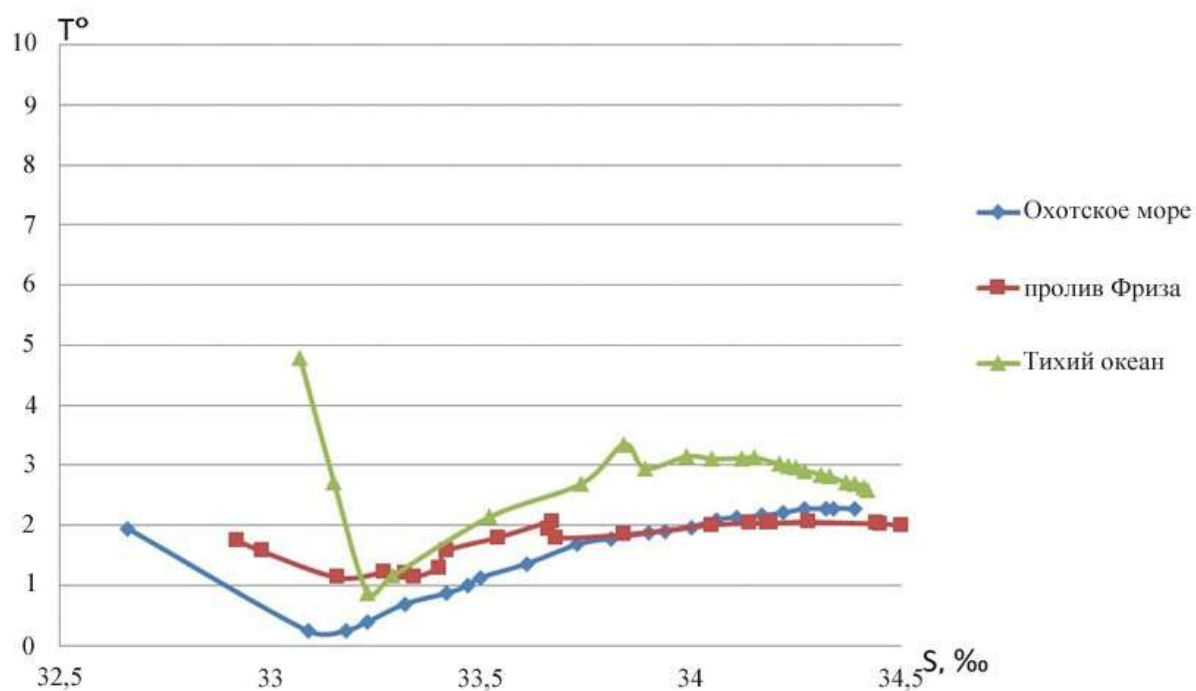


Рисунок 2.3 – T-S кривые в Охотском море, проливе Фриза и Тихом океане (построены от поверхности моря до глубины 1100 м с шагом 50 м)

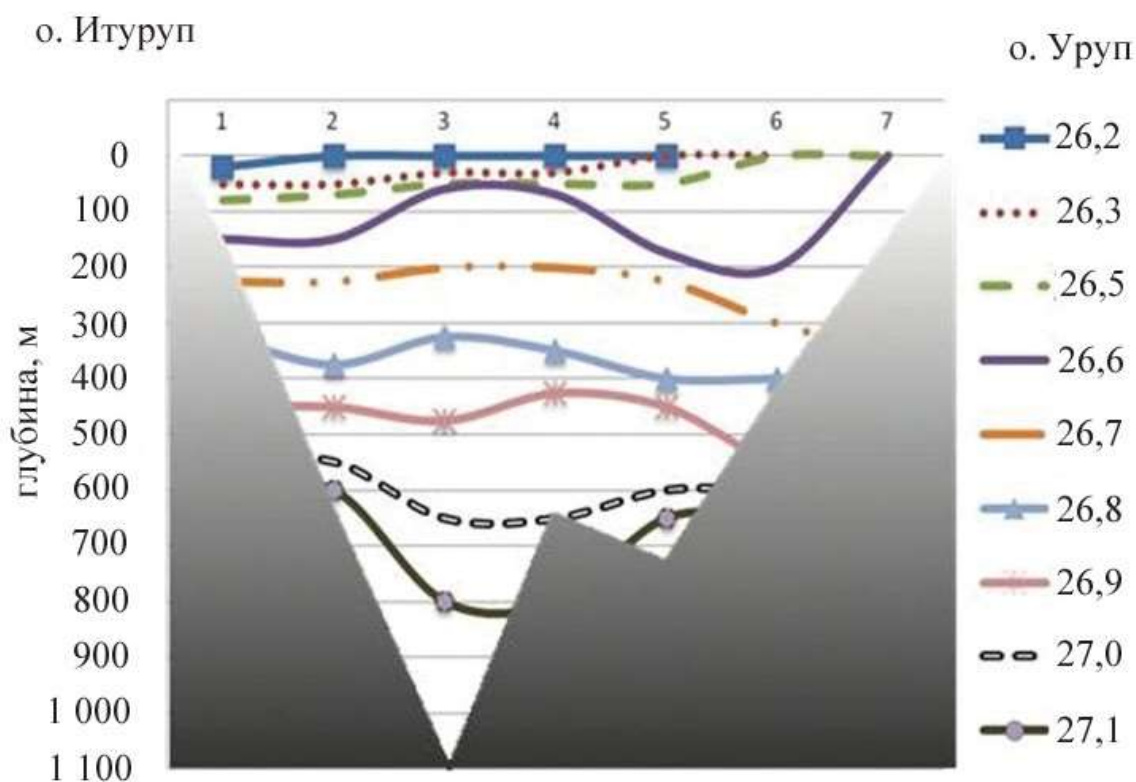


Рисунок 2.4 – Распределение условной плотности по σ_t по ширине пролива Фриза

Поле скорости звука также определяется особенностями структуры вод. Для тихоокеанской структуры вод ось звукового канала совпадает с зоной минимальной температуры холодного промежуточного слоя. В охотоморской

структуре вод форма вертикальной кривой скорости звука так же определяется температурным профилем. Близкие к нулю значения минимальной температуры в холодном промежуточном слое обуславливают формирование резко выраженного подводного звукового канала.

В зоне пролива наблюдаются сглаженные экстремумы кривой вертикального профиля скорости звука, размыв оси звукового канала.

Анализ данных измерений позволил выявить основные особенности трансформации водных масс Охотского моря и Тихого океана в проливе Фриза. Характер вертикальной структуры вод в проливе остается тем же, что в море и в океане, но границы отдельных водных масс несколько смещаются. В мелких частях пролива вода слабо стратифицирована.

Соленость воды в проливах на поверхности выше, чем в море. Зона пролива характеризуется уменьшением температуры воды на поверхности относительно сопредельных вод океана и моря. Холодный и теплый промежуточные слои в проливе меньше отличаются по своим характеристикам, в некоторых случаях границы их выражены нечетко. Отрицательные температуры не были отмечены в проливе.

Изменение и выравнивание вертикальной структуры вод в проливе связано с процессами усиленного перемешивания. При этом необходимо отметить, что значения температуры и солености воды в проливе не являются промежуточными между характеристиками водных масс океана и моря. Примером может служить минимальная температура на поверхности в проливе по сравнению с прилегающими районами моря и океана. Подобная картина возникает в результате интенсивного перемешивания поверхностных вод с нижележащим холодным промежуточным слоем. При этом в самом холодном промежуточном слое температура воды повышается, и мощность его увеличивается. С удалением от пролива роль процессов перемешивания уменьшается, и водные массы приобретают характер вертикальной структуры моря или океана.

2.3 Влияние размера пролива на гидрологический режим в озерах лагунного типа.

Вдоль побережья острова Сахалин располагаются множество уникальных акваторий, играющих ключевые роли как в жизни и деятельности человека, так и в жизни множества разнообразных видов животных.

К одним из таких уникальных акваторий относятся лагуны. Лагуна – это мелководная часть моря (океана), отделённая от него полосой наносной суши – баром, косой или другой береговой аккумулятивной формой, природного или антропогенного происхождения, соединяющаяся с морем одним или несколькими узкими проливами (Большая российская энциклопедия). Несмотря на, казалось бы, малую значимость, с точки зрения географии и экологии, лагуны играют огромную роль в формировании и развитии экосистем Мирового океана (Бровко, и др., 2002; Лымарев, 1978; Бровко, 1990). Они защищают береговую линию, поглощая значительную часть энергии волн, снижая эрозийное воздействие на берег. Поддерживают биологическое разнообразие, служа в своем роде инкубатором для множества видов животных.

Однако гидрологический баланс озёр лагунного типа очень хрупок и выстраивается совокупностью множества факторов. На него влияют климатические, физико-географические, биологические и антропогенные факторы. К наиболее важным факторам относится солевой баланс, который напрямую зависит от природных и антропогенных процессов связанных с водообменом лагун с морем. Здесь нужно учитывать, как объёмы пресной воды поступающих в лагуны вместе с речным стоком и осадками, так и стабильность и объёмы поступающей морской воды, которые зависят от количества и размеров протоков, связывающий их морем.

Узкие протоки, ограничивают водообмен, что приводит к опреснению водоема. В тоже время, узкие протоки смягчают воздействие приливных эффектов, амплитуду колебаний уровня воды, уменьшают скорость течений,

что затрудняет перемешивание различных слоев, что приводит к стратификации воды и дефициту кислорода в придонных слоях. Без перемешивания происходит застаивание воды, приводящие к накоплению токсичных веществ в нижних слоях, например, сероводород.

Широкие же протоки, наоборот, усиливают приливные эффекты, способствуя значительным колебаниям уровня воды в лагуне, это формирует приливно-отливные течения, поддерживая активный водообмен, улучшая перемешивание вод, выравнивая температуры и повышая уровень растворенного кислорода, способствует более быстрому обновлению вод водоема.

Далее автором рассматривается влияние размера проток (с учетом антропогенного воздействия человека) на гидрологический режим озер лагунного типа на примере озера Тунайча (рисунок 2.5), соединяющееся с Охотским морем (Залив Мордвинова) через узкий, мелководный пролив Красноармейский, протяженностью порядка 4 км. Рассмотрены уникальные особенности водоема, представлены результаты многолетних натурных исследований, проводимых СКБ САМИ ДВО РАН с участием диссертанта в период с начала 2000-х годов по настоящее время. Проведен сравнительный анализ данных других исследований.



Рисунок 2.5 - Остров Сахалин, озеро Тунайча.

Памятник природы регионального значения озеро Тунайча (Постановление Губернатора Сахалинской области от 18.08.1995 № 257, 1995) — расположено в юго-восточной части острова Сахалин, в наиболее низменной части Муравьевской низменности. Отделено от Охотского моря (залив Мордвинова) полуостровом Пузина. Длина озера составляет 28 км, а наибольшая ширина 9,4 км, площадь водного зеркала 173,4 км², площадь водосбора 554 км² (Бровко, и др., 1995).

Озеро Тунайча - важная составляющая для Сахалинского региона, являясь излюбленным местом отдыха, как местного населения, так и гостей острова. На берегах обустроены зоны для купания, прогулок, расположены базы отдыха и детские оздоровительные центры. Озеро обладает высокой степенью биологического разнообразия и является излюбленным местом для рыбаков, в нем обитает 39 видов рыб и круглоротых, в том числе 9 видов лососевых, включая редкого сахалинского тайменя, занесенного в Красные книги Российской Федерации и Сахалинской области. Такие виды как горбуша, кета, корюшка, сельдь и навага имеют промысловое значение. По

берегам гнездятся множество видов птиц, таких как, орлан-белохвост, малы лебедь, лебедь-кликун, скопа.

Однако в последние десятилетия наметилась тенденция к ухудшению экологического состояния озера и его водосборного бассейна. Воды озера заметно преснее, в летний период происходит их активное зарастание синезелеными водорослями, изменяется видовой состав рыб и других обитателей водоема, что не могло не сказаться на экологическом равновесии и сохранении биоразнообразия озера.

Тунайча является меромиктическим водоемом с двухслойной стратификацией, между которыми отсутствует водообмен. Нижний слой более плотный, располагается ниже 12-15 м, его соленость составляет от 12 до 22 ‰. Верхний слой менее плотный и его соленость 2,5-30 ‰.

Основным обитателем нижнего слоя выступает сообщество анаэробных бактерий т.к., в этом слое отсутствует кислород необходимый для жизнедеятельности животных и растений. Другой не маловажной особенностью нижнего слоя служит скопление больших объемов токсичных веществ, таких как сероводород (H_2S), который токсичен для всех кислородных форм жизни. По данным исследований 2002 года, концентрация сероводорода достигла 300-320 микрограммов/литр (СахНИРО, 2016). Вероятнее всего такая ситуация сложилась из-за отсутствия вентиляции придонных слоев озера холодными водами Охотского моря, ввиду нарушения водообмена озера с морем через пролив Красноармейский.

Наиболее ранние упоминания об инструментальной съемке пролива Красноармейский датируются 1876 г., когда штурманский офицер корвета «Баян» подпоручик К.Д. Фелицын² проводил гидрографические исследования

² ФЕЛИЦЫН Клавдий Дмитриевич (09(21).04.1848, г. Ревель – 29.07.(10.08) 1886, г. Ревель), мореплаватель, ученый. Родился в семье полкового священника. По окончании Штурманского училища

больших озер Тонино-Анивского полуострова, тогда же был составлен план «Тунайчинской протоки», позже, группой гидрографов в 1951 г. был переименован в пролив Красноармейский (Полевой, 1959) (рисунок 2.6). На этом плане изображена протока в естественном природном состоянии, до появления технических сооружений. Позже в период Карафута³ (1905-1945 гг.), на берегу протоки было основано поселение Тонай (ныне село Охотское), и началось активное освоение озера Тунайча, протоки Красноармейской и прилегающих прибрежных территорий Охотского моря (залив Мордвинова), приведшего к строительству первого деревянного моста через протоку (рисунок 2.7). По не подтверждённым данным, японцами проводились дноуглубительные работы в протоке, через которую в последствии заходили небольшие рыболовецкие суда. Вместе с тем из исторических справок, при ликвидации одного из партизанских отрядов, под командованием штабс-капитана Гротто-Слепиковского, в озеро Тунайча зашли два паровых катера с орудиями на борту. Таким образом можно сделать вывод, что в тот период, размеры протоки были наиболее максимальными за отрезок времени от первых инструментальных измерений до настоящего времени, а значит и водообмен озера с морем.

(1868) произведен в кондукторы корпуса флотских штурманов (КФШ). В 1874-79 штурманским офицером корвета «Баян» совершил кругосветное плавание. Высадился на Сахалине в сопровождении 6 солдат 4-го Восточно-Сибирского линейного батальона, с 02(14) июля по 10 (22) октября 1876 провел мензурную съемку берегов и осмотр угольных месторождений на Тонино-Анивском полуострове; впервые произвел опись Большого и Малого Чибисанских и Вавайских озер, выполнил промер протоки, соединяющей оз. Тунайча с Охотским морем.

³ Период Карафута — с 1905 по 1945 год, в течение которого южная часть острова Сахалин входила в состав Японской империи.

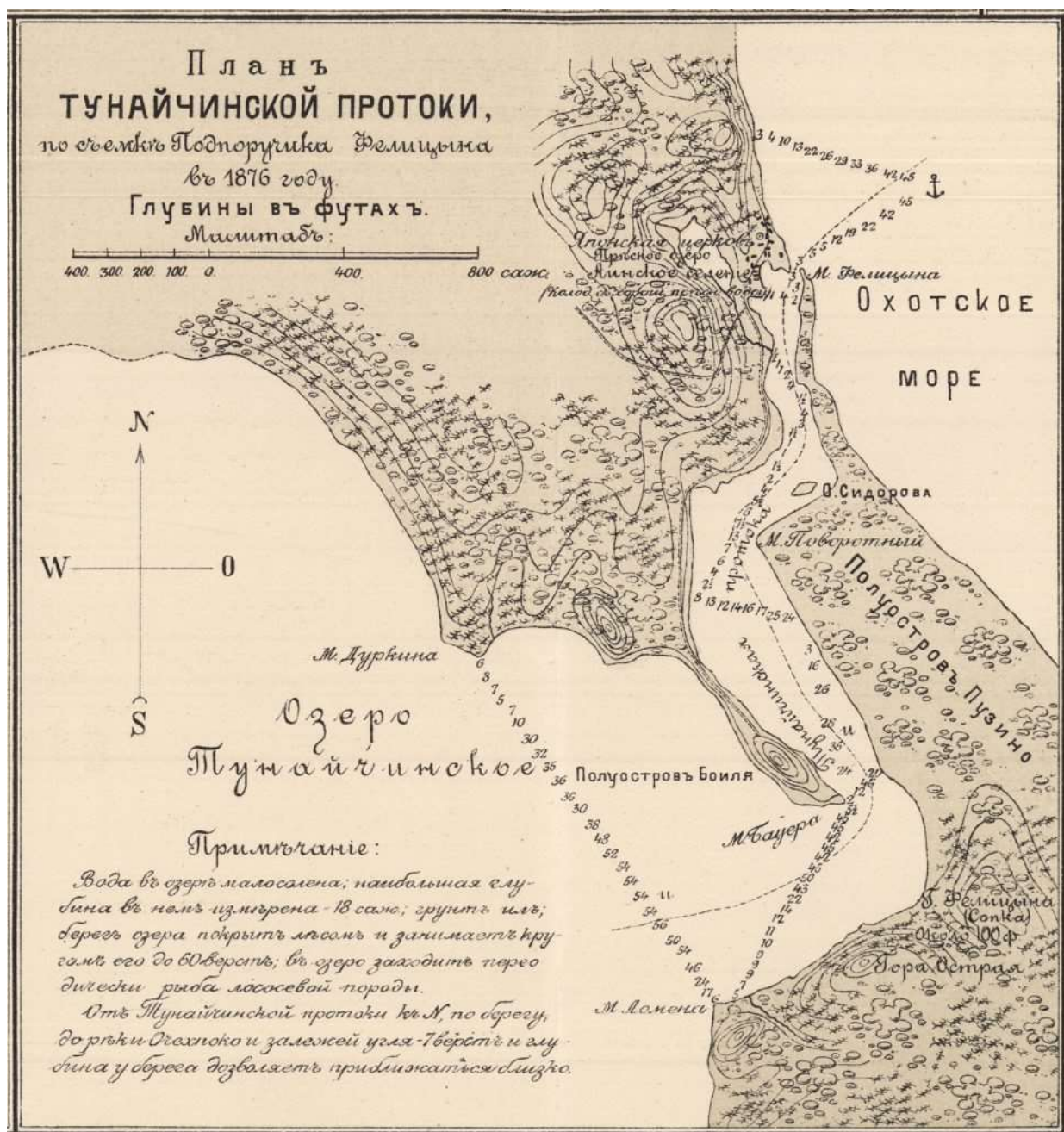


Рисунок 2.6 - План Тунайчинской протоки от 1876 г.
(Российский государственный архив Военно-Морского Флота., 1889)

Первые, достаточно краткие сведения о гидрологии озера содержатся в отчете Сахалингосрыбвода (Сахалингосрыбвод, 1956; СахНИРО, 2016), согласно которому в озере отмечена двухслойная стратификация с соленостью верхнего слоя 6,6‰ и 4,5‰ в приустьевых участках рек. Также было отмечено низкое содержание кислорода и высокая концентрация сероводорода (H₂S) в нижним слое озера.

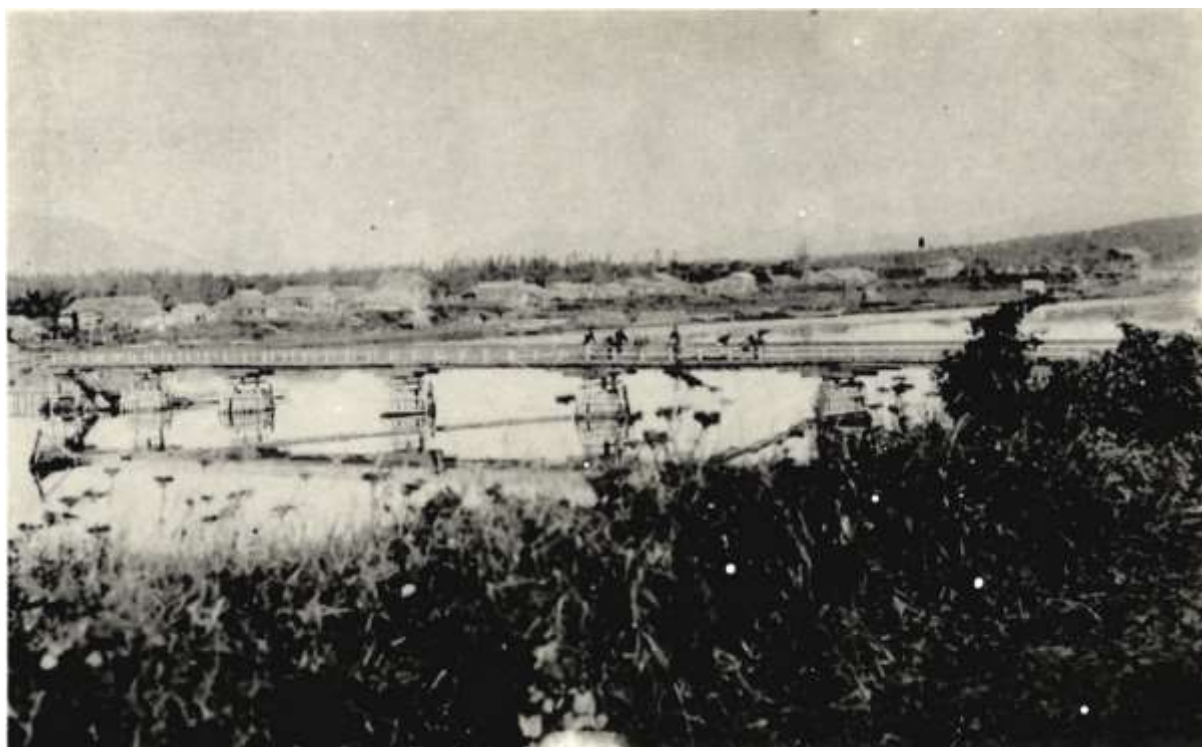


Рисунок 2.7 – Деревянный мост через пролив Красноармейский (японский пос. Тонай (ныне село Охотское). фото 30х годов XX века).

По результатам последующих экспедиций проведённых гидрографической партией СахУГМС⁴ в 1960-1961годах, а также в 1968-1969 гг. представлено наиболее исчерпывающее гидрологическое описание озера Тунайча, где был описан водный баланс, физические и химические свойства воды, термические и ледовые явления, описана геоморфология озера. Согласно данным этих экспедиций солёность озера находилась в пределах 5,6-5,8‰ (летний период) и 6,1-6,25‰ (в зимний период) (Григорьев, 1961; 1969; СахНИРО, 2016).

Ключевым же историческим моментом приведшим к сильному изменению гидрологического режима озера Тунайча, стало строительство нового моста через пролив Красноармейский в 1974 году. При этом видимо в экономических целях длину моста было решено уменьшить с примерно 200

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сахалинское территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (ФГБУ «Сахалинское УГМС»).

метров (старый деревянный мост), до 60 м (железобетонный мост 1974 г.), а оставшиеся расстояние отсыпали грунтом и укрепили, соорудив дамбу (рисунок 2.8). Таким образом сократив поперечное сечение русла пролива на две трети, снизилась и динамика водообмена с морем, запустив процесс постепенного оседания взвешенных осадков, заиливания, обмеления русла протоки и замыванию устьевых участка. Это постепенно привело к полному прекращению вентиляции придонных слоев озера холодными водами Охотского моря (Бровко, и др., 1995).

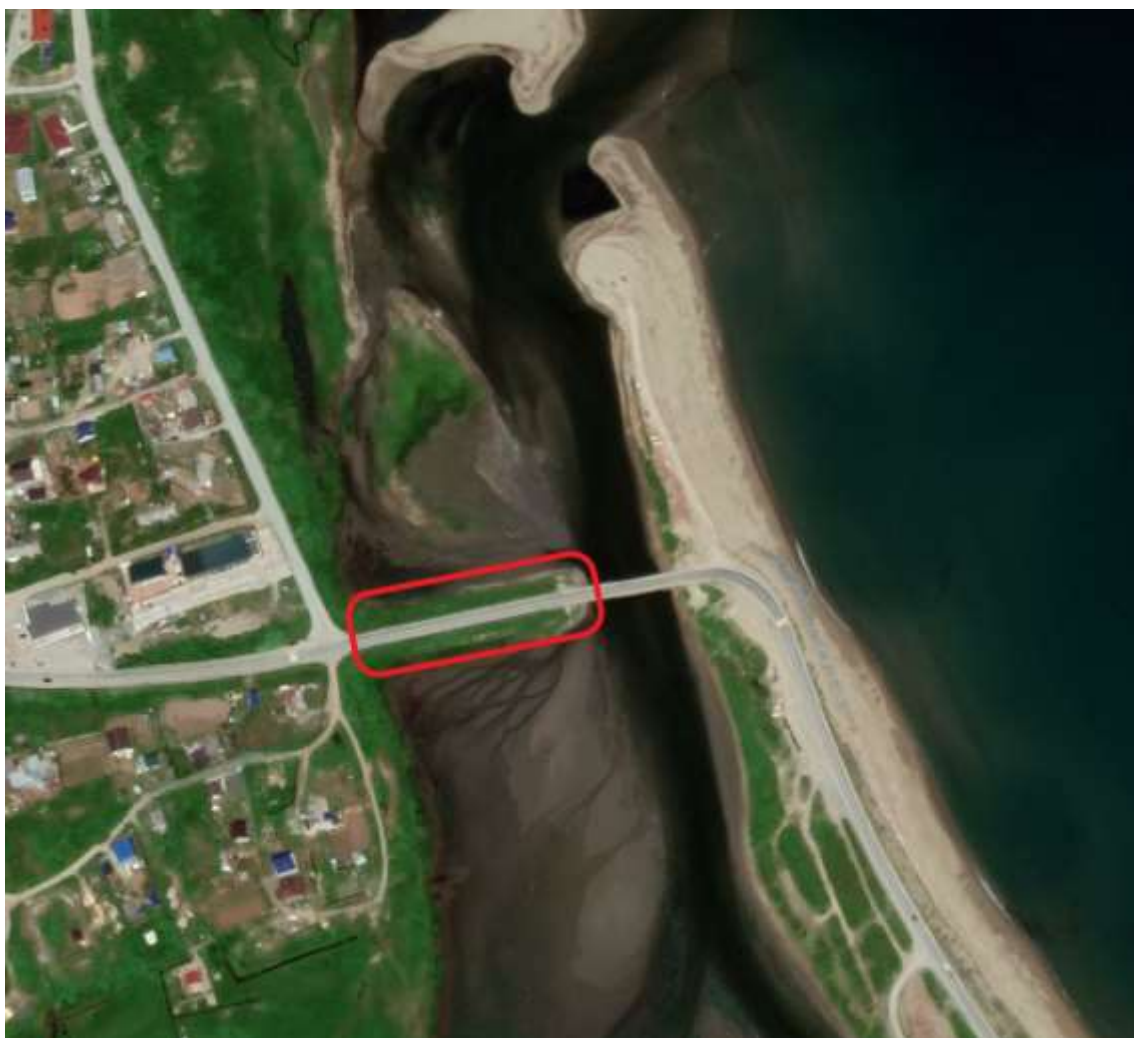


Рисунок 2.8 – Отсыпная дамба (отмечена красным) и мост через протоку Красноармейская (по состоянию на 2022 г.). Мост находится в том же месте.

Уже в июле 1977 года по заданию обкома КПСС и облисполкома под руководством С.Х. Сабитова было проведено обследование оз. Тунайча с целью определения степени его зарастания и разработки мелиоративных

мероприятий, но никаких значимых действий предпринято не было (СахТИНРО, 1977).

В 1989 году ДВГУ выполнило научно-исследовательскую работу - «Геоморфолого-экологические исследования оз. Тунайча», согласно их отчету, соленость озера уже составляла 5,6‰ (ДВГУ, 1989). Согласно данным СахТИНРО к 1990 г. показатель солености снизился до 4‰ (ДВГУ, 1990; СахНИРО, 2016). К началу 2000-х годов соленость в озере упала до 2,4 – 2,6‰. Одновременно с этим проблематика экологического равновесия озера Тунайча получила новый виток. С этого момента по настоящее время множество организации (СКБ САМИ⁵, СахНИРО⁶, Сахалинрыбвод⁷, и др.) проводили периодические исследования озера по разным научным направлениям. Например, СахНИРО занималось изучением водной биоты озера и условий ее обитания. СКБ САМИ занималось численным моделированием волнового воздействия на прибрежную зону залива Мордвинова и устьевое участка пролива Красноармейский, изучало водообмен озера с морем (Шустин, и др., 2005), занималось разработкой и апробацией морских приборов, выработкой методик измерения гидрофизических параметров водной среды при сложных климатических условиях в летний и зимний периоды. (Глава 1, стр.13). Далее представлены результаты серии измерений, проведенных осенью 2013 году и в марте 2014 года, когда озеро покрыто льдом. Измерения проводились в котловине малой Тунайчи в 1,5 км от мыса Бауэра на траверзе мыса Ломена, от поверхности до дна в заданных горизонтах, с помощью погружной

⁵ Федеральное государственное учреждение науки Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН).

⁶ Сахалинский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (СахНИРО).

⁷ Сахалинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Главрыбвод».

автоматизированной мобильной измерительной платформы (Глава 1.2, стр.14).

На рисунках 2.9, 2.10, 2.11 представлены результаты измерений, проводится сравнительный анализ осенних измерений, которые проводились 10 сентября 2013 года и весной 2014 года озеро покрыто льдом. В осеннее время наблюдаются небольшие изменения профиля температур с каждым проходом станции, что вероятнее всего связано небольшими течениями вызванные приливными циклам через пролив (рисунок 2.9). В весенний же период, профиль направлен в обратном направлении, это связано с более теплыми нижними слоями. Изменения по профилю от промера к промеру не значительны. Данная картина может быть связана с отсутствием приливных движений через перекрытое льдом устье пролива, а также отсутствием перемешивания верхних слоев при ветровом воздействии.

На рисунке 2.10 представлен график изменения электропроводимости, которая зависит от солености воды. На графиках наблюдается схожая картина, что и с графиками температур. Величины электропроводимости соответствуют соленостям от 2,5 до 3,5 ‰.

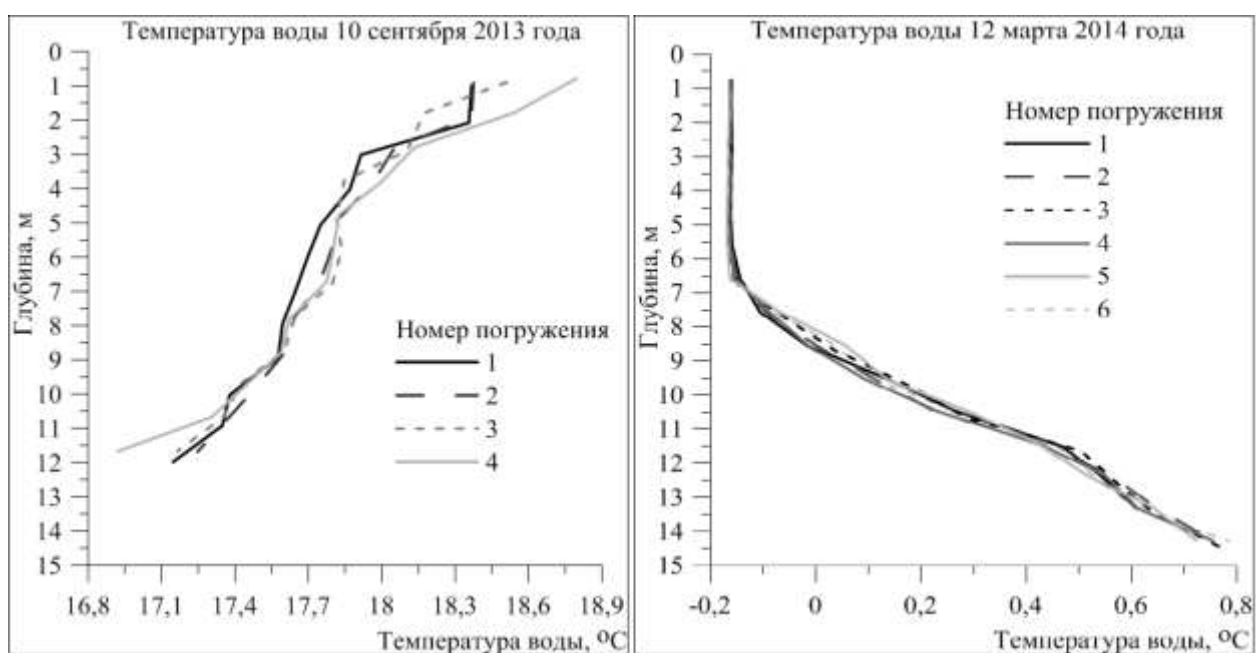


Рисунок 2.9 - Распределение температуры по профилю глубины (слева осенние измерения, справа весенние)

На рисунке Рисунок 2.11 представлен график распределения растворенного кислорода по профилю глубины. Здесь так же наблюдается устойчивый характер и графики практически не меняются со временем. Можно лишь отметить, что ближе к поверхности содержание кислорода на 20 % больше, чем на глубине 15 м.

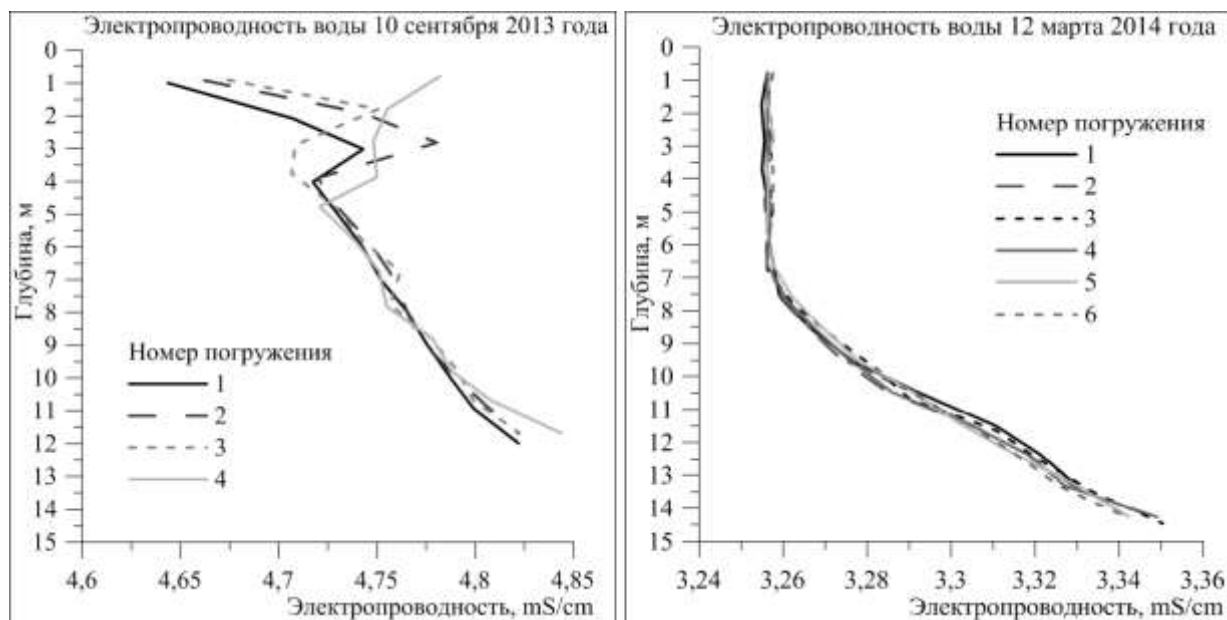


Рисунок 2.10 - Распределение электропроводимости по профилю глубины (слева осенние измерения, справа весенние)

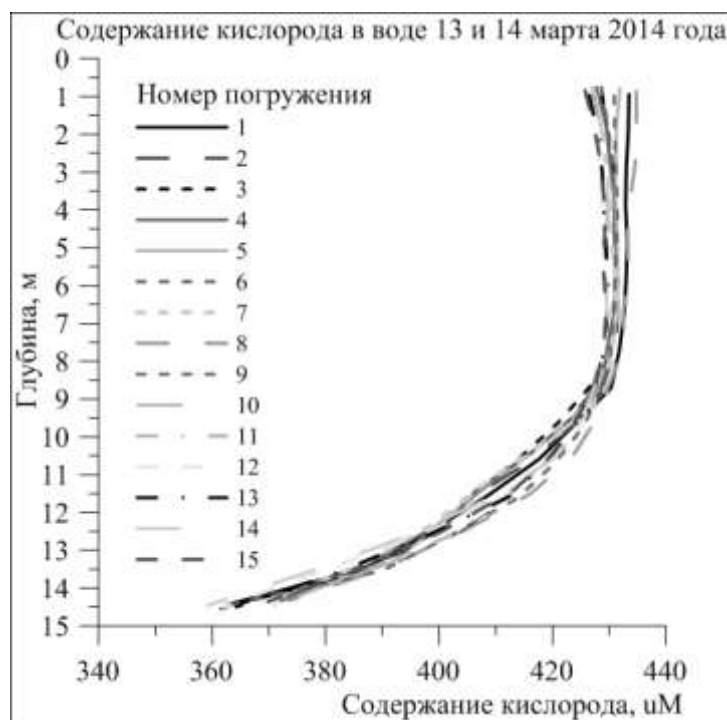


Рисунок 2.11 - Распределение содержания растворенного кислорода по профилю глубины (март 2014)

Так же аналогичные измерения проводились в весенне-осенний периоды 2015, 2016 годов, полученные результаты схоже с измерениями 2013, 2014 годов. Результаты измерений подтвердили многолетние наблюдения. В зимнее время, когда устье пролива Красноармейский забито льдом, приходящим в залив Мордвинова с севера Охотского моря, а само русло покрыто льдом, практически полностью прекращается водообмен озера Тунайча с морем. Так как превышение уровня озера на уровне моря в среднем составляет 0,24 м и проникновение холодных вод Охотского моря происходит в основном при сильных ветровых нагонах, когда наблюдается обратное явление при котором уровень моря превышает уровень озера Тунайча (до 0,2 м при средних приливах и до 0,5 м при высоком приливе и в результате сильных ветровых нагонах) (Бровко, и др., 2018).

В 2022 году во время проведения научно-исследовательской работы по комплексному обследованию озера Тунайча (СКБ САМИ ДВО РАН, 2022) сотрудниками СКБ САМИ было обнаружено, что соленость верхнего слоя озера повысилась до 5-6‰. Причиной такой ситуации вероятно послужило расширение пролива в устьевой части.

2.4 Изменение гидрологических характеристик озера лагунного типа в следствии антропогенного воздействия на устье пролива.

Как отмечалось ранее, с начала первых гидрологических исследований озера Тунайча Сахалингосрыбводом (Сахалингосрыбвод, 1956) в 50-х годах XX века и до строительства железобетонного моста через пролив Красноармейский с перекрытием большей части русла дамбой в 1974 году, соленость миксолимниона составляла порядка 6,6‰, что подтверждалось и другими обследованиями озера (Григорьев, 1961; 1969). В последующий период соленость озера постепенно снижалась и к 2000-му году достигло значение в 2,5‰. Исходя из хронологии изменения солености, вода в озере прошла α -хорогалинную зону в 5-8‰ (Хлебович, 1989) и на данный момент

являются олигогалинными, что привело к замещению морских видов пресноводными.

По наблюдениям СКБ САМИ соленость в озере Тунайча в период с 2002 по 2022 гг. была довольно стабильна и менялась в пределах от 2,5‰ до 3,5‰ в зависимости от сезонных изменений ширины устья пролива. Однако измерения 2022 года показали увеличение солености в два раза.

Ранее уже отмечалось, что водообмен в озере зависит от размеров пролива Красноармейский связывающий его с Охотским морем (залив Мордвинова). Которая сильно видоизменяется в следствии сильных штормовых явлений и активной деятельности человека. Как выяснилось позже на устьевом участке пролива, весной 2022 года начали работы по добыче песка. Динамику изменений отчетливо видны на спутниковых снимках Google Earth (рисунок 2.13).



Рисунок 2.12 - Карта озера Тунайча (о. Сахалин). В правой части отмечены места проведения измерений 2013 и 2022 гг. соответственно.)



Рисунок 2.13 - Спутниковые снимки Google Earth устьевой зоны пролива Красноармейский озера Тунайча. (июль 2013 г. слева, июль 2022 года справа)

Были проведены гидрографические работы в приустьевых участках пролива. По результатам измерений ширина устья в 2022 году составила порядка 40 метров, в то время как в июле 2013 года ширина устья составляла всего 30 м. Также увеличилась глубина этого участка, 2м в 2013году и 3 м в 2022 году, в среднем на 1 м.

В дополнение к натурным измерениям гидрологических параметров 2013 года, сотрудниками СКБ САМИ были проведены натурные измерения, теми же техническими средствами, что и в июле 2013 года, в том же районе озера, возле мыса Бауэра (рисунок 2.12). Далее представлены графики распределения температуры и проводимости по профилю глубины полученных автоматизированной измерительной платформой ПАГИС.

На рисунке 2.14 представлен график изменения электропроводимости, которая зависит от солености воды. При анализе измерений 2013 года наблюдаются величины электропроводимости, которые соответствуют солености от 2,5‰ до 3‰. Поверхностный слой до 4х метров, менее соленый, что связано с периодом отлива в момент проведения измерений. В это время сток более пресной воды, которая легче, движется из озера в море. При анализе измерений 2022 года наблюдаются величины электропроводимости

соответствующие соленостям от 5,6‰ до 5,75‰. Показания солености от поверхности до глубины семи метров довольно однородны. Начиная от глубины семь метров в отдельных измерительных проходах станции наблюдается увеличение солености.

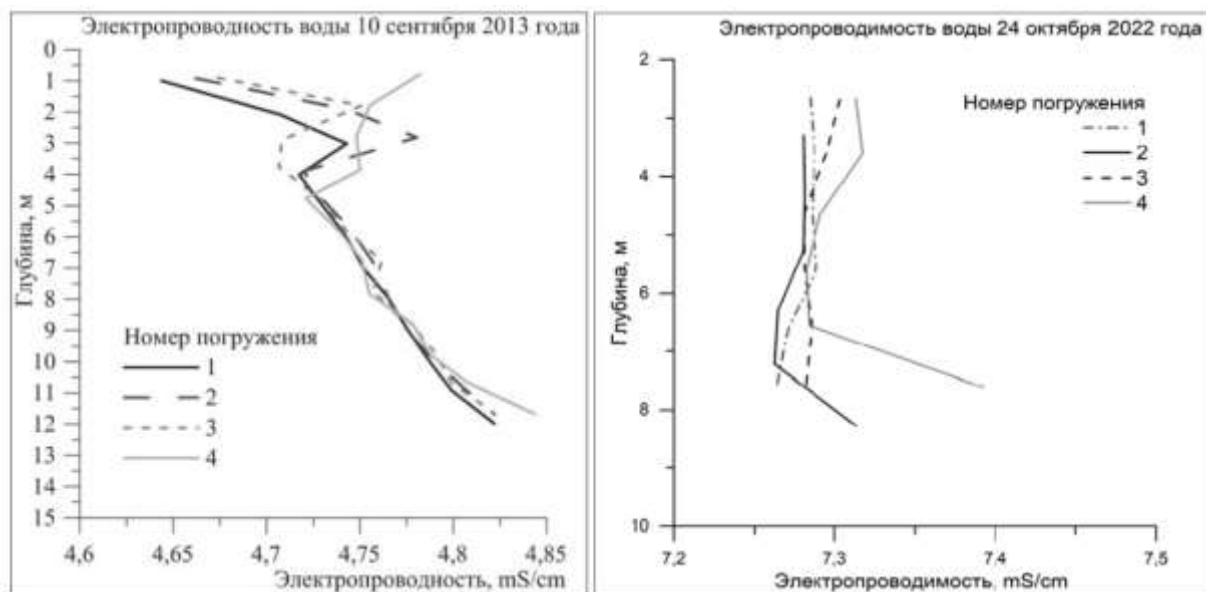


Рисунок 2.14 - Изменение электропроводимости по профилю измерения (слева осенние 2013 года, справа осенние 2022 года)

На рисунке 2.15 представлен график распределения температуры по профилю измерения.

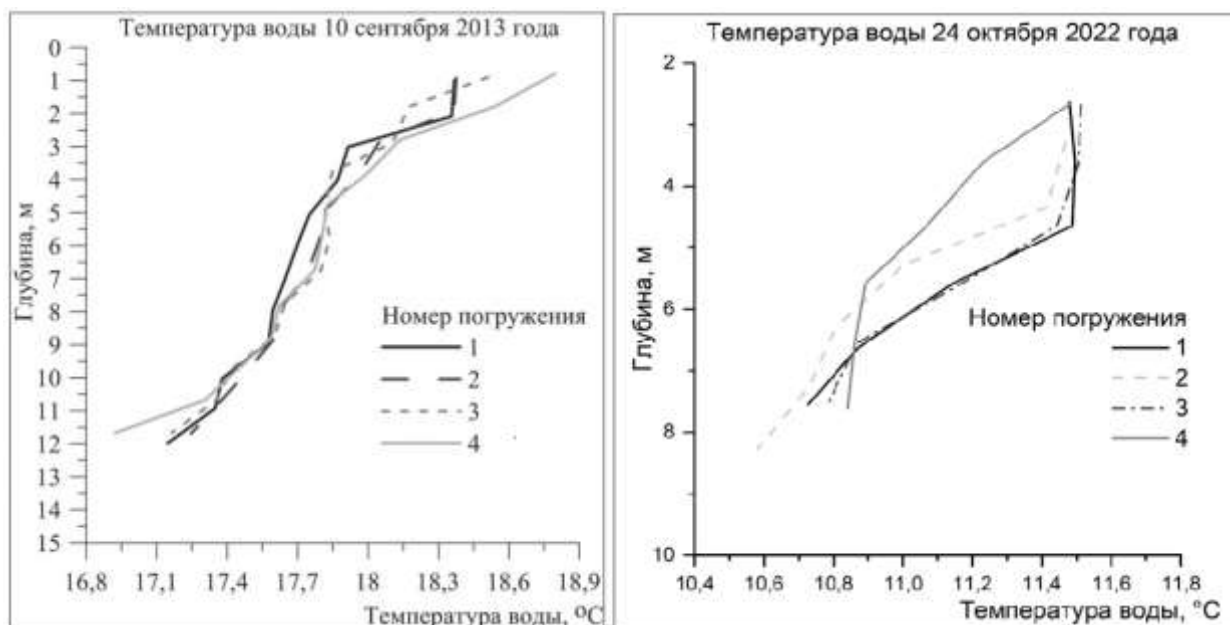


Рисунок 2.15 - Изменение температуры по профилю измерения (слева осенние 2013 года, справа осенние 2022 года)

Структура результатов измерений 2013 и 2014 года в целом схожа. Верхние слои более прогреты, чем нижние, в среднем на 1 градус в диапазоне глубин измерения. Измерения 2013 года находятся в диапазоне от 17 до 19 градусов по шкале Цельсия, в измерения 2022 года в диапазоне от 10,5 до 12 градусов. Это связано с тем, что измерения в 2022 году проводились в более позднее время. На обоих графиках наблюдаются небольшие колебания профиля температуры при каждом проходе станции, что связано с перемешиванием (течениями, отливно-приливным циклом, стоком рек и т.д.).

Анализ результатов измерений гидрологических параметров в толще воды в 2013 и 2022 годах показал увеличение солености в месте исследований (озеро Тунайча, п-ов Бойля, мыс Бауэра) в два раза, от 2,5‰ в 2013 году до 5,6‰ в 2022 году. Такие изменения связаны со значительным изменением устья пролива Красноармейский с 30 м шириной и глубиной 2 м в 2013 году и шириной 40 м и глубиной 3 м в 2022 году соответственно, что подтверждается спутниковыми снимками Google Earth (рисунок 2.13). Также отметим, что площадь поперечного сечения устья пролива Красноармейский, соединяющий озеро Тунайча с Охотским морем (залив Мордвинова), в 2022 году увеличилась в два раза по сравнению с 2013 годом.

2.5 Исследование распределения солености в озере лагунного типа

В 2022 году в рамках НИР «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем» сотрудниками СКБ САМИ было выявлено повышение солености в озере в два раза, за длительный промежуток времени (1977 – 2022 гг.) такое большое повышение зафиксировано впервые. Одной из составных частей научно-исследовательской работы была оценка распределения солености по всей акватории озера Тунайча. Однако ввиду уникальных значений солености, полученных при гидрологических измерениях, было принято решение о проведении более тщательных исследований распределения солености по

акватории озера. Ввиду ограниченности времени на проведение данной работы, большой площади исследований (142 км²), а также для ускорения процесса измерений, диссертантом в кратчайшие сроки был разработан и собран погружной зонд для измерения электропроводимости воды и температуры на базе датчика «AANDERAA Conductivity Sensor 4319». (Глава 1.4, стр. 25). Применение индуктивного датчика проводимости позволяет получить более стабильные измерения без использования электродов, которые могут загрязняться и изнашиваться в агрессивных условиях морской воды.

Во время измерений, зонд, подключенный к ноутбуку, посредством кабеля с нанесенной разметкой через 1 м, погружался в воду, при стабилизации значений с датчика температуры (инертность датчика порядка 3-5 секунд), зонд погружался до следующей отметки на кабеле и так до дна. Процесс измерений отображен на рисунке 2.16 Питание на зонд подавалось через кабель от отдельного аккумулятора 12В. Данные с зонда регистрировались в файл с дискретностью 1 секунда. Измерения проводились моторной лодки.



Рисунок 2.16 - Процесс измерения проводимости погружным зондом

Точки измерения выбирались так чтобы максимально охватить площадь озера с учетом распределения глубин. Карта распределения точек измерения представлена на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 - Озеро Тунайча. Точки измерения профилей электропроводимости.

Результаты измерений подтвердили четкую стратификация озера Тунайча наблюдаемую множеством экспедиций проводимыми различными организациями начиная с 50-х годов XX века (Сахалингосрыбвод, 1956; Григорьев, 1961; 1969; СахТИНРО, 1977; Зайцев, и др., 2013; СКБ САМИ ДВО РАН, 2022).

Однако начиная момента строительства моста через пролив Красноармейский в начале 1970-х годов, соленость озера постепенно снижалась на протяжении 30 лет и к началу 2000-х годов стабилизировалась на уровне примерно 2,5‰ вплоть до 2022 года, пока площадь сечения пролива Красноармейский не была увеличена в два раза.

Анализ данных показал, что граница раздела слоев озера поднялась до 15м, когда как раньше находилась в промежутке 12-15 м. Соленость верхнего слоя озера наблюдалась в пределах 6‰ по всей акватории озера Тунайча. С увеличение глубины зафиксировано значительное увеличение солености с наибольшим значение в 21‰, которое было зафиксировано в наиболее глубокой точке озера, на глубине более 40 м. В промежутке от 40 м до дна

наблюдается снижение солености до 17‰ (рисунок 2.18), предположительно это может быть вызвано изменением химизма в придонном слое повлиявшем на результаты измерения датчика.

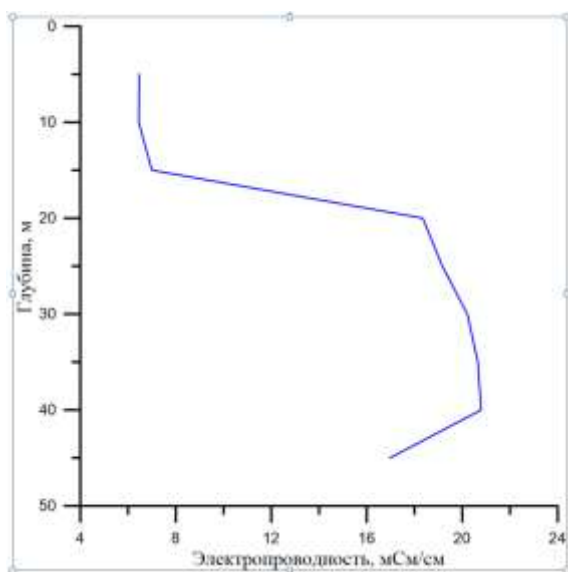


Рисунок 2.18 - Профиль электропроводности в наиболее глубокой точке озера

Результаты полученных измерений профилей солености и температуры вошли в состав отчета НИР «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем». Данные отчета будут использованы для выводов комиссии по экологической проблеме озера Тунайча.

2.6 Натурные измерения водообмена озера лагунного типа с морем.

Помимо вышеописанных работ, в рамках исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем (залив Мордвинова) через пролив Красноармейский, также проведены работы по натурным измерениям расходов воды в приустьевых участках рек. Произведена оценка объема пресной воды, поступающей в озеро вместе с реками.

Исследования по определению расхода воды впадающих в озеро проводились в период с 5 по 12 мая 2022 года. Этот период весеннего половодья характеризуется как основная фаза водного режима озера, при

котором достигаются уровневые максимумы. Доля весеннего стока составляет до 60% от годовых значений, что обусловлено климатическими особенностями Сахалина. Минимальные уровни отмечаются в конце августа – начале сентября. Повторный минимум так же может наблюдаться в конце октября – начале ноября (Григорьев, 1961; 1969). Этот период был выбран для исследования водообмена через пролив Красноармейский. Также это время года характеризуется началом сильных штормовых и ветровых нагонов, когда возрастает вероятность проникновения больших объемов морской воды в озеро Тунайча.

Ввиду большой области проведения измерений (площадь водного зеркала 174 км²) перед началом полевых работ, водотоки были разбиты на группы по условиям формирования стока, а также по схожим морфологическим и морфометрическим характеристикам их бассейнов. Общая площадь водосбора 554 км² (Бровко, и др., 1995). Для измерения расходов воды были выбраны типичные для каждой группы водотоки, такие как устья впадающих озер (Червячное, Добрецкое, Свободное, Крестоножка) и наиболее крупных рек, таких как Подорожка, Комисаровка, Казачька и Ударница. Таким образом было проведено рекогносцировочное обследование 18 водотоков на рисунке 2.19 изображена схема географического расположения исследуемых водотоков. На каждом из них было разбито по одному гидрологическому створу. При организации которого выбирался прямолинейный участок русла в незначительной удаленности от устья (рисунок 2.20). Измерения проводились методом «скорость-площадь» (МИ 1759-87, 1986).



Рисунок 2.19 - Схема географического расположения исследованных водотоков.
(Измерения проводились в мае 2022 года)



Рисунок 2.20 - Организация гидрологического створа на реке Каменка

Для измерения скорости течений водотоков рек и проливов, впадающих в озеро Тунайча, а также скорости и направления течений в проливе Красноармейский, при водообмене озер с морем. Применялся измерительный прибор, разработанный автором - «Автономный регистратор течений водного

потока» (Заголовок 1.3, стр.21). Прибор был построен на базе доплеровского датчика течений AANDERAA ZPulse® Doppler Current Sensor 4420.

Прибор использовался в двух модификациях. Первая применялась для обследования рек, проток и небольших водотоков, впадающих в озеро, где сам измерительный датчик выводился из корпуса регистратора и соединялся с ним посредством длинного кабеля через герметичный разъем. На рисунке 2.21, 2.22 изображена подготовка к измерениям расходов воды на реке Дальняя и протоке между озером Свободное и озеро Тунайча. Измерительный датчик закреплен на маленькой треноге с вертикальной штангой. Это позволяло проводить измерения точечным способом с выбором необходимого количества скоростных вертикалей на заданной глубине, в зависимости от размера водотока, после чего результат пересчитывался и усреднялся.



Рисунок 2.21 - Подготовка к измерению расходов воды на реке Дальняя



Рисунок 2.22 - Протока, соединяющая озеро Свободное и озеро Тунайча

На более крупных и глубоких водотоках, измерения проводились с лодки (рисунок 2.23), на которой к транцу специальными креплениями крепилась штанга с датчиком на необходимом уровне.



Рисунок 2.23 - Гидрологические работы на реке Комиссаровка

Результаты измерений расхода воды и скорости течения водотоков (таблица) в приустьевой части впадающих в озеро Тунайча в период половодья были использованы для расчетов среднегодового объема стока всех рек, впадающих в озеро Тунайча.

Таблица 2.2 – Измеренные расходы воды и скорости течения водотоков в приустьевых частях рек и водотоков, впадающих в озеро Тунайча (05.05.2022-12.05.2022). Период весеннего половодья.

№ водотока на схеме	Название водотока, озера	Характеристика						
		Средняя глубина потока, м	Макс. глубина потока, м	Ширина потока, м	Площадь поперечного сечения потока, ω , м^2	Средняя скорость течения, $V_{\text{ср}}$, м/с	Макс. скорость течения, V_{max} , м/с	Расход воды, Q , $\text{м}^3/\text{с}$
01	оз. Крестоножка	0,15	0,25	2,0	0,32	0,5	0,52	0,16
02	оз. Червячное	0,14	0,25	2,5	0,40	0,09	0,11	0,04
07	Ручей без названия	0,55	0,73	2,9	1,73	0,096	0,18	0,17
09	Ручей без названия	0,18	0,21	1,55	0,25	0,16	0,19	0,04
12	р. Ударница	1,36	1,85	15,0	21,48	0,07	0,19	1,57
13	р. Восточная	0,23	0,37	4,9	1,195	0,07	0,18	0,08
14	р. Нака	0,53	0,8	12,0	6,95	0,10	0,21	0,64
15	оз. Свободное	0,57	0,8	6,2	3,87	0,53	0,63	2,05
20	р. Дальняя	0,22	0,25	1,0	0,23	0,3	0,32	0,07
24	р. Краба	0,56	0,65	4,0	2,295	0,15	0,21	0,34
25	р. Ерзовка	0,41	0,63	2,5	1,10	0,21	0,37	0,23
26	оз. Добрецкое	0,21	0,25	2,25	0,47	0,08	0,10	0,04
27	р. Казачка	1,12	1,75	12,1	13,75	0,07	0,15	0,94
29	р. Рысь	0,78	0,9	1,8	1,41	0,06	0,18	0,08
32	р. Каменка	0,5	0,72	6,0	3,23	0,11	0,16	0,34
33	р. Соболевка	0,27	0,3	3,0	0,8	0,19	0,41	0,12
38	р. Комиссаровка	1,56	2,1	26,9	41,74	0,16	0,34	7,03
43	р. Подорожка	1,53	1,95	14,4	22,45	0,13	0,18	2,92

Вторая модификация измерительного прибора применялась для автономной регистрации направления и скорости течения в проливе, соединяющем озеро с морем, в период сложных климатических условий. Модификация отличалась тем, что измерительный датчик крепился непосредственно на крышке массивного прочного корпуса. В самом же

корпусе находилась электронная плата регистрации и накопления измеренных данных с аккумуляторной батареей. Сам прибор крепился на устойчивой раме и заранее устанавливался в точку измерений на определенном расстоянии от дна. Целью было измерить динамические процессы, протекающие в самом узком месте пролива, возле моста, во время сильного штормового нагона, когда работы на воде запрещены из-за высоких рисков для жизни.

В процессе изучения водообмена озера Тунайча и залива Мордвинова в проливе Красноармейский (Москвитин, и др., 2022), было выявлено аномальное явление. При обычных климатических условиях приливные волны Охотского моря обеспечивают слабую вентиляцию придонных слоев озера, встречая на своем пути барьер из искусственной насыпной дамбы и малой площади поперечного сечения пролива под мостом, а также протяженного заиленного, мелководного участка русла с малым пропускным сечением находящегося выше моста (рисунок 2.24).



Рисунок 2.24 - Красной точкой отмечено место установки автономного регистратора течений. Слева отчетливо видны участки отмели выше и ниже моста.

В тоже время продолжительные штормовые и ветровые нагонные волны (Москвитин, и др., 2020), значительно повышают уровень воды в проливе

Красноармейский, преодолевая встречное течение из озера, заполняя мелководный участок пролива. Вследствие чего в озеро Тунайча поступают значительные объемы морской воды. Вместе с тем, по завершении мощных нагонных явлений, наступает обратный эффект, когда значительно объем водных масс начинает вытекать из озера в залив Мордвинова (Охотское море) с большой скоростью.

Так во время проведения полевых работ в ноябре 2022 года, после сильнейших нагонных волн, которые длились почти сутки. Сотрудниками СКБ САМИ ДВО РАН с помощью автономного регистратора течений в районе моста, где был организован гидрологический створ, были зафиксированы вытекающие течения из озера Тунайча в Охотское море, скорость которых достигала 90 см/сек. Течение было настолько сильным, что даже приливные течения, из залива Мордвинова, лишь немного замедляли его скорость до 60 см/сек (рисунок 2.25).

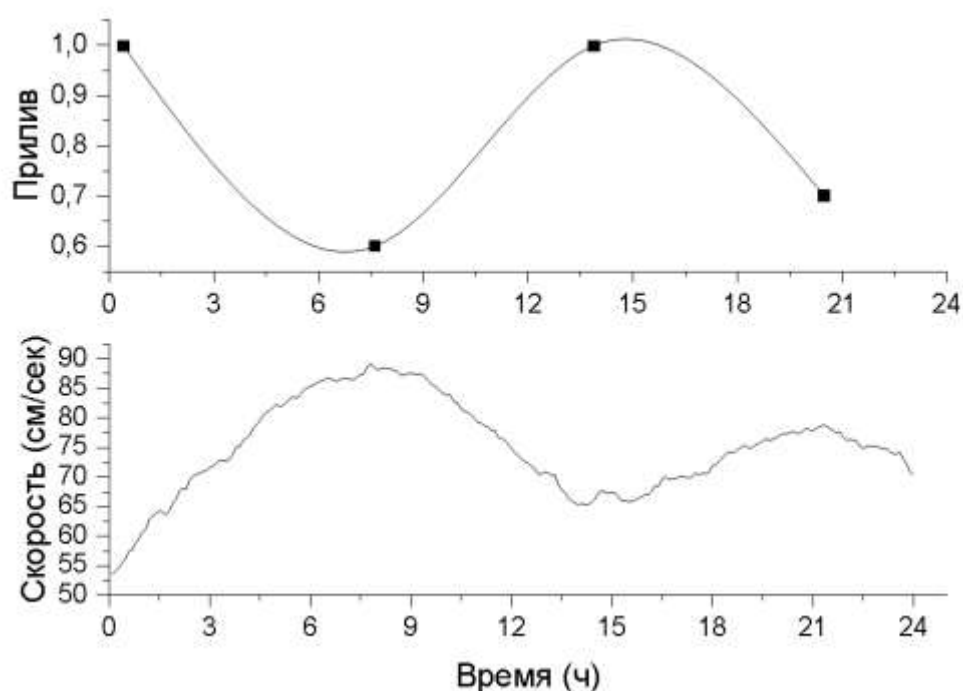


Рисунок 2.25 - Скорость вытекающего течения из озера Тунайча, после штормового нагона в ноябре 2022 года

Проведен большой объем полевых измерений расхода воды и скорости течений водотоков в приустьевой части, впадающих в озеро Тунайча в период

основных фаз водного режима. Проведены работы по исследованию водообмена озера Тунайча и залива Мордвинова. Результаты показали, что вентиляция придонных слоев морской водой происходит только при сильных ветровых и штормовых нагонах, когда морская вода продавлиывает встречное течение из озера. Полученные результаты были использованы для расчета среднегодового объема стока всех водотоков в озеро Тунайча.

Так же во время работ было апробировано устройство – автономный регистратор течений на базе AANDERAA ZPulse® Doppler Current Sensor 4420. Как показал опыт применения, автономный вариант регистратора течений оказался абсолютно не заменим в период сложных климатических условий, когда работа с лодки при низких осенних температурах, штормовом ветре и нагонных волнах, представляла не только большую сложность, но и серьезную опасность.

Работа проводилась в рамках составной части научно-исследовательской работы «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем».

2.7 Вывод к второй главе

Во второй главе представлены результаты комплексных исследований гидрофизических характеристик охотоморского региона, выполненных авторскими измерительными комплексами, представленными в первой главе.

- Выполнен анализ гидрофизических исследований, выполненных автором, в районе Курильских островов (пролив Фриза). Анализ данных измерений позволил выявить основные особенности трансформации водных масс Охотского моря и Тихого океана в проливе Фриза. Характер вертикальной структуры вод в проливе остается тем же, что в море и в океане, но границы отдельных водных масс несколько смещаются. В мелких частях пролива вода слабо стратифицирована. Соленость воды в проливах на поверхности выше, чем в море. Зона пролива характеризуется уменьшением

температуры воды на поверхности относительно сопредельных вод океана и моря. Холодный и теплый промежуточные слои в проливе меньше отличаются по своим характеристикам, в некоторых случаях границы их выражены нечетко. Отрицательные температуры не были отмечены в проливе. В проливе Фриза, в мелководной части водные массы хорошо перемешаны течениями, вода практически однородна – вертикальные градиенты гидрологических характеристик составляют порядка 0,008 град/м. В этом районе отмечена наиболее низкая температура и скорость звука по сравнению с другими точками измерения.

- Проведен анализ водообмена через Курильский пролив (пролив Фриза). Исследования показали, что в Охотское море вносится значительное количество тепла, что определяет климатические особенности всего моря и обширных прибрежных акваторий. Полученные сведения о характере водообмена Охотского моря с Тихим океаном через пролив Фриза позволяют более дифференцированно рассматривать задачу о снабжении моря теплом. Этот вопрос имеет значение, так как определяет многие черты гидрологического режима (интенсивность процессов ледообразования, пространственное распределение льдов, температурные характеристики водных масс, условия рыбного промысла и зимней навигации).

- Определено, что гидроакустическая структура поля скорости звука в изучаемом районе определяется особенностями гидрологической структуры морских водных масс. Гидроакустическая структура вод в проливе Екатерины относится к южно-охотоморскому типу, с наличием звукового канала на глубине 100-200 м. Отличительная особенность строения поля скорости звука в проливе Екатерины заключается в наибольшем диапазоне изменения величины скорости звука от поверхности до оси звукового канала.

- В рамках комплексной экспедиции «Восточный бастион – Курильская гряда», организованной Русским географическим обществом, Российской академией наук и министерством обороны в 2019 году. Получены данные гидрологических характеристик морских вод в районе Курильских островов

Уруп и Итуруп. Выявлено их различие для охотоморской и тихоокеанской стороны Курильской гряды. Температура воды со стороны океана выше, чем с охотоморской стороны. Соответствующие отличия наблюдаются по всем параметрам, зависящим от температуры (скорость звука, электропроводность и т.д.). Выявлены значительные отличия по величине скорости течений в точках измерения. Максимальные значения концентрации кислорода отмечаются в момент смены направления течения.

- Выполнены комплексные исследования в рамках научно-исследовательской работы «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем». Обработан весь доступный объем архивных и литературных материалов. В 2022 году проведен большой объем гидрографических и гидрофизических работ. Получено распределение солёности и температуры по всей акватории озера. Эта работы была проведена в два этапа, в весенний и осенний периоды, для оценки сезонной изменчивости. Анализ результатов измерений показал, что в зимнее время практически не происходит приливных движений внутри озера, что связано с недостаточными размерами протоки, соединяющей озеро с морем. Часть протоки замерзает в зимнее время. Результаты измерений и их анализ показали, что вентиляция придонных слоев свежей морской водой происходит только при сильных ветровых и штормовых нагонах, когда морская вода продавлиывает встречное течение из озера. Полученные результаты были использованы для оценки среднегодового объема стока всех водотоков в озеро Тунайча. Данные отчета используются для работы межведомственной комиссии Сахалинской области по экологической проблеме озера Тунайча.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА ВБЛИЗИ МЫС СВОБОДНЫЙ (ОСТРОВ САХАЛИН)

3.1 Введение

В регистре (Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей, 2003) приведены данные о морских волнах с различной обеспеченностью в различных районах Охотского моря. Шаг по пространству в регистре достаточно велик (чуть меньше 2 градусов), и не позволяет использовать его в условиях прибрежной зоны, где сильное влияние на волны оказывают эффекты рефракции, дифракции и вдольбереговых течений. Именно поэтому предпринимаются усилия по анализу морского волнения в различных заливах и бухтах, где осуществляется экономическая деятельность. Так, в связи с созданием карбонового полигона в заливе Анива в недавней работе (Мысленков, и др., 2025) представлен анализ характерных высот, периодов и длин волн, полученных численным моделированием за период 1979 - 2023 годы. Так, средняя многолетняя высота значительных волн составляет до 0,5 м в северной части залива и до 1 м в южной. Максимальная высота значительных волн достигает 8,5 м в южной части залива и около 4–5 м в северной. Наиболее волноопасные направления для района гор. Корсаков идут из открытой части залива. Такие волны часто вызывают штормовые нагоны, которые будут рассчитываться в следующей главе. Отметим также анализ волн – убийц (кратковременно возникающих аномально высоких волн) на основе измерений в Анивском заливе в работах (Зайцев, и др., 2011; Кузнецов, и др., 2014)

Аналогичные исследования выполнялись для восточной части острова Сахалин (залив Терпения, залив Мордвинова). Так, в диссертации К.И. Кузнецова (Кузнецов, 2013) и статье (Кузнецов, и др., 2014) приведены результаты натурных экспериментов по изучению короткопериодных волновых колебаний в открытых и полужакрытых бассейнах, которые проводились на шельфе юго-восточного побережья острова Сахалин (Рисунок

3.1). В результате продолжительных (2006 – 2012 гг.) натурных измерений придонного давления были получены обширные экспериментальные данные о ветровом волнении с дискретностью 1 сек. Эти исследования продолжались в дальнейшем при участии автора под руководством член-корреспондента РАН А.И. Зайцева. Результаты исследования ветрового режима вблизи мыса Свободный будут описаны ниже.

Исследование волновых процессов вблизи мыса Свободный на юго-восточном побережье о. Сахалин с использованием автономных регистраторов волнения и метеостанции проведено также в работе (Ковалев, и др., 2024). Анализ пятимесячных данных уровня моря и температуры, атмосферного давления и скорости ветра выявил, что в диапазоне периодов волн 2–600 сек отсутствуют значительные пики для ветровых и инфрагравитационных волн. Во время штормов наблюдается рост энергии инфрагравитационных волн. Обнаружены волны с периодами 14.2 с, 3.62 мин и 8.85 мин, связанные с зыбью и излученными волнами, распространяющимися в сторону моря. Анализ характеристик ветрового волнения показал, что в диапазоне периодов 2–20 сек отсутствуют значительные волновые процессы, включая ветровые волны. Максимальная высота волн наблюдалась при продолжительных южных ветрах, связанных с циклоном.

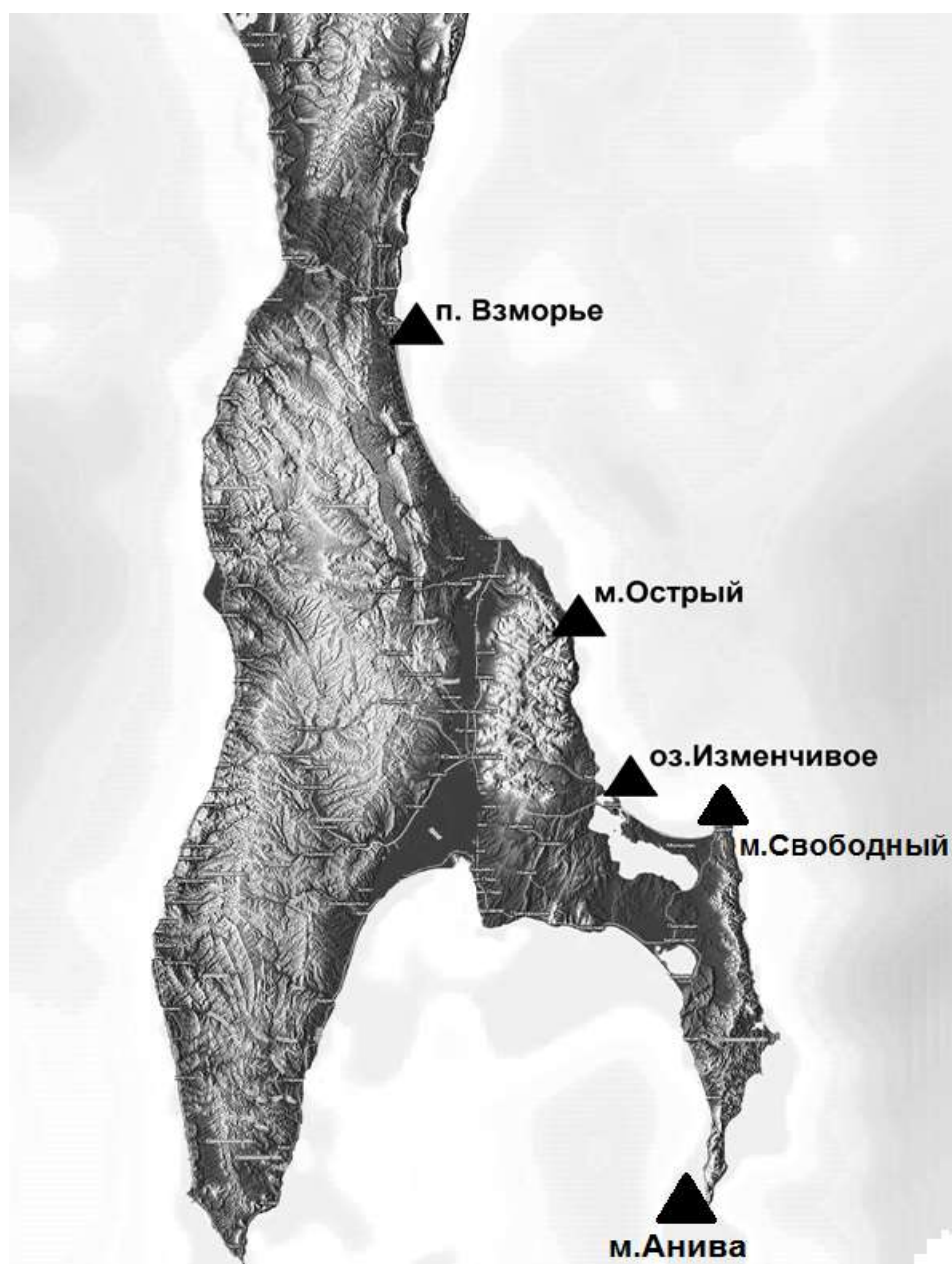


Рисунок 3.1 - районы измерений параметров ветрового волнения в 2006-2012 годы (Кузнецов, 2013)

Отметим также натурный эксперимент на м. Свободном в течение года (2012-2013), заключавшийся в постановке ADCP с измерителем течений и STD зондом, а также в измерениях волнения и уровня моря (Шевченко, и др., 2018). Выявлена значительная сезонная изменчивость прибрежных течений, выраженная в консолидации потока ЮВ румба в октябре – феврале и увеличении средней скорости в 2 раза; значительном ослаблении в этот период приливных течений и возрастании интенсивности неперiodических. В период интенсификации течения отмечено резкое повышение температуры морской

воды на горизонте 21 м (с 2–3 до 15 °С) и понижение солености (с 32.8 до 30.5‰).

Отметим первые регистрации волн-убийц в этом районе. (Зайцев, и др., 2011). В результате эксперимента в районе мыса Свободный с октября 2011 года по май 2012 года получены данные гидростатического давления в точке на дне. Диссертант принимал непосредственное участие в подготовке и установке измерительных систем.

Предварительный анализ колебаний обнаруживает множество сильных штормов в период наблюдений с ноября по декабрь 2011 года. Примеры наиболее сильных штормов, отмеченных в конце декабря - начале января с амплитудой ветрового волнения до 9 метров представлены на рисунке 3.2. Всего на анализируемой записи за 70 дней наблюдения волнения в безледный период было выделено около 200 волн, попадающих под определение амплитудного критерия аномально больших волн.

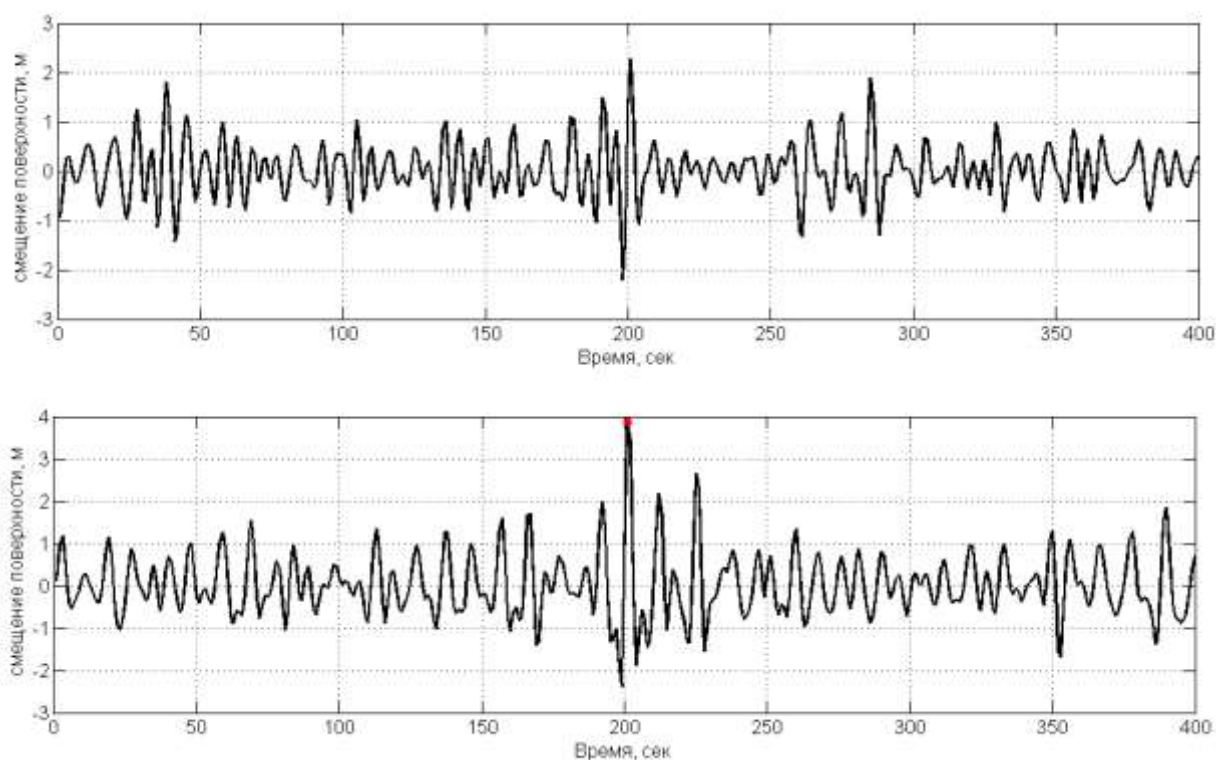


Рисунок 3.2 - Примеры аномально больших волн (волн-убийц), зарегистрированных на м. Свободный

сверху – 8 декабря 2011 года, высота 4.48м ($H/H_s = 2.43$);

снизу – 24 декабря 2011 года, высота 6.23м ($H/H_s = 2.29$)

Оценки возникновения аномально-больших получены из анализа долговременных записей уровня моря за ноябрь-май 2011-2012 годов, полученных с помощью донной станции (глубина постановки 16 м). Было зарегистрировано 200 волн за 70 дней наблюдений в безледный период. По крайней мере, две аномально большие волны до 6 м, зарегистрированные 24 декабря и 25 декабря 2011 года, произошли во время движения циклона. Его характеристики даны на сайте Сахалинского метеоагенства (<http://sakhmeteo.ru/>). В течение нескольких дней на Охотском море сохраняется штормовая погода. Ветер северной четверти усиливался до 17-22 м/с, в порывах до 25 м/с; высота волн до 4 метров. Виной всему стал циклон, который 16 декабря приблизился к Камчатке. Сильный ветер охватил не только побережье Камчатки, но, практически, всю акваторию Охотского моря». Стоит отметить, что при прохождении данного циклона **18 декабря в центральной части Охотского моря в 200 километрах от Сахалина потерпела крушение плавучая буровая платформа "Кольская"**.

Так же под руководством профессора, доктора физико-математических наук член-корреспондента РАН Слюняева А.В., был разработан вариант устройства для долговременного измерения поверхностного волнения моря (описанного в главе 1.7), с тремя равноудаленными друг от друга измерительными датчиками давления синхронизированных от одного тактируемого источника. Данный вариант устройства предназначен для регистрации объемных волн, а также их направлений. Общий вид устройства и структурная схема представлены ниже на рисунках 3.3, 3.4.



Рисунок 3.3 – Внешний вид устройства волнограф с тремя равноудаленными измерительными датчиками

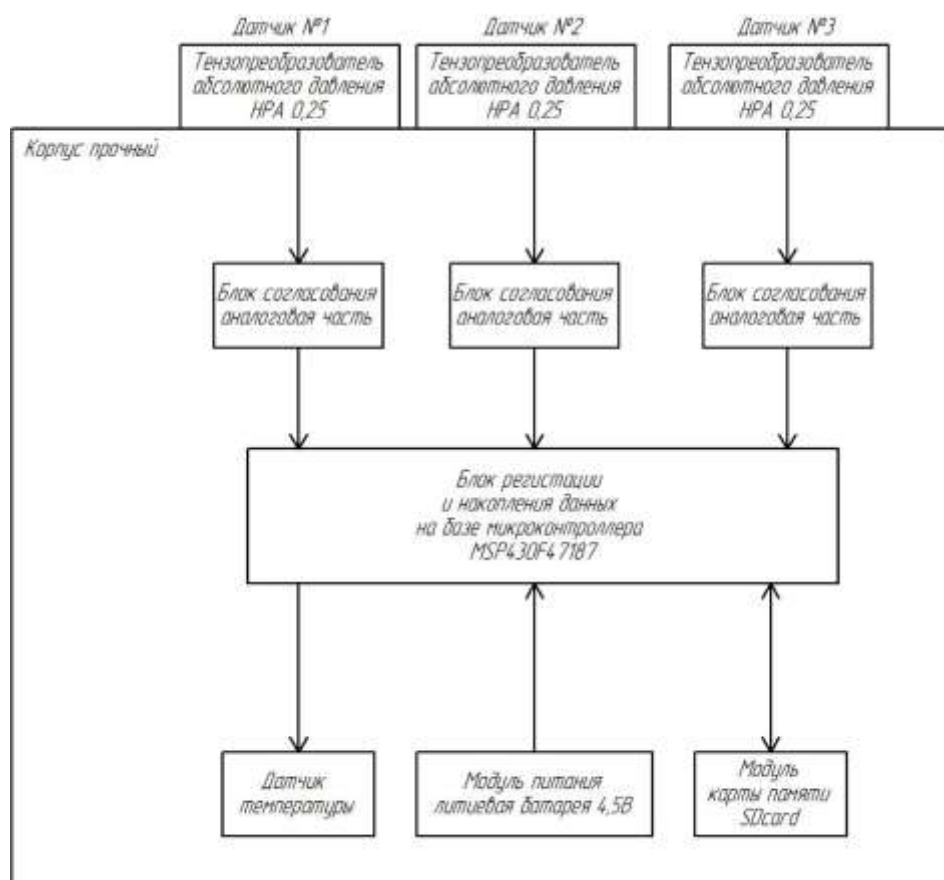


Рисунок 3.4 - Структурная схема устройства «волнограф» с тремя равноудаленными датчиками

Измерения проводились в осенне-весенний период в заливе Мордвинова.

Результаты измерений данным устройством затронули период сильных штормовых явлений, а также становление ледяного покрова в заливе Мордвинова. Полученные данные использовались для выявления зависимости вероятностного распределения высот волн (Кокорина, и др., 2022; Слюняев, и др., 2023).

Настоящий раздел содержит результаты анализа многолетних наблюдений параметров ветровых волн на мысе Свободный. Особое внимание уделено анализу редко встречающихся волн-убийц в записях.

3.2 Обобщенные вероятностные распределения высот волн по результатам измерений на мысе Свободный

Высота волны H (вертикальное расстояние от нижней точки ложбины до верхней точки гребня) является наиболее часто используемой характеристикой морских волн. В банке накопленных данных измерений на мысе Свободный уже содержится несколько тысяч регистраций аномально высоких волн, удовлетворяющих формальному критерию превышения значительной высоты волнения H_S в 2 раза и более, $AI = H/H_S > 2$. Измерения проводились серией кампаний с установкой одного или нескольких датчиков на срок несколько месяцев, включая зимние периоды покрытия поверхности льдом.

Эти данные можно найти в публикациях (Зайцев, и др., 2011; Кузнецов, и др., 2014; Didenkulova, et al., 2019; Кокорина, и др., 2022). В предположениях линейности волн и узости спектра вероятность превышения высоты задается распределением Рэля (Massel, 1996):

$$R_R(H) = \exp \left[-2 \left(\frac{H}{H_S} \right)^2 \right], \quad (3.1)$$

представляющим собой зависимость интегральной функции распределения (кумулятивной частоты) от нормированной высоты H/H_S .

На практике значительная высота определяется через среднеквадратичное смещение поверхности σ , $H_S = 4\sigma$, или как среднее от трети наиболее высоких волн в выборке, $H_S = H_{1/3}$. Распределение (3.1) обычно используется в качестве первого приближения для описания морских волн. В частности, оно позволяет оценить вероятность возникновения аномально высоких волн: $P_R(H = 2H_S) = 3,35 \cdot 10^{-4}$. По уже сделанным оценкам, действительная вероятность возникновения «волн-убийц» примерно соответствует этому значению: в среднем 2–3 аномальные волны в сутки (Кузнецов, и др., 2014). Более точная оценка вероятности редких экстремальных событий $H > 2H_S$, поиск условий, способствующих повышению вероятности таких событий, являются актуальными проблемами современной океанографии. Именно эти вопросы и будут обсуждаться в настоящем разделе.

Разбиение длинных записей волн на короткие интервалы по 10–30 мин является стандартным способом повышения статистической однородности данных. Предполагается, что такие интервалы, с одной стороны, соответствуют периодам примерной стационарности условий, характеризующихся постоянным значением H_S , а с другой - достаточны для обеспечения не слишком больших погрешностей вероятностных оценок, связанных с конечностью выборки. В таких интервалах записей содержится от нескольких десятков до пары сотен индивидуальных волн. В предположении универсальности распределений вероятностей волн по параметру превышения значительной высоты волн H/H_S данные для разных коротких интервалов записей могут объединяться для построения вероятностных распределений морского волнения. Соответственно, результатом такой обработки станет обобщенное распределение $P(H/H_S)$.

При учете конечной ширины спектра, нелинейности волн и т.д. в теоретических распределениях вероятности возникают поправки, нарушающие универсальность распределения Рэлея. Недоучет этого

обстоятельства ведет к построению функций распределения вероятностей на основе разнородных данных, что должно приводить к ошибочным оценкам. В частности, такой подход может маскировать редкие, возникающие при определенных условиях аномальные функции распределения в массиве однотипных функций распределения, соответствующих значительно более частым условиям. В литературе можно найти как свидетельства разнородности распределений вероятностей на основе разных банков натурных данных, так и прямое обсуждение зависимости распределений от локаций, времен года и т. п. (Baschek, et al., 2011; Cattrell, et al., 2018; Cattrell, et al., 2019; Слюняев, и др., 2023). Очевидно, что для повышения адекватности строимых на основе натурных данных вероятностных распределений (особенно в области редких событий), определения их зависимости от конкретных характеристик волнения следует использовать дополнительную сортировку данных по статистически однородным условиям.

Распределение вероятностей превышения высоты, построенное в (Кокорина, и др., 2022) по данным измерений волн около мыса Свободный в 2012–2015 годах, воспроизведено на рисунке 3.5(*a*). В (Кокорина, и др., 2022) было установлено, что за экстремальные значения высот на рисунке 3.5(*a*) ответственны события аномально высоких волн, наблюдавшиеся в ледовый период. Последний легко выделялся по характерному виду записей с почти нулевым фоновым волнением. К нему относились не только периоды, когда акватория была покрыта сплошным льдом, но и зимнее время между таковыми. После разделения массива данных на условия открытой воды и ледовые в первом случае данные исключительно хорошо описываются распределением Глуховского (рисунок 3.5(*б*)), в то время как второй класс условий демонстрирует значительные отклонения от этого распределения (рисунок 3.5(*в*)) и содержит «волны-убийцы» с наибольшими превышениями значительной высоты. Таким образом, общее распределение вероятностей на рисунке 3.5(*a*) содержит как

минимум два класса событий, характеризующихся существенно различными вероятностными свойствами, о чем нельзя сделать вывод лишь на основании рисунка 3.5(а).

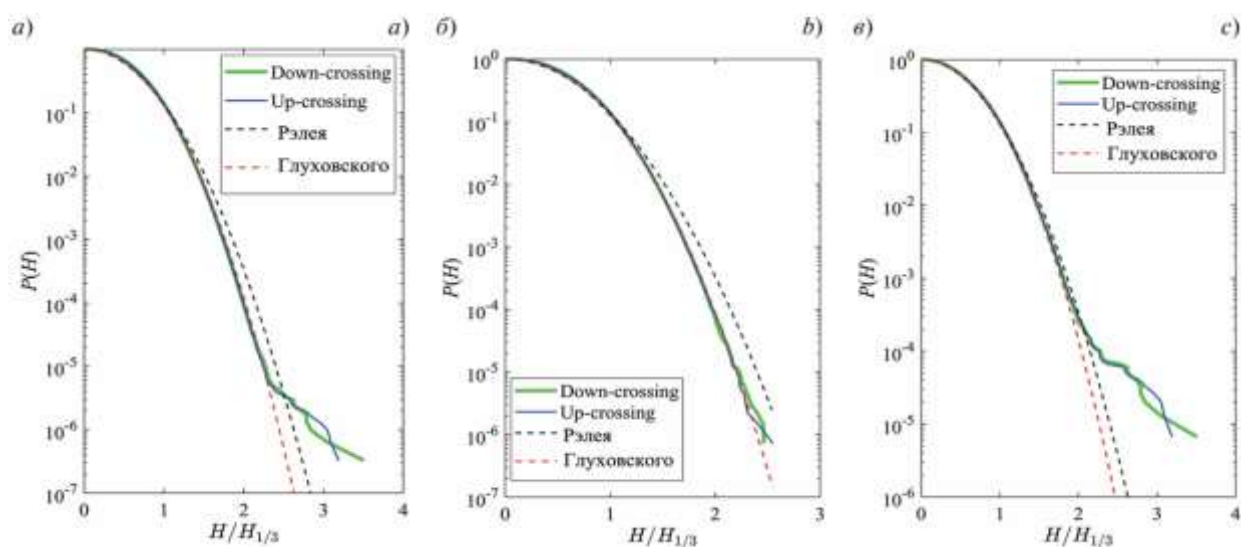


Рисунок 3.5 - Распределение вероятностей превышения высот волн по натурным данным за сезоны 2012–2014 гг.: все данные (а), данные только периодов безо льда (б) и ледовый период сезона 2014–2015 гг. (в). Разными цветами построены распределения по пересечению нулевого уровня вниз (Down-crossing) и вверх (Up-Crossing). Другие линии соответствуют распределениям Рэлея и Глуховского, см. в (Кокорина, и др., 2022)

Для океанографии стандартными являются диаграммы T_Z-H_S , отражающие вероятность волновых условий с данной значительной высотой H_S и данным периодом T_Z , определенным для волновой последовательности по пересечениям нулевого (невозмущенного) уровня. Такая диаграмма для части данных измерений была приведена в работе (Кокорина, и др., 2022). Ее вариант, дополненный новыми данными, показан на рисунке 3.6. Все зарегистрированные значительные высоты не превышают половины глубины точки измерения, так что в каком-то смысле нелинейность волн не является уж очень большой.

Данные с очень слабым волнением $H_S = 4\sigma < 0,2$ не использовались в обработке. Можно предположить, что временные последовательности, соответствующие одним или близким ячейкам на этой диаграмме, соответствуют, в основном, схожим метеоусловиям, относятся к похожим волновым состояниям и описываются одним распределением вероятности.

С другой стороны, разбиение таблицы T_Z-H_S на большое число ячеек приводит к значительному оскудению предполагаемых однородными статистических выборок. Потому выделение статистически однородных подмножеств данных является важной и нетривиальной задачей.

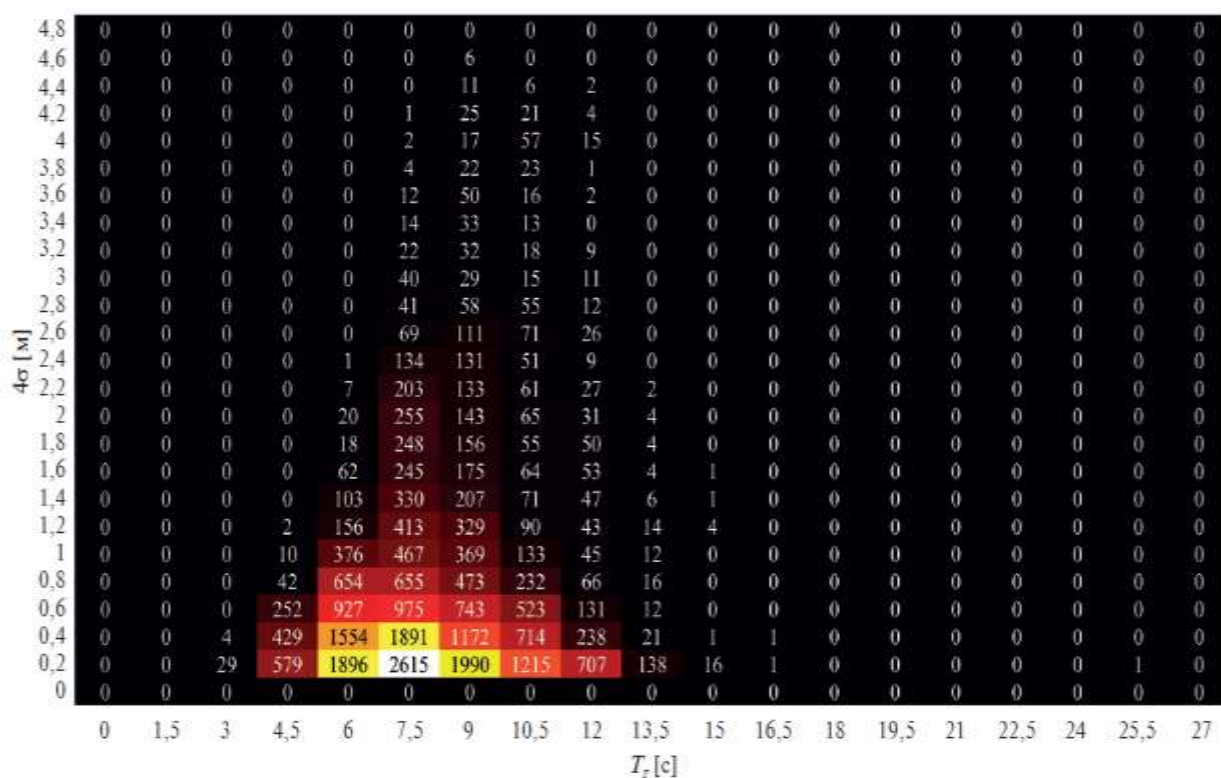


Рисунок 3.6 - Диаграмма распределения количества 20-минутных записей (см. числа в ячейках) по значительным высотам $H_s = 4\sigma$ и периодам T_z

Здесь мы предлагаем подход к формированию статистических выборок, основанный на выполнении схожих физических условий, выраженных не в размерных (как на примере T_Z-H_S диаграммы рисунок 3.6), а в безразмерных параметрах, имеющих ясный физический смысл. Он применяется к данным натурных измерений около мыса Свободный. В следующем разделе 3.2.1 кратко обсуждаются естественные безразмерные физические параметры, которые являются первыми кандидатами на роль управляющих параметров распределений вероятностей. Там же обсуждаются два примера модификаций распределения Рэлея с учетом нелинейности. Далее приводятся результаты построения распределений

вероятностей высот волн на основе натуральных данных для подмножеств, соответствующих разным интервалам безразмерных параметров.

3.2.1 Физические параметры, ведущие к изменению вероятностных свойств высот волн

Из общих соображений, условия в точке измерения характеризуются локальной глубиной h , а волны — характерной длиной (или периодом) и интенсивностью. Хорошо известно, что свойства волн на поверхности воды, связанные с конечностью глубины h , определяются комбинацией kh , где k — волновое число. В частности, безразмерная глубина kh входит в дисперсионное соотношение

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)}, \quad (3.2)$$

где ω — циклическая частота волн; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения.

Такая же комбинация определяет нелинейные свойства волн на заданной глубине, включая коэффициенты нелинейных взаимодействий и параметрические области нелинейной неустойчивости волн (McLean, 1982). Так, при $kh > 0,5$ однородные волны становятся модуляционно неустойчивыми по отношению к длинным модуляциям под углом к направлению распространения, а при $kh > 1,363$ неустойчивыми становятся продольные возмущения; с ростом kh возрастает инкремент неустойчивости и область неустойчивых волновых чисел. Поскольку было показано теоретически и экспериментально (например, (Onorato, et al., 2016)), что условия модуляционно устойчивых и неустойчивых волновых систем характеризуются разными распределениями вероятностей редких событий, то учет параметра kh при построении статистических ансамблей представляется важным. Этот параметр может быть использован и в качестве характеристики длины (периода) волн на конечной глубине, потому вместо периода T_z для описания волновых условий будем

использовать величину kh , которую можно понимать как безразмерную характеристику длины волны.

Безразмерный параметр нелинейности волн на мелкой воде вводят в виде отношения амплитуды волны к глубине, что для значительной амплитуды волн $H_S/2$ можно записать в виде $a = H_S/h/2$ (Пелиновский, и др., 2015). В пределе глубокой воды естественный размер задачи h становится неприменимым; хорошо известно, что на глубокой воде безразмерной характеристикой интенсивности волн является крутизна, которую можно записать в виде $\varepsilon = kH_S/4 = k\sigma$. Тогда мелководный параметр нелинейности можно представить в виде отношения крутизны и безразмерной глубины: $a = (kH_S)/(kh)/2 = 2\varepsilon/(kh)$. В частности, условия обрушения волн на мелководье и на большой глубине формулируются в терминах пороговых величин параметров, которые можно записать в форме $A/h \approx 0,25$ и $kA \approx 0,4$ соответственно, где A — амплитуда волны.

В статье (Toffoli, et al., 2007) параметр нелинейности μ для произвольной глубины приведен в форме

$$\mu = k \frac{H_S}{2} F(kh), \quad (3.3)$$

$$F = \frac{(4 \tanh kh + \tanh 2kh)(1 - \tanh^2 kh)}{2 \tanh kh(2 \tanh kh - \tanh 2kh)} + \tanh kh,$$

Как видно, он также зависит от глубины через комбинацию kh . В пределе глубокой воды этот параметр становится удвоенной крутизной $\mu \rightarrow 2\varepsilon$, а в пределе мелкой воды пропорционален параметру Урселла, $\mu \rightarrow 2Ur$, $Ur = 3/8 kH_S (kh)^{-3}$, который, в свою очередь, составлен из крутизны и безразмерной глубины. Параметр Урселла контролирует баланс между эффектами нелинейности и дисперсии, действующими на волну (Massel, 1996). Так что при малых значениях Ur волны на малой глубине синусоидальны, а при Ur порядка единицы волны становятся кноидальными и имеют вид уединенных горбов (солитонов). В (Pelinovsky, et al., 2006) на основе прямого численного моделирования

слабонелинейного уравнения Кортвега–де Вриза делался вывод о возможности возрастании вероятности возникновения аномально высоких волн в случае больших величин параметра Ur , когда доля солитоноподобных волн была высока.

Таким образом, мера нелинейности волн может отражаться одним из перечисленных выше параметров, которые связаны между собой через параметр глубины kh . Для последующего исследования в настоящей работе будут использованы три из них в следующих определениях:

$$\varepsilon = k\sigma, \quad a = 2\frac{\sigma}{h}, \quad Ur = \frac{3}{2} \frac{k\sigma}{(kh)^3}, \quad (3.4)$$

В работе (Кокорина, и др., 2022) показано, что большинство данных по результатам измерений у о-ва Сахалин в 2012–2015 гг. очень хорошо описывается распределением Глуховского, см. рисунок 3.5(б). Теоретическое распределение Глуховского (Massel, 1996)

$$P_G(H) = \exp \left[-\frac{\pi}{4 \left(1 + \frac{n}{\sqrt{2\pi}} \right)} \left(\frac{H}{\bar{H}} \right)^{\frac{2}{1-n}} \right], n = \frac{\bar{H}}{h}, \quad (3.5)$$

использует параметр нелинейности $n = \frac{\bar{H}}{h}$, введенный как отношение средней высоты волн $\bar{H} = \langle H \rangle$ к глубине. Очевидно, что параметр распределения n стремится к нулю в пределе большой глубины (при конечном H_s и растущем h) или в пределе волн малой амплитуды $a \ll 1$, тогда распределение Глуховского(3.5) переходит в распределение Рэля (3.1) со связью $\bar{H} = \sqrt{2\pi H_s}$. В прибойной зоне n приближается к значению 0,5, а отношение $\bar{H} \cdot k \cdot H_s$ увеличивается примерно на 20 % (Massel, 1996). В общем случае можно приблизительно переписать нормированную высоту с использованием значительной высоты H_s : $\frac{H}{\bar{H}} \approx \frac{4}{\sqrt{2\pi}} \frac{H}{H_s}$. Тогда получается связь параметра n с параметром нелинейности

для волн на мелкой воде $n \approx \frac{\sqrt{2\pi}}{4} \frac{H_s}{h} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} a$. Таким образом, для не слишком больших a распределение Глуховского (3.5) можно записать в виде функции от величины H/H_s , зависящей также от параметра нелинейности мелководных волн a : $P_G(H) = P_G(H/H_s; a)$. Распределение Глуховского учитывает эффект глубины, связанный с действием нелинейности, оцениваемой параметром a . В рамках этого распределения в интервалах малых высот, $H < 3H_s/4$, и больших высот, $H > 3H_s/4$, вероятность оказывается выше и ниже распределения Рэлея, соответственно (см. в (Slunyaev, et al., 2016)).

Другой пример модификации распределения Рэлея для высот волн обсуждался в работе (Mori, et al., 2006):

$$P_{G-ch}(H) \approx \exp\left(-\frac{H^2}{8\sigma^2}\right) \left[1 + (\lambda_4 - 3)B\left(\frac{H}{\sigma}\right)\right], \lambda_4 = \frac{\langle \eta^4 \rangle}{\sigma^4}, B(\xi) = \frac{1}{384} \xi^2 (\xi^2 - 16), \quad (3.6)$$

который представляет собой ряд Грама–Шарлье для слабо негауссового распределения, см. в (Massel, 1996)). Здесь λ_4 соответствует четвертому статистическому моменту (эксцессу) для смещения поверхности η . Из анализа зависимости (3.6) следует, что рост четвертого момента $\lambda_4 > 3$ приводит к увеличению вероятности волн с большой высотой $H > 4\sigma$ в сравнении с распределением Рэлея. Оценка четвертого момента для условий глубокой воды была дана в той же работе (Mori, et al., 2006):

$$\lambda_4 = 3 + 24\varepsilon^2 + \frac{\pi}{\sqrt{3}} BFI^2, BFI = \sqrt{2} \frac{\varepsilon}{\Delta k/k}, \quad (3.7)$$

с использованием параметра относительной ширины спектра волновых чисел $\Delta k/k$. В статье (Слюняев, и др., 2011) было показано, что соотношение (3.7) может существенно нарушаться в случае не стационарности волнения. Другие предлагавшиеся оценки параметра

эксцесса обсуждались в нашем недавнем обзоре (Слюняев, и др., 2023). Последним слагаемым в формуле для эксцесса λ_4 можно пренебрегать в случае широкого спектра $\Delta k/k \gg \varepsilon$, и тогда отклонение λ_4 от 3 определяется малым параметром — квадратом крутизны волн. В специфических случаях относительно узкого спектра параметр модуляционной неустойчивости BFI может быть немалым, что приводит к существенному повышению вероятности высоких волн.

Таким образом, подобно распределению Глуховского, распределение (3.6) может быть записано в виде зависимости от нормированной высоты и параметра нелинейности для глубокой воды: $P_{G-Ch}(H) = P_{G-Ch}(H/H_5; \varepsilon)$. Если учет нелинейности в распределении для мелкой воды (3.5) приводит к понижению вероятности высоких волн в сравнении с распределением Рэля, то для распределения (3.6) эффект нелинейности обратный.

3.2.2 Вариативность распределений высот волн по натурным данным в зависимости от ключевых физических параметров

Исходные данные измерений донными датчиками представлены в виде последовательностей записей давления с частотами регистрации 1 Гц и 8 Гц. Задача реконструкции взволнованной поверхности по измерениям вариаций давления на дне неоднозначна (в частности, традиционно волны предполагаются однонаправленными) и нетривиальна. Наиболее часто для этого используют гидростатическую теорию для мелкой воды или линейную теорию для диспергирующих волн. Нелинейность дополнительно усложняет задачу. В настоящей работе смещение поверхности воды $\eta(t)$ определялось из гидростатического соотношения

$$p(t) = p_{atm} + \rho g[h + \eta(t)], \quad (3.8)$$

где $p(t)$ — измеренное давление, p_{atm} — атмосферное давление, h — глубина установки датчика, и ρ — плотность воды. Гидростатическое

приближение неточно при нарушении условий мелкой воды $kh < 1$, потому аккуратнее будет сказать, что описываемая здесь обработка выполнена для возбуждаемых поверхностными волнами вариаций донного давления в нормированной форме. Из-за наличия приливов среднее смещение для разных 20-минутных записей отличается, что было учтено в виде корректировки локальной глубины

$$h = \frac{\bar{p} - p_{atm}}{\rho g}, \quad (3.9)$$

где усреднение давления соответствует данному 20-минутному интервалу записи. Атмосферное давление предполагалось постоянным, соответствующим значению на момент установки донной станции. Соответствующая вариация глубины составила до 10 %.

Для расчета характеристик волн (среднеквадратичного смещения σ , высот H , периодов T) из записей $\eta(t)$ посредством спектральной фильтрации были вычтены осцилляции с периодами более 10 мин. Каждая 20-минутная последовательность характеризовалась собственными величинами значительной высоты $H_{1/3}$, среднеквадратичного смещения поверхности σ , среднего периода волн T_Z . Предполагая выполнение дисперсионного соотношения (3.2), для каждого интервала определялось волновое число k , соответствующее частоте $\omega = 2\pi/T_Z$ и эффективной глубине h .

В настоящем исследовании использованы данные измерений ветрового волнения за 2012–2015, 2020, 2022 и 2024 годы на глубине от 8 до 13 м. Записи с очень слабым волнением, $\sigma < 5$ см, не использовались в обработке, что привело к существенному уменьшению размера статистического ансамбля. Всего в анализе использовано порядка 27 тысяч 20-минутных записей, что соответствует временному ряду продолжительностью примерно в 1 год.

Далее на рисунке 3.7 представлены данные измерений гидростатического давления в заливе Мордвинова (о.Сахалин) полученные при помощи регистратора придонного давления, варианта с тремя равноудаленными измерительными датчиками показанного выше, на рисунке 3.3.

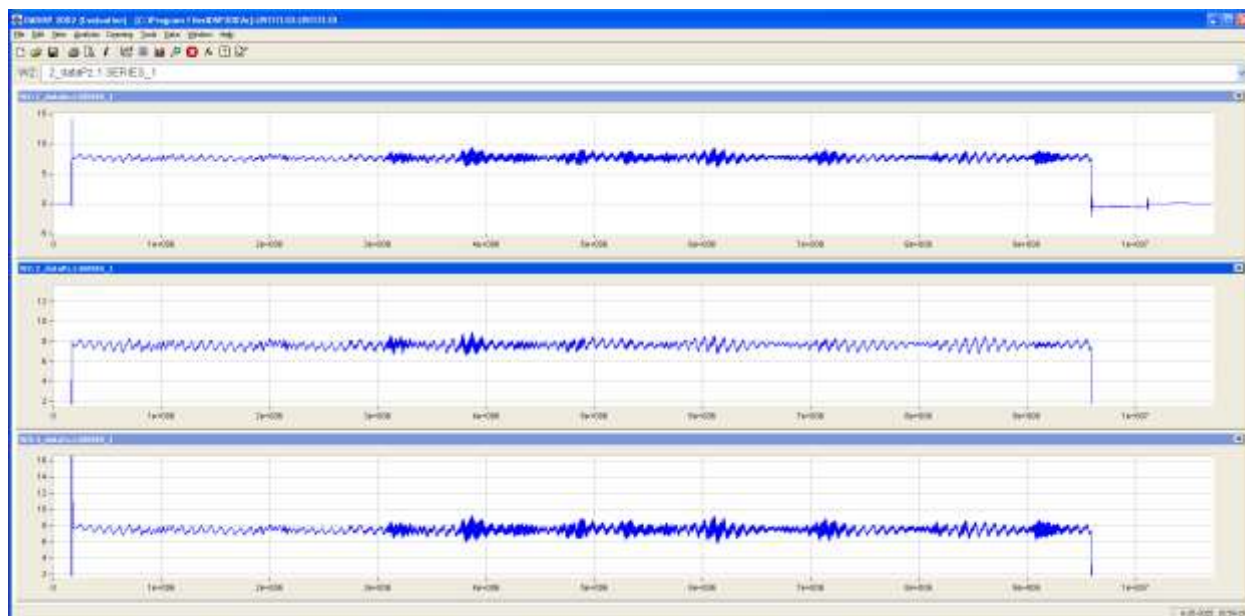


Рисунок 3.7 - Временные записи вариаций придонного давления полученных при помощи устройства представленного на рисунке 3.3

На рисунке 3.8 построена диаграмма, аналогичная приведенной на рисунке 3.6, но по горизонтальной координате отложены величины безразмерной глубины kh . Как следует из рисунка, вариации периодов волн и локальной глубины приводят к большому разбросу значений безразмерной глубины для разных 20-минутных записей: от условий очень мелкой воды $kh = 0,3$ до относительно глубокой воды $kh = 2$.

Распределения 20-минутных записей по параметру глубины kh и одному из трех параметров нелинейности (рисунок 3.8) построены на рисунке 3.9. Все распределения имеют качественно схожий вид и демонстрируют события с большой нелинейностью при выполнении условий довольно мелкой воды, хотя положение максимума нелинейности несколько отличается для рисунка 3.9, а–в: $kh \approx 0,7$, $kh \approx 0,6$, и $kh \approx 0,5$

соответственно. Здесь нужно учитывать и то, что этому интервалу безразмерных глубин соответствует большая часть данных.

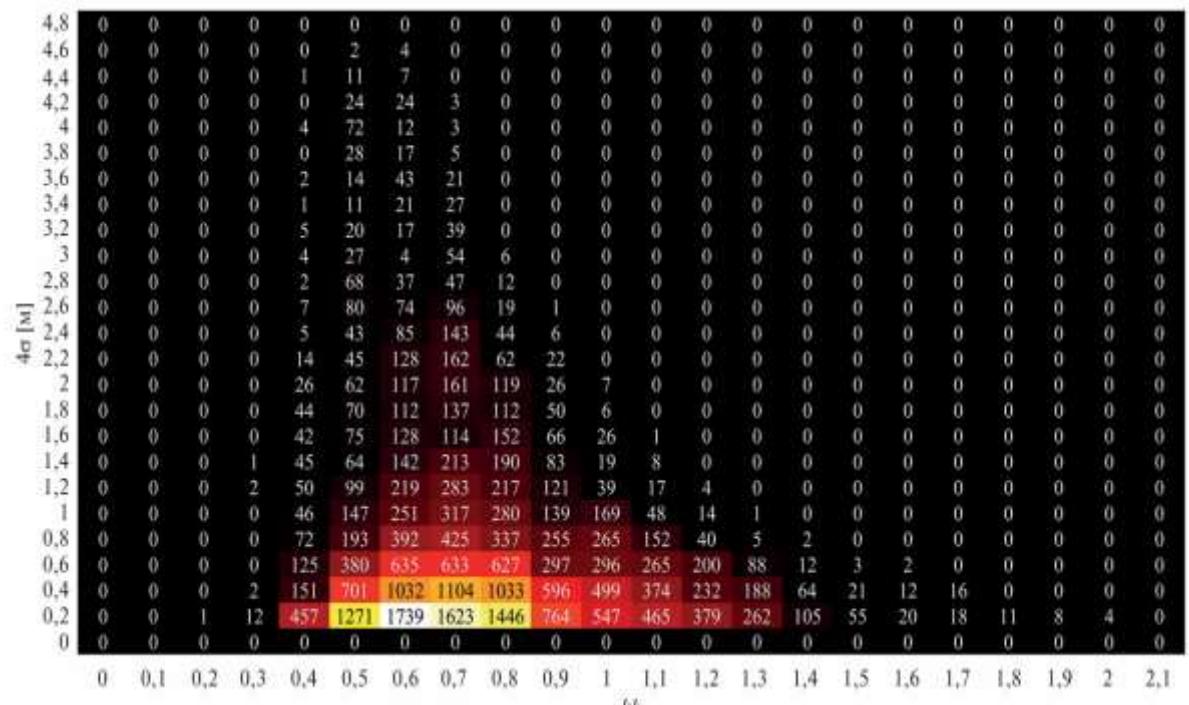


Рисунок 3.8 - Диаграмма распределения количества 20-минутных записей по значительным высотам H_s и безразмерным глубинам kh

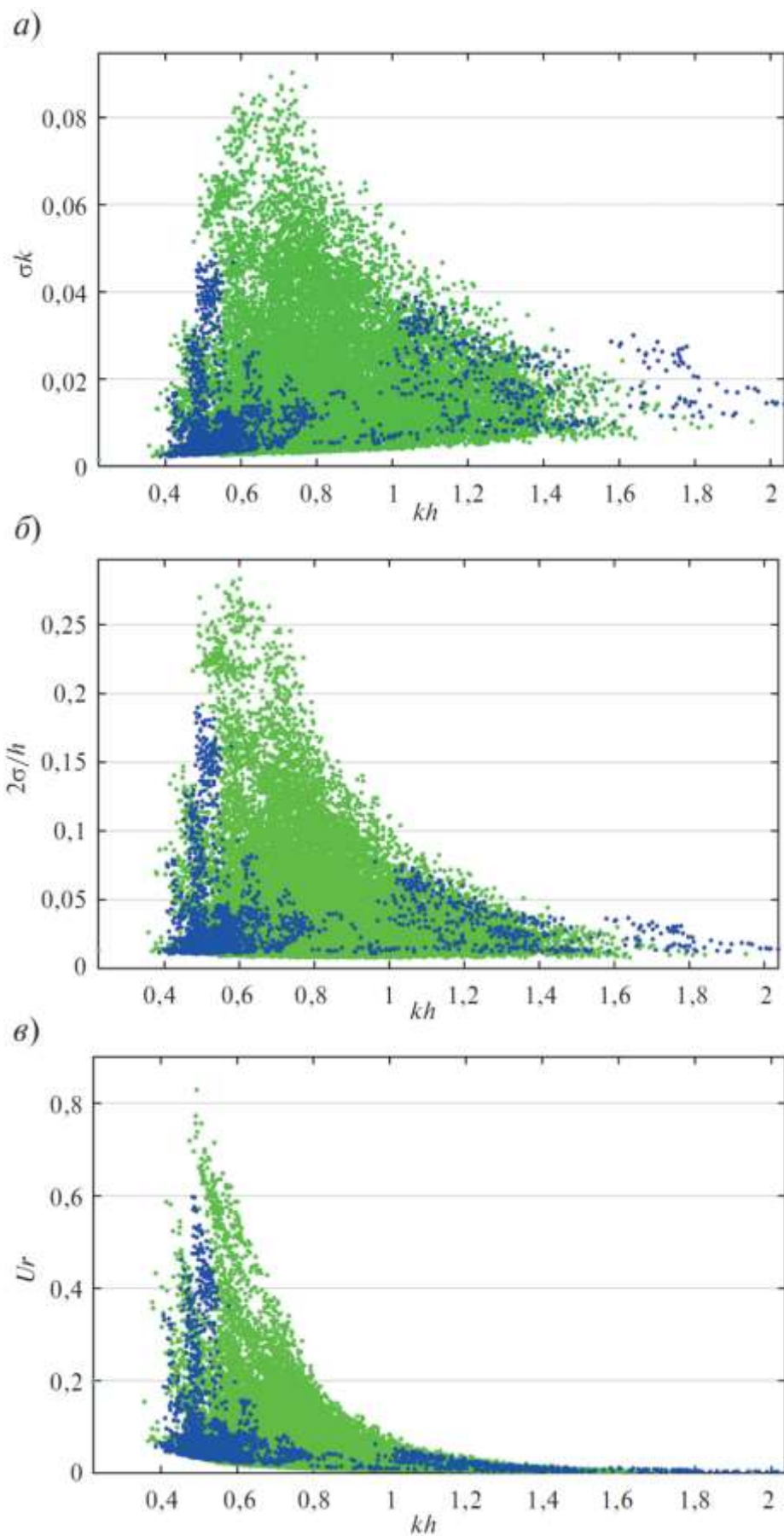


Рисунок 3.9 - Диаграммы распределения 20-минутных записей по безразмерным глубинам kh и параметрам нелинейности ε (а), ε (б) и Ur (в). Темными синими точками построены периоды наличия ледового покрова, светлыми зелеными — остальные

Из рисунка 3.9(*a*) следует вывод о меньших крутизне волн в ледовых условиях (темные синие точки) в сравнении с волнами на открытой поверхности (светлые зеленые точки), хотя это может быть следствием значительно меньшего количества данных, соответствующих ледовым условиям. На всех панелях на рисунке 3.9 данные в присутствии льда кластеризуются в интервале самых малых kh (длинные волны), при этом нелинейные параметры a и Ur могут быть не малыми. Бросается в глаза значительно меньшее число данных (особенно со значительной нелинейностью), соответствующих ледовым периодам, в интервале средних глубин $kh = 0,6...1$, что пока не получило физической интерпретации.

Массив данных, отсортированных по безразмерной глубине, а также по одному из трех параметров нелинейности был использован для построения распределений вероятностей превышений высот волн в нескольких интервалах значений соответствующего параметра. Тем самым исследуется зависимость распределения вероятностей от одного из четырех параметров: kh , ε , a и Ur . Эти распределения приведены на рисунок 3.10; там же приведены соответствующие интервалы величин для каждой кривой. Красными штриховыми линиями построены референсные распределения Рэлея.

Распределение количества 20-минутных записей по значениям рассматриваемых параметров очень неоднородно. При разбиении общего массива данных на несколько подгрупп, содержащих примерно одинаковое число волн, различий для парциальных распределений вероятностей почти не наблюдалось. Число волн, соответствующих значительному отклонению безразмерного параметра от среднего, мало и дает очень слабую поправку к распределению вероятности. Потому общий массив данных был разделен на подмножества разного размера, лучше отражающие различные интервалы безразмерных параметров. Значение

минимальной вероятности по данным в каждой подгруппе равно $1/N$, где N — общее число волн. Как можно видеть из рисунка 3.10, число волн в рассматриваемых подмножествах может отличаться на порядок, но в каждой из подгрупп не менее 10^5 индивидуальных волн, что для распределения Рэлея соответствовало бы 30 событиям «волн-убийц».

Распределения на рисунке 3.10(*а*) отображают зависимость распределения вероятностей от безразмерного параметра kh . Распределения для $kh < 1,4$ располагаются близко. Резкий рост вероятности самых больших (по отношению к $H_{1/3}$) волн для интервала безразмерных глубин $kh \leq 0,7$ связан, вероятно, с ледовыми случаями аномально высоких волн, характеризуемыми относительно длинными волнами. Качественно распределение для $kh \leq 0,7$ выглядит похожим на рисунке 3.5(*а*), где «тяжелый хвост» экстремальных волн связан с событиями в ледовый период (см. рисунок 3.5(*б* и *в*)). Отметим распределение для наиболее глубоководных записей $kh \geq 1,4$, которое заметно ближе к распределению Рэлея, чем остальные кривые, в том числе в диапазоне не слишком редких событий $P < 0,01$.

Распределения на рисунок 3.10(*б–г*) демонстрируют качественно схожий между собой эффект систематического уменьшения вероятности волн с большим превышением значительной высоты при увеличении параметра нелинейности. Для разных интервалов относительно небольшой крутизны волн $\varepsilon < 0,4$ (рисунок 3.10(*б*)) такое поведение касается только самого «хвоста» распределения, но для $k\sigma \geq 0,04$ понижается вероятность даже относительно невысоких волн, $H > 1,2 H_{1/3}$. По данным на рисунке 3.10 распределение вероятности изменяется наиболее согласованно и наиболее чувствительно при изменении параметра мелководной нелинейности a (рисунок 3.10(*в*)). В этом случае вероятность событий в области $H \approx 2 H_{1/3}$ в зависимости от a изменяется на порядок.

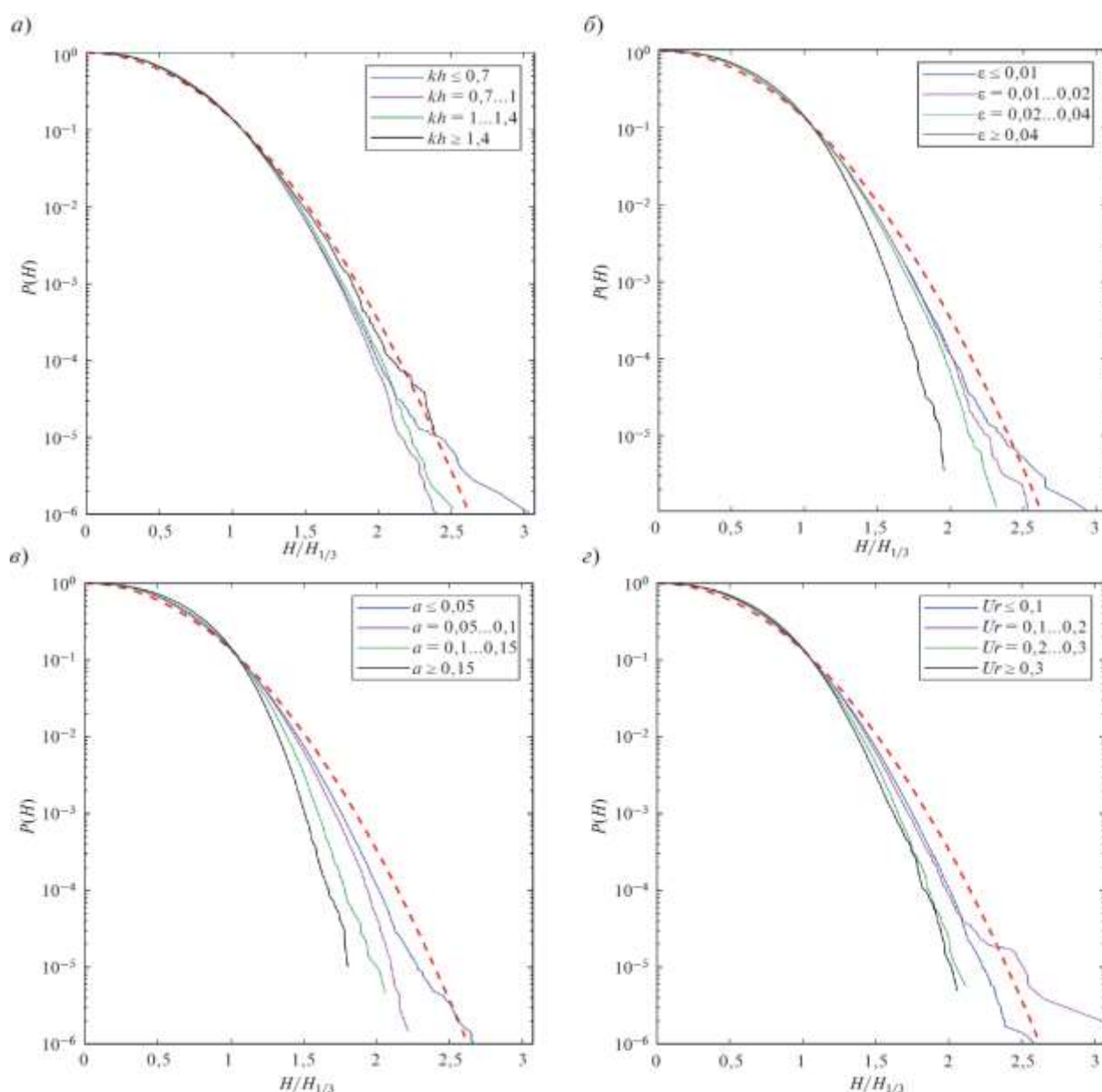


Рисунок 3.10 - Распределения вероятностей превышения высоты волн по выборкам в диапазонах параметров: глубины kh (а), крутизны волн ε (б), мелководной нелинейности a (в), числа Урселла Ur (г). Диапазоны соответствующих параметров указаны в кодировках линий

Зависимость распределения от параметра Ur , иллюстрированная на рисунок 3.10(г), выражена не так четко, но распределения для $Ur > 0,2$ и $Ur < 0,2$ разделяются вполне четко. Из рассмотренных на рисунке 3.10 результатов можно сделать вывод, что натурные данные демонстрируют наиболее сильную зависимость распределения вероятностей от параметра a при почти отсутствующей зависимости от безразмерного параметра

глубины kh (для данного набора данных, обеспечивающего данный интервал значений).

3.3 Выводы

В данной главе проанализированы данные долговременных измерений волн у побережья о-ва Сахалин в акватории Охотского моря донными станциями регистрации вариаций давления. Эти записи составляют часть большого по размеру банка данных измерений с 2009 года, которые планируется исследовать в дальнейшем. На данном этапе для восстановления поверхности использовано гидростатическое приближение; альтернативно можно считать исследование примененным к исходным записям давления.

Главной задачей исследования явилось их разделение по подгруппам, которые должны соответствовать физически эквивалентным условиям распространения волн. Это позволит сформировать представительное подмножество статистически однородных волн, дифференцировать различные физические процессы, участвующие в формировании волн большой высоты. Для сортировки данных использованы естественные безразмерные параметры задачи: нормированная глубина места измерения и три параметра нелинейности, соответствующие крутизне (параметр нелинейности на глубокой воде), отношению амплитуды волны к глубине (параметр нелинейности на мелкой воде) и числу Урселла (отношение эффектов мелководной нелинейности к дисперсии). Несмотря на разный физический смысл, все перечисленные нелинейные параметры связаны между собой посредством безразмерной глубины.

Построены экспериментальные распределения вероятностей для подгрупп записей, соответствующих разным интервалам безразмерных параметров. Все зависимости демонстрируют в разной степени отличие от распределения Рэлея, которое заключается в том, что экспериментальная зависимость лежит выше теоретической кривой в интервале небольших высот и ниже распределения Рэлея в области больших значений высот волн.

События самых больших превышений значительной высоты, наблюдавшиеся в ледовый период, сильно выбиваются из общего распределения и характеризуются значительно большей вероятностью. Выявлена существенная зависимость функции распределения вероятностей высот волн от нелинейности. Она наиболее сильно и четко проявляется при изменении параметра мелководной нелинейности – отношения среднеквадратичного смещения к глубине. Этот вывод качественно согласуется с теоретически распределением Глуховского, для которого отличие от распределения Рэлей контролируется именно таким параметром, и отличие от распределения Рэлея выглядит качественно схожим с наблюдениями образом. С усилением нелинейности вероятность волн, превышающих значительную высоту в 2 раза и более, снижается.

Хотя доминирующая часть записей соответствует значению $kh \approx 0,6 \dots 0,7$, из-за вариации периодов проходящих волн и приливных эффектов по данным измерений на фиксированной глубине получается исследовать волны в широком диапазоне безразмерных глубин $kh = 0,3 \dots 2$. Для них наблюдается зависимость вероятностного распределения от глубины. Для выборки $kh \geq 1,4$ натурные данные следуют распределению Рэлея значительно лучше, демонстрирую повышение вероятности высоких волн в сравнении с данными $kh < 1,4$.

Записи, соответствующие условно ледовым периодам и содержащие волны с наибольшим превышением значительной высоты, располагаются на плоскостях безразмерных параметров отлично от остальных данных. Волны в таких записях обладают заметной крутизной $k\sigma > 0,03$ в довольно широком интервале безразмерных глубин $kh = 0,5 \dots 2$. Значительной нелинейностью в терминах отношения среднеквадратичного смещения поверхности к глубине и параметра Урселла обладает только их часть, содержащая сравнительно длинные волны.

Анализ полученных данных позволил выявить ряд конструктивных недостатков измерительной системы. Так в первой итерации системы, при длительной постановке, мелкие частички взвеси постепенно осаждались в канале измерительного датчика, что значительно снижало чувствительность измерительного элемента. Также была выявлена проблема с синхронизацией датчиков, что значительно усложняло обработку получаемых данных.

По итогу выявленных недостатков были внесены схемотехнические и конструктивные изменения в конструкцию измерительной системы, которые значительно улучшили качество получаемых данных.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОХОТСКОМ МОРЕ

4.1 Введение

Численное моделирование гидрофизических процессов и их влияние на береговую и прибрежную инфраструктуру – это процесс использования математических методов и вычислительных алгоритмов для анализа и прогнозирования возможных изменений ландшафта и экологии прибрежной зоны. Этот метод позволяет эффективно управлять рисками позволяя, еще на этапе проектирования адаптировать прибрежную инфраструктуру.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования гидродинамики морских волн в прибрежных районах охотоморского региона, направленных на изучение, как исторических событий, так и оценки их воздействия на береговую линию и инфраструктуру портовых территорий. Численное моделирование этих волновых режимов проведено в рамках нелинейной теории мелкой воды с применением программного вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС, разработанного международной кооперацией специалистов; руководителем работ с российской стороны является член-корреспондент РАН А.И. Зайцев (Зайцев, и др., 2019; Zaytsev, et al., 2019).

В разделе 4.2 собраны данные полевого обследования района г. Корсакова (Сахалин) после сильнейшего шторма 15 ноября 2019 года и приведены результаты численного моделирования этого события.

В разделе 4.3 обсуждаются особенности вычисления силовых характеристик воздействия штормовых нагонов на вертикальные опоры малого диаметра в рамках существующего вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС, решающего уравнения длинных волн.

Раздел 4.4 содержит результаты исследований волнового режима в заливе Мордвинова (Сахалин) и рекомендации по поддержке экологического состояния озера Тунайча.

Результаты исследований опубликованы в статьях (Зайцев, и др., 2020; Москвитин, и др., 2020; Кокорина, и др., 2022; Кокорина, и др., 2022; Слюняев, и др., 2023; Москвитин, и др., 2020)

4.2 Полевое обследование и численное моделирование штормового нагона 15 ноября 2019 года на юге острова Сахалин

Штормовые нагоны весьма часто встречаются на побережье острова Сахалин, особенно в его южной части (Шевченко, и др., 1994; Шевченко, 1997; Като, и др., 2001) . Штормовой период на Сахалине наблюдается почти ежегодно в осеннее-зимний период. Нередко штормовые нагоны приводят к затоплению портовых территорий в городе Корсаков и городских улиц, прилегающих к береговой линии. Штормовые нагоны приводят к большим экономическим потерям, вызванных остановкой всех работ в портах и прибрежных мастерских. Иногда происходят весьма разрушительные штормовые нагоны; так в ноябре 1990 и 1995 г. некоторые суда выбрасывало на мель, другие разбивало о причальные стенки (рисунок 4.1).

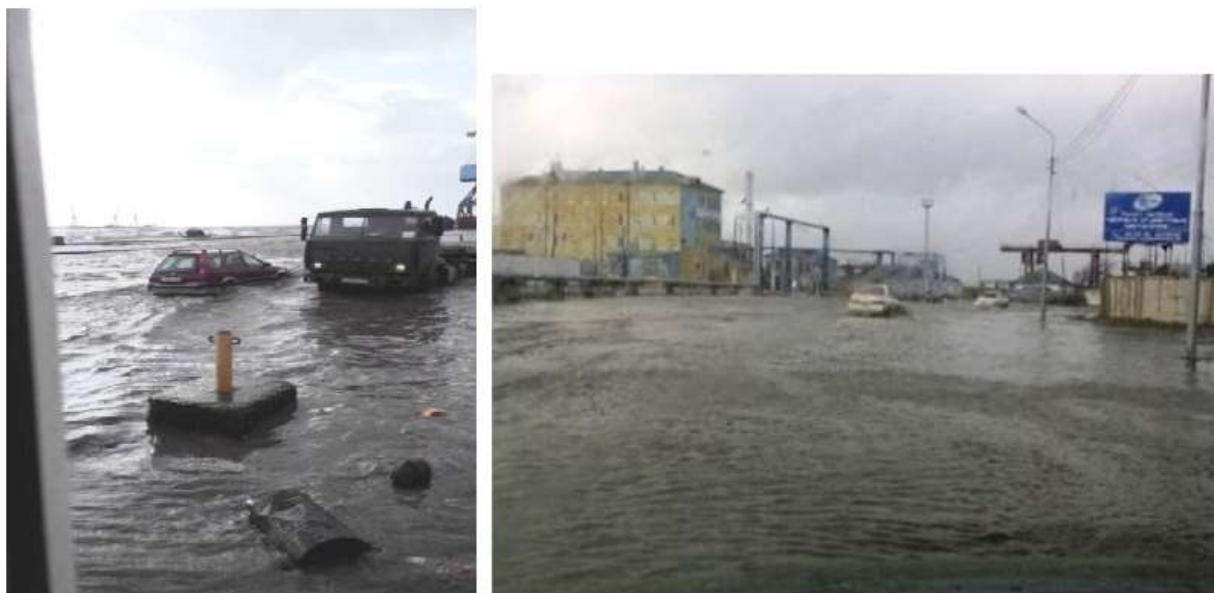


Рисунок 4.1 - Затопление порта г. Корсакова во время штормового нагона в ноябре 1995 г.

Штормовой нагон 1990 года был предметом моделирования в статье (Иванова, и др., 2015). На рисунке 4.2 приведены результаты моделирования в сопоставлении с натурными данными для нескольких пунктов Сахалина,

взяты из этой работы. Как видим, в порту г. Корсаков высоты волны превысила 80 см. Согласие данных расчета и наблюдений очень хорошее.

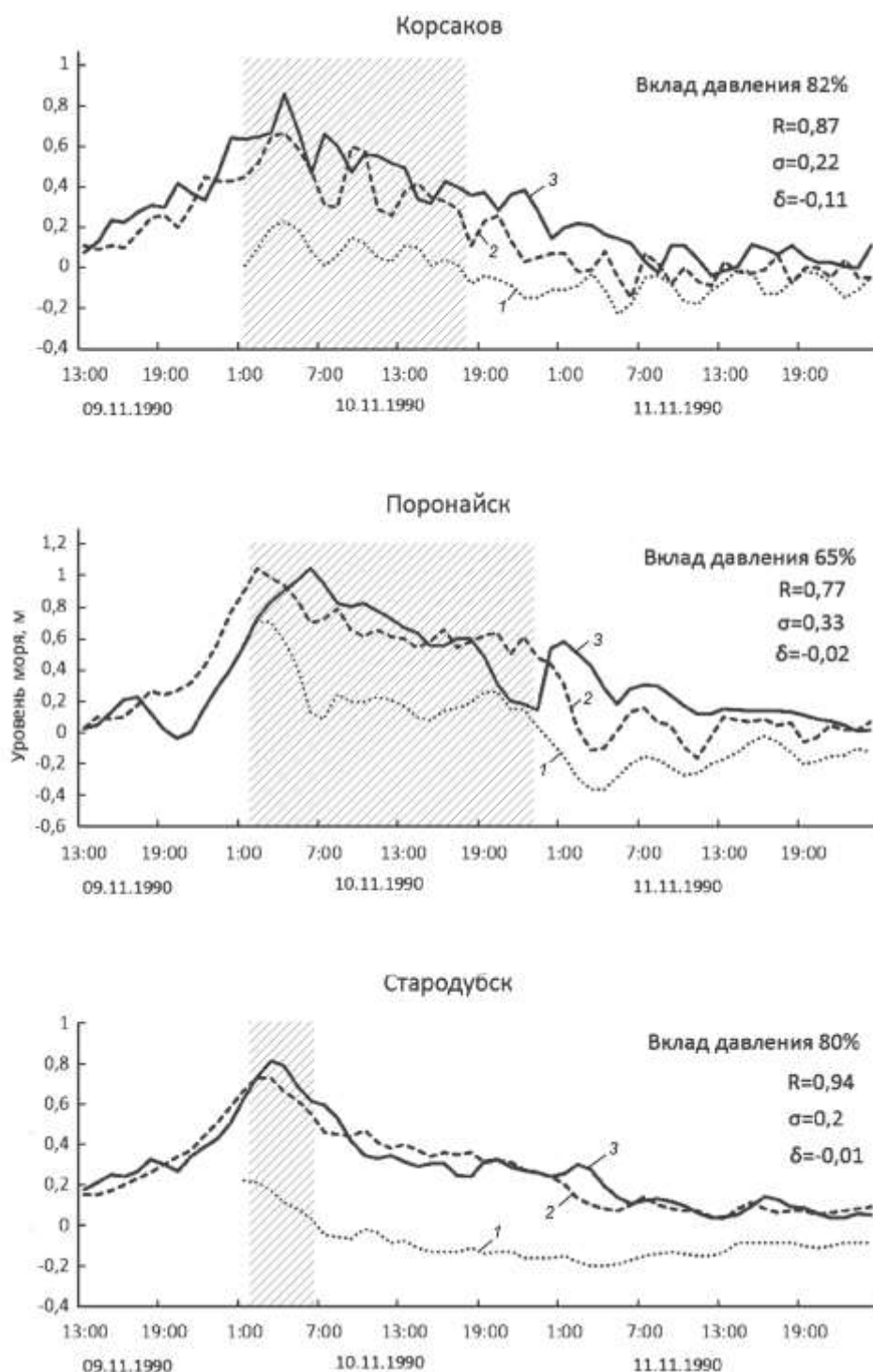


Рисунок 4.2 - Данные наблюдений и результаты моделирования штормового нагона 1990 г. в пунктах на Сахалине: 1 — модель “только ветер”, 2 — модель “давление и ветер”, 3 — наблюдения. Коэффициент корреляции (R) и систематическая ошибка (δ) рассчитаны для кривых 2 и 3, среднеквадратическое отклонение (σ) — для кривой 2. Оконтурены области, для которых рассчитан вклад атмосферного давления. Пояснения см. в тексте статьи (Иванова, и др., 2015).

Согласно статистике (Като, и др., 2001) «в южной части острова Сахалин максимальные значения высот штормовых нагонов составили около 1,4 на юго-восточном и около 1 м на южном и юго-западном участках побережья. Причем нагоны 15–16 декабря 1981 г., 9–10 ноября 1990 г. и 8–9 ноября 1995 г., когда нагонные волны достигали максимальной интенсивности, привели к очень серьезному материальному ущербу». Если говорить о г. Корсакове и прилегающей территории, то здесь максимальная высота штормового нагона оценивается в 89.7 см, а на период в 100 лет в 84.7 ± 6.8 см (Като, и др., 2001). Эти оценки были сделаны более 20 лет назад, и за это время произошло еще много случаев штормовых нагонов. Так, на рис. 4.3 показана фотография затопления порта Корсакова 7 декабря 2012 года. Такое же сильное событие произошло 15 ноября 2019 года, изучаемое в этом разделе.



Рисунок 4.3 - Затопление порта Корсаков и прилегающих улиц штормовым нагоном 7 декабря 2012 года.

Следует сказать, что анализ волнового режима в интересующем нас заливе Анива на юге острова Сахалин недавно был выполнен в работе (Мысленков, и др., 2025). По их данным, средняя многолетняя высота

значительных волн составляет до 0,5 м в северной части залива (там, где расположен г. Корсаков) и до 1 м в южной, открытой части залива. Максимальная высота значительных волн достигает 8,5 м в южной части залива и около 4–5 м в северной. Такие волны приводят к сильным штормовым нагонам на побережье вблизи г. Корсаков. В среднем, длина волны вблизи берега составляет 30 м, а период – 3 с; см., рисунок 4.4, взятый из цитируемой работы.

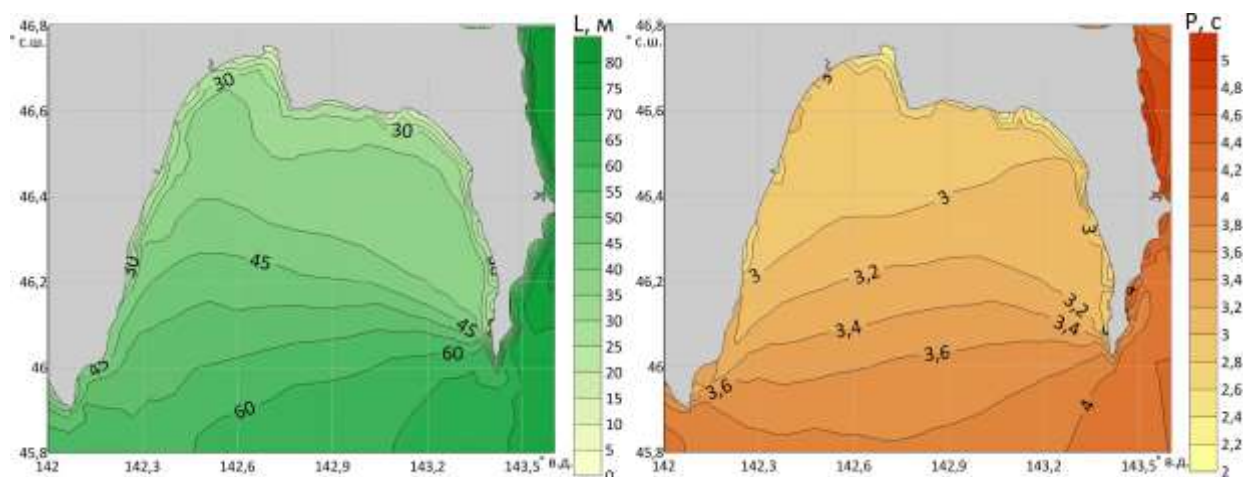


Рисунок 4.4 - Средняя многолетняя длина ветровых волн (слева) и средний многолетний период волн (справа).

4.2.1 Полевое обследование штормового нагона 2019 года

Предметом нашего анализа стал штормовой нагон 15 ноября 2019 года, затопивший портовую часть города Корсаков (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 - Затопление части порта г. Корсаков 15 ноября 2019 года

В ходе обследования проведены измерения высоты, до которой дошла вода относительно уровня моря (высота наката), и уровня воды в некоторых затопленных точках, часть фотографий приведена на рисунке 4.6. Отметим, что максимальная высота наката доходила до 1,5 м относительно уровня моря. Была затоплена значительная часть прибрежной территории. К счастью, сам город расположен на возвышенности, так что вода не смогла проникнуть в город на значительное расстояние.



Рисунок 4.6 - Фото измерений высоты наката от штормового нагона в порту г. Корсаков

Граница зоны затопления, построенная по результатам полевого обследования, показана на рисунке Рисунок 4.7. Ширина зоны затопления от уреза воды доходила до 200 м.



Рисунок 4.7 - Зона затопления от штормового нагона 15 ноября 2019 года
(белой линией отмечен GPS трек границы наката)

4.2.2 Моделирование штормового нагона 2019 года

Штормовые нагоны вызываются длинными волнами, поэтому обычно их моделирование производится в рамках уравнений теории мелкой воды. Литература по расчету штормовых нагонов достаточно объемная, и здесь мы отметим лишь несколько работ, где моделировались штормовые нагоны в морях, окружающих Россию (Фомин, и др., 2004; Фомин, и др., 2015; Иванова, и др., 2015)

В наших расчетах использовался вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС_П, созданный в рамках международной кооперации, руководителем работ с российской стороны является член-корреспондент РАН А.И. Зайцев (Зайцев, и др., 2019; Zaytsev, et al., 2019). Этот вычислительный пакет решает систему нелинейных уравнений мелкой воды в сферических координатах на вращающейся Земле с учетом силы трения и атмосферного воздействия

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN \cos \theta}{D} \right) \\
+ \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \\
- \frac{\rho_{air} C_D}{\rho_w} U_w \sqrt{(U_w^2 + V_w^2)} = fN,
\end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + \\
+ \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} - \frac{\rho_{air} C_D}{\rho_w} V_w \sqrt{(U_w^2 + V_w^2)} = -fN,
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0, \tag{4.3}$$

где η – вертикальное смещение водной поверхности относительно невозмущенного уровня; t – время; M и N – компоненты расхода воды вдоль долготы λ и широты θ ; f – параметр Кориолиса ($f = 2\Omega \sin \theta$) и Ω – частота вращения Земли (период вращения 24 часа); R – радиус Земли; $D = h(\lambda, \theta) + \eta$ – полная глубина бассейна и $h(\lambda, \theta)$ – невозмущенная глубина воды; g – гравитационная постоянная; ρ_{air} – плотность воздуха; ρ_w – плотность воды; U_w и V_w – компоненты скорости ветра (обычно измеренные на высоте 10 м от поверхности воды); C_D – коэффициент лобового сопротивления (в расчетах принимался равным 2×10^{-3}); n – коэффициент шероховатости дна (так называемая формула Маннинга). Мы приняли $n = 0.015 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$, что характерно для естественного дна (песок, мелкая галька).

Начальные условия соответствуют невозмущенному состоянию моря

$$M(\lambda, \theta, t = 0) = N(\lambda, \theta, t = 0) = 0, \eta(\lambda, \theta, t = 0) = 0 \tag{4.4}$$

Как известно, атмосферными источниками морских волн является переменное атмосферное давление и ветровые напряжения. Отметим, что мы не используем в наших расчетах данные об атмосферном давлении, поскольку его градиент на рассматриваемой акватории мал. В качестве атмосферного возмущения мы используем только касательное напряжение ветра – последние слагаемые в левой части уравнений (4.1) и (4.2). Данные о временном и пространственном распределении скорости ветра на высоте 10 м взяты из базы системы анализа прогноза климата (CFSR) (National Centers for Environmental Information). Распределение скорости ветра 14, 15 и 16 ноября 2019 года показано на рисунке 4.8.

Оно показывает, что в заливе 14 ноября преобладает ветер юго-восточного направления со средней скоростью около 10 м/с. Затем 15 ноября наблюдается усиление до 25-30 м/с и смена направления на западное. 16 ноября скорость стихает до 15 м/с.

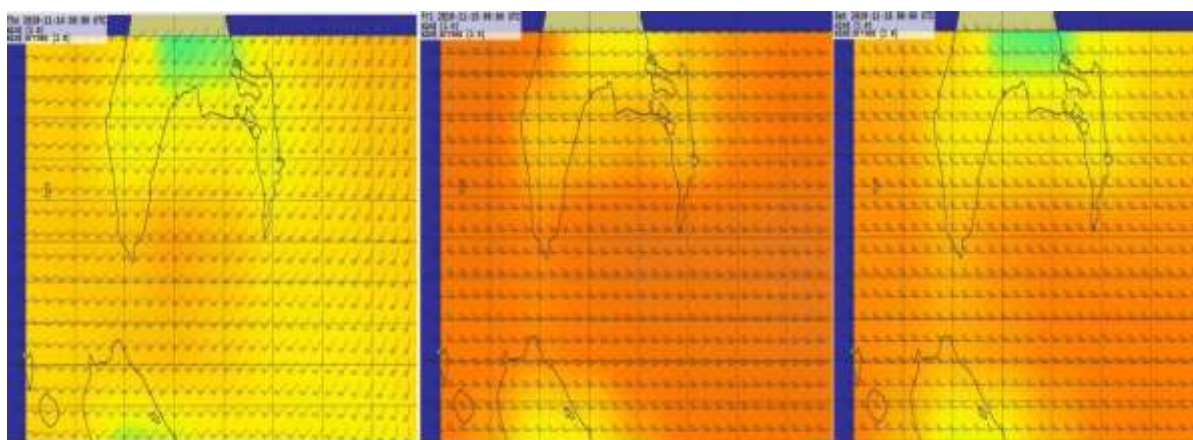


Рисунок 4.8 - Пространственное распределение ветра на высоте 10 м в (период 14.11.2019-16.11.2019 (слева направо) по данным CFSR)

Для численного моделирования использовалась батиметрия залива Анива, которая была получена из 30-секундной батиметрия Мирового океана (General Bathymetric Chart for the Oceans) с добавлением более точной прибрежной батиметрии, которая была взята из различных источников. Шаг по пространству в основной части акватории залива Анива составил около 150 м. В прибрежной зоне вблизи города Корсаков мы использовали вложенные

сетки с переходом к шагам до 20 м. Расчетная область представлена на рисунке 4.9.

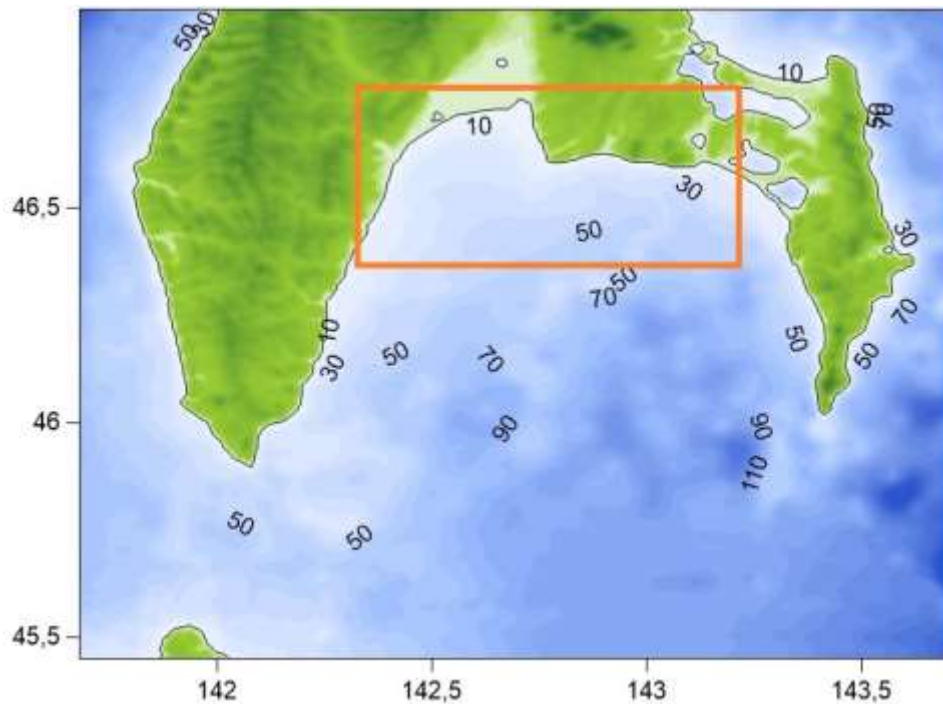


Рисунок 4.9 – Расчетная область залива Анива, использованная в численном моделировании

В южной части залива Анива на границах расчетной области использовались условия свободного ухода волн из акватории в рамках линейной теории мелкой воды.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial \eta}{\partial l} \Big|_{\Gamma} = 0, \quad (4.5)$$

$$u_l|_{\Gamma} = \sqrt{\frac{g}{h}} \eta|_{\Gamma}, \quad (4.6)$$

где скорость u и градиент уровня волны вычисляются вдоль направления l , перпендикулярного границе Γ расчетной области. Такое приближение оправдано, поскольку волны вдали от берега являются линейными и трение о дно на большой глубине очень мало.

В северной части Анивского залива на суше приняты граничные условия полного отражения, что эквивалентно вертикальной стенке на глубине 5 м

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial l} \right|_{\Gamma_6} = 0 \text{ или } u_l|_{\Gamma_6} = 0, \quad (4.7)$$

где Γ_6 – «сухопутная» граница расчетной области – последние точки в мористой части. В районе гор. Корсаков учитывался накат волн на берег с учетом граничного условия

$$D|_{L(x,y,t)} = h(x,y) + \eta(x,y,t)|_{L(x,y,t)} = 0, \quad (4.8)$$

откуда и определялся размер затопляемой зоны на побережье $L(x,y,t)$, а также высота наката волн

$$R = \max_t \eta(x,y,t)|_{L(x,y,t)}, \quad (4.9)$$

Моделирование проводилось на протяжении трех суток действия сильного ветра. Особенно сильно уровень моря менялся 15 ноября в течение нескольких часов (рисунок 4.10). Распределение вариаций уровня воды за все время моделирования (трое суток) показывает, что максимальные значения сосредоточены в северо-западной части залива Анива, и они превышают 1 м (рисунок 4.11).

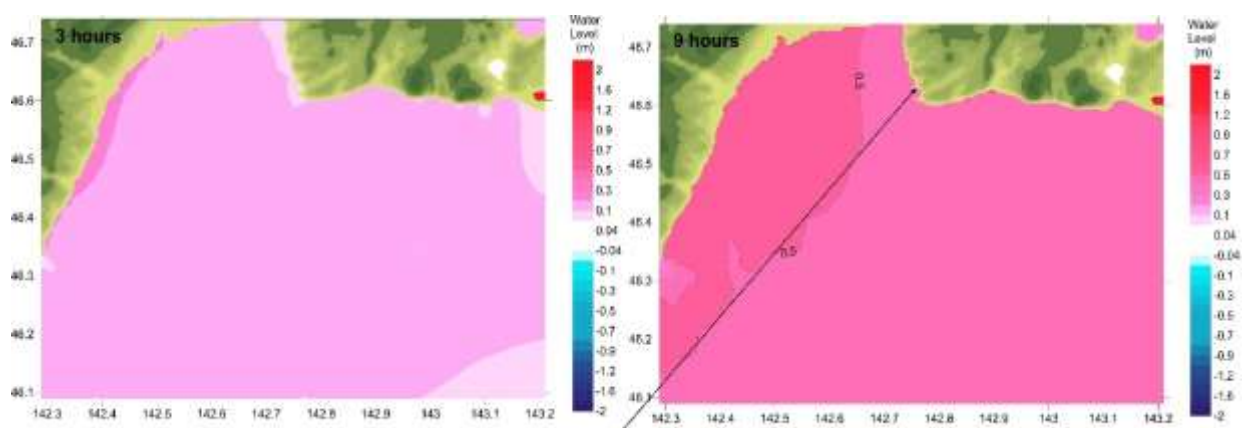


Рисунок 4.10 - Распределение смещений водной поверхности во время шторма 15 ноября 2019 года, через три часа (слева) и девять часов (справа), после начала шторма.

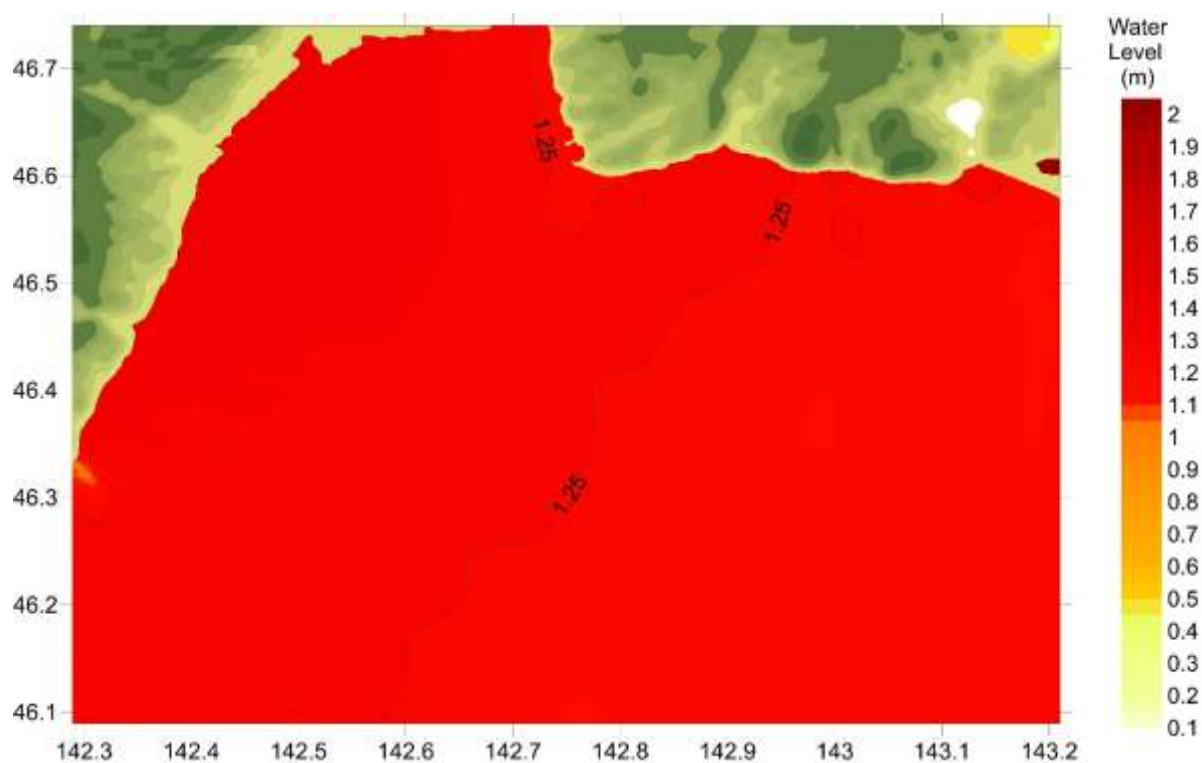


Рисунок 4.11 - Пространственное распределение максимумов подъема уровня воды за 72 часа моделирования

Особо выделим результаты расчетов для порта гор. Корсаков. Через 20 часов уровень воды в порту поднялся примерно на 1.7 м (расчетное значение), и вода начала спадать только через сутки (рисунок 4.12). Рассчитанные скорости течений достигают 2 м/с, и они могут представлять опасность для судов и вызывать разрушения на берегу.

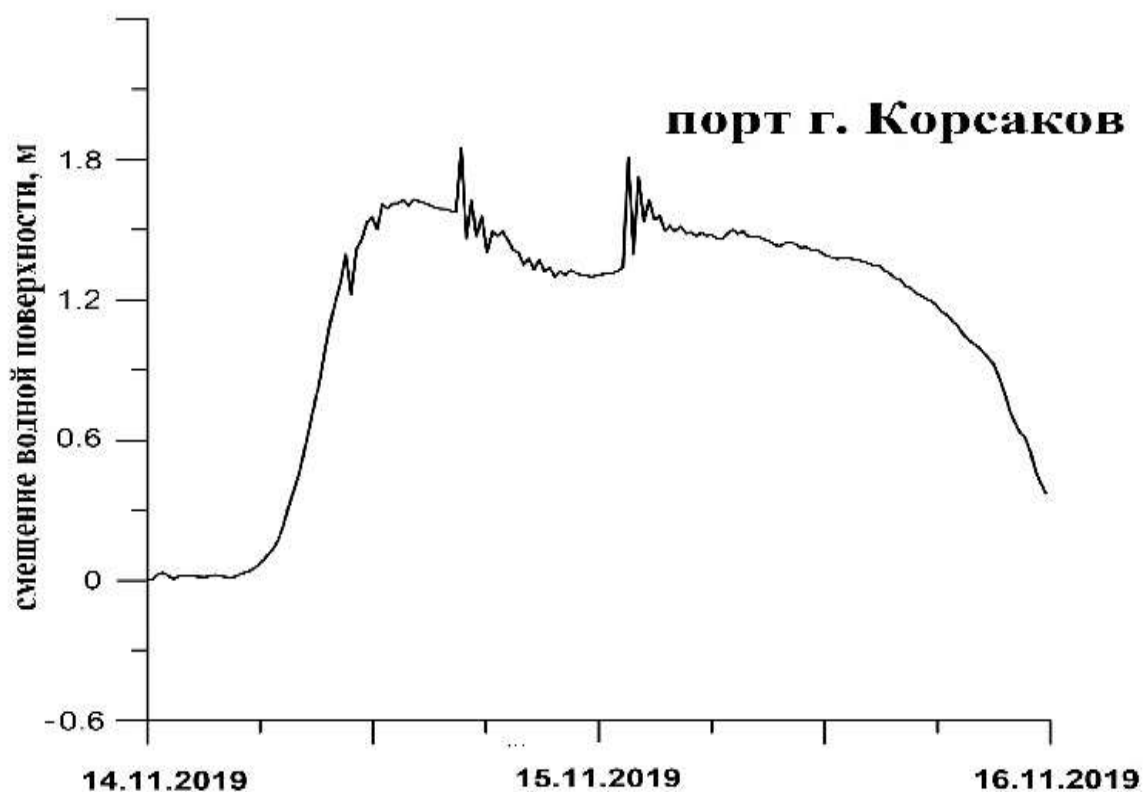


Рисунок 4.12 - Рассчитанная мареограмма в порту Корсаков

Штормовой нагон на берег рассчитывался только в районе города Корсаков с учетом вложенных сеток. Рассчитанное распределение высот штормового нагона вдоль побережья приведено на рисунке 4.13. Максимальная высота нагона составляет 1,5 м, что превышает измеренные значения примерно на 0.5 м. Такое расхождение вполне возможно, поскольку использованные в расчетах карты приводного ветра задаются с большим интервалом во времени и могут не соответствовать локальным значениям ветра в промежутках. В то же время ширина зоны затопления, согласно расчетам, составляет 200 м от линии уреза, что соответствует наблюдениям. Это объясняет полное затопление портовой территории во время штормового нагона.

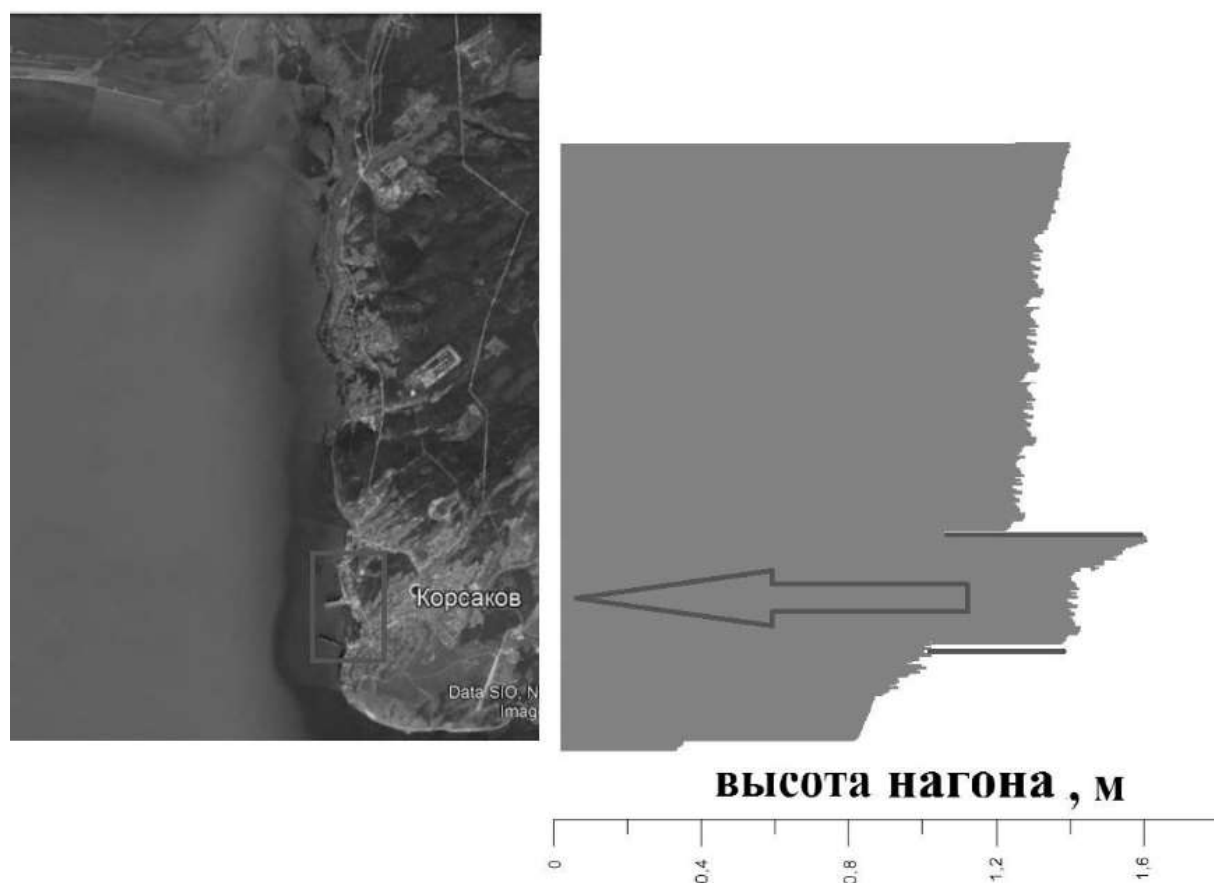


Рисунок 4.13 – Рассчитанное распределение высот нагона вдоль побережья. Квадратом помечена часть, где проводили измерения

Рассчитанные характеристики штормовых нагонов в прибрежной зоне Анивского залива можно использовать для оценки их силового воздействия на опоры малого диаметра.

Опоры малого диаметра в численных моделях длинноволновых процессов играют роль подсеточных эффектов, и они не влияют на структуру волнового поля. Поэтому нет необходимости в модификации численной модели, что существенно упрощает расчеты силового воздействия, которое определяется локальными характеристиками волнового поля. Приведем здесь набор известных формул механики сплошных сред, определяющих силы и моменты на опоры малого диаметра; эти формулы содержатся также в Своде правил СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», утвержденного приказом Минстроя Российской Федерации 23 июня 2017 года, № 915/ПР (Минстрой России, 2017)

(этот документ разработан при участии моего научного руководителя член-корреспондента РАН А.И. Зайцева.

Так, сила гидродинамического давления на вертикально стоящую опору в воде (ее длина превышает глубину моря, и ее вершина поднимается над поверхностью воды) есть

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_w g D S, \quad (4.10)$$

где ρ_w – плотность морской воды; D – полная глубина воды и S – поперечный размер преграды (по направлению распространения волны). Давление определяется гидростатическим значением и ее волновая часть пропорциональна высоте волны. Отсюда следует, что расчет силы давления при известной высоте волны не представляет трудностей, и все характеристики сооружения (диаметр, или ширина стенки) определяют только численный коэффициент в формуле (4.11).

Сооружение в вязком потоке испытывает еще и силу лобового сопротивления (силу Моррисона), которую обычно аппроксимируют формулой

$$F_f = \frac{1}{2} \rho_w C_D u^2 S, \quad (4.11)$$

где C_D - коэффициент лобового сопротивления, который находится из справочников и зависит от формы преграды, а также режима течения (турбулентное или ламинарное); u – модуль скорости течения в расчетной точке, находимый без учета конструкции. Таким образом, и силу лобового сопротивления также легко посчитать, используя данные численного моделирования волн в акватории. В принципе, в нестационарном волновом потоке возникает еще сила инерции, связанная ускорением, однако в приближении длинных волн эта компонента мала.

Соотношение двух компонент сил воздействия на одиночную преграду малого диаметра, как это видно из формул (4.12) и (4.13), определяет так называемое “гидродинамическое воздействие” (Ozer, et al., 2011)

$$HD = \frac{F_f}{F_h} = C_D \frac{u^2}{g D} = C_D F_R^2, \quad (4.12)$$

которое пропорционально числу Фруда

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gD}} \quad (4.13)$$

Как видим, число Фруда определяется только параметрами волнового процесса и не зависит от конкретных особенностей вертикальной преграды, если ее поперечный размер достаточно мал. Расчет числа Фруда позволяет судить о соотношении сил воздействия на сооружения. Этот параметр «встроен» в программный комплекс НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE). Результаты вычислений квадрата числа Фруда для Анивского залива во время штормового нагона 15 ноября 2019 года представлены на рисунке 4.14. Они показывают, что числа Фруда во всей акватории остаются малыми (меньше единицы), причем наибольшие значения получены для пунктов севернее и южнее гор. Корсаков. Отсюда следует, что сила гидродинамического давления определяет главным образом воздействие штормовых нагонов на вертикальные опоры малого диаметра.

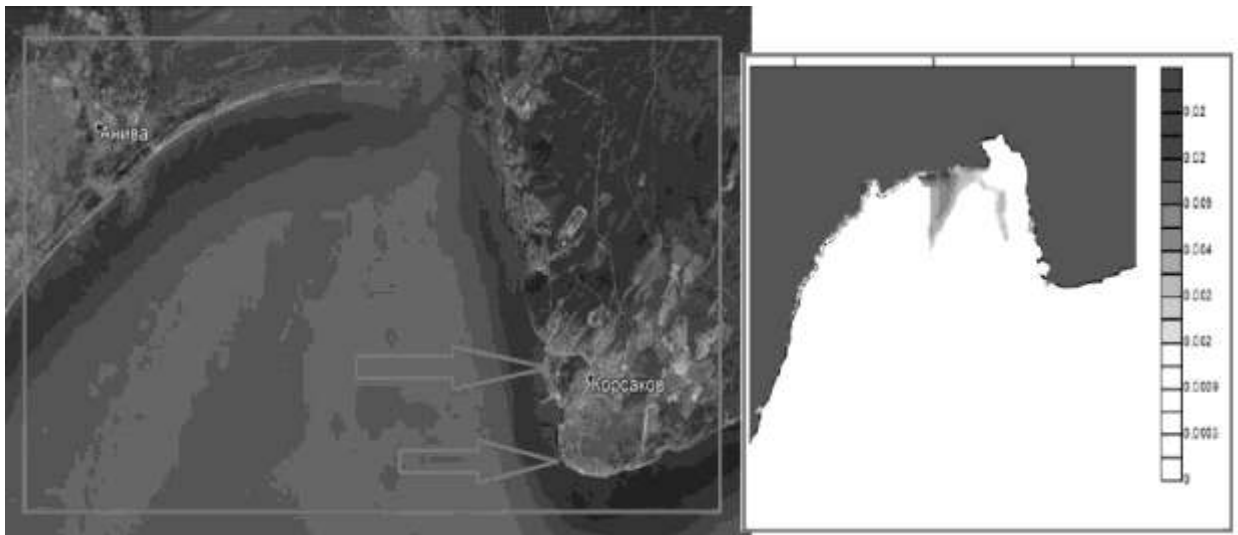


Рисунок 4.14 - Рассчитанное значение квадрата числа Фруда для шторма 15.11.2029 г. (стрелками показаны наибольшие значения на побережье гор. Корсаков)

В последнее время для оценки силового воздействия волн на сооружения стали использовать следующую характеристику, названную моментом, имеющей смысл кинетической энергии волны (Park, et al., 2013).

$$Momentum = \sqrt{(MU)^2 + (NV)^2}, \quad (4.14)$$

где M и N - компоненты расхода воды, U и V – скорости течений в волне вдоль перпендикулярных направлений. Результаты вычисления момента (4.14) для шторма 15 ноября 2019 года представлены на рисунке 4.15. Эта величина размерная $\text{м}^3/\text{с}^2$. Легко показать, что в малоамплитудном приближении для бегущей волны имеем следующую асимптотику для величины момента

$$Momentum = g\eta^2, \quad (4.15)$$

и для волн с амплитудой 0.5 м величина момента оказывается равной $4 \text{ м}^3/\text{с}^2$. В наших расчетах его величина оказывается меньше единицы, так что кинетическая энергия волнового потока оказывается достаточно малой. В сущности, это коррелирует со слабостью силы лобового сопротивления, отмеченной выше.

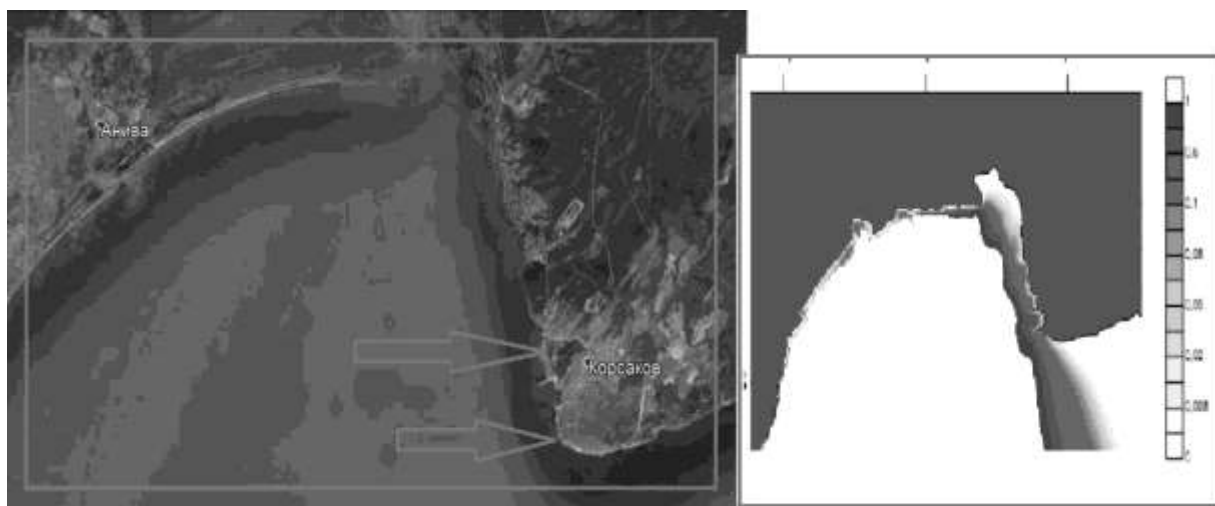


Рисунок 4.15 -Значение момента жидкости во время шторма 15.11.2019 (стрелками показаны наибольшие значения на побережье гор. Корсаков)

4.3 Оценка воздействия опасных волновых процессов в заливе Мордвинова (остров Сахалин)

Залив Мордвинова на острове Сахалин (рисунок 4.16) подтвержден действиям циклонов, траектория которых каждый раз разная. Сила воздействия штормов на прибрежную зону от данных циклонов, естественно, различна. Основное влияние на это оказывает траектории их движения, а также размеры циклона. Целью исследований является анализ путей движения волн и выделение тех, которые оказывают влияние на усиление волнения в заливе Мордвинова.

В различные годы количество и интенсивность проходимых циклонов и волны, вызванные ими, в Охотском море различны. Анализ исторической информации (Шевченко, 1997) показал, что в силу географического расположения исследуемого залива основное влияние на него оказывают циклоны, которые проходят непосредственно над акваторией залива, двигающиеся вдоль побережья Курильских островов (с обязательным расположением его части в акватории Охотского моря), а также циклоны, проходящие через акваторию Охотского моря (особенно его южную и центральную части).

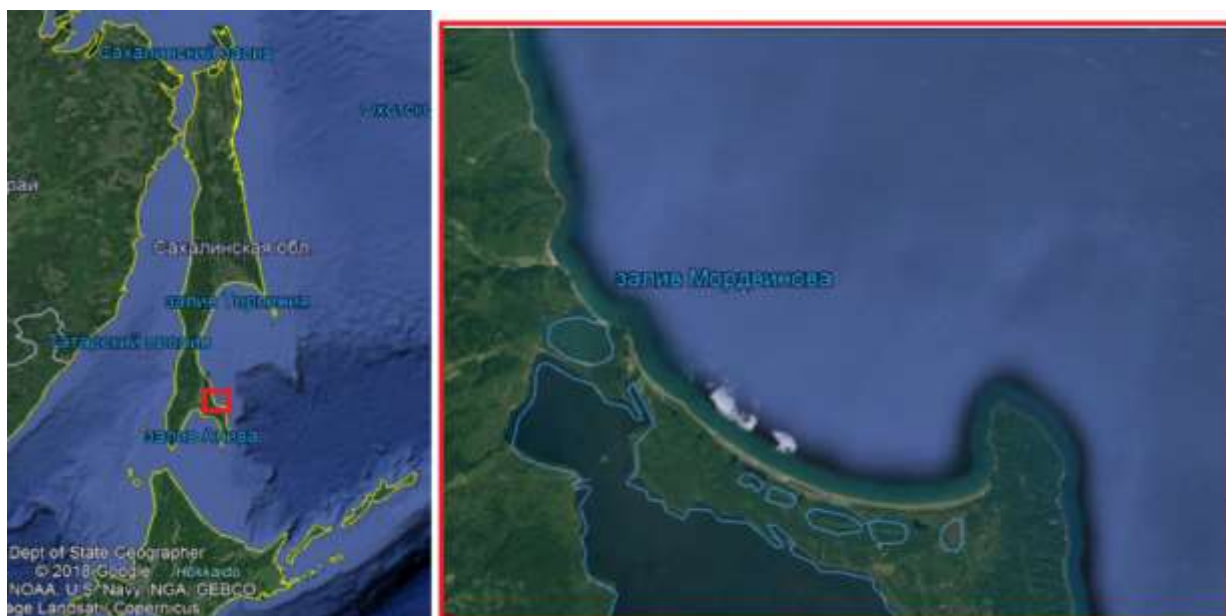


Рисунок 4.16 - Карта залива Мордвинова (о. Сахалин)

В нашем исследовании мы решили не анализировать движение циклонов, что требует больших компьютерных ресурсов, а взять морскую волну с фиксированными параметрами, входящую в расчетную область под разными направлениями. Со стороны открытой границы на вход в залив задавалась волны с периодами, высотами и скоростями, согласно измеренным данным. Ставился численный «волногенератор».

Для выполнения численных расчетов распространения длинных волн, включая цунами, по акватории Охотского моря использовался программный комплекс «NAMI DANCE» (Зайцев, и др., 2019; Zaytsev, et al., 2019), рекомендованный ЮНЕСКО для расчетов распространения волн цунами. Этот комплекс позволяет проводить численные расчеты как в режиме реального времени в случае сильного землетрясения и угрозы цунами, так и расчеты исторических и гипотетических событий с целью изучения особенностей распространения длинных волн по акватории и накат их на побережье. Особенностью проведения таких численных расчетов является возможность расчета волновых характеристик с учетом потенциальной инфраструктуры, оценить критические режимы волнового воздействия.

Мы не будем приводить здесь снова уравнения, решаемые данным вычислительным комплексом. Они совпадают с (4.1) - (4.3) без учета атмосферного воздействия. Хотя эти уравнения не содержат дисперсию, однако, в вычислительном комплексе заложена возможность создания численной дисперсии; см. для деталей (Зайцев, и др., 2019; Zaytsev, et al., 2019). Поэтому фактически численные расчеты распространения волн проводились в рамках нелинейно-дисперсионной теории (уравнения Буссинеска) в сферических координатах.

Для моделирования использовалась 30-секундная батиметрия Мирового океана (General Bathymetric Chart for the Oceans) с добавлением более точной прибрежной батиметрии залива Мордвинова, которая была получена из различных источников (рисунок 4.17).

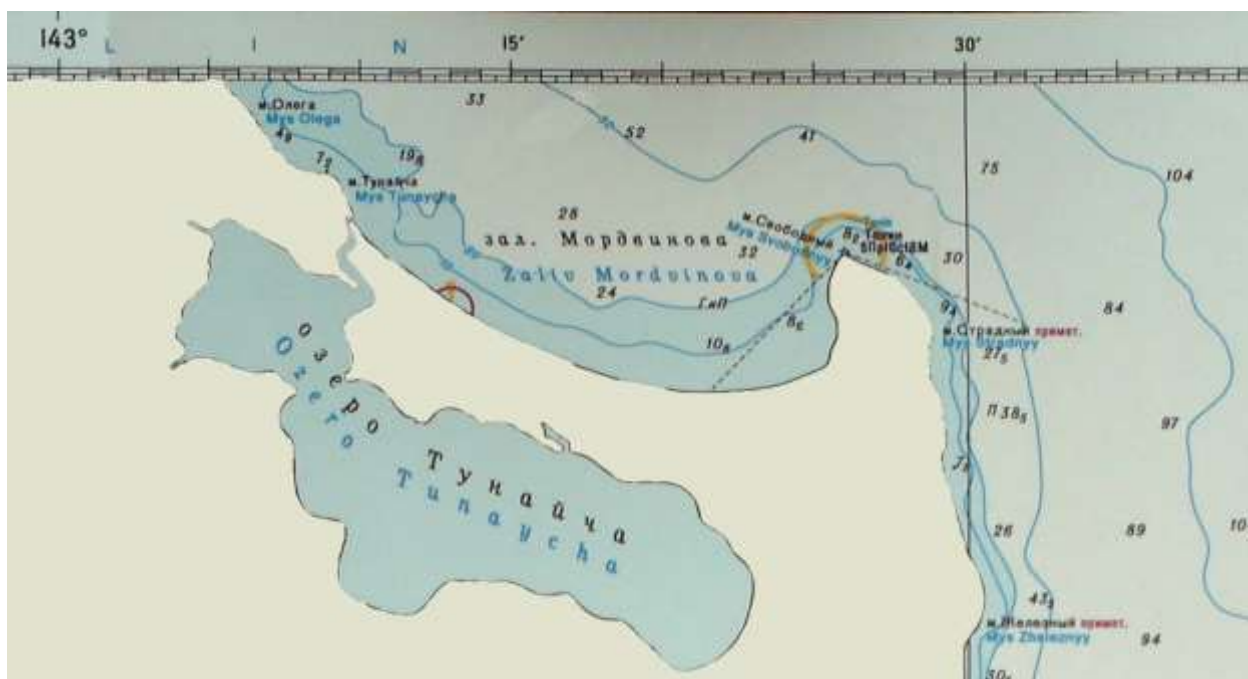


Рисунок 4.17 – Батиметрия залива Мордвинова.

С помощью встроенного GPS на цифровую карту залива Мордвинова были нанесены объекты прибрежной инженерии. Проведена серия вычислительных экспериментов сценариев распространения и воздействия волн на прибрежную зону, как в реальных условиях, так и с учетом потенциальных объектов прибрежной инженерии.

Результаты расчетов волнового режима показали, что при подходе волны с востока (рисунок 4.18) максимальные значения амплитуд волн получены к северу от п. Охотское вдоль побережья и южнее м. Свободный. В самом же заливе Мордвинова наибольшие волны проявились у самого берега. По сравнению с прилегающей акваторией, расположенной севернее и южнее залива Мордвинова, в самом заливе высоты волн были меньше. Это связано с тем, что выступающая часть мыса Свободный, является препятствием на пути распространения волн. В результате этого, максимальные высоты волн расположены в районе мыса и к югу от него с восточной стороны побережья, а с западной стороны от мыса Свободный и в самом заливе волны меньше. Максимальное значение амплитуды волны в 6.9 м достигается на западной части побережья залива. Зум на рисунке 4.18 справа демонстрирует проникновение волн в озеро Тунайча через протоку Красноармейскую.

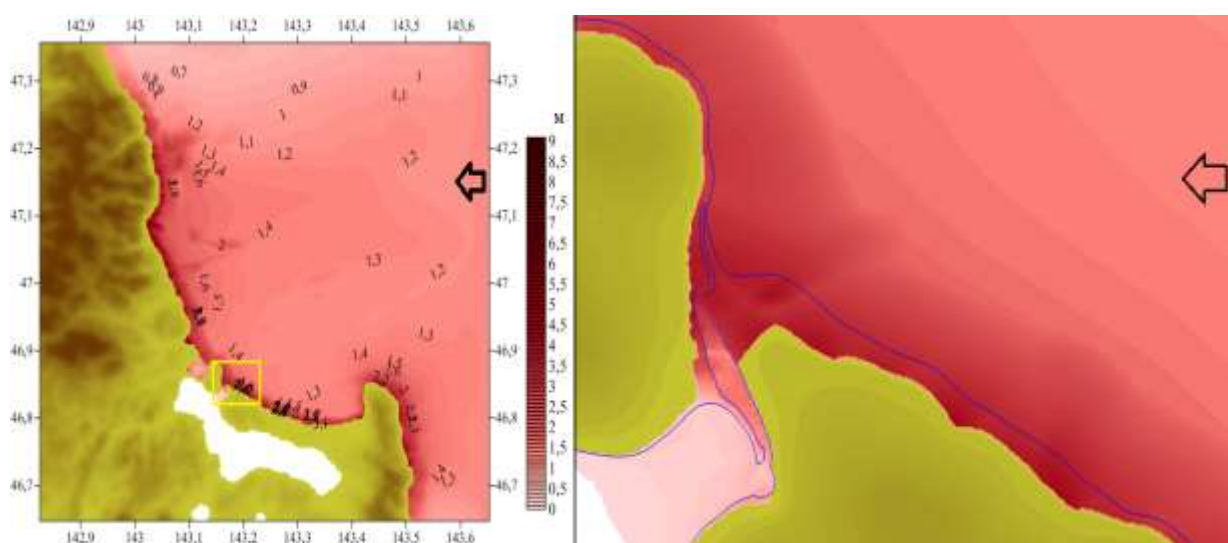


Рисунок 4.18 - Распределение максимальных значений амплитуд волн при подходе волн с востока. (Стрелкой показано направление распространения источника) На правом рисунке представлен зум распределения волн в окрестности протоки Красноармейской, демонстрируя, что волны проникают в озеро Тунайча.

При подходе волны с севера (рисунок 4.19, слева) максимальные значения амплитуд волн выше, чем в предыдущем сценарии и составляет 8.5 м. В самом же заливе Мордвинова максимальные значения амплитуд волн (около 8 м) наблюдаются в районе проток в озера лагунного

типа (Тунайча и Изменчивое), расположенные в южной части залива. И здесь волна заходит в озеро Тунайча (рисунок 4.19, справа).

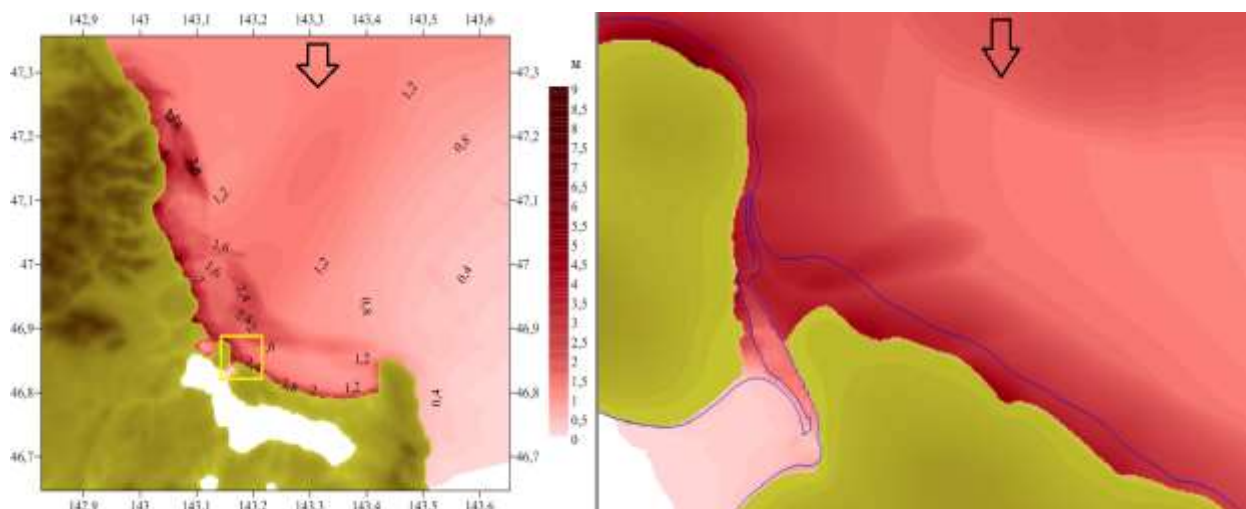


Рисунок 4.19 - Распределение максимальных значений амплитуд волн при подходе волн с севера. Стрелкой показано направление распространения волн

Наряду с вычислением высот волн, мы выполнили также расчеты числа Фруда, характеризующее отношение сил лобового сопротивления к силе гидродинамического давления; см. формулу(4.13) в предыдущем разделе. Результаты расчетов квадрата числа Фруда для залива Мордвинова представлены на рисунках 4.20 и 4.21 . Они показывают, что вблизи берега числа Фруда больше единицы, так что сила лобового сопротивления будет преобладающей для оценки воздействия волн на опоры небольшого диаметра. Особенно сильно возрастает число Фруда, если волны подходят с севера к протоке Красноармейская. Мы специально приводим эти рисунки в различных масштабах, демонстрируя, что волны, проникают в озеро Тунайча через протоку Красноармейскую, заливая ее берега.

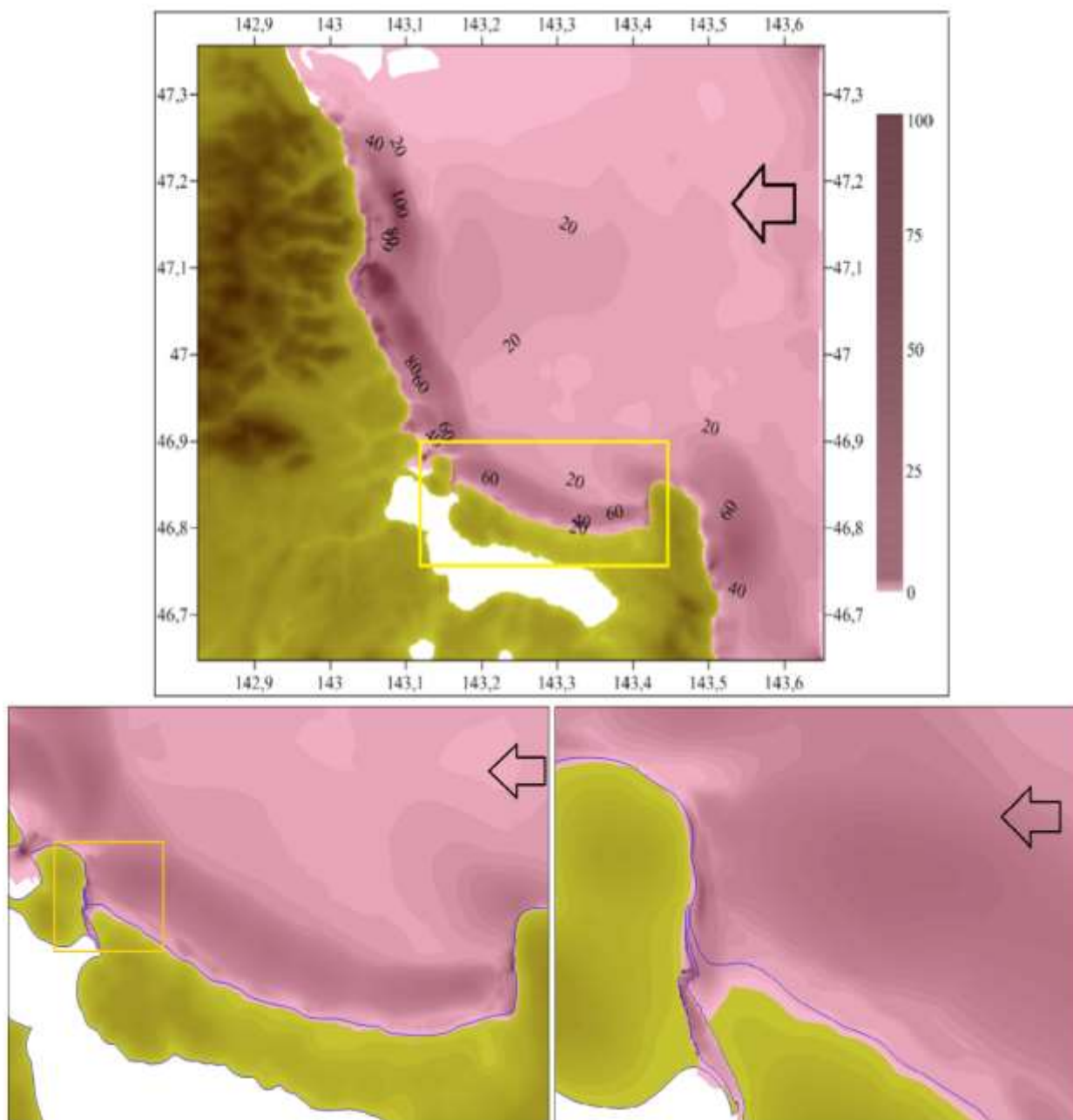


Рисунок 4.20 - Рассчитанное значение квадрата числа Фруда при подходе волн с востока. Внизу представлен зум рисунка, демонстрирующий проникновение волн в озеро Тунайча.

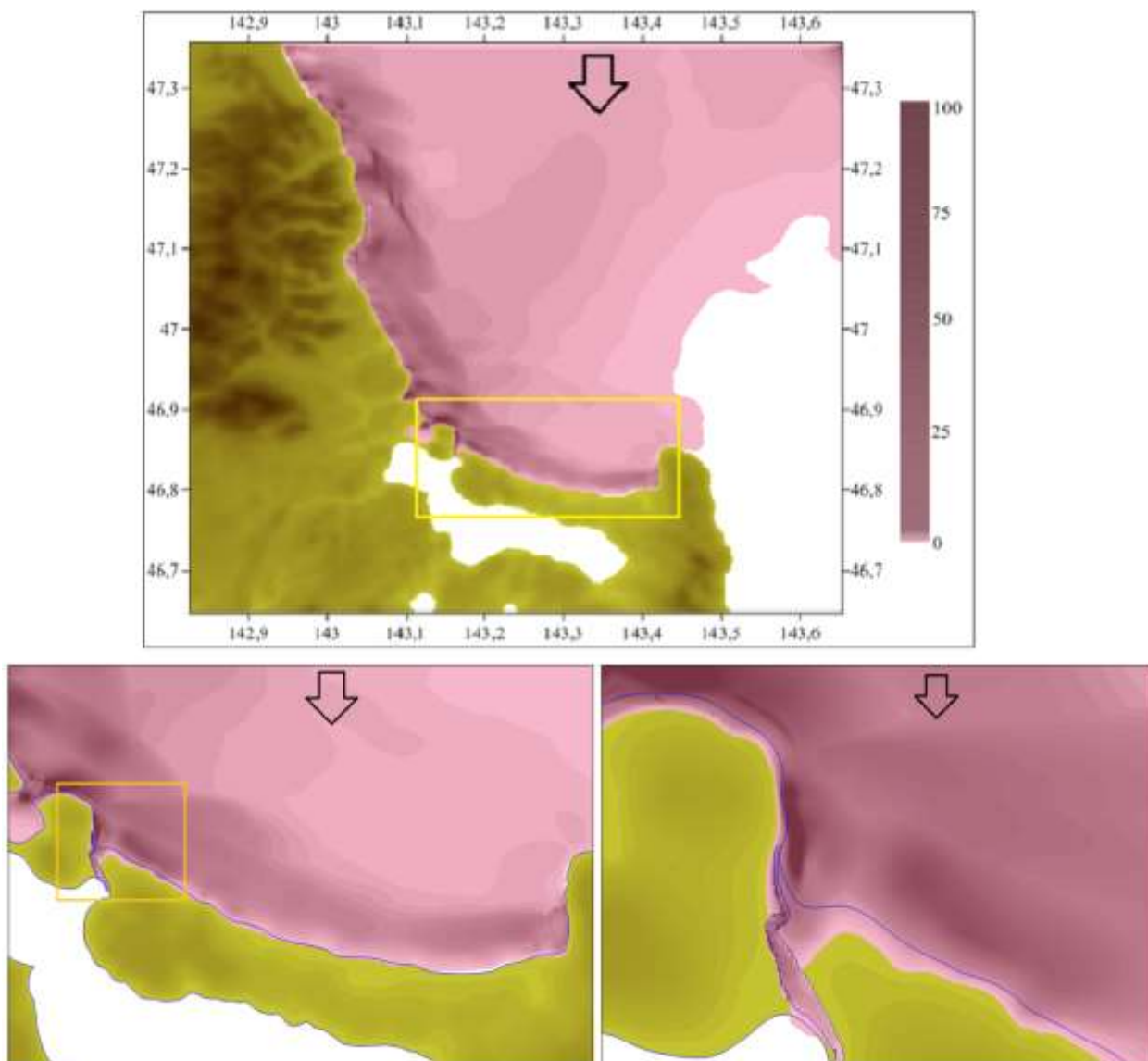


Рисунок 4.21- Рассчитанное значение квадрата числа Фруда при подходе волн с севера. Внизу представлен зум рисунка, демонстрирующий проникновение волн в озеро Тунайча.

Выполненные расчеты легли в основу инженерного проекта, направленное на улучшение экологического состояния озера Тунайча. Даны рекомендации по углублению и укреплению русла протоки. Озеро Тунайча расположено в юго-восточной части о. Сахалин. Его площадь составляет 174 км², длина 29 км, ширина 6 км. Данное озеро лагунного типа, соленое (рисунок 2.5). Экологические проблемы озера Тунайча обусловлены отсутствием вентиляции его придонных водных слоёв холодными водами Охотского моря, присутствие которых обязательно для сохранения биообразования и экологического равновесия в водах озера. Основной причиной сложившейся ситуации является обмеление пролива Красноармейский, который соединяет

озеро с заливом Мордвинова. В зимне-весенний период, когда устанавливается лед на озере Тунайча, в проливе Красноармейский и в прибрежной части залива Мордвинова водообмен между морем и озером значительно уменьшается. А в период становления торосов в устье пролива Красноармейский водообмен и вовсе прекращается (карта пролива Красноармейский изображена на рисунке 2.8).

Уже рисунки, приведенные выше, показали, что волны проникают в озеро Тунайча через протоку Красноармейскую. Более детально этот процесс исследован с учетом наката волн на реально существующую топографию береговой зоны. При входе в залив волны с востока (рисунок 4.22) максимальная высота наката 5.7 м наблюдается западнее протоки Красноармейская. Максимальная зона затопления почти 200 м. Коса со стороны озера Тунайча (рисунок 4.22 внизу справа) затапливаются волнами, способствуя вентиляции вод озера.

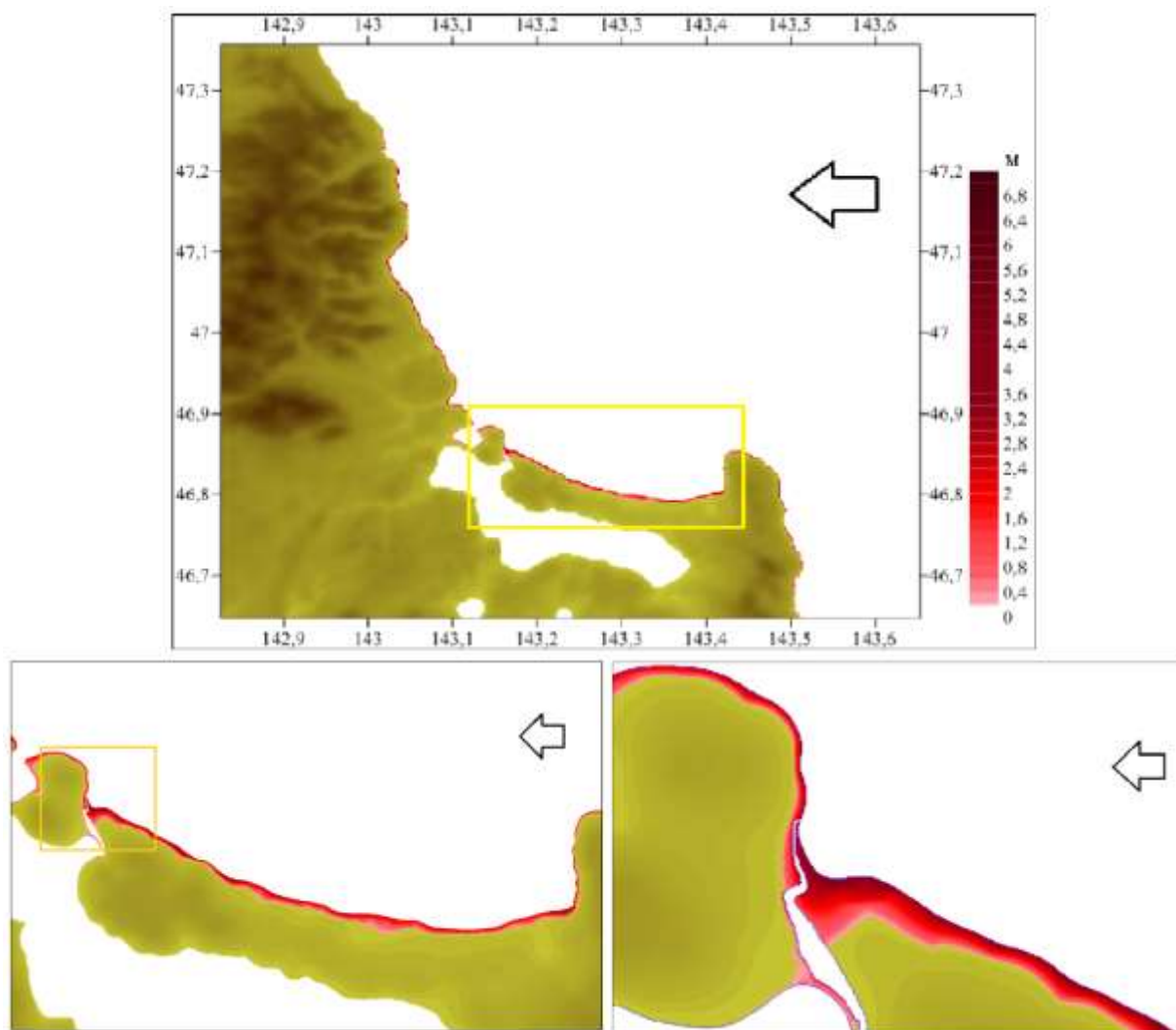


Рисунок 4.22 - Зона затопления при подходе волн с востока. Последовательно даны зумы с увеличивающимся масштабом.

При входе в залив волны с севера (рисунок 4.23) максимальная высота наката 6.7 м наблюдается в районе протоки Красноармейская. Максимальная зона затопления немногим менее 200 м. И здесь хорошо видно затопление протоки Красноармейская и проникновение волн в озеро Тунайча.

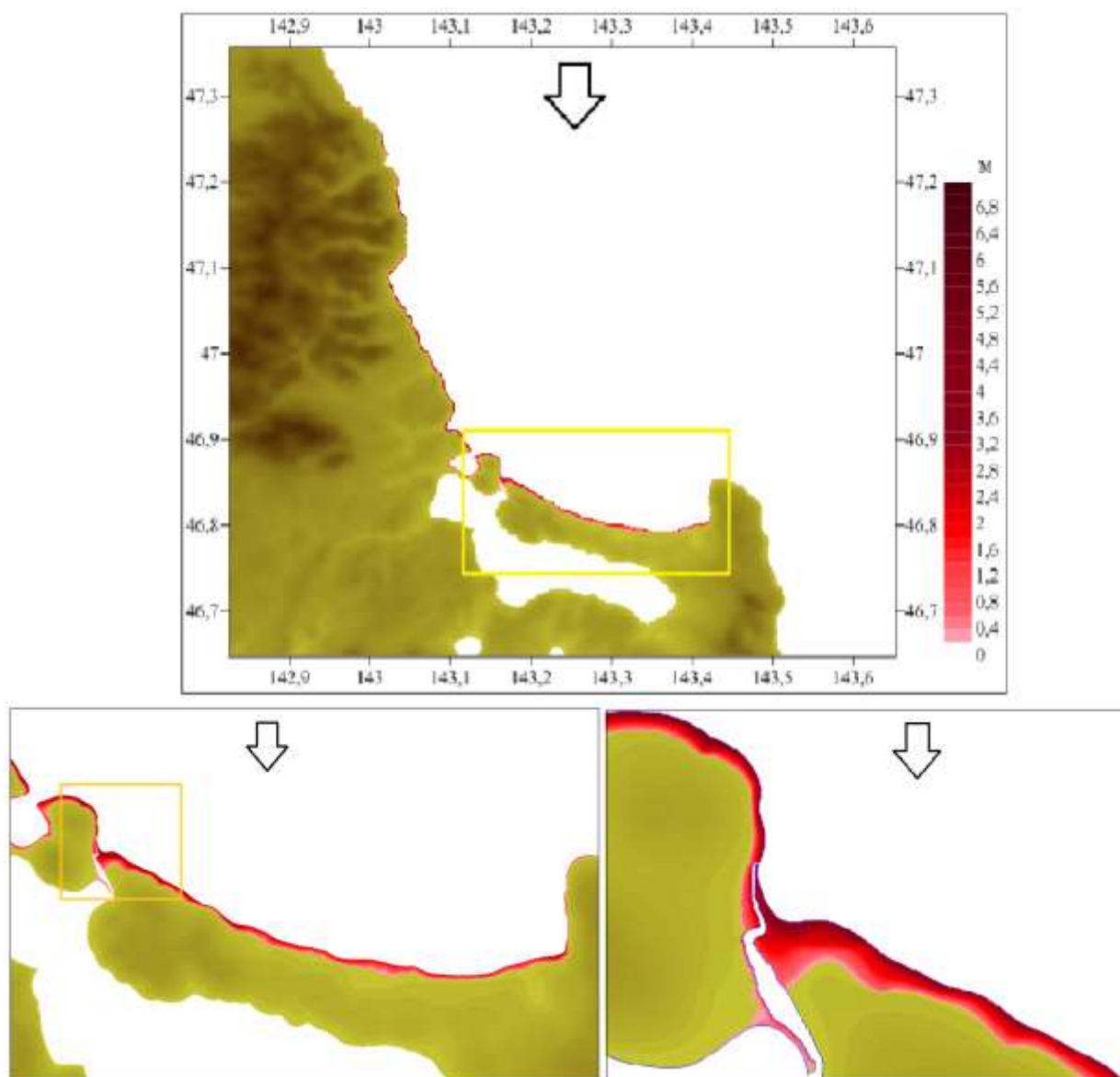


Рисунок 4.23 - Зона затопления при подходе волн с севера. Последовательно даны зумы с увеличивающимся масштабом.

Таким образом, если проходящие циклоны генерируют волны с амплитудами более 3 м, то волны проникают в озеро Тунайча через протоку Красноармейская. Скорости течения достаточно велики (о чем свидетельствуют большие значения числа Фруда), и это означает, что именно в этом районе будут происходить размывы побережья, учитывая донный материал и критические скорости. Это может приводить к «закупорке» протоки Красноармейской. Чтобы препятствовать этому процессу, форма устанавливаемого при входе барьера должна быть направлена не только вдоль

побережья, но и закрывать побережье с севера, так как именно при движении волнения с севера происходит наибольшее воздействие на эту часть побережья. С какой бы стороны не пришли длинные волны (при прохождении циклона или цунами), они будут усиливаться у побережья залива в одних и тех же районах. Однако, при подходе волн с севера колебания уровня моря увеличиваются еще и на входе в залив (примерно на широте расположения мыса Свободный). Учитывая особенности батиметрии залива, можно сделать вывод, что основное влияние на усиление волнового воздействия (увеличение высот волн и их воздействие на побережье) оказывают отражение волн от побережья и резонансные характеристики самого залива.

Результаты расчетов выявили, что в силу географического расположения исследуемого залива основное влияние оказывают циклоны, которые проходят непосредственно над акваторией залива, двигаются вдоль побережья Курильских островов (с обязательным расположением его части в акватории Охотского моря), а также циклоны, проходящие через акваторию Охотского моря (особенно его южную и центральную части). Это подтверждает представленные выше результаты численных расчетов воздействия на побережье длинных волн, движущихся с востока и севера, в районе залива Мордвинова. Из анализа их проявления следует, что в самом заливе не происходит значительного усиления и высоты волн не увеличиваются у побережья так сильно, как это происходит в некоторых других заливах. Распределение числа Фруда, который оказывается большим и, следовательно, волновой поток является высокоскоростным, в заливе Мордвинова показывают, что коса в районе протоки Красноармейская будет подвержена более сильному разрушительному воздействию волн при приходе сильных штормовых волн с севера или северо-востока. Так же эти волны приведут к возможным разрушениям дороги вдоль северной части залива. Волны с востока окажут влияние на западное побережье залива, однако эта часть практически не урбанизирована.

Результаты исследования, суммированные в данном разделе, использовались при выполнении НИР «Комплексное обследование памятника природы регионального значения «Озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем» (Москвитин, и др., 2022).

4.4 Выводы к четвертой главе

Во четвертой главе представлены результаты численных исследований гидродинамики поверхностных волн охотоморского региона.

- Проведено полевое обследование результата штормового нагона, случившегося 15 ноября 2019 года в г. Корсакове на юге Сахалина. Выполнено численное моделирование этого события в рамках нелинейной теории мелкой воды с помощью вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС. Штормовые условия моделировались с использованием данных о временном и пространственном распределении ветра на высоте 10 м, взятых из базы системы анализа прогноза климата (CFSR). При скорости ветра до 15 м/с высоты штормового нагона в районе порта г. Корсакова достигают 1,7 м, и ширина зоны затопления до 200 м, что полностью согласуется с данными измерений.

- Выполнено комплексное исследование гидродинамического воздействия на пролив Красноармейский, соединяющая озеро Тунайча с Охотским морем (залив Мордвинова). Анализ результатов проведенных численных расчетов показывает, что возрастание характеристик наката волн на побережье южнее пролива Красноармейский происходит при движении волны с севера.

- Предложено, что для препятствия размыва переноса отложений в районе пролива Красноармейский (в результате чего пролив становится мельче) необходимо установить барьер, форма которого должна быть направлена не только вдоль побережья, но и закрывать побережье с севера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Представлена позиционная автоматизированная измерительная станция «ПАГИС». Данная разработка адаптирована для измерения гидрофизических и гидрохимических параметров водной среды на заданных горизонтах. Проведены измерения различных параметров водной среды в сложных гидрологических условиях в разное время года, в том числе в ледный период.
- Разработан погружной зонд для измерения электропроводимости и температуры. С помощью авторских измерительных систем выполнена научно-исследовательская работа по оценке водного баланса в озере лагунного типа Тунайча. Проведен большой объем гидрографических работ.
- Представлено устройство «Волнограф», предназначенное для регистрации и накопления долговременных измерений поверхностного волнения моря. Данные измерений охватывают периоды сильных штормовых нагонов и становление ледового покрова в отдельных заливах Охотского моря.
- Разработан автономный регистратор течений водного потока, который применялся для исследования объемов воды, проникающих через пролив в озеро лагунного типа во время сильных штормовых нагонов в сложных климатических условиях. Выполнены исследования расхода воды и скорости течений водотоков в приустьевой части, впадающих в озеро Тунайча в период основных фаз водного режима.
- Выполнена адаптация безэкипажного корабля (БЭК) повышенной остойчивости для применения в прибрежной зоне. Данная платформа была использована для проведения гидрографических работ.
- Представлена авторская разработка для бесконтактного измерения изменения водной поверхности в лабораторных условиях. Рассматривается метод регистрации нагонных одиночных волн на наклонный берег в опытно-экспериментальном бассейне с помощью бесконтактного емкостного датчика,
- Разработано устройство «Волнограф», предназначено для регистрации и накопления долговременных измерений поверхностного волнения моря, методом измерения придонного давления.

- Выполнен анализ гидрофизических исследований, выполненных автором, в районе Курильских островов (пролив Фриза). Анализ данных измерений позволил выявить основные особенности трансформации водных масс Охотского моря и Тихого океана в проливе Фриза. Характер вертикальной структуры вод в проливе остается тем же, что в море и в океане, но границы отдельных водных масс несколько смещаются. В этом районе отмечена наиболее низкая температура и скорость звука по сравнению с другими точками измерения.

- Проведен анализ водообмена через Курильский пролив (пролив Фриза). Исследования показали, что в Охотское море вносится значительное количество тепла, что определяет климатические особенности всего моря и обширных прибрежных акваторий. Полученные сведения о характере водообмена Охотского моря с Тихим океаном через пролив Фриза позволяют более дифференцированно рассматривать задачу о снабжении моря теплом. Этот вопрос имеет значение, так как определяет многие черты гидрологического режима (интенсивность процессов ледообразования, пространственное распределение льдов, температурные характеристики водных масс, условия рыбного промысла и зимней навигации).

- Определено, что гидроакустическая структура поля скорости звука в изучаемом районе определяется особенностями гидрологической структуры морских водных масс. Гидроакустическая структура вод в проливе Екатерины относится к южно-охотоморскому типу, с наличием звукового канала на глубине 100-200 м. Отличительная особенность строения поля скорости звука в проливе Екатерины заключается в наибольшем диапазоне изменения величины скорости звука от поверхности до оси звукового канала.

- Выполнен анализ данные долговременных измерений волн у побережья о-ва Сахалин в акватории Охотского моря донными станциями регистрации вариаций давления.

- Проведено полевое обследование результата штормового нагона, случившегося 15 ноября 2019 года в г. Корсакове на юге Сахалина. Численное исследование показало, что при скорости ветра до 15 м/с высоты штормового нагона в районе порта г. Корсакова достигают 1,7 м, и ширина зоны затопления до 200 м, что полностью согласуется с данными измерений.

- Выполнено комплексное исследование гидродинамического воздействия на пролив Красноармейский, соединяющая озеро Тунайча с Охотским морем (залив Мордвинова). Анализ результатов проведенных численных расчетов показывает, что возрастание характеристик наката волн на побережье южнее пролива Красноармейский происходит при движении волны с севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **"АСТВ"** [В Интернете] // В Корсакове во время циклона затопило порт. - 15 ноября 2019 г.. - <https://astv.ru/news/criminal/2019-11-15-v-korsakove-vo-vremya-ciklona-zatopilo-port>.
2. **Baschek B. and Imai J.** Rogue wave observations off the US West Coast [Article] // Oceanography. - 2011. - V. 24. - pp. 158-165.
3. **Cattrell A. D. [et al.]** Can rogue waves be predicted using characteristic wave parameters? [Article] // Journal of Geophysical Research: Oceans.. - 2018. - V. 123. - pp. 5624-5636.
4. **Cattrell A. D. [et al.]** Reasonal intensification and trends of rogue wave events on the US western seaboard [Article] // Scientific Reports. - 2019. - V. 9. - p. 4461.
5. **Cochin N. E., Kibel I. A. and Roze N. V.** Theoretical hydromechanical. M, Part 1. The 6th prod. Part 2. 4 prod. [Book]. - 1963.
6. **Denissenko P. [et al.]** Experimental statistics of long wave runup on a plane beach [Article] // Journal of Coastal Research, Special Issue. - 2013. - SPEC. ISSUE 65. - pp. 195-200.
7. **Didenkulova E. and Zaitsev A.** In situ wave measurements in the Sea of Okhotsk [Article] // Proc. The Fourteenth International MED-COAST Congress on Coastal and Marine Science, Engineering, Management and Conservation.. - 2019. - Vol. 2. - pp. 755-762.
8. **Didenkulova E. and Zaitsev A.** In situ wave measurements in the Sea of Okhotsk [Article] // Proc. The Fourteenth International MED-COAST Congress on Coastal and Marine Science, Engineering, Management and Conservation.. - 2019. - Vol. 2. - pp. 755-762.
9. FDC1004 4-Channel Capacitance-to-Digital Converter for Capacitive Sensing Solutions [Online]. - <https://www.ti.com/lit/gpn/fdc1004>.

10. **Geethmani R. [et al.]** Non-Contact Continuous Capacitive Liquid Level Sensing [Article] // International Journal of Pure and Applied Mathematics. - 2018. - 12 : Vol. 119. - pp. 1921-1930.
11. **General Bathymetric Chart fo the Oceans** General Bathymetric Chart fo the Oceans [Online]. - <https://www.gebco.net/>.
12. **Gladyshev S. [et al.]** J. Geophys. [Journal]. - 2000. - 11 : Vol. 105. - pp. 26281-26299. - 11.
13. <http://sakhmeteo.ru/> Сахалинское метеоагенство [В Интернете] // <http://sakhmeteo.ru/>. - <http://sakhmeteo.ru/>.
14. **Hydraulic model experiment for tsunami** Regarding effects on river structures caused by river run-up tsunami [Online]. - 2004. - <https://www.pwri.go.jp/eng/about/pr/webmag/wm047/kenkyu.html>.
15. **Loytsyansky L. G.** Mechanics of liquid and gas [Book]. - [s.l.] : The 7th prod. M, 2003.
16. **Lynett P. J. [et al.]** Inter-model analyses of tsunami-induced coastal currents [Journal] // Ocean Modelling. - 2017. - Vol. 114. - pp. 14-32.
17. **Massel S. R.** Ocean surface waves: Their physics and prediction. [Article] // World Scientific Publ.. - Singapore : [s.n.], 1996. - p. 491.
18. **McLean J. W.** Instabilities of finite-amplitude gravity waves on water of finite depth [Article] // Journal of Fluid Mechanics. - 1982. - V. 115. - pp. 331-341.
19. **Mori N. and Janssen P.A.E.M.** On kurtosis and occurrence probability of freak waves [Article] // Journal of Physical Oceanography. - 2006. - V. 36. - pp. 1471-1483.
20. **National Centers for Environmental Information** National Centers for Environmental Information [Online]. - <https://www.ncei.noaa.gov/>.

21. **Onorato M. [et al.]** On the origin of heavy-tail statistisc in equations of the Nonlinear Schrodinger type [Article] // Physics Letters A.. - 2016. - V. 380. - pp. 3173-3177.
22. **Ozer C. and Yalciner A. C.** Sensitivity Study of Hydrodynamic Parameters during Numerical Simulations of Tsunami Inundation [Journal] // Pure and Applied Geophysics. - 2011. - 11 : Vol. 168. - pp. 2083-2095.
23. **Park H. [et al.]** Tsunami inundation modeling in constructed environments: A physical and numerical comparison of free-surface elevation, velocity, and momentum flux [Journal] // Coastal Engineering. - 2013. - Vol. 79. - pp. 9-21.
24. **Pelinovsky E. and Sergeeva A.** Numerical modeling of the KdV random wave field [Article] // European Journal of Mechanics - B/Fluids. - 2006. - V.25. - pp. 425-434.
25. **RGRU** Российская газета [В Интернете] // На Сахалине штормовыми волнами залило территорию порта. - 15 ноября 2019 г.. - <https://rg.ru/2019/11/15/reg-dfo/na-sahaline-shtormovymi-volnami-zalilo-territoriiu-porta.html>.
26. **Slunyaev A. V., Sergeeva A. V. and Didenkulova I.** Rogue events in spatiotemporal numerical simulations of unidirectional waves in basins of different depth [Article] // Natural Hazards. - 2016. - V. 84. - pp. 549-565.
27. **Soloviev S. L. and Go Ch. N.** Tsunami Catalogue on the West Coast of the Pacific Ocean. [Journal] // Science. - 1974. - p. 308.
28. **Talley L. D. and Hanawa K.** Ocean Circulat and Climate [Journal]. - 2001. - Vol. 77. - pp. 373-386.
29. **Texas Instruments** FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications [В Интернете]. - 2021 г.. - <http://www.ti.com/lit/an/snoa927a/snoa927a.pdf>.

30. **Texas Instruments** TIDA-00317 - Capacitive-Based Liquid Level Sensing Sensor Reference Design [Online]. - 2021. - <https://www.ti.com/tool/TIDA-00317>.
31. **Toffoli A. [et al.]** Second-order theory and setup in surface gravity waves: a comparison with experimental data [Article] // Journal of Physical Oceanography. - 2007. - V. 37. - pp. 2726-2739.
32. **Warner M. J. [et al.] et al.** J.Geophys [Journal]. - 1996. - Vol. 101 C.9. - pp. 20525-20542.
33. **Xylem** ZPulse® Doppler Current Sensor [Online] // [www.Aanderaa.com](http://www.aanderaa.com). - 2019. -
https://www.aanderaa.com/media/pdfs/d367_aanderaa_zpulse_dcs.pdf.
34. **Zaitsev A. I. [et al.]** The Nevelsk Tsunami on august 2, 2007: instrumental data and numerical modeling [Journal] // Doklady Earth Sciences. - 2008. - 1 : Vol. 421. - pp. 867-870.
35. **Zaitsev A. I. [и др.]** The Tsunami on Sakhalin on August 2, 2007: mareograph evidence and numerical simulation [Дневник] // Russian Journal of Pacific Geology. - 2009 г.. - 5 : Т. 3. - стр. 437-442.
36. **Zaytsev A. [et al.]** Numerical tsunami model NAMI-DANCE. [Article] // Science of Tsunami Hazards. - 2019. - No. 4 : Vol. 38. - pp. 151-168.
37. **Zaytsev A. and at al** Numerical tsunami model NAMI-DANCE [Journal] // Science of Tsunami Hazards.. - 2019. - 4 : Vol. 38. - pp. 151-168.
38. **Zaytsev A. I. [et al.]** Tsunami on the island of Sakhalin: observations and numerical modeling. [Journal]. - Nizhny Novgorod : [s.n.], 2017.
39. **Богданов К. Т.** Гидрологические условия пролива Фриза в летнее время [Статья] // Океанологические исследования. - 1968 г.. - 19. - стр. 95-104.

40. **Богданов К. Т. и Мороз В. В.** Гидрологические условия зоны Курильских проливов в летний сезон [Статья] // Океанология. - 1998 г.. - 6 : Т. 38. - стр. 813-821.
41. **Большая российская энциклопедия** Лагуна [В Интернете] // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. - 21. 06. 2023 г.. - URL: <https://bigenc.ru/c/laguna-6291b5/?v=7593602>. - Большая российская энциклопедия.
42. **Бровко П. Ф. [и др.]** Лагуны Сахалина [Статья] // ДВГУ. - Владивосток : [б.н.], 2002 г.. - стр. 80.
43. **Бровко П. Ф. [и др.]** Природа Корсаковского района: Научное издание [Статья] // Изд-во ДВГУ. - Владивосток : [б.н.], 1995 г..
44. **Бровко П. Ф. [и др.]** Типы и динамика лагунных проливов Сахалина [Статья] // Вестник Сахалинского музея. - 2018 г.. - № 1 (25). - стр. 147-156. - ISSN: 2618-8457.
45. **Бровко П. Ф.** Развитие прибрежных лагун [Статья]. - Владивосток : Изд-во Дальневост. гос. ун-та, 1990 г.. - стр. 148.
46. **Бровко П. Ф.** Эволюция лагун дальневосточных морей [Отчет]. - [б.м.] : Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра геогр. наук: 11.00.04, 1990. - стр. 36.
47. Водная биота озера Тунайча (южный Сахалин) и условия ее существования. - Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2016 г.. - стр. 378.
48. **Геоэкология озера Тунайча. Рыбохозяйственное значение и рекомендации по рациональному использованию оз. Тунайча.** Заключительный отчет по ХД 153-89 с СахТИНРО по теме «Геоморфолого-экологические исследования озера Тунайча» по х/д № 11/90 с Корсаковским горисполкомом по теме «Рыбохозяйственное значение и рекомендации по рациональному использованию озера

- Тунайча» [Текст] // отв. исполн. Демин, Л. В.; Клюканов, В. А.. - Владивосток : ДВГУ, 1991 г.. - стр. 171. - Архив СахНИРО. №6233..
49. Гидрологический режим озера Тунайча [Статья] // СахУГМС; отв. исполн. В.В. Шкаликова. - Ю-Сах : [б.н.], 1969 г.. - стр. 192. - Б-ка СахУГМС. № 118..
50. **Гладышев С. В. и Хен Г. В.** Распространение тихоокеанских вод в Охотском море [Дневник] // Доклады академии наук. - 2004 г.. - 6 : Т. 397. - стр. 823-826.
51. **Григорьев В. И.** Озера Тонино-Анивского полуострова южного Сахалина: Дипломная работа; Рукопись [Текст]. - 1961 г.. - стр. 180. - Архив Сахалингидромета. №45.
52. **ДВГУ** Геоморфолого-экологические исследования оз. Тунайча: отчет о НИР [Текст] / сост. отв. Володарский А. Н.. - Владивосток : ДВГУ, 1989 г.. - стр. 161. - Архив СахНИРО. №6234.
53. **ДВГУ** Гидрохимические и гидробиологические условия озера Тунайча (промежуточный отчет по х/д 153-89 с СахТИНРО по теме «Геоморфолого-экологические исследования озер Тунайча») // ДВГУ; отв. исполн. Л.В. Демин. - Владивосток : ДВГУ, 1990 г.. - стр. 93. - Архив СахНИРО. №6088..
54. **Зайцев А. И. [и др.]** Вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС в проблеме цунами. [Статья] // Вычислительная механика сплошных сред. - 2019 г.. - № 2 : Т. 12. - стр. 161-174.
55. **Зайцев А. И. [и др.]** Натурные измерения гидрологических параметров в сложных условиях [Статья] // Датчики и системы. - 2013 г.. - № 12. - стр. 44-48.
56. **Зайцев А. И. [и др.]** Организация инструментальных наблюдений поверхностных волн в Охотском море [Статья] // Датчики и системы. - 2013 г.. - 6. - стр. 38-44.

57. **Зайцев А. И. [и др.]** Численное моделирование штормового нагона 5 ноября 2019 года [Статья] // Морской гидрофизический журнал. - 2020 г.. - № 4 (214) : Т. 36. - стр. 396-406.
58. **Зайцев А. И. и др.** Вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС в проблеме цунами [Дневник] // Вычислительная механика сплошных сред.. - 2019 г.. - 2 : Т. 12. - стр. 161-174.
59. **Зайцев А. И., Малащенко А. Е. и Пелиновский Е. Н.** Аномально большие волны вблизи южного побережья о.Сахалин [Статья] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. - 2011 г.. - № 4 : Т. 4. - стр. 35-42.
60. **Зайцев А. И., Семин С. В. и Костенко И. С.** Натурные измерения и численное моделирование гидрологических параметров в озере Тунайча [Статья] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - Нижний-Новгород : [б.н.], 2014 г.. - № 1. - стр. 46-52.
61. **Зубов Н. Н.** основы учения о проливах Мирового океана. [Дневник] // Географгиз. - М. : Географгиз., 1956 г..
62. **Иванова А. А. [и др.]** Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин [Статья] // Вестник Московского университета. Серия 5: География.. - 2015 г.. - №3. - стр. 41-49.
63. **Иванова А. А. [и др.]** Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин [Статья] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. - 2015 г.. - № 3. - стр. 41-49.
64. **Иванова А. А. и др.** Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин [Дневник] // Вестник московского университета сер. 5: География. - 2015 г.. - 3. - стр. 41-49.
65. **Кабатченко И. М. [и др.]** Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 [Статья] // Океанология. - 2007 г.. - №1 : Т. 47. - стр. 150-155.

66. **Като Э., Миськов О. А. и Шевченко Г. В.** Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века [Дневник] // ИМГиГ ДВО РАН. - 2001 г.. - стр. 160-176.
67. **Кафанов А. И., Лабай В. С. и Печенева Н. В.** Биота и сообщества макробентоса лагун северо-восточного Сахалина [Статья] // СахНИРО. - Южно-Сахалинск : [б.н.], 2003 г.. - стр. 176.
68. **Ким А. И. [и др.]** Исследование распределения солености по акватории водоема [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2023 г.. - № 6. - стр. 67-73.
69. **Ковалев Д. П. [и др.]** Волны в морской акватории вблизи мыса Свободный (юго-восточная часть о. Сахалин) [Статья] // Геосистемы переходных зон, . - 2024 г.. - №3 : Т. 8.
70. **Ковалев Д. П.** Экстремальный стон у юго-восточного побережья о.Сахалин [Дневник] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. - 2013 г.. - 1 : Т. 6. - стр. 52-57.
71. **Кокорина А. В. [и др.]** Анализ данных долговременных измерений волн у острова Сахалин [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2022 г.. - № 12. - стр. 45-54.
72. **Кокорина А. В. [и др.]** Данные долговременных измерений волн у о-ва Сахалин [Конференция] // В книге: Нелинейные волны - 2022. Тезисы и аннотации докладов. - Нижний-Новгород : [б.н.], 2022. - стр. 134-137.
73. **Костенко И. С. и Москвитин А. А.** Осуществление экологического мониторинга с помощью измерительной станции «ПАГИС» [Конференция] // В книге: Геодинамические процессы и природные катастрофы.. - [б.м.] : Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. отв. ред. Л. М. Богомолов., 2019. - стр. 165.

74. **Кочин Н. Е., Кибель И. А. и Розе Н. В.** Теоретическая гидромеханика [Книга]. - М : [б.н.], 1963. - Ч.1. 6-е изд. Ч.2. 4-е изд..
75. **Кузнецов К. И. [и др.]** Наблюдения волн-убийц в прибрежной зоне о. Сахалин [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2014 г.. - № 2. - стр. 33-39.
76. **Кузнецов К. И. [и др.]** Особенности характеристик ветрового волнения у юго-восточного побережья о.Сахалин по измерениям придонного давления [Статья] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. - 2014 г.. - №2 : Т. 50. - стр. 242.
77. **Кузнецов К. И.** Экспериментальное исследование волновых движений в жидкости конечной глубины и их численное моделирование // Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. - Нижний-Новгород : [б.н.], 2013 г.. - Кандидатская диссертация .
78. **Леонов К. В.** Региональная океанография. Ч.1. [Дневник] // Гидрометеиздат. - Л. : Гидрометеиздат., 1960 г..
79. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. 7-е изд. [Книга]. - М : [б.н.], 2003.
80. **Лухнов А. О. [и др.]** Проблемы создания аппаратно-программного комплекса для исследования гидродинамики шельфовой зоны [Статья] // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. - 2006 г.. - Т. 18. - стр. 120-123.
81. **Лымарев В. И.** Основные проблемы физической географии океана [Статья]. - М. : Мысль, 1978 г.. - стр. 248.
82. **Лымарев В. И.** Основные проблемы физической географии океана [Книга]. - 1978. - стр. 248.
83. **Малашенко А. Е. [и др.]** Многофункциональная гидрофизическая автономная станция. [Патент] : 50299. - 24 06 2005 г..

84. **Малашенко А. Е. [и др.]** Автономная гидрофизическая станция вертикального профилирования [Патент] : 2406639. - 16 4 2009 г..
85. **Малашенко А. Е. [и др.]** Автономная гидрофизическая станция для зондирования параметров водной среды на нескольких фиксированных глубинах [Патент] : 56593. - 25 10 2005 г..
86. **Малашенко А. Е. [и др.]** Натурные измерения гидрологических параметров озера Тунайча в ледовый период [Статья] // Датчики и системы. - 2014 г.. - 12. - стр. 58-62.
87. **Малашенко А. Е., Кузнецов Ю. А. и Чудаков А. И.** Материалы международной научно-практической конференции. [Конференция] // Научно-технические разработки СКБ САМИ и ВПО ДАЛЬРЫБВТУЗ в оценках воздействия на биоту средств освоения ресурсов континентального шельфа, использование их в системе исследований морского океанариума.. - Владивосток : [б.н.], 2011.
88. **МИ 1759-87** Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость-площадь» [Текст] // утверждены Всесоюзным научно-исследовательским институтом расходомерии на НТС института 11.07.1986 г., протокол №8. - [б.м.] : Издательство стандартов, 1986 г.. - стр. 28.
89. **Минстрой России** "СП 292.1325800.2017. Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования" // утв. и введен в действие Приказом Минстрой России от 23.06.2017 №915.пр. - 2017 г.. - (ред. от 16.07.2021).
90. **Морошкин К. В.** Водные массы Охотского моря. [Дневник]. - М : Наука, 1966 г.. - стр. 687.
91. **Москвитин А. А. [и др.]** Влияние волнового воздействия на экологическое состояние озера Тунайча (о.Сахалин) [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2020 г.. - 11. - стр. 53-58.

92. **Москвитин А. А. и Тихончук Е. А.** Исследования гидрологических характеристик водной среды в районе Курильских островов [Статья] // Подводные исследования и робототехника. - 2023 г.. - №4 (46). - стр. 78-86.
93. **Москвитин А. А. [и др.]** Влияние волнового воздействия на экологическое состояние озера Тунайча (о. Сахалин) [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2020 г.. - №11. - стр. 53-58.
94. **Москвитин А. А. [и др.]** Влияние волнового воздействия на экологическое состояние озера Тунайча (о. Сахалин) [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2020 г.. - № 11. - стр. 53-58.
95. **Москвитин А. А. [и др.]** Изменение экологического состояния озера Тунайча (о. Сахалин) в следствии внешнего воздействия [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2022 г.. - № 12. - стр. 98-104.
96. **Москвитин А. А. и Тихончук Е. А.** Гидрологические характеристики водных масс в проливе Фриза [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2022 г.. - №8. - стр. 3-9.
97. **Москвитин А. А.** Методика бесконтактного измерения уровня воды в лабораторных условиях [Статья] // Инженерная физика. - 2023 г.. - №5. - стр. 63-69.
98. **Москвитин А. А.** Натурные измерения водобмена озера лагунного типа с морем [Статья] // Экологические системы и приборы. - 2023 г.. - 6. - стр. 59-66.
99. **Москвитин А. А., Куркин А. А. и Зайцев А. И.** Оценка воздействия опасных волновых явлений в заливе Мордвинова (о-в Сахалин) [Конференция] // В сборнике: КОГРАФ-2020. - Нижний-Новгород : [б.н.], 2020. - стр. 317-323. - Сборник материалов 30-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам.

100. **Мысленков С. А. [и др.]** Анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива (Охотское море) [Статья] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. - 2025 г.. - №1 (395). - стр. 118-130.
101. **Национальный атлас России. Природа. Экология** [Книга] / ред. гл. Котляков В. М. и отв. ред. Кравченко Г. Ф.. - Москва : Роскартография, 2000-2008. - Т. 2 : в 4 т. : стр. 495.
102. **Пелиновский Е. Н., Родин А. А. и Шургалина Е. Г.** О критериях перехода опрокидывающегося бора в волнообразный [Статья] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2015 г.. - Т. 51. - стр. 598-601.
103. **Перунов В. В. и Малащенко А. Е.** Циклическая автономная гидрофизическая станция вертикального профилирования [Патент] : 2406640. - 16 4 2009 г..
104. **Плахотник А. Ф.** Опыт вычисления расходов воды через Курильские проливы. [Книга]. - [б.м.] : Автореферат канд. Диссертации, ИОРАН, 1953.
105. **Полевой Б. П.** Первооткрыватели Сахалина [Книга]. - Ю-Сах. : Сахалинское книжное издательство, 1959.
106. **Постановление Губернатора Сахалинской области от 18.08.1995 № 257** «Об утверждении результатов инвентаризации 1993-1994 годов территорий памятников природы регионального значения Сахалинской области». - Южно-Сахалинск : [б.н.], 1995 г..
107. **Российский государственный архив Военно-Морского Флота.** Фонд 1331, Опись 10, Ед.Хр.637 [Архив] // Карта №370. Планы: устья реки Тайтиски, острова Монерон, бухты Такмака, Тунайчинской протоки, рейда Поро-Томари и озер на мысе Анива.. - 1889 г..

108. **Сахалингосрыбвод** Отчет по обследованию озера Тунайча. Экспедиция «Сахалингосрыбвода» [Текст] // исполн. Н. М. Никоноров, Н. М. Золотарева, Р.З. Вахрутдинова. ;. - [б.м.] : Сахалингосрыбвод, 1956 г.. - стр. 20. - Архив СахНИРО. №763.
109. **СахНИРО** Водная биота озера Тунайча (южный Сахалин) и условия ее существования [Монография] / ред. Лабай В. С.. - Южно-Сахалинск : Издания СахНИРО, 2016 г.. - стр. 240. - ISBN 978-5-902516-26-2.
110. **СахТИНРО** Результаты обследования оз. Тунайча и рекомендации по его биологической мелиорации: Отчет о НИР [Текст] // СахТИНРО; отв. исполн. Э. Х. Сабитов.. - Ю-Сах. : [б.н.], 1977 г.. - стр. 8. - Архив СахНИРО. № 3993.
111. **СахУГМС** Гидрологический режим озера Тунайча [Текст] // отв. исполн. В. В. Шкаликова. - Ю-Сах : СахУГМС, 1969 г.. - стр. 192. - Б-ка СахУГМС. № 118.
112. **СКБ САМИ ДВО РАН НИР** «Комплексное экологическое обследование памятника природы регионального значения «озеро Тунайча» в части исследования водообмена озера Тунайча с Охотским морем» [Отчет]. - Южно-Сахалинск : СКБ САМИ, 2022 г.. - стр. 245.
113. **Слюняев А. В. и Сергеева А. В.** Стохастическое моделирование однонаправленных интенсивных волн на глубокой воде в приложении к аномальным морским волнам [Статья] // Писма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2011 г.. - Т. 94. - стр. 850-858.
114. **Слюняев А. В. [и др.]** Зависимость вероятностного распределения высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин [Дневник]. - Нижний-Новгород : Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2023 г.. - 3 : Т. Т.16. - стр. 18-29.

115. **Слюняев А. В., Пелиновский Д. Е. и Пелиновский Е. Н.** Морские волны-убийцы: наблюдения, физика и математика [Статья] // Успехи физических наук.. - 2023 г.. - № 2 : Т. 193. - стр. 155-181.
116. **Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей** / под ред. Лопатухина, Л. И., Бухановского, А. В., Дегтярева, А. Б. и др. - Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2003 г..
117. **Файман П. А. [и др.]** Моделирование распространения тихоокеанских вод в Охотском море [Дневник] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2021 : Известия РАН, 2021 г.. - 3 : Т. 57. - стр. 372-384.
118. **Фомин В. В. и Иванов В. А.** Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла [Дневник] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - 2004 г.. - 10. - стр. 233-242.
119. **Фомин В. В. и Иванова В. А.** Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла [Статья] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - 2004 г.. - №10. - стр. 233-242.
120. **Фомин В.В. и др.** Штормовые нагоны в Татарском заливе и затопление дельты Дона [Дневник] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. - 2015 г.. - 1. - стр. 74-82.
121. **Хлебович В. В.** Критическая соленость и хорогалиникум: современный анализ понятий [Статья] // Биология солоноватых вод. - Л : ЗИН АН СССР, 1989 г.. - стр. 5-11.
122. **Чернов А. Г. [и др.]** Натурный эксперимент по регистрации захваченных волн в районе м.Острый (Охотское море) [Статья] //

- Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. - 2006 г.. - Т. 18. - стр. 91-98.
123. **Шевченко Г. В. [и др.]** Особенности гидрофизических процессов в районе мыса Свободный (юго-восточное побережье о. Сахалин) по данным инструментальных измерений [Статья] // Геосистемы переходных зон. - 2018 г.. - №2 : Т. 2. - стр. 81-91.
124. **Шевченко Г. В. и Любичкий Ю. В.** Проявления штормовых нагонов в южной части острова Сахалин. [Дневник] // ИМГиГ ДВО РАН. - 1994 г.. - стр. 44.
125. **Шевченко Г. В.** Статистические характеристики штормовых нагонов в южной части о.Сахалин [Статья] // Известия РГО. - Москва : [б.н.], 1997 г.. - № 3 : Т. 129. - стр. 94-107.
126. **Шульга Т. Я.** Моделирование штормовых нагонов в ограниченных волновых бассейнах [Дневник] // Морской гидрофизический журнал.. - 2006 г.. - 6. - стр. 3-12.
127. **Шустин В. А., Золотухин Д. Е. и Файн А. В.** Гидродинамические условия преодоления экологического кризиса озера Тунайча (залог экологической устойчивости озера Тунайча - хорошая связь с морем) [Статья] // Мор.исслед. и технологии изуч. природы Мирового океана. - Сб. ст. - Владивосток : ДВО РАН, 2005 г.. - 1. - стр. 82-95.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Публикации в журналах, включенных в Белый список:

1. **Москвитин А.А.**, Зайцев А.И., Шибаета М.Ю., Шабрамова Л.С. Влияние волнового воздействия на экологическое состояние озера Тунайча (о. Сахалин). / Экологические системы и приборы. 2020. № 11. С. 53-58.
2. **Москвитин А.А.** Методика бесконтактного измерения уровня воды в лабораторных условиях. / Инженерная физика. 2023. №.5. С. 63-69.
3. **Москвитин А.А.** Натурные измерения водообмена озера лагунного типа с морем. / Экологические системы и приборы. 2023. № 6. С. 59-66.
4. Зайцев А.И., Леоненков Р.В., **Москвитин А.А.**, Костенко И.С. Натурные измерения гидрологических параметров в сложных условиях. / Датчики и системы. 2013. № 12 (175). С. 44-48.
5. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Доган Д., Ялченир Б., Ялченик А., Куркин А.А., **Москвитин А.А.** Численное моделирование штормового нагора 5 ноября 2019 года на юге острова Сахалин. / Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 4 (214). С. 396-406.
6. **Москвитин А.А.**, Шабрамова Л.С. Использование баз данных предметно-специфических признаков и спектральных характеристик в существующих сервисах обработки спутниковых данных. / Экологические системы и приборы. 2022. № 10. С. 52-58.
7. Сидоренко А.И., **Москвитин А.А.**, Кондрашова Е.С. Наземная беспилотная автоматизированная гусеничная платформа для обследования снежного покрова в лавиносборах методом георадиолокации. / Инженерная физика. 2024. № 12. С. 3-8.
8. Кокорина А.В., Слюняев А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., **Москвитин А.А.**, Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н. Анализ данных долговременных измерений волн у острова Сахалин. / Экологические системы и приборы. 2022. № 12. С. 45-54.

9. **Москвитин А.А.**, Ким А.И., Шабрамова Л.С., Зайцева М.Ю., Толикина М.Ю. Изменение экологического состояния озера Тунайча (о. Сахалин) в следствии внешнего воздействия. / Экологические системы и приборы. 2022. № 12. С. 98-104.
10. Слюняев А.В., Кокорина А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., **Москвитин А.А.**, Диденкулов О.И., Пелиновский Е.Н. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин. / Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 3. С. 18-29.
11. **Москвитин А.А.**, Тихончук Е.А. Гидрологические характеристики водных масс в проливе фриза. / Экологические системы и приборы. 2022. № 8. С. 3-9.
12. Малащенко А.Е., Молчанов П.А., **Москвитин А.А.**, Корытко А.С., Леоненков Р.В., Сидоренко А.И., Кондрашова Е.С., Ким В.С. Дрова Ю.В. Мультистатическая система объективного контроля надводных и подводных средств морской робототехники в условиях полигона. / Инженерная физика. 2024. № 12. С. 9-21.
13. Ким А.И., **Москвитин А.А.**, Ким Т.Е., Зайцева М.Ю. Исследование распределения солености по акватории водоема. / Экологические системы и приборы. 2023. № 6. С. 67-73.

Публикации в научных изданиях ВАК:

1. **Москвитин А.А.** Натурные измерения водообмена озера лагунного типа с морем. / Экологические системы и приборы. 2023. № 6. С. 59-66.
2. Слюняев А.В., Кокорина А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., **Москвитин А.А.**, Диденкулов О.И., Пелиновский Е.Н. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин. / Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 3. С. 18-29.

3. **Москвитин А.А.**, Зайцев А.И., Шибаета М.Ю., Шабрамова Л.С. Влияние волнового воздействия на экологическое состояние озера Тунайча (о. Сахалин). / Экологические системы и приборы. 2020. № 11. С. 53-58.
4. **Москвитин А.А.** Методика бесконтактного измерения уровня воды в лабораторных условиях. / Инженерная физика. 2023. №5. С. 63-69.
5. **Москвитин А.А.**, Шабрамова Л.С. Использование баз данных предметно-специфических признаков и спектральных характеристик в существующих сервисах обработки спутниковых данных. / Экологические системы и приборы. 2022. № 10. С. 52-58.
6. Зайцев А.И., Леоненков Р.В., **Москвитин А.А.**, Костенко И.С. Натурные измерения гидрологических параметров в сложных условиях. / Датчики и системы. 2013. № 12 (175). С. 44-48.
7. Малашенко А.Е., Зайцев А.И., Костенко И.С., Леоненков Р.В., **Москвитин А.А.** Натурные измерения гидрологических параметров озера Тунайча в ледовый период. / Датчики и системы. 2014. № 12 (187). С. 58-62.
8. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Доган Д., Ялченир Б., Ялченик А., Куркин А.А., **Москвитин А.А.** Численное моделирование штормового нагона 5 ноября 2019 года на юге острова Сахалин. / Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 4 (214). С. 396-406.
9. Кокорина А.В., Слюняев А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., **Москвитин А.А.**, Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н. Анализ данных долговременных измерений волн у острова Сахалин. / Экологические системы и приборы. 2022. № 12. С. 45-54.
10. **Москвитин А.А.**, Тихончук Е.А. Исследования гидрологических характеристик водной среды в районе Курильских островов. / Подводные исследования и робототехника. 2023. № 4 (46). С.78-86.
11. **Москвитин А.А.**, Ким А.И., Шабрамова Л.С., Зайцева М.Ю., Толикина М.Ю. Изменение экологического состояния озера Тунайча (о. Сахалин) в

следствии внешнего воздействия. / Экологические системы и приборы. 2022. № 12. С. 98-104.

12. **Москвитин А.А.**, Тихончук Е.А. Гидрологические характеристики водных масс в проливе фриза. / Экологические системы и приборы. 2022. № 8. С. 3-9.
13. Сидоренко А.И., **Москвитин А.А.**, Кондрашова Е.С. Наземная беспилотная автоматизированная гусеничная платформа для обследования снежного покрова в лавиносборах методом георадиолокации. / Инженерная физика. 2024. № 12. С. 3-8.
14. Ким А.И., **Москвитин А.А.**, Ким Т.Е., Зайцева М.Ю. Исследование распределения солености по акватории водоема. / Экологические системы и приборы. 2023. № 6. С. 67-73.
15. Малащенко А.Е., Молчанов П.А., **Москвитин А.А.**, Корытко А.С., Леоненков Р.В., Сидоренко А.И., Кондрашова Е.С., Ким В.С. Дрова Ю.В. Мультистатическая система объективного контроля надводных и подводных средств морской робототехники в условиях полигона. / Инженерная физика. 2024. № 12. С. 9-21.

Публикации в научных изданиях Scopus:

1. **Moskvititn A.**, Shabramova L., Zaysev A., Pelinovsky E. Element of the coastal disaster risk information system, taking into account engineering and socio-economic applications. / Lecture Note in Civil Engineering. 2022. Т. 203. С. 89-96.
2. Слюняев А.В., Кокорина А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., **Москвитин А.А.**, Диденкулов О.И., Пелиновский Е.Н. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин. / Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 3. С. 18-29.

Публикации в других научных журналах и изданиях:

1. **Москвитин А.А.**, Куркин А.А., Зайцев А.И. Оценка воздействия опасных волновых явлений в заливе Мордвинова (о-в Сахалин). / В сборнике: КОГРАФ -2020. Сборник материалов 30-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. Нижний Новгород, 2020. С. 317-323.
2. **Москвитин А.А.**, Шабрамова Л.С., Зайцев А.И. Элементы информационной системы прибрежных рисков острова Сахалин, связанных с природными катастрофами. / В книге: Геодинамические процессы и природные катастрофы. Тезисы докладов IV Всероссийская научная конференция с международным участием. Южно-Сахалинск, 2021. С. 88.
3. **Москвитин А.А.**, Шабрамова Л.С. Использование баз данных предметно-специфических признаков и спектральных характеристик в существующих сервисах обработки спутниковых данных. / В книге: КОГРАФ-2022. Сборник тезисов 32-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. Нижний Новгород, 2022. С. 63-64.
4. **Костенко И.С.**, **Москвитин А.А.** Осуществление экологического мониторинга с помощью измерительной станции «ПАГИС». / В книге: Геодинамические процессы и природные катастрофы. Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. отв. ред. Л.М. Богомолов. 2019. С. 165.
5. Кокорина А.В., Слюняев А.В., Диденкулова Е.Г., Зайцев А.И., **Москвитин А.А.** Данные долговременных измерений волн у о-ва Сахалин. / В книге: Нелинейные волны – 2022. Тезисы и аннотации докладов. Нижний Новгород. 2022. С. 134-137.

Свидетельства о регистрации программных продуктов:

1. **Москвитин А.А.**, Сидоренко А.И., Кондрашова Е.С. Программа «ЛУЧ», записываемая в микроконтроллер для формирования световых характеристик в светооптических плавучих предостерегающих маяках и навигационных знаках. / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021613937, 16.03.2021. Заявка № 2021610332 от 13.01.2021.
2. Чернов А.Г., Куркин А.А., Тюгин Д.Ю., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Зайцев А.И., **Москвитин А.А.**, Пронин П.И., Зарубин Д.Н., Кузин В.Д., Саблуков Д.С. Береснев П.О., Филатов В.И. Программный комплекс для дистанционного управления катером. / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016661836, 21.10.2016. Заявка № 2016619116 от 25.08.20216.
3. Зайцев А.И., **Москвитин А.А.**, Куркин А.А., Куркина О.Е., Елифанова А.С., Санников Н.А. Проявление морских природных катастроф на побережье острова Сахалин. / Свидетельство о регистрации базы данных RU 2020622343, 19.11.2020. Заявка № 2020622155 от 09.11.2020.