

На правах рукописи



Куликов Михаил Евгеньевич

ПРИЛИВНЫЕ И НЕПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ В
МОРЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 1.6.17 – Океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук

Медведев Игорь Павлович

Официальные оппоненты: **Шевченко Георгий Владимирович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории Сахалинского филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения "Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии"

Май Руслан Игоревич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «__» _____ 2024 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва, 117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Колебания уровня моря возникают под влиянием приливообразующих сил в результате гравитационного взаимодействия Земли, Луны и Солнца, а также отражают влияние различных динамических процессов, происходящие в толще и на поверхности воды, под воздействием изменений температурного и плотностного градиентов, океанической циркуляции, влиянием сильного речного стока и наличием сезонного ледяного покрова. Метеорологические процессы, такие как перемещение барических образований, изменение атмосферного давления и напряжение ветра, также вызывают заметные изменения уровня моря. Изучение отдельных видов колебаний уровня моря и оценка основных факторов, определяющих ее, представляется актуальной задачей. Расчеты прилива и его характеристик, оценка экстремальных изменений уровня моря, величин сгонно-нагонных явлений, резко повышающих (или понижающих) уровень моря, важны при проектировании и строительстве на шельфе и в прибрежной зоне арктических морей. Их прогноз также значим для обеспечения транспортных операций на трассе Северного морского пути и освоения месторождений углеводородов.

Ранее в работах [Прошутинский, 1993; Ashik and Vanda, 1995; Ашик, 1997; Ashik et al., 1999; Voinov, 2002; Каган и др., 2010; Войнов и Пискун, 2015; Войнов, 2016; Войнов и Пискун, 2023] особое внимание было уделено изучению приливной динамики и сгонно-нагонных явлений в арктических морях. Однако экстремальные характеристики приливных колебаний и сгонно-нагонных явлений в морях Российской Арктики и их сезонная изменчивость до сих пор остаются недостаточно исследованными. В работах [Прошутинский, 1993; Kowalik and Proshutinsky, 1993] на основе анализа наблюдений и численного моделирования были рассчитаны гармонические постоянные суточных и полусуточных приливов для всего Северного Ледовитого океана. В работе [Ашик и Рыжов, 2012] описывался режим экстремальных (годовой максимум, минимум и величина) колебаний уровня по станциям арктических морей России, проанализировано пространственное распределение параметров экстремальных колебаний уровня и показана их связь с морфометрическими характеристиками арктических морей и их районов.

В зарубежной научной литературе приливам в Арктике уделяется значительное внимание. В первую очередь следует упомянуть современные глобальные модели приливов в Северном Ледовитом океане: AOTIM5 [Padman and Erofeeva, 2004] и AO-FVCOM [Chen et al., 2009]. Эти модели достаточно точно воспроизводят особенности приливов в глубоководных частях океана, но имеют проблемы с адекватным воспроизведением приливов на мелководных

прибрежных участках, в частности в морях Российской Арктики. Так в работе [Fofonova et al., 2014] была представлена модель приливов для внешней части акватории моря Лаптевых, не включающая в себя побережья п-ва Таймыр и Хатангского залива. Некоторые особенности сезонных изменений гармонических постоянных прилива в Арктике рассматривались в ряде работ зарубежных ученых. Например, в работе [St-Laurent et al., 2008] показано значительное влияние ледяного покрова на основную приливную волну M_2 , по данным заякоренных станций в акватории Гудзонова залива и Гудзонова пролива в Канаде. А в исследовании [Müller et al., 2014] при помощи численной модели показано, что изменчивость амплитуд приливных волн в полярных регионах составляет до 5–10%. При этом следует подчеркнуть, что эти исследования относятся в основном к Канадской и центральной частям Арктического региона, тогда как Российский регион Арктического бассейна в этих работах практически не рассматривался.

Измерения уровня моря при помощи придонных датчиков гидростатического давления проводятся во многих частях Мирового океана, в том числе на Дальнем Востоке [Ковалев и Ковалев, 2018; Шевченко и др., 2019] и в замкнутых морях европейской части России [Медведев и Архипкин, 2015]. В Арктике таких измерений очень мало; в основном проводятся измерения течений по данным ADCP [Pnyushkov and Polyakov, 2012; Janout and Lenn, 2014], причем они носят нерегулярный и фрагментарный характер. Моделирование суммарного уровня моря с выделением экстремальных штормовых нагонов с помощью гидродинамической модели ADCIRC ограничено западной частью Арктики (Белое, Баренцево моря [Кораблина и др., 2017]) и акваторией вокруг Аляски [Joyce et al. 2019; Cassalho et al., 2022]. Отдельные штормовые нагоны были также воспроизведены моделью TELEMAC-2D для Канадской Арктики (море Бофорта) [Kim et al., 2021]. Для моря Лаптевых моделирование колебаний уровня на сетке с высоким пространственным разрешением не проводилось.

Многие аспекты колебаний уровня моря, детально освещенные для других акваторий Мирового океана [Pugh and Woodworth, 2014], остаются нерассмотренными для акватории Российской Арктики. Представленные выше результаты либо базируются на анализе колебаний уровня в отдельных, сравнительно немногочисленных, пунктах арктического побережья, либо на численном моделировании с недостаточным пространственным и временным разрешением. В связи с этим возникает естественный запрос на исследование колебаний уровня в арктических морях России, как по данным инструментальных измерений (прибрежных мареографов и датчиков в открытой части моря), так и с помощью численного моделирования, которое отвечало на имеющиеся научные вопросы и позволило бы решать чисто практические задачи, связанные с навигацией и прибрежным строительством.

Целью работы является детальное исследование особенностей приливных и непериодических колебаний уровня моря с учетом их сезонной изменчивости по данным многолетних наблюдений и численного моделирования динамических процессов на побережье и шельфе арктических морей России.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Проанализировать приливные колебания вдоль всего арктического побережья России и оценить их вклад в суммарные колебания уровня моря. Оценить гармонические и негармонические приливные характеристики, их сезонную изменчивость и рассчитать экстремальные значения прилива.

2. Оценить дисперсию непериодических (неприливных) колебаний уровня моря и рассчитать статистические характеристики суммарного и непериодического уровней. Провести количественный анализ штормовых нагонов.

3. Выполнить адаптацию гидродинамической модели ADCIRC к условиям моря Лаптевых. Провести настройку и верификацию модели. Выполнить численное моделирование колебаний уровня моря Лаптевых и оценить экстремальные характеристики нагонов и сгонов. Сравнить региональную приливную модель AOTIM5 с данными натурных наблюдений.

4. Выполнить установку придонных датчиков гидростатического давления на шельфе моря Лаптевых и Белого моря в районе Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова (ББС МГУ), провести анализ приливных и метеорологических колебаний уровня моря на шельфе, сопоставить их с данными береговых наблюдений и с результатами моделирования.

Методология и методы научного исследования. Исследование базируется на обработке и анализе данных многолетних наблюдений за колебаниями уровня в арктических морях. В рамках статистического анализа применялся корреляционный, регрессионный, спектральный и вейвлет анализы. Анализ приливов производился при помощи современных методов гармонического анализа. Результаты расчетов, как приливных характеристик, так и экстремальных величин сгонно-нагонных явлений, сопоставлялись (где это было возможно) с результатами полученными другими авторами.

Для анализа колебаний уровня моря в широком диапазоне частот на шельфе моря Лаптевых использовались высокочастотные придонные датчики гидростатического давления. Результаты их измерений были сопоставлены как с модельными расчетами отдельных волновых характеристик и использовались для оценки влияния концентрации льда на эти

характеристики. На основе записей датчиков также был произведен анализ суммарного уровня моря и его приливных характеристик в Белом море в районе ББС МГУ.

Численное моделирование метеорологических и приливных колебаний уровня в заливах моря Лаптевых проводилось при помощи гидродинамической модели ADCIRC, с включением в модель ряда гидрометеорологических параметров из реанализа NCEP/CFSR, таких как атмосферное давление, приземный ветер и концентрация льда. Для изучения штормовых нагонов использовался математический аппарат статистики экстремальных значений. Результаты модельных расчетов сопоставлялись с натурными измерениями, а также с расчетами других региональных моделей (например, AOTIM5).

Личный вклад соискателя. Автором были защищены бакалаврский и магистерский дипломы по теме исследования и опубликованы статьи по теме сезонной изменчивости приливов в морях Российской Арктики. Численная модель ADCIRC, адаптированная под изучение колебаний уровня море Лаптевых, запускалась совместно с научным руководителем (в магистратуре) Архипкиным В.С. на кафедре океанологии МГУ имени М.В. Ломоносова. Дальнейшей обработкой полученных результатов моделирования и их интерпретацией занимался соискатель. Обучаясь в аспирантуре, автор был основным исполнителем гранта РФФИ, посвященного изучению короткопериодных колебаний уровня в Карском и Лаптевых морях. В период с 2018 по 2021 гг. соискатель принимал участие в экспедициях на НИС «Академик Мстислав Келдыш», где выполнял постановку сети сейсмологических станций совместно с датчиками придонного гидростатического давления на шельфе моря Лаптевых. В результате обработки и анализа данных с этих датчиков были опубликованы статьи в такие журналы, как Continental Shelf Research и Sensors. Полученные результаты автор также представлял на многочисленных всероссийских и международных конференциях.

Научная новизна работы. Новизна исследования заключается в детальном изучении приливных и непериодических колебаний уровня моря вдоль всего арктического побережья России, в анализе и временной (сезонной) и пространственной изменчивости и интерпретации полученных результатов на основе численного моделирования. Использование современных методов статистического анализа временных рядов дало возможность рассчитать вероятностные характеристики экстремальных подъемов и понижений уровня моря. Впервые проводилось численное моделирование колебаний уровня моря Лаптевых на сетке с высоким пространственным разрешением. Результаты измерений колебаний уровня моря на шельфе моря Лаптевых, полученные с помощью высокоточных датчиков, также являются уникальными для данной акватории и расширяющими наше понимание динамических процессов в этом районе.

В результате исследований сформулированы следующие **основные положения**, выносимые на защиту:

1. Установлено, что гармонические постоянные прилива в арктических морях России подвержены существенным сезонным изменениям. Амплитуда полусуточного прилива M_2 в восточном секторе Арктики в течение года меняется на величину до 45–60% от среднемноголетнего значения. В частности, величина сизигийного прилива на побережье острова Врангель в течение года увеличивается до 2 раз, в Тикси – до 1.4 раза, в Карском море – до 1.3 раза. Характер сезонных изменений параметров основных приливных волн в первую очередь связан с влиянием ледяного покрова в зимне-весенний период.

2. На основе анализа регулярных наблюдений за колебаниями уровня моря на 44 береговых станциях в арктических морях России выявлена «горячая точка» — бухта Тикси, наиболее подверженная влиянию экстремальных сгонно-нагонных явлений. В среднем за год в бухте Тикси наблюдается 22 нагона и сгона высотой более 40 см. В этой акватории также был отмечен максимальный размах неперидического уровня относительно полной воды прилива (*skew surge*), составивший 2.4 м.

3. Показано, что на большей части побережья российской Арктики (за исключением Белого моря, Хатангского залива и части акватории Чукотского моря вблизи острова Врангель) неперидические колебания вносят преобладающий вклад в суммарную дисперсию колебаний уровня моря. При этом относительная роль приливов возрастает, а сгонно-нагонных колебаний уменьшается при удалении от берега. В центральной части шельфа моря Лаптевых вклад приливных колебаний уровня составляет 32%, тогда как в его северной части превышает 75% от общей энергии колебаний уровня моря.

4. Проведено численное моделирование приливных и неперидических колебаний уровня моря для ключевых районов арктического побережья России, результаты которого хорошо соответствуют данным натурных и спутниковых наблюдений. Данные моделирования позволили получить пространственную картину этих явлений. Наибольшие значения нагонов, рассчитанные по данным численной модели на 100-летний период повторяемости, были получены для Оленекского и Янского заливов (358 см) и острова Котельный (371 см). Наиболее значительные сгоны были рассчитаны для Хатангского и Янского заливов (-353 см).

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные оценки сезонной изменчивости характеристик прилива и количественный анализ сгонно-нагонных явлений в арктических морях могут быть использованы для прогноза колебаний уровня моря и оценки экстремальных значений в практических целях при строительстве и эксплуатации прибрежных

сооружений в арктических условиях, а также для обеспечения эффективной и безаварийной навигации флота в арктических морях.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается тщательной верификаций измерений уровня моря, полученных с помощью 44 прибрежных мареографов (станций), представляющих собой самописцы уровня моря (СУМ) на морских береговых и устьевых гидрометеорологических пунктах наблюдений и их сопоставлении (везде, где это возможно) с результатами независимых измерений. Исходные записи уровня моря были получены из Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО), где прошли тщательную проверку. Датчики придонного гидростатического давления, использованные для измерений на шельфе и побережье морей, были предварительно апробированы и настроены для получения значений уровня моря с минимальными погрешностями. Результаты численного моделирования верифицировались на основе сравнения с натурными наблюдениями за колебаниями уровня моря. Основные результаты диссертации сопоставлялись с результатами других авторов, что в итоге позволило существенно дополнить и расширить существующие представления о характере колебаний уровня моря в Арктике.

Апробация результатов. Основные результаты по теме диссертации докладывались на семинарах лаборатории цунами имени академика С.Л. Соловьева (2019–2021 гг.), на заседаниях ученого совета Физического направления Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН (2022 и 2023 гг.), на семинаре кафедры океанологии СПбГУ (2023 г.). Исследование было поддержано грантами РФФИ № 20-35-90096 («Аспиранты»), № 20-05-00533 и № 18-05-60250 («Арктика»).

Основные результаты диссертационной работы также были представлены на международных и всероссийских конференциях, таких как: международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование MARESEDU» (2016–2020 гг.), международная конференция «3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference» (2017 г.), всероссийская научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (2017 г.), всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана (КИМО)» (2017–2021 гг.), всероссийская научная конференция МФТИ (2017–2021 гг.), международная встреча «Workshop on Sea-Level Measurements in Hostile Conditions, UNESCO» (2018 г.), международная научная конференция «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики» (2020 г.), международная конференция EGU General Assembly (2021 г.), всероссийская научно-практическая конференция «Задачи и проблемы мониторинга

природных условий Обской губы на фоне изменяющегося климата и интенсивной хозяйственной деятельности» (2022 г.).

Публикации соискателя по теме диссертации. Автором было опубликовано по теме исследования 30 работ, из которых 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, 24 тезиса докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. В работе содержится 60 иллюстраций и 16 таблиц. Список цитированной литературы насчитывает 102 источника. Общий объем диссертации составляет 111 страниц.

Благодарности. Диссертационная работа выполнена под руководством кандидата физико-математических наук, заведующего лабораторией цунами ИО РАН, И.П. Медведева, которому автор выражает искреннюю благодарность. Автор признателен первоначальному научному руководителю Е.А. Куликову, который сформулировал задачу исследования, был идейным вдохновителем экспедиций, в результате которых автор получил материалы, явившиеся важнейшим элементом данной работы. Автор выражает благодарности всей команде НИС «Академик Мстислав Келдыш», начальнику экспедиций И.П. Семилетову, руководителю отряда сейсмологии А.А. Крылову, благодаря которым были осуществлены постановка и подъем датчиков. За плодотворное руководство выпускными квалификационными работами по выбранной тематике, автор признателен доцентам кафедры океанологии МГУ им. М.В. Ломоносова А.Т. Кондрину и В.С. Архипкину. За многочисленные советы и консультации автор признателен А.Б. Рабиновичу. Автор также признателен за поддержку всему коллективу Лаборатории цунами, коллегам из ИО РАН и всем членам своей семьи.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** раскрывается основная проблематика работы, обосновывается актуальность, ставится цель и задачи исследования, описаны научная новизна и практическое значение работы, основные положения, выносимые на защиту, а также представлена апробация результатов исследования, описана ее структура и выражены благодарности.

В **первой главе** описаны данные и методы, использованные в исследовании. В **разделе 1.1** приводится информация о 44-х станциях с ежечасными записями уровня в арктических морях России, высокочастотных данных (1 Гц), полученных с придонных датчиков гидростатического давления (автономного регистратора волнения или АРВ и мареографов

фирмы RBR), установленных на шельфе моря Лаптевых и на побережье Белого моря (рисунок 1), а также о входных параметрах численной модели ADCIRC, воспроизводившей колебания уровня на побережье моря Лаптевых. В модели применялись данные реанализа NCEP/CFSR (атмосферное давление, приземный ветер и концентрация льда) за период с 1980 по 2000 гг. с временным шагом 1 час и пространственным разрешением $0.3125^\circ \times 0.312^\circ$. На открытых границах задавались гармонические константы прилива, взятые из базы FES2004.

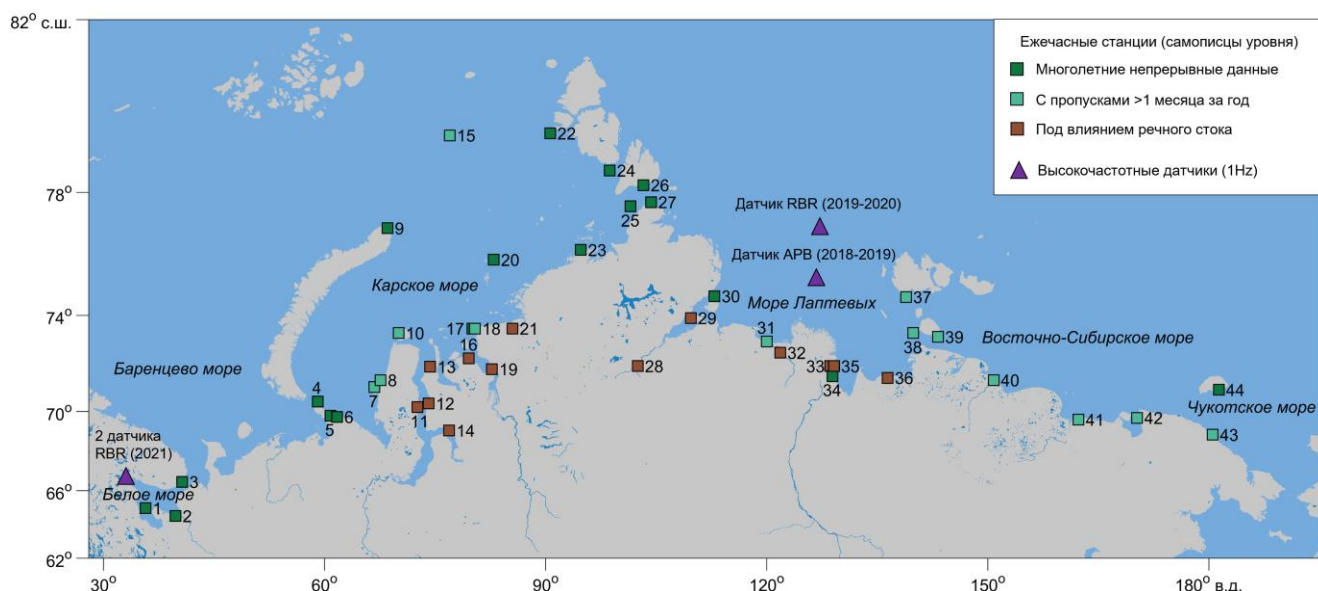


Рисунок 1 – Инструментальные наблюдения за уровнем моря: ежечасные данные с портала ЕСИМО и ежесекундные записи с придонных датчиков гидростатического давления

В разделе 1.2 описаны основные методы, примененные в работе с рядами наблюдений за уровнем моря: гармонический и спектральный анализы, статистика экстремальных значений приливного, остаточного и суммарного уровня моря, методы адаптации модели ADCIRC к условиям моря Лаптевых и сравнение результатов натурных наблюдений за приливами с моделью AOTIM5.

Расчет приливов проводился при помощи гармонического анализа методом наименьших квадратов (МНК) в программе T_Tide (MATLAB). Средние значения гармонических постоянных (ГП) прилива получены при помощи векторного осреднения их годовых значений, а для расчета сезонной изменчивости использовались осредненные за многолетний период месячные значения ГП. Спектральный анализ применялся для сравнения дисперсии приливных и непериодических колебаний уровня моря между арктическими станциями, а также для построения спектрограмм по высокочастотным данным с датчиков. Спектры рассчитывались при помощи метода Уэлча в скользящем окне Кайзера-Бесселя с 50% перекрытием. Были найдены экстремальные характеристики уровня – его значения и размах,

количество штормовых нагонов (непериодических колебаний уровня моря амплитудой > 40 см) и выделены крупнейшие события. Была также проведена оценка возможных модельных значений непериодического уровня для побережья моря Лаптевых за периоды повторяемости до 100 лет при помощи распределения Гумбеля.

Для моделирования колебаний уровня моря Лаптевых была построена нерегулярная триангуляционная сетка с шагом от 0.2 до 20 км. Побережье было поделено на 100-км участки, внутри которых одни характеристики усреднялись (количество штормовых нагонов, значения дисперсии, параметры приливов), а для других находились экстремумы (значение и размах уровня) за весь моделируемый период. В модели AOTIM5 используется сетка с шагом 5 км для всей Арктики, в которой рассчитаны основные ГП прилива, с учетом ассимиляции данных наблюдений и спутниковой альтиметрии. В данном исследовании для сравнения результатов натурных наблюдений с модельными использовались значения приливных амплитуд K_1 и M_2 , а также величин среднего сизигийного прилива (R_{spr}) и максимального приливного размаха (R_{abs}).

Во **второй главе** приведены результаты анализа инструментальных наблюдений за уровнем в морях Российской Арктики: Белом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском. **Раздел 2.1** посвящен изучению особенностей приливов в этих морях. Рассчитаны основные гармонические и негармонические приливные характеристики, рассчитаны их экстремальные величины, изучена сезонная изменчивость приливов.

На рисунке 2 показаны средние многолетние значения амплитуд главных приливных гармоник: суточных O_1 и K_1 , полусуточных N_2 , M_2 и S_2 , а также четвертьсуточного прилива M_4 , значимого для станций в Белом море. Величины среднего сизигийного прилива $R_{spr} = 2 \times (M_2 + S_2)$ и максимального приливного размаха R_{abs} (среди суточных циклов прилива за предвычисленные 18.6 лет) приведены на рисунке 3. Максимальных значений приливные величины наблюдаются в Белом море (R_{abs} до 429 см на станции Сосновец), а среди морей Сибирского континентального шельфа выделяется Хатангский залив моря Лаптевых ($R_{abs} = 131$ см на станции остров Преображения) [Kulikov et al., 2018; Медведев и др., 2022].

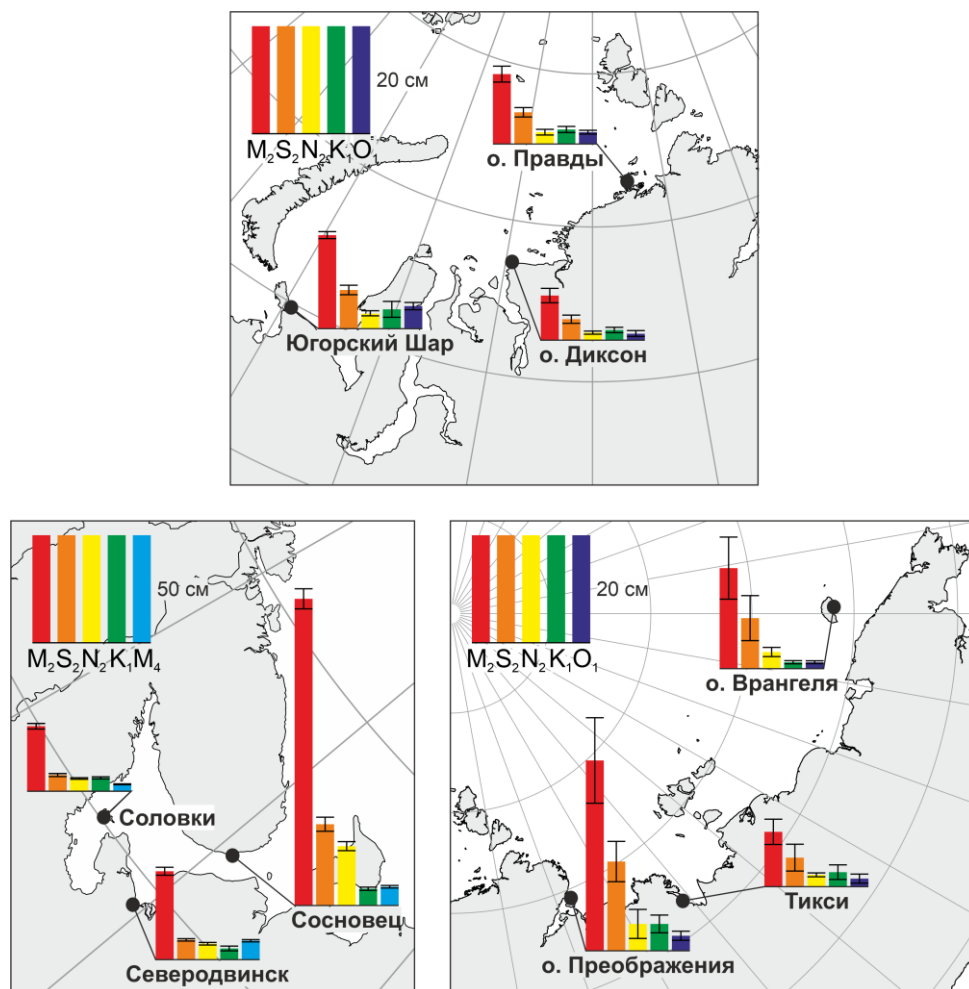


Рисунок 2 – Амплитуды и сезонный размах основных приливных гармоник (в см) для станций с многолетними непрерывными записями в Карском море (сверху), Белом море (снизу слева) и морях восточного сектора Арктики (снизу справа)

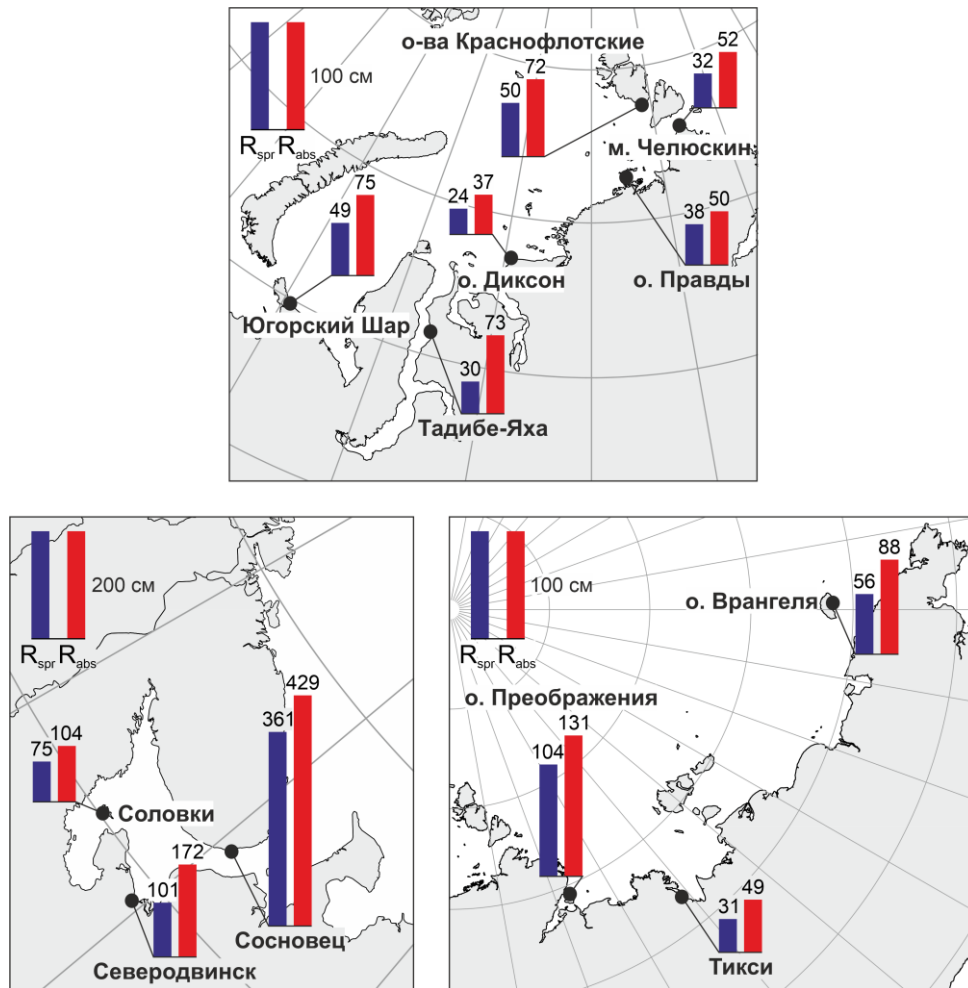


Рисунок 3 – Значения (в см) среднего сизигийного прилива R_{spr} (синие столбики) и максимальной абсолютной величины прилива R_{abs} (красные столбики) для станций с многолетними непрерывными записями Карского моря (сверху), Белого (снизу слева) и морей восточного сектора Арктики (снизу справа)

Характер сезонной изменчивости на примере основной полусуточной гармонике M_2 для станций с многолетними непрерывными записями уровня моря показан на рисунке 4. На большинстве станций с выраженным сезонным ходом наблюдается максимум приливной амплитуды в летний безледный период (июль – август), а минимум – с марта по май (период развитого ледяного покрова), что свидетельствует о влиянии льда на прилив. На станциях Соловки, остров Правды и бухта Тикси наблюдается обратная (аномальная) сезонная изменчивость, связанная также с влиянием льда на изменение приливной фазы, приводящее к увеличению амплитуды в период устойчивого ледяного покрова [Kulikov et al., 2020].

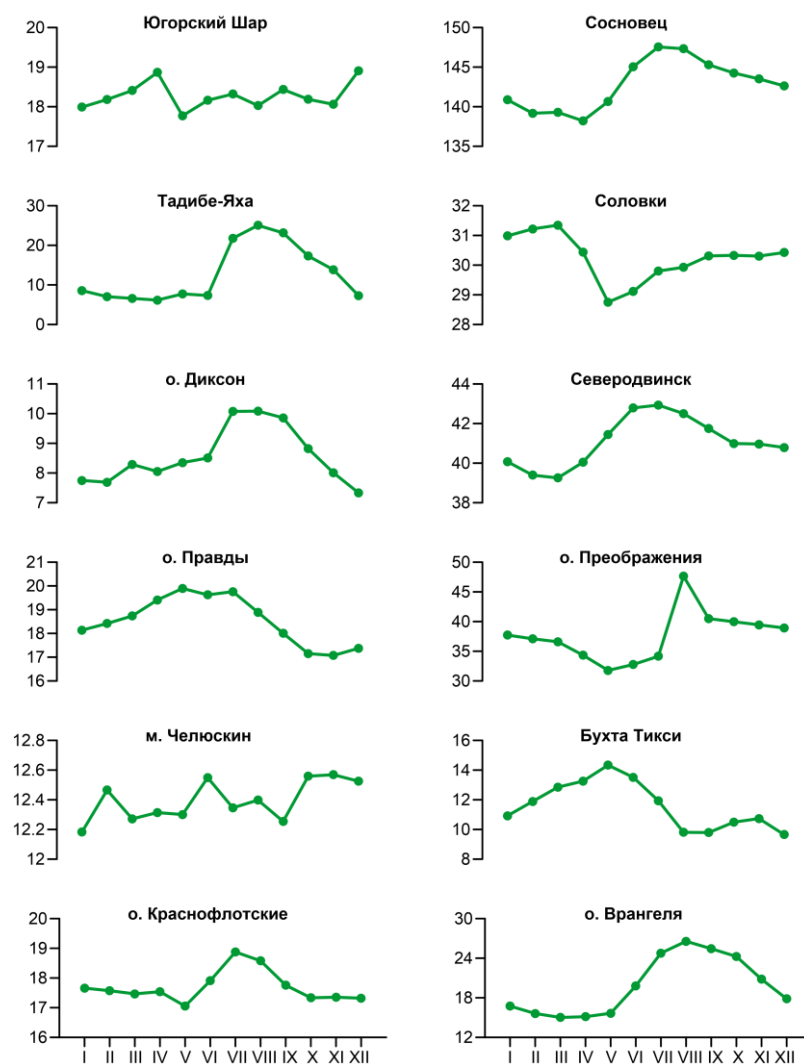


Рисунок 4 – Сезонная изменчивость амплитуды гармоника M_2 (в см) для прибрежных станций арктических морей России

Сезонный размах амплитуды гармоника M_2 также был представлен в виде относительных значений (в %) от среднего векторного значения амплитуды, рассчитанного с учетом фазы между месячными значениями. Относительный сезонный размах амплитуды M_2 для станций Белого моря находится в пределах 6.5–9%, в Карском море он меняется в широких пределах: от 3.1 до 166.5% (на станции Тадибе-Яха в Обской губе). В море Лаптевых для станций остров Преображения и бухты Тикси он составляет 42.2 и 45.4% соответственно. На острове Врангеля (Чукотское море) сезонный размах M_2 достигает 61.4% от среднего [Куликов и Медведев, 2021; Kulikov and Medvedev, 2021]. Проводилась также оценка сезонной изменчивости суточного прилива K_1 и прилива в сизигию R_{spr} , которая показала зависимость приливных величин от ледяного покрова для большей части арктических станций с выраженным сезонным ходом.

В разделе 2.2. проводился статистический анализ суммарного и непериодического (после вычитания прилива) уровней моря с выделением экстремальных штормовых нагонов и их количественным анализом для арктических станций с многолетними наблюдениями. Показано, что на большей части побережья морей Российской Арктики (за исключением Белого моря, Хатангского залива и части акватории Чукотского моря вблизи острова Врангель), непериодические колебания вносят преобладающий вклад в суммарную дисперсию по сравнению с приливом. На рисунке 5 приведены записи суммарного уровня во время максимальных нагонов и сгонов для станций, расположенных в морях Белом, Карском и Лаптевых [Медведев и др., 2022].

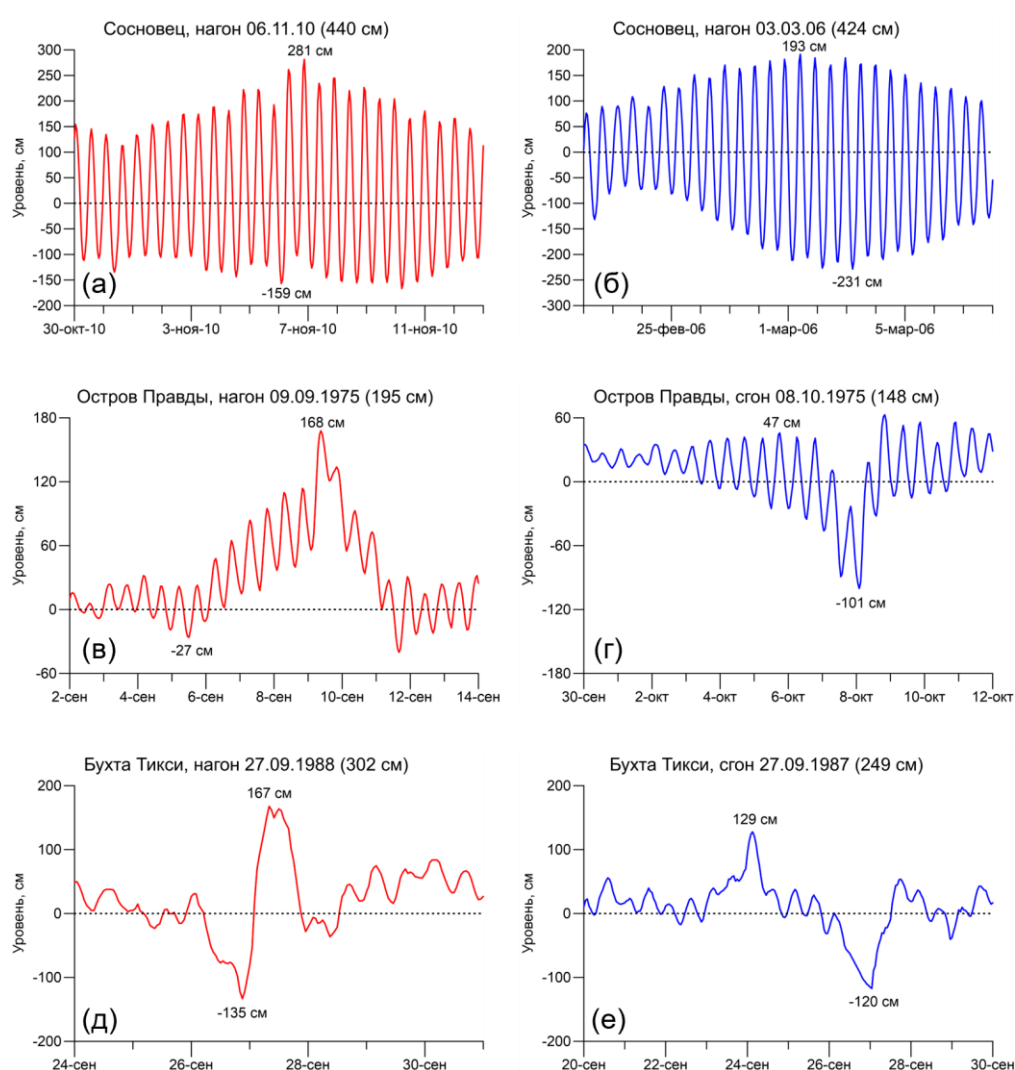


Рисунок 5 – Нагоны (а, в, д) и сгоны (б, г, е) с максимальным размахом суммарного уровня моря для станций: Сосновец (а, б), остров Правды (в, г), и бухта Тикси (д, е)

Были также рассчитаны максимальные величины «смещенного нагона», или *skew surge*, которые важны для практического использования. Этот параметр позволил оценить возможные

величины штормовых нагонов относительно известного приливного уровня (полных вод прилива) для станций с продолжительными наблюдениями за уровнем моря (рисунок 6). Среди всех арктических станций как по общему количеству штормовых нагонов, так и по их максимальной величине лидирует бухта Тикси. Там за период с 1981 по 2005 гг. в среднем за год происходило по 22 нагона и сгона величиной более 40 см, а максимальный штормовой нагон достигал значения в 243 см относительно прилива в фазу полной воды. При этом максимальный размах суммарного уровня был зафиксирован на станции Сосновец в Белом море, где из-за наибольшей среди рассматриваемых станций величины приливов он достигал 529 см за наблюдаемый период.

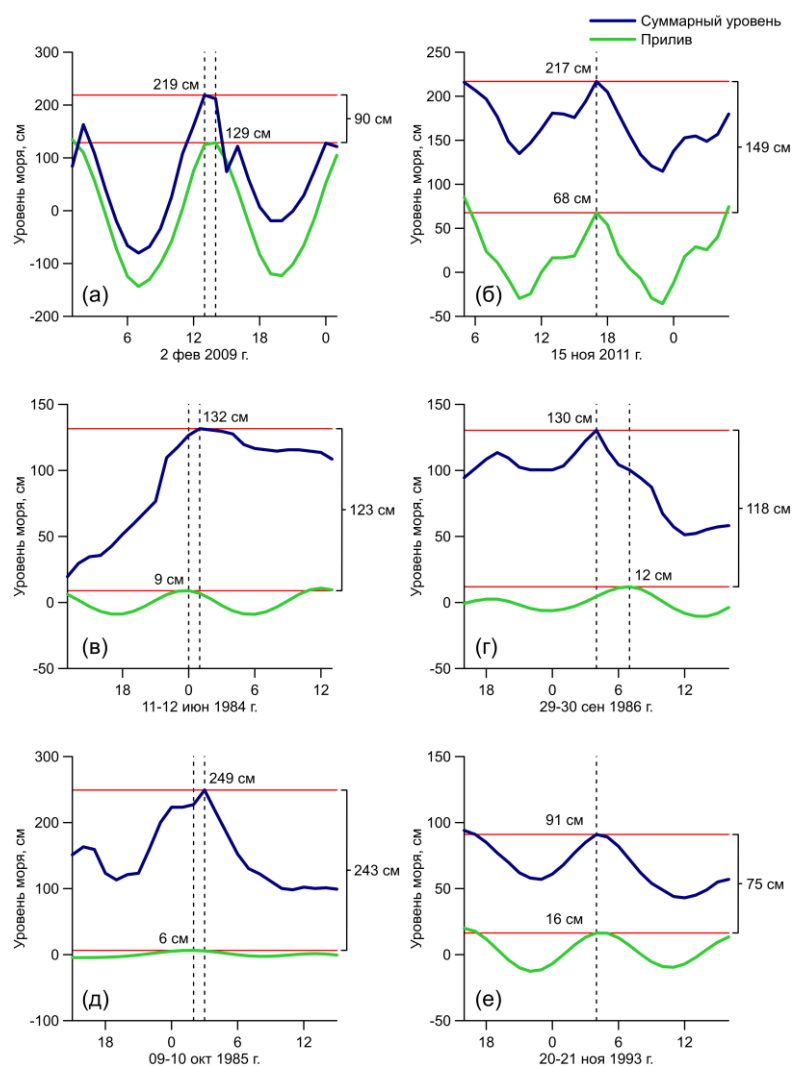


Рисунок 6 – Максимальные значения *skew surge* для станций: Сосновец (а), Северодвинск (б), остров Диксона (в), остров Правды (г), бухта Тикси (д) и остров Врангеля (е). Смещение между временем наступления полных вод прилива и максимумами суммарного уровня моря показано пунктирными линиями

Описание результатов обработки данных, полученных с придонных датчиков гидростатического давления, приводится в **разделе 2.3**. Благодаря ежесекундным исходным данным появилась возможность более детально исследовать колебания уровня в различных частотных диапазонах – от ветрового волнения и зыби до изменчивости уровня синоптического масштаба. Были найдены различия в доле приливов в дисперсию суммарных колебаний уровня моря между центральной частью шельфа моря Лаптевых (измерения APB, 2018–2019 гг.), где вклад приливов составляет 32%, и его северной частью (запись с RBR, 2019–2020 гг.), где доля приливов достигает 75%. Соответствующие оценки величины среднего сизигийного прилива (R_{spr}) при этом составляют 15 и 43.8 см.

По спектрограммам, построенным за годовые периоды записей с датчиков (рисунок 7), была проанализирована сезонная изменчивость энергии высокочастотных колебаний (в районе 5–10 секунд), соответствующих ветровому волнению и зыби. Энергия этих колебаний уменьшалась на несколько порядков в период с ноября по июнь – июль, что связано с влиянием ледяного покрова. Это подтверждается также данными с гидрофонов, установленных на сейсмологических станциях [Krylov et al., 2020; Krylov et al., 2021; Krylov et al., 2022]. Причем на спектрограмме APB заметно эпизодическое появление высокочастотной энергии с начала июня, что связано с появлением полыньи в этот период [Squire et al., 2021].

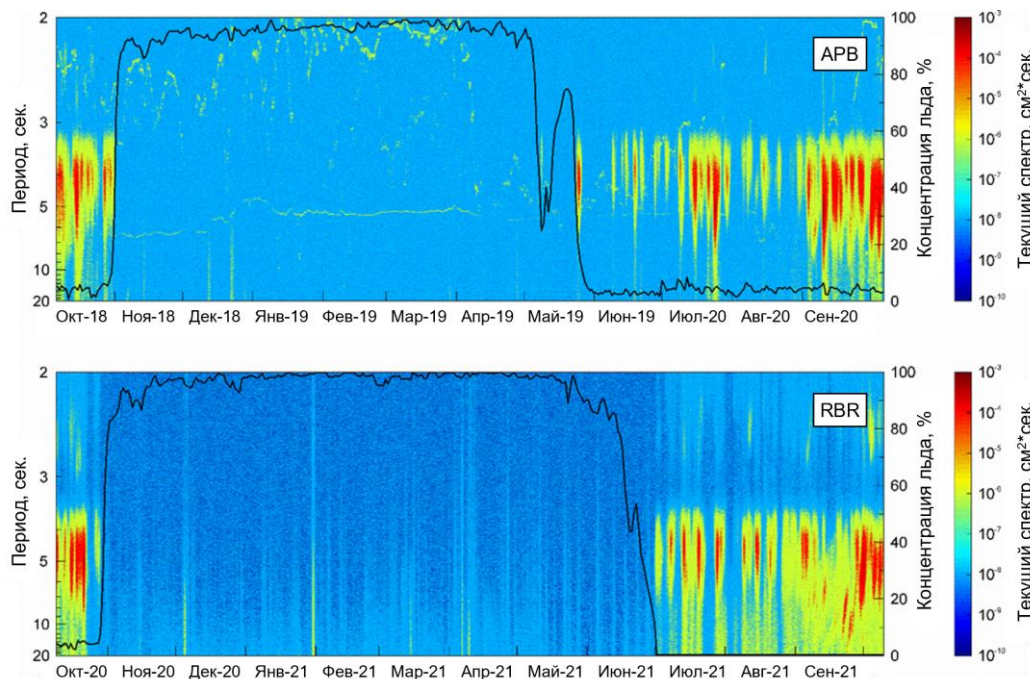


Рисунок 7 – Временные спектрограммы колебаний уровня моря, рассчитанные по записям с мареографов APB (вверху) и RBR (внизу). Черной кривой показана концентрация льда, построенная по данным из реанализа EUMETSAT

Датчики RBR были задействованы и в прибрежных измерениях уровня моря в районе Беломорской биологической станции (ББС МГУ) в апреле – мае 2021 года. Общий размах суммарного уровня за этот период составил 228 см (пирс ББС МГУ) и 223 см (мыс Киндо). Доля приливов в общую дисперсию колебаний уровня превышает 80%. Значения R_{spr} в точках достигает 165.2 см для пирса и 173 см для мыса Киндо, что хорошо согласуется с предыдущими измерениями в этом районе. В **разделе 2.4** кратко сформулированы основные выводы по второй главе.

Часть результатов, изложенных в Главе 2, опубликованы в работах [Kulikov et al., 2020; Медведев и др., 2022; Куликов и Медведев, 2021; Куликов и др., 2020; Куликов и др., 2017; Krylov et al., 2021; Krylov et al., 2022; Kulikov et al., 2018; Squire et al., 2021; Kulikov et al., 2018; Kulikov et al., 2017; Kulikov and Medvedev, 2021].

В **третьей главе** приводятся основные результаты численного моделирования колебаний уровня, полученные с помощью гидродинамической модели ADCIRC для моря Лаптевых (раздел **3.1**), а также некоторые особенности расчета приливов в Российской Арктике, посредством арктической приливной модели AOTIM5 (раздел **3.2**).

Сравнение модельных результатов колебаний уровня с натурными данными показало, что модель ADCIRC достаточно хорошо воспроизводит колебания уровня в море Лаптевых. Так, коэффициент корреляции (R) для годовой серии в бухте Тикси составляет 0.83, а для периодов отдельных штормовых нагонов значение R составляет 0.81–0.98 для разных станций моря Лаптевых, включая прибрежную, островную и станцию, расположенную на р. Хатанга. Оценка дисперсии непериодических колебаний уровня моря показало, что их доля в общей дисперсии преобладает над вкладом приливов для большей части побережья моря, за исключением района Хатангского залива (рисунок 8), что также совпадает с результатами натурных данных [Куликов и др., 2020].

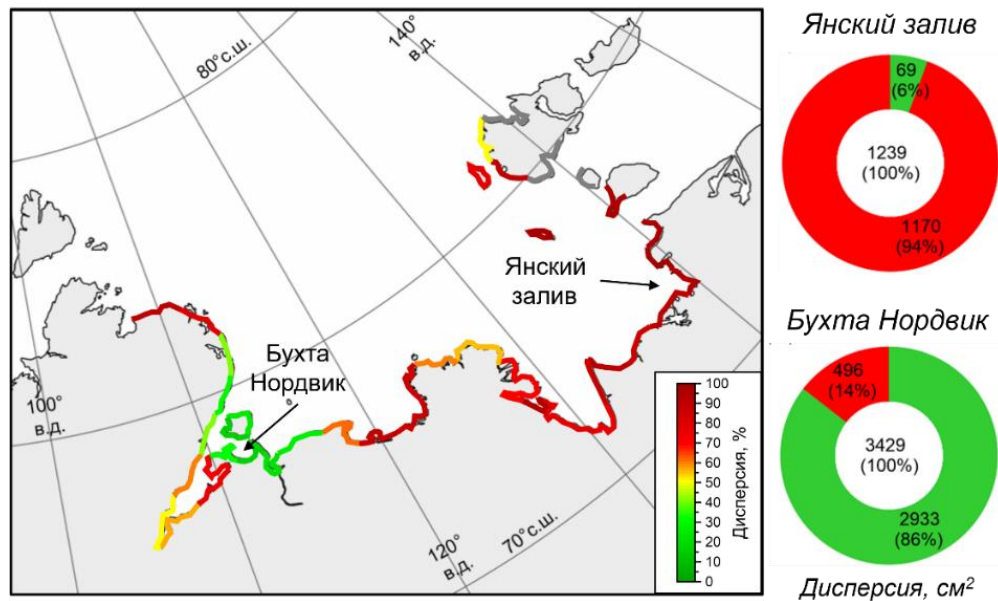


Рисунок 8 – Доля (%) дисперсии неперiodических колебаний уровня моря для участков побережья моря Лаптевых по данным численного моделирования (ADCIRC). Справа показаны соотношения для участков с максимальным и минимальным вкладом неперiodического уровня в суммарную дисперсию (его доля обозначена красным цветом, доля приливов – зеленым)

В данном разделе был проведен статистический анализ для экстремальных значений суммарного, приливного и неперiodического уровней моря Лаптевых за весь моделируемый период (1980-2000 гг.). Величина размаха суммарного уровня варьируется от 267 см в Хатангском заливе до 544 см в Янском заливе. Максимальные значения экстремальных характеристик прилива по данным модели были получены для Анабарского залива ($R_{spr} = 176$ см, $R_{abs} = 264$ см). Для неперiodического уровня были оценены его экстремальные возможные значения на периоды повторяемости до 100 лет (рисунок 9). Наибольшие значения нагонов были получены для Ленского и Янского заливов (358 см), а также острова Котельный (371 см). Наиболее значительные сгоны были рассчитаны для Хатангского и Янского заливов (353 см). Максимальный размах неприливногo уровня моря, рассчитанного за 100-летний период, был получен для Эбеляхской губы Янского залива, где он достиг около 7 метров (698 см) [Медведев и др., 2022].

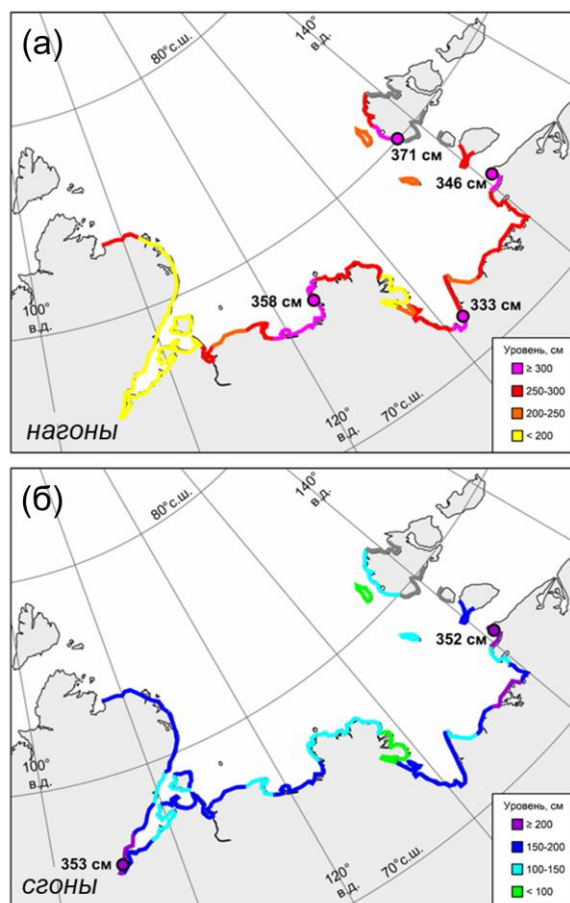


Рисунок 9 – Максимумы (а) и минимумы (б) неперiodического уровня моря, рассчитанные на 100-летний период повторяемости по данным моделирования (ADCIRC)

В разделе 3.2, посвященном арктической приливной модели AOTIM5 (2018 г.), показано ее сравнение с предыдущей версией (2004 г.) и с результатами, полученными после обработки данных наблюдений за уровнем моря [Куликов и др., 2019]. Для большинства акваторий модель адекватно оценивает величину основных приливных гармоник. Наиболее близко к наблюдаемым значениям приливов модель воспроизводит шельфовые районы арктических морей и их прибрежные области без сложной меняющейся батиметрии (чередa островов, проливы, части заливов). На рисунке 10 приведены примеры отдельных заливов Карского моря (Юрацкая губа, Пясинский залив) и моря Лаптевых (бухта Кожевникова Хатангского залива), где рассчитанная моделью приливная величина R_{abs} завышена в 2–3 раза по сравнению с натурными наблюдениями. В разделе 3.3 кратко сформулированы основные выводы по третьей главе.

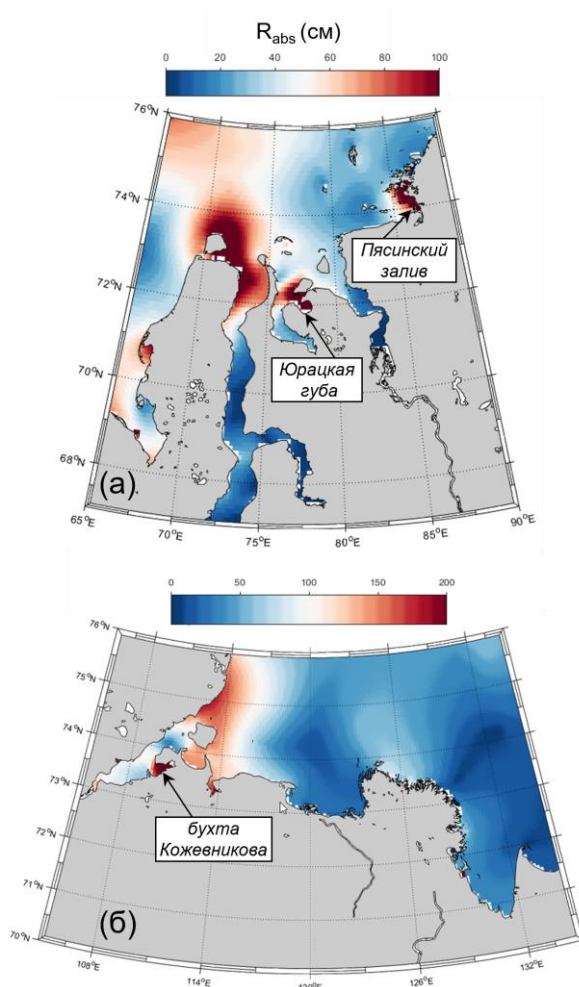


Рисунок 10 – Величина максимального размаха приливных колебаний уровня по данным АОТМ5 для юго-западных частей морей Карского (а) и Лаптевых (б)

Часть результатов, изложенных в Главе 3, опубликована в работах [Медведев и др., 2022; Куликов и др., 2020; Куликов и др., 2018; Куликов и др., 2019; Куликов и др., 2020].

В **Заключении** сформулированы основные выводы исследования. В ходе данного исследования на основе многолетних записей уровня в морях Российской Арктики был получен ряд принципиально новых результатов, относящихся к динамике приливных и неперiodических колебаний уровня моря в этом районе. Проведен анализ сезонных изменений приливов для ранее малоизученных регионов. Использование современных методов статистического и спектрального анализа временных рядов, дало возможность рассчитать вероятностные характеристики экстремальных подъемов и понижений уровня моря. Проведен количественный анализ сгонно-нагонных явлений, с выделением экстремальных характеристик неперiodических колебаний уровня в морях арктического бассейна. Впервые было проведено численное моделирование колебаний уровня моря Лаптевых на сетке с высоким пространственным разрешением. Результаты измерений колебаний придонного гидростатического давления с

помощью высокоточных датчиков на шельфе моря Лаптевых являются уникальными для данной акватории, позволяют получить важные сведения о характере приливных и непериодических движений в этом районе и верифицировать численную модель. Синхронные измерения колебаний уровня моря несколькими датчиками придонного гидростатического давления в Белом море также представляет несомненный интерес с точки зрения изучения региональных особенностей колебаний уровня моря в данном районе. Ниже представлены основные выводы исследования:

1. Показано, что на арктическом побережье России наблюдается сильная сезонная изменчивость прилива, обусловленная, прежде всего, влиянием ледяного покрова. Амплитуда главной полусуточной гармоники M_2 в восточном секторе Арктики в течение года меняется на 45–60%. Максимальные сезонные изменения среднего сизигийного прилива на станции остров Врангеля достигают размаха в 100%, минимальные – на беломорских станциях – 5–10%, размах прилива меняется от 31 см в бухте Тикси до 361 см на острове Сосновец.

2. Оценка дисперсии колебаний уровня моря показала, что в Белом море доминируют приливы, а в Карском море и в море Лаптевых вклад приливных и непериодических колебаний примерно одинаковый (47–55%). На острове Диксон и в бухте Тикси изменчивость уровня моря определяется значительным преобладанием непривливых колебаний (76–79%). В Белом море максимум дисперсии наблюдается в зимний период (октябрь-март), а в морях восточного сектора Арктики – летом (июль-октябрь).

3. Максимальное количество штормовых нагонов (амплитудой свыше 40 см) было зарегистрировано в море Лаптевых и в бухте Тикси (44 события за год), минимальное – на острове Врангеля в Чукотском море (7 событий). Максимальный размах суммарного уровня моря во время нагона составил 440 см в Белом море (остров Сосновец), при сгоне – 424 см. Значение «смещенного нагона» максимально в море Лаптевых (бухта Тикси) – более 249 см.

4. Вклад приливных колебаний уровня в центральной части шельфа моря Лаптевых составляет 32%, а в его северной части превышает 75% от общей энергии колебаний уровня моря, что связано с характером прилива и наличием сплоченного ледяного покрова. Для Белого моря размах суммарного уровня в период измерений достигает 228 см, а величина среднего сизигийного прилива – 173 см.

5. Результаты численного моделирования колебаний уровня моря Лаптевых с помощью модели ADCIRC хорошо соответствуют данным натурных наблюдений. Максимальные значения приливов (189 см) были получены для района Хатангского залива. Наибольшие значения нагонов, рассчитанные за 100-летний период повторяемости, отмечались

для Оленекского и Янского заливов (358 см) и острова Котельный (371 см), а сгоны – для Хатангского и Янского заливов (-353 см).

6. Модель АОТМ5 для арктических морей позволяет адекватно оценить величину основных приливных гармоник и восстановить общую пространственную структуру прилива. На основе данной модели были выделены акватории с максимальным приливом: юг Баренцева, пролив Горло и заливы Белого моря, устьевая область Обской губы в Карском море, Хатангский залив моря Лаптевых и севернее Новосибирских островов, что согласуется с доступными натурными данными.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список работ по теме диссертации, опубликованных в изданиях из перечня ВАК:

1. **Kulikov M.E.** Seasonal variability of tides in the Arctic Seas / **M.E. Kulikov**, I.P. Medvedev, A.T. Kondrin // Russian Journal of Earth Science. – 2018. – V. 18. – P. ES5003.
2. **Kulikov M.E.** Features of seasonal variability of tidal sea-level oscillations in the Russian Arctic Seas / **M.E. Kulikov**, I.P. Medvedev, A.T. Kondrin // Russian Meteorology and Hydrology. – 2020. – V. 45 (6). – P. 411–421.
3. Squire V.A. A cornucopia of oscillations on the Laptev Sea shelf / V.A. Squire, D.P. Kovalev, P.D. Kovalev, I.P. Medvedev, **M.E. Kulikov** // Continental Shelf Research. – 2021. – V. 227. – P. 104514.
4. Krylov A.A. Ocean-bottom seismographs based on broadband MET sensors: architecture and deployment case study in the Arctic / A.A. Krylov, I.V. Egorov, S.A. Kovachev, D.A. Ilinskiy, O.Y. Ganzha, G.K. Timashkevich, K.A. Roginskiy, **M.E. Kulikov**, M.A. Novikov et al. // Sensors. – 2021. – V. 21(12). – P. 3979.
5. Krylov A.A. Peculiarities of the HVSR method application to seismic records obtained by ocean-bottom seismographs in the Arctic / A.A. Krylov, **M.E. Kulikov**, S.A. Kovachev, I.P. Medvedev, L.I. Lobkovsky, I.P. Semiletov // Applied Sciences. – 2022. – V. 12 (19). – P. 9576.
6. Медведев И.П. Экстремальные колебания уровня в морях российской Арктики в условиях глобального изменения климата / И.П. Медведев, **М.Е. Куликов**, Е.А. Куликов, А.Ю. Медведева, О.И. Яковенко, Д.А. Смирнова // Вестник РФФИ. – 2022. – № 2 (114). – С. 84–101.

Опубликованные тезисы докладов (основные):

7. **Куликов М.Е.** Характеристики стонно-нагонных колебаний уровня Белого моря / **М.Е. Куликов**, Кондрин А.Т. // Труды V Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2016)». – Москва. – 2016. – С. 59–62.
8. **Куликов М.Е.** Сезонная изменчивость приливов арктических морей России / **М.Е. Куликов**, Кондрин А.Т., Е.А. Куликов, И.П. Медведев // Тезисы докладов научной конференции «Моря России: наука, безопасность, ресурсы». – Севастополь. – 2017. – С. 80–81.
9. **Kulikov M.E.** Seasonal variability of tides in the Arctic seas of Russia / **M.E. Kulikov**, A.T. Kondrin, I.P. Medvedev // Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting. – Helsinki. – 2017. – V. 201. – P. 226–228.
10. **Kulikov M.E.** Seasonal variability of tides and storm surges in the Arctic seas of Russia / **M.E. Kulikov**, E.A. Kulikov, I.P. Medvedev, A.T. Kondrin // IOC Workshop Reports, 281. – UNESCO. – 2018. – P. 33–34.
11. **Куликов М.Е.** Моделирование штормовых нагонов в морях российской Арктики / **М.Е. Куликов**, В.С. Архипкин, И.П. Медведев, А.Т. Кондрин // Процессы в геосредах. – Санкт-Петербург. – 2018. – № 3 (17). – С. 254.
12. **Куликов М.Е.** Моделирование метеорологических и приливных колебаний уровня в море Лаптевых / **М.Е. Куликов**, И.П. Медведев, В.С. Архипкин // Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых (КИМО) «Комплексные исследования Мирового океана». – Калининград. – 2020. – С. 102–103.
13. **Куликов М.Е.** Изучение структуры колебаний уровня моря Лаптевых при помощи высокочастотных измерителей придонного давления / **М.Е. Куликов**, И.П. Медведев, А.А. Крылов, М.А. Новиков // Труды 63 научной конференции МФТИ. – Москва. – 2020. – С. 319–320.
14. **Куликов М.Е.** Анализ приливных колебаний уровня Карского моря по данным прибрежных наблюдений / **М.Е. Куликов**, И.П. Медведев // Труды 64 научной конференции МФТИ. Аэрокосмические технологии. – Москва. – 2021. – С. 298–299.
15. **Kulikov M.E.** Seasonal variability of tides in the Russian Arctic seas / **M.E. Kulikov**, I.P. Medvedev // EGU General Assembly 2021. – Online, 19–30 Apr 2021. – 2021. – EGU21-11880.