

На правах рукописи



Шармар Виталий Дмитриевич

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В  
СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ ПО ДАННЫМ  
НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 1.6.17 — «Океанология»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023



## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Изменения климата в последние десятилетия носят глобальный характер и отличаются значительными, трудно предсказуемыми аномалиями. Эти изменения касаются не только характеристик глобальной температуры, ледяного покрова и температуры океана, но и параметров ветрового волнения Мирового океана. Волны в контексте климата являются интегратором характеристик ветра на достаточно больших масштабах и представляют собой эффективный индикатор климатических изменений. На региональном уровне параметры ветрового волнения важны для понимания динамики климата различных акваторий. Например, наблюдаемое увеличение площади открытой воды, разгона ветра и его продолжительности может приводить к усилению ветрового волнения в свободных ото льда акваториях Арктики. Таким образом, исследование характеристик волнения, их динамики на различных масштабах времени как переменных глобальной климатической системы представляет актуальную задачу, требующую всестороннего анализа при оценке многолетних исторических колебаний ветро-волнового климата.

При этом современные данные о ветровом волнении характеризуются существенными неопределенностями. На сегодняшний день существует 3 основных источника измерений ветровых волн: попутные судовые наблюдения, измерения с заякоренных буев и спутниковые средства мониторинга. Попутные судовые наблюдения обладают наибольшей продолжительностью измерений волнения — более 150 лет, их главным недостатком является пространственно-временная неоднородность, ограничивающая точность оценок изменчивости климата в глобальном масштабе. Измерения с заякоренных буев проводятся лишь в отдельных точках и сравнительно коротки. Спутниковые средства мониторинга обеспечивают однородное покрытие Мирового океана, однако их существенным недостатком является неполный набор характеристик смешанного волнения, особенно экстремальных величин, и относительно короткие ряды наблюдений. Указанные недостатки существенно затрудняют применимость этих данных для климатических исследований. Важным источником глобальных и долгопериодных данных о ветровых волнах является моделирование, дающее возможность анализа динамики волнового климата на различных периодах: от декадных до исторических.

В последние десятилетия происходило стремительное развитие волнового моделирования за счёт усовершенствования спектральных волновых моделей, что наряду с развитием усвоения данных измерений и наращивания вычислительных мощностей обеспечило возможность ретроспективного восстановления волнового климата на мультидекадных масштабах. Однако различные численные эксперименты («хидкасты» — от англ. hindcasting) расходятся как в оценках характеристик волнения, так и в оценке долгопериодных тенденций волнового климата. Расхождения в волновых

ретроспективных прогнозах обусловлены использованием моделей с различными конфигурациями и параметризациями подсеточных процессов. Различные модели (WAM, MIKE21, SWAN и WaveWatch III) обнаруживают в глобальных расчетах существенные локальные расхождения даже при условии использования одинаковых граничных условий. Эти расхождения связаны как с самими конфигурациями моделей, так и с различиями в граничных условиях, используемых для моделирования.

Все вышеперечисленные причины приводят к значительным погрешностям в климатических характеристиках волн и оценках экстремальных волн. Это сдерживает эффективное использование моделирования для оценок изменений земной климатической системы и объединение волновых моделей с моделями климата и Земной системы.

**Целью** данной работы является установление характеристик динамики ветрового волнения в современном климате на основе численного моделирования и анализ механизмов, определяющих эту изменчивость.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Адаптировать спектральную модель WaveWatch III (далее WW3) версии 5.16 для расчетов волнения в глобальном масштабе и провести тестирование различных конфигураций.
2. Провести валидацию результатов моделирования волнения по данным измерений с заякоренных буев и спутниковой альтиметрии.
3. Разработать методологию валидации ретроспективных прогнозов спектральной волновой модели по данным попутных судовых наблюдений.
4. Провести реконструкцию глобального волнового климата для современных климатических условий (1980—2019) с использованием модели WW3.
5. Выполнить диагностику совместной изменчивости высот волн и характеристик ледового покрова в современном климате.
6. Разработать региональные конфигурации моделей волнения субполярной Атлантики и Арктики для оперативной верификации радиолокационных измерений ветрового волнения в этом регионе.

**Научная новизна:**

1. Впервые созданы глобальные климатологии характеристик ветрового волнения на основе численного моделирования с использованием данных четырех современных атмосферных реанализов (ERA5, ERA—Interim, MERRA2, CFSR) в качестве граничных условий.
2. Впервые проведена сравнительная оценка долгопериодной изменчивости характеристик волнения для четырех хиндкастов с выделением районов Мирового океана, для которых наблюдаются устойчивые климатические сигналы.

3. Предложена новая методология валидации ретроспективных прогнозов спектральной волновой модели по данным попутных судовых наблюдений с учетом неоднородности.
4. Впервые выполнен анализ взаимодействия ветрового волнения и морского льда в Арктике, который позволяет оценить возможное улучшение климатической предсказуемости за счет учета ветрового волнения в объединённых моделях Земной системы.
5. Впервые продемонстрирована возможность использования высоко разрешающего моделирования для оперативного мониторинга волновой обстановки, полученной на основе использования инновационной радиолокационной приставки SeaVision.

**Практическая значимость** связана с созданием ансамбля долгопериодных сеточных массивов характеристик ветрового волнения, позволяющего оценивать роль атмосферных процессов в формировании динамики ветрового волнения на поверхности Мирового океана. На основе расчетов выбора граничных условий в модели волнения были просчитаны четыре варианта, которые помогают понять причины несоответствий в климатических и сезонных диапазонах изменчивости, как в отдельных областях Мирового океана, так и в Мировом океане в целом на воспроизведение волновых характеристик. Кроме того, полученные оценки экстремального волнения на поверхности всего Мирового океана могут быть использованы для оценки и минимизации рисков мореплавания и других видов морской деятельности. Материалы диссертации уже использованы при составлении климатических прогностических оценок ветрового волнения проекта COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate Project), являющегося поставщиком данных о волнении для МГЭИК, в котором автор принимал активное участие (<https://www.nature.com/articles/s41597-022-01459-3>).

**Методология и методы исследования.** Методологической основой исследования, осуществленного в рамках численного моделирования, является модель WW3. Эта модель была адаптирована автором в Институте океанологии РАН и используется для широкого круга задач.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Построены новые конфигурации спектральной волновой модели WW3 для Мирового океана и Арктики, для их обоснования проведена тщательная валидация.
2. Впервые созданы глобальные климатологии характеристик ветрового волнения, включая статистики экстремальных волн на основе численного моделирования с использованием данных четырех современных атмосферных реанализов (ERA5, ERA-Interim, MERRA2, CFSR) в качестве граничных условий. Получены оценки долгопериодной изменчивости для средних и экстремальных значений волнения.

3. Предложена и апробирована методология валидации ретроспективных прогнозов спектральной волновой модели по данным попутных судовых наблюдений, что позволило впервые провести сравнение с глобальными визуальными наблюдениями с учетом их неоднородности.
4. Выполнены оценки линейных трендов средних и экстремальных характеристик волнения для Арктики в присутствии ледового покрова. Показано, что в Беринговом море наблюдаются значимые положительные тренды.
5. Построены высокоразрешающие региональные конфигурации модели и проведено их объединение с высокоразрешающей моделью атмосферы, что позволило получить уточнённые характеристики ветрового волнения для прибрежных районов Арктических морей и впервые продемонстрировать возможность использования высокоразрешающего моделирования для оперативного мониторинга волновой обстановки.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается качественной и количественной согласованностью результатов моделирования с натурными измерениями как контактными, так и дистанционными. Физическая трактовка полученных результатов находится в согласии с общепризнанными представлениями. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих зарубежных изданиях, доклады вались на международных конференциях и неоднократно обсуждались на семинарах.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на заседаниях Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (апрель 2022 г.; сентябрь 2022 г.). Отдельные результаты докладывались на следующих российских и международных конференциях:

- XIX научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ» Нижний Новгород, 29 февраля - 6 марта 2020 г.; VI научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», 2021 г.; XXVII международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», 2021 г.; международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование» (MARESEDU), 2021 и 2022 гг.; международное совещание по Ветровому волнению, штормовым нагонам и прибрежным процессам (Storm Surges and Coastal Hazards), 2019 г.; ежегодная ассамблея Европейского геофизического союза в г. Вена, Австрия (EGU), 2019 г.; совещание Европейского космического агентства по вопросам о состоянии поверхности моря (ESA Sea State CCI), 2021 г.; международное совещание по Ветровому волнению в прибрежных зонах

(WISE), 2021 и 2022 гг.; международное совещание программы по созданию климатических прогностических оценок ветрового волнения (COWCLIP), 2019-2023 гг.

**Личный вклад.** Все защищаемые положения получены автором лично, включая планирование и выполнение численных экспериментов, а также интерпретацию результатов и написание статей. Автор принимал активное участие в международном проекте COWCLIP от лица ИО РАН наряду с 7 ведущими исследовательскими центрами. Результаты хиндкаста на основе атмосферного реанализа MERRA2 были получены совместно с Маркиной М.Ю., они стали частью международного проекта по восстановлению климата ветрового волнения (хиндкаст находится в открытом доступе <https://wave-hindcast.ocean.ru/>). Приведенные в диссертации результаты верификации высокоразрешающего моделирования с данными разработкой в ИО РАН совместно с ЗАО МКИС радиолокационной системы SeaVision были получены соискателем лично в ходе трех морских экспедиций НИС ИО РАН. В 50 рейсе НИС «Академик Сергей Вавилов» в августе - сентябре 2020 года в соответствии с планами работ ИО РАН на Северо-Атлантическом полигоне проведены измерения ветрового волнения радиолокационной системой SeaVision и дрейфующим волнографом Spotter. В 2021 году в 57 рейсе НИС «Академик Иоффе» выполнено повторение ранних измерений вдоль трансатлантического разреза примерно по 60° с.ш. В сентябре-декабре 2022 в 63 рейсе НИС «Академик Иоффе» в рамках комплексной экспедиции ИО РАН были выполнены измерения ветрового волнения в центральной части Атлантического океана.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 10 из которых изданы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 1 глава в монографии в соавторстве и 1 тезисы докладов.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, достоверность, апробация, личный вклад, публикации представляемой работы.

**Первая глава** посвящена обзору научной литературы по климатической динамике ветрового волнения на различных масштабах по данным наблюдений и численного моделирования.

В **разделе 1.1** рассмотрены современные источники данных о глобальных наблюдениях за ветром и волнением, используемые в исследованиях

климатической динамики и экстремальных характеристик ветра и волнения Мирового океана: попутные судовые наблюдения, данные спутниковых измерений, глобальные проекты по реанализу ветра и волнения.

В разделе представлено описание попутных судовых данных, ассимилированных в архив, известный как ICOADS (International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set). Это наиболее полная из существующих коллекций данных приводных метеорологических наблюдений: в нее включены все данные попутных судовых наблюдений (Voluntary Observing Ship, далее VOS) с 1784 г. до настоящего времени. Сведения о ветровом волнении появляются в ICOADS в конце XIX столетия (с 1870 г.). Попутные судовые наблюдения недостаточно точны и привязаны преимущественно к судоходным трассам, помимо этого, траектории судов часто пролегают вне зон сильных штормов, что ограничивает область их применения.

Анализ спутниковых данных для изучения динамики волн включает наиболее полный массив GlobWave, ESA Sea State CCI, Multi-Mission product (рис. 1). Начиная с 1985 года он включает данные 9 альтиметрических спутниковых миссий, при этом одновременно на орбите находятся не более пяти спутников (в настоящем момент — октябрь 2023 — их семь).

В данном разделе также представлены данные контактных методов измерений (с помощью заякоренных станций и дрейфующих буйковых датчиков) в отдельных частях Мирового океана и радиолокационных методов зондирования на основе использования судовой РЛС X-диапазона. Несмотря на то, что сеть буйковых измерений ежегодно увеличивается за счет появления новых средств измерений, а данные измерений гарантируют непрерывность и высокую точность временных рядов характеристик волнения, их локализация в отдельных районах океана не позволяет получить глобальной картины. Начиная с 1979 по настоящее время данные NDBC буев предоставляют информацию о волнении с максимальным временным охватом в 39 лет, с учётом пропусков из-за выхода из строя измерительной аппаратуры.

В разделе **1.2** приводится обзор исследований волнового климата (на основе ключевой характеристики — *значительной высоты волны*). В действующих нормах за основу определения волнового климата обычно используются характеристики волнения за длительные промежутки времени (от 40 лет). В разделе представлен обзор работ, освещающих вопросы волнового климата по данным попутных судовых наблюдений, спутниковых измерений и по данным измерений *in-situ*.

В разделе **1.3** представлено описание результатов исследования долгопериодной климатической динамики ветрового волнения при помощи численного гидродинамического моделирования с применением спектральных непараметрических моделей III и IV поколений WAMDI. Именно

благодаря развитию в области волнового моделирования и усвоению данных наблюдений, достигнут значительный прогресс в исследовании и оперативном климатическом прогнозировании волнения в Мировом океане. Большое разнообразие атмосферных и волновых реанализов, охватывающих промежуток времени от 50 до 70 лет (рис. 1), обеспечивает информацию о глобальных полях ветро-волновых характеристик в высоком разрешении и дает возможность оценить их изменчивость на масштабах десятилетий.

**Вторая глава** посвящена разработке конфигурации и валидации численного климатического эксперимента с помощью модели WW3, которая часто используется в исследованиях долговременной изменчивости и динамики ветровых волн. Модель основана на численном решении уравнения баланса волновой энергии, представленного в спектральном виде. Численным решением модели являются частотно-направленные энергетические спектры в каждой точке расчётной области, из которых в процессе постобработки получают основные характеристики ветрового волнения (значительная высота волны, период, направление волн и т.д.).

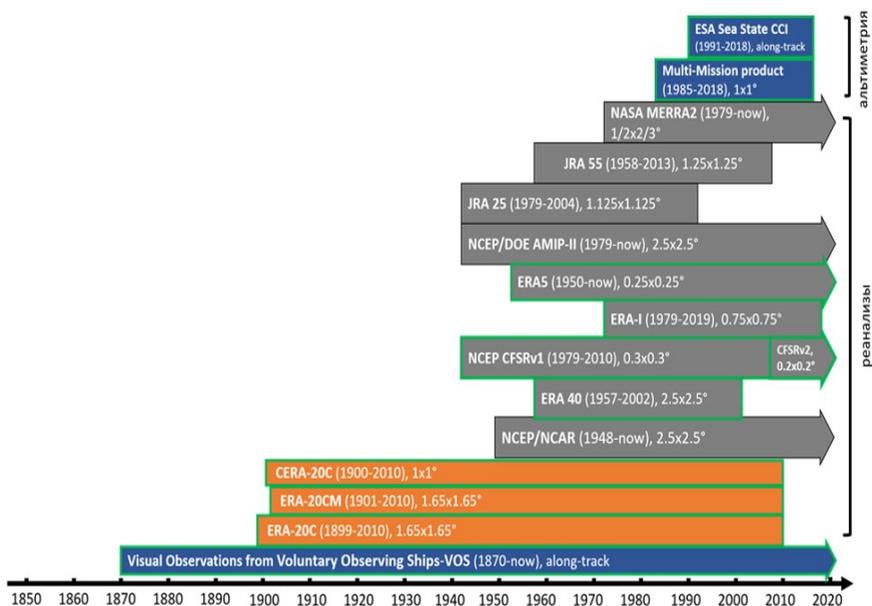


Рис. 1 — Временная протяженность наиболее используемых информационных массивов данных о ветре и волнении. Зеленым контуром выделены массивы, содержащие данные о ветре и волнении, черным контуром — атмосферные реанализы

В разделе 2.1 представлено подробное описание спектральной модели WW3 с описанием функции источника ST4.

В разделе 2.2 дано обоснование конфигурации численного эксперимента по восстановлению глобального волнового климата. В модельной конфигурации была задана функция источника ST4 с установленным по умолчанию коэффициентом взаимодействия ветра и волн ( $\beta_{\max}=1.25$ ). Для слагаемого слабонелинейного взаимодействия существует достоверное теоретическое описание «из первых принципов» в приближении слабой нелинейности, однако на практике используется упрощенная схема расчета нелинейного взаимодействия DIA (SNL1,  $C = 2.5 \times 10^5$ ). Параметризация схемы взаимодействия волн со льдом IC0 задается по умолчанию, как наиболее удобная с точки зрения модификации. В выбранной параметризации скорость затухания волновой энергии при прохождении акваторий, частично покрытых льдом, зависит от пространственного разрешения входных данных о сплоченности льда. Каждый модельный эксперимент проводится на расчётной сетке, соответствующей пространственному разрешению исходного атмосферного реанализа, задаваемый с 6-ти часовой дискретностью в узлах сеточной области.

Для расчётов спектр разделяется на 32 интервала частотных полос с центральными частотами 0.0418 до 0.4115 Гц, выбираемых таким образом, чтобы каждая последующая центральная частота была равна предыдущей, умноженной на инкремент 1.1. По направлениям спектр делится на 24 угловых полос по  $15^\circ$  каждая. Для решения задачи конфигурация экспериментов была фиксированной, отличались только атмосферные реанализы, используемые в качестве граничных условий (См. табл. 1). В табл. 1 представлены характеристики 4 атмосферных реанализов (ERA-Interim, ERA5, CFSR MERRA2), по которым рассчитывался волновой климат на глобальном масштабе: ERA-Interim (ECMWF, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) и CFSR (NCEP, Национальный центре экологического прогнозирования) наиболее часто используются для исследования ветрового волнения; ERA5 (ECMWF) наиболее современный в настоящий момент и обладающий наиболее высоким разрешением; и MERRA2 (NASA), который воспроизводит максимальное количество циклонов, в том числе интенсивных. Также в табл. 1 приведены величины дискретизации модельного временного шага, используемого в численных экспериментах. В дальнейшем результаты расчётов волнения по модели WW3 обозначены для каждого эксперимента с указанием реанализа, использованного в качестве форсинга модели ERA5-WW3, ERAi-WW3, MERRA2-WW3, CFSR-WW3.

В разделе 2.3 приведены результаты двухэтапной валидации полученных результатов расчетов по модели WW3 с применением различных реанализов в качестве граничных условий. Первый этап включает оценку качества воспроизведения скорости ветра на высоте 10 метров (путем

Таблица 1 — Конфигурация расчётов ветрового волнения

| Реанализ   | Разрешение            |                   | Пространствен-<br>ное разрешение<br>(lat x lon) | Дискретность по времени<br>(сек) в WaveWatch III |                 |              |              |
|------------|-----------------------|-------------------|---|--|-----------------|--------------|--------------|
|            | атмосферной<br>модели | Схема<br>усвоения |   | $\Delta t_g$                                     | $\Delta t_{xy}$ | $\Delta t_k$ | $\Delta t_s$ |
| ERA5       | T636 L137             | 4D-Var + EDA      | $0.25^\circ \times 0.25^\circ$                  | 1800   | 225             | 900          | 60           |
| ERAi       | T255 L60              | 4D-Var            | $0.7^\circ \times 0.7^\circ$                    | 1200   | 600             | 600          | 60           |
| CFRSR (v2) | T382 L64              | 3D-Var SSI        | $0.312^\circ \times 0.312^\circ$                | 1800   | 300             | 900          | 30           |
| MERRA2     | 1/2 x 2/3 L72         | 3D-Var + IAU      | $0.5^\circ \times 0.625^\circ$                  | 1200   | 600             | 600          | 60           |

сравнения с данными измерений *in-situ* и спутниковой информации по альтиметрам). На втором этапе анализируется воспроизведение высот волн путём сравнения с заякоренными буями NDBC, массивом GlobWave, содержащим все имеющиеся данные спутниковой альтиметрии и попутными наблюдениями с судов VOS. Ниже приводятся результаты валидации численных экспериментов по данным измерений на основании двух источников информации: откалиброванных спутниковых измерений альтиметра семейства Jason-1 из специализированной базы данных GlobWave и натуральных измерений на заякоренных станциях сети буев Национального центра данных NDBC.

На первом этапе валидации количественными статистическими метриками являются нормализованная средняя интегральная ошибки (NBIAS), индекс рассеяния (SI) и среднеквадратическая ошибка (RMSE) между результатами хиндкаста,  $h$ , и измерениями,  $m$ :

$$NBIAS = \left[ (\bar{h} - \bar{m}) \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i)^2} \right] \times 100, \quad (1)$$

$$SI = \frac{1}{\bar{h}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2 - (m_i - \bar{m})^2} \times 100, \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - m_i)^2}. \quad (3)$$

здесь черта над каждым из аргументов означает среднюю величину,  $N$  - общее число значений.

На рис. 2 показаны количественные статистики для высот волн: нормализованная средняя интегральная ошибки — верхний ряд, индекс рассеяния — центральный ряд и среднеквадратическая ошибка — нижний ряд. Наименьшие погрешности обнаруживаются для ERA5-WW3, тогда как ERAi-WW3

и MERRA2-WW3 показывают чуть больший разброс, но одинаковые тенденции в целом. Существенно отличается от трех упомянутых массивов CFSR-WW3, который значительно завышает измерения альтиметра семейства Jason-1, особенно в средних широтах.

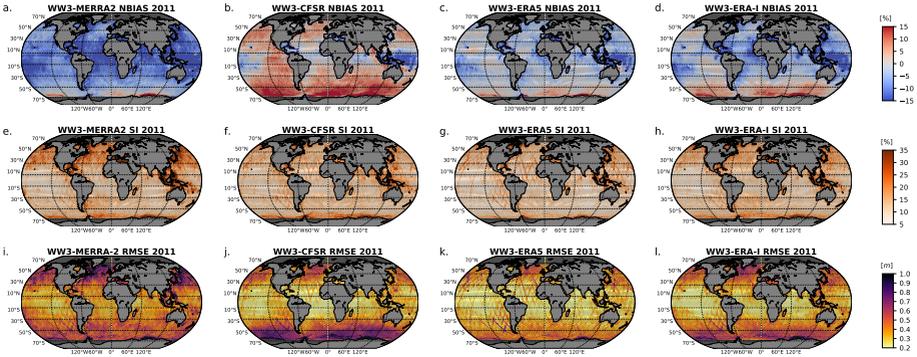


Рис. 2 — Нормализованное отклонение (NBIAS: a-d), индекс рассеяния (SI; e-h) и среднеквадратическая ошибка (RMSE; i-l) высоты волны по результатам моделирования ветрового волнения MERRA2-WW3 (a,e,i), CFSR-WW3 (b, f, j), ERA5-WW3 (c,g,k) и ERAI-WW3 (d,h,i) в сравнении с данными спутниковой альтиметрии Jason-1 в 2011 году

Второй этап оценки качества волновой модели включал сравнение скорости ветра на высоте 10 м в данных реанализов и высоты волнения (полученной с использованием ветра из этих реанализов) с данными 35 волномерных буюв из базы NDBC в Атлантическом и Тихом океанах (параграф 2.3.2). На рис. 3 показаны основные метрики ошибок между временными рядами из данных буюв NDBC и временными рядами скорости ветра (рис. 3, a - d) предоставляемые в реанализах и результатах моделирования высот волн (рис. 3, e - h), чтобы оценить внутримодельные различия, связанные с граничными условиями. На рис. 3 приведен результат сравнения в форме диаграммы Тейлора. В каждом из графиков одновременно отображаются данные статистических метрик (коэффициента корреляции, нормированного стандартного отклонения, центрированного среднеквадратического отклонения). Здесь верхний ряд (a-d) представляет результат сравнения скорости ветра, а нижний ряд (e-h) — значительной высоты волн в координатах буюв. Справа (i) показано пространственное распределение буюв.

В целом, сравнение не выявило продукта, значительно превосходящего другие по качеству воспроизведения ветра: все реанализы демонстрируют хорошее согласие с данными буюв с коэффициентом корреляции, превышающим 0.8, и центрированным среднеквадратическим отклонением менее  $0.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Нормализованное стандартное отклонение скоростей ветра в трех

реанализах MERRA2, ERAi и ERA5 (рис. 3 а, б, с) близко к 1 для всех сравниваемых буев. Однако, для высот волн максимальные отклонения от данных буев получены для массива CFSR (значения нормированного стандартного отклонения находятся в диапазоне 0.75-1.25), в то время как для остальных трёх хидкастов коэффициент корреляции варьируется в диапазоне 0.8-0.9 с центрированным среднеквадратическим отклонением, составляющим не более 0.5.

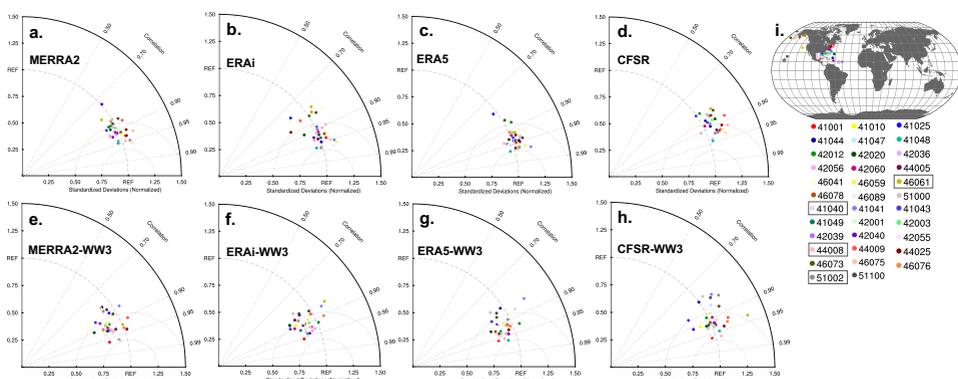


Рис. 3 — Диаграмма Тейлора для основных метрик ошибок между временными рядами высоты волнения по данным буев NDBC (цветом показано местоположение буев (i) и временными рядами скорости ветра (а - d) в реанализах и результатов моделирования высот волн (е - h). Радиальные пунктирные линии показывают коэффициент корреляции, значения, отложенные по осям X и Y, показывают нормированное стандартное отклонение ( $STD_{model}/STD_{buoy}$ ), контурные линии показывают центрированное среднеквадратическое отклонение (CRMSE)

Отдельной частью работы стала верификации результатов моделирования по данным попутных наблюдений с учетом их неоднородности, представленная в параграфе 2.3.3. Ранее было показано, что на климатическом масштабе расхождения режимных характеристик не превышают точности кодирования в данных попутных судовых наблюдений. Наибольшие разницы традиционно сконцентрированы в Южном океане и штормовых районах Северного полушария. Это связано, с одной стороны, с недостаточной плотностью визуальных наблюдений в Южном океане, с другой стороны, с тенденцией судов избегать штормовых условий.

Для исключения ошибок, связанных с недостаточной плотностью визуальных наблюдений, и оценки именно качества самой модели, в данных моделирования была воспроизведена пространственно-временная плотность

попутных судовых наблюдений. Сравнение проводилось как для значительной высоты волн, так и для высот зыби и ветровой волны, поскольку попутные судовые наблюдения обеспечивают независимые оценки компонентов ветрового волнения и могут служить эталоном для волновых систем, полученных разделением модельных спектров. На рис. 4 показан пример работы такой схемы выборки за один месяц в одном двуградусном квадрате: модельные данные – синяя линия, судовые – красные точки.

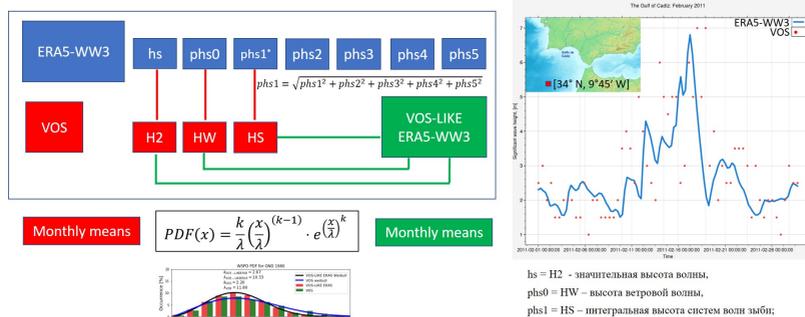


Рис. 4 — Алгоритм воспроизведения пространственно-временной плотности визуальных наблюдений в волновой модели

В результате было проведено сравнение среднегодовых значений значительных высот волн, высот ветровых волн и зыби по модели ERA5-WW3 с использованием предложенного алгоритма. по результатам работы этой методологии можно заключить, что (1) прямые разности оригинальных данных VOS и данных модели ERA5-WW3 нельзя сравнивать напрямую; (2) разности воспроизведенной модели VOS-LOKE ERA5-WW3 с данными наблюдений показывают наименьшие расхождения, что говорит о высоком качестве модели и репрезентативности методики верификации; (3) однако, для отдельных волновых систем отличия могут быть существенными. Модель завышает высоты ветровых волн практически на всей акватории Мирового океана, за исключением тропиков, причем эти ошибки не связаны с неадекватной выборкой VOS; (4) для зыби ситуация обратная: модель недооценивает высоты зыби на 0.5–1.5 м практически повсеместно, за исключением восточной части Тихого океана – района, где полностью развита зыбь и ветровое волнение легко разделяемы. И, как и в случае ветровых волн, эти разности связаны не с плотностью судовых наблюдений, а с методикой разделения волновых систем в модели [1].

Глава 2 завершается обобщенным анализом всех проведенных численных экспериментов. Обосновывается вывод о том, что исследование волнового климата и его климатической изменчивости, включая экстремальные величины волнения не может определяться исходя из одиночных

модельных расчетов из-за несовершенства входных данных, поскольку даже в рамках одной модели результаты существенно различаются при использовании разных граничных условий, как это показано на примере используемых полей ветра по реанализу CFSR. Изложенные во второй главе результаты опубликованы в [2].

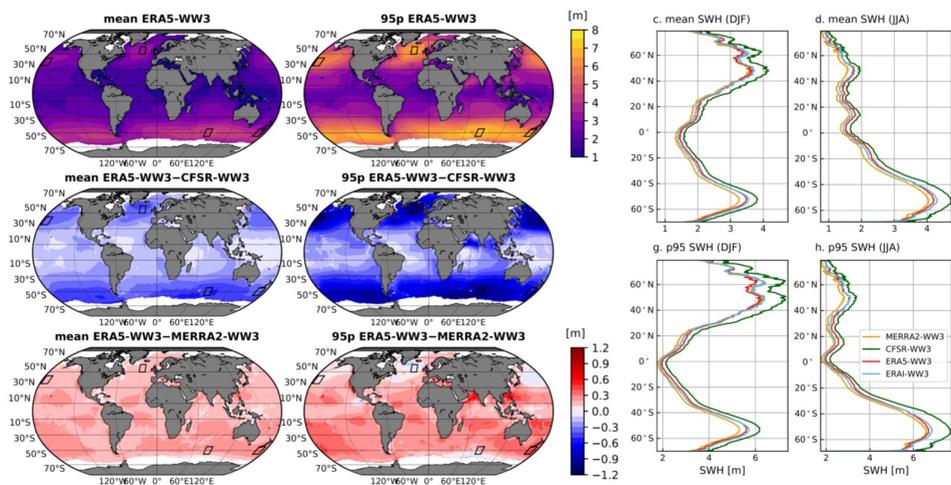
**Третья глава** посвящена реконструкции глобального волнового климата и диагностике совместной изменчивости высот волн и характеристик ледового покрова в современном климате.

После двухступенчатой валидации реконструированных климатологий в **разделе 3.1** приведены оценки волнового климата и его изменчивости для средних и экстремальных волновых характеристик. Все 4 климатологии показывают похожую картину распределений как средних, так и для экстремальных среднегодовых высот волн, однако оценки CFSR выше, чем у взятого за основу сравнения массива ERA5, и различия достигают 1.2 м для 95 перцентиля в умеренных широтах обоих полушарий (рис. 5, а). В свою очередь, высоты волн в массиве MERRA2 меньше, чем в ERA5, однако даже для экстремальных высот волн различия составляют не более 0.5 м. Для зимнего и летнего сезонов максимальные расхождения в зонально осредненных значительных высотах волн также характерны для CFSR. Разности достигают 0.6 м для средних и 1 м для экстремальных характеристик в умеренных широтах Северного полушария в зимний период (рис. 5, б). Максимальные отклонения в летнем сезоне возникают в Южном полушарии.

Кроме того, в **третьей главе** обсуждается межгодовая изменчивость волнового климата и долгопериодные тренды. В **разделе 3.2** проводится анализ долгопериодной изменчивости среднегодовых значений скорости ветра и значительных высот волн. В целом, похожие тенденции наблюдаются для всех реконструированных климатологий. Однако и здесь прослеживаются расхождения в магнитудах средних значений – до  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  для ветра между CFSR и MERRA2 (рис. 6, а), что естественно отражается и на высотах волн – до 0.5 м (рис. 6 б). Следует отметить, что заметный положительный тренд в массиве данных ERA5, начиная с 2001, связан с количеством (и качеством) усвоенных данных натуральных наблюдений. Для анализа межмодельных различий в оценке долгопериодной изменчивости высот волн к реконструированным 4 климатологиям были добавлены временные ряды среднегодовых значений по модели WAM (ERAi-WAM, ERA5-WAM), которые показали максимальную согласованность с ERA5-WW3. Анализ временных рядов глобальных средних характеристик дает нам общее представление об изменениях волнового климата за последние 40 лет.

Детали более полной картины волнового климата за последние 40 лет представлены в **разделе 3.2** с помощью диаграмм зонально-осредненных линейных трендов. Из рисунка 7,а видно, что атмосферный реанализ CFSR и соответствующий хиндкаст CFSR-WW3 выбиваются из общей картины, отличаясь от остальных реанализов и климатологий как знаком, так и величиной трендов. Наиболее заметные различия сконцентрированы в экваториальной области и в Южном океане. Продолжая диагностику межмодельных различий, были также проанализировали тренды средних характеристик высот волн по модели WAM (ERA5-WAM). Следует отметить, что в Северном полушарии они показывают гораздо более сильный сигнал, чем тренды по модели WW3.

Для установления климатически устойчивых сигналов долгопериодной изменчивости ветро-волновых характеристик были построены карты согласованности межгодовых линейных трендов для всех массивов данных. Совместное пространственное распределение трендов, объединенное по признаку совпадения знака, демонстрирует статистически значимые положительные тенденции скорости ветра в умеренных и субтропических широтах Северной Атлантики, в западной части Южной Атлантики и в



- а) Среднегодовые расхождения в высотах волн для средних (слева) и экстремальных (справа) по хиндкасту ERA5-WW3 (верхний ряд) и разницы с хиндкастами CFSR-WW3 (центральный ряд), MERRA2-WW3(нижний ряд)
- б) Диаграммы зональных разниц высот волн для средних (сверху) и экстремальных (снизу) в зимнем (слева) и летнем (справа) сезонах

Рис. 5 — Различия в оценках среднегодового и сезонного волнового климата за период с 1980 по 2019 гг.

тропических широтах южной части Тихого океана. При этом все массивы данных характеризуются уменьшением скоростей ветра в северо-восточной части Тихого океана. Согласованность оценок трендов высот волн по результатам моделирования, в целом, повторяет картину пространственного распределения для скоростей ветра. Все модельные массивы высот волн показывают рост в умеренных и субтропических широтах Северной Атлантики, в западной части Южной Атлантики и уменьшение в северо-восточной части Тихого океана (рис.7, б).

В разделах 3.1 и 3.2 показано, что массив данных CFSR-WW3 значительно расходится с остальными климатологиями в долгопериодных климатических оценках. Однако именно реанализ CFSR активно используется в качестве входной информации в моделировании современного волнового климата и приводится в качестве справочной информации в международном проекте COWCLIP. Все модели, использующие в качестве форсинга CFSR выбываются из согласованной картины оценок трендов по другим реанализам. Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в [3]. Стоит отметить, что одна из климатологий, представленная в диссертации, а именно MERRA2-WW3, также была включена в общее исследование международной координационной группы COWCLIP [4, 5, 3].

Раздел 3.3 посвящен приложению результатов разработанных конфигурация модели WW3 для проведения более сложного анализа ветрового волнения в отдельных регионах с целью оценки совместной изменчивости высот волн и характеристик ледового покрова в современном климате Арктики. Актуальность такой задачи определяется сокращением площади ледового покрова в Арктике, что создает благоприятные условия для роста

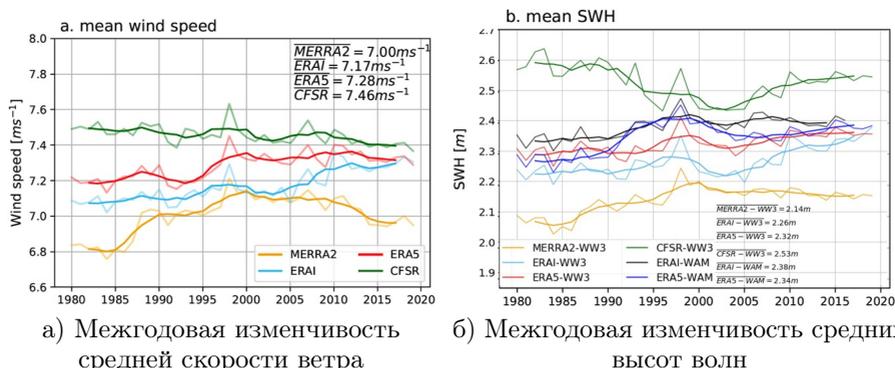
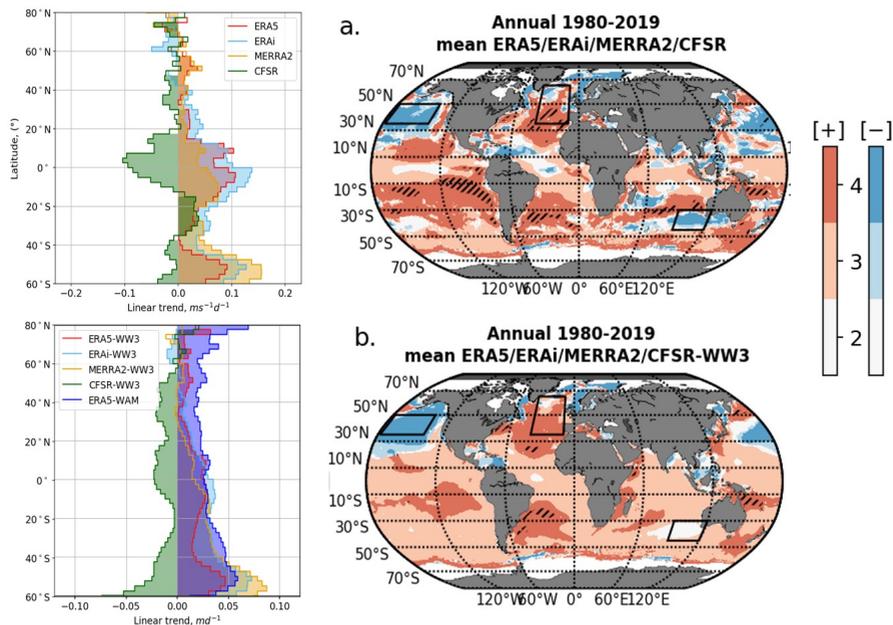


Рис. 6 — Временной ряд средних скорости ветра в реанализах (а) и высот волн по хиндкастам (б). Тонкие линии соответствуют годовым значениям, жирные линии показывают 4-летнее скользящее среднее за период с 1980 по 2019 гг.

ветровых волн, которые в свою очередь могут препятствовать формированию молодого льда в осенний период.

Согласно данным сплоченности льда по четырём реанализам, общая площадь ледового покрова в сентябре 1980-2019 гг. сокращается, значимый линейный тренд составляет  $-9 \cdot 10^5 \text{ км}^2 \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ . Морской лед в осенний период подвержен наибольшей изменчивости в Чукотском, Баренцевом и Карском морях, линейный тренд в сплоченности льда составляет более 0.2 единиц  $\cdot \text{десятилетие}^{-1}$ . Следующим этапом анализа закономерно стало сравнение динамики линейных трендов скорости ветра и высот волн в



а) Диаграммы зональной изменчивости межгодовых линейных трендов средних характеристик, осредненных по широте по 2.5° квадратам

б) Согласованность межгодовых линейных трендов. Цветом показано общее количество реанализов или хиндкастов, которые согласуются по знаку линейного тренда. Заштрихованные области означают статистически значимые тренды на 90% уровне согласно критерию Стьюдента

Рис. 7 — Диаграммы зональной изменчивости (а) и согласованность по знаку (б) межгодовых линейных трендов скорости ветра в реанализах (сверху) и высот волн по хиндкастам (снизу) за 40-летний период времени с 1980 по 2019 гг.

каждом из морей Арктики, с целью выделения регионов, наиболее чувствительных к современным изменениям климата (См. рис. 8). Проведенный анализ показывает, что

- в зимний сезон в Беринговом море средние и экстремальные высоты волн растут (до  $0.1 \text{ м} \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ , до  $0.2 \text{ м} \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ ), что отчасти связано с изменениями, наблюдаемыми для площади ледового покрова;
- в осенний сезон наблюдаются значимые положительные тренды высот волн в Беринговом море и на юго-западе Гренландии. Экстремальные высоты волн в массивах MERRA2 и CFSR показывают отрицательный тренд (до  $-0.2 \text{ м} \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ ) вдоль побережья Скандинавии.

Над большой площадью прикромочной ледовой зоны (с характерными значениями спло́нности 15% – 80%) в Чукотском море наблюдаются положительные тренды средних скоростей ветра ( $0.33 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ , в то время как для высот волн значимые положительные тренды наблюдаются только для областей в прикромочной ледовой области с минимальными значениями спло́нности (до  $0.06 \text{ м} \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ ). В Баренцевом море, где наряду с Чукотским морем наблюдается наиболее сильное сокращение площади ледового покрова в сентябре в современном климате, средние высоты волн в областях, прилегающих к прикромочной ледовой зоне, растут (до  $0.04 \text{ м} \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ ), в то время как экстремальные волны показывают отрицательный тренд (до  $-0.05 \text{ м} \cdot \text{десятилетие}^{-1}$ ), что отчасти связано с изменениями, наблюдаемыми для скоростей приводного ветра и заслуживает дальнейшего исследования.

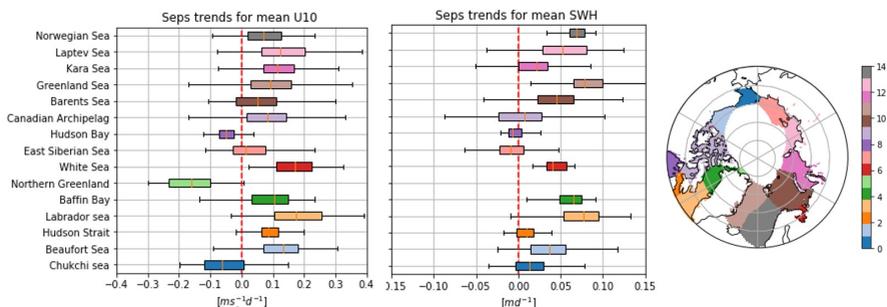


Рис. 8 — Региональная оценка линейных трендов скорости ветра и высот волн на основе реанализа ERA5 в современном климате (1980-2019) в сентябре

Заключительная **четвертая глава** посвящена проведению оперативного модельного эксперимента в Субполярной Северной Атлантике и

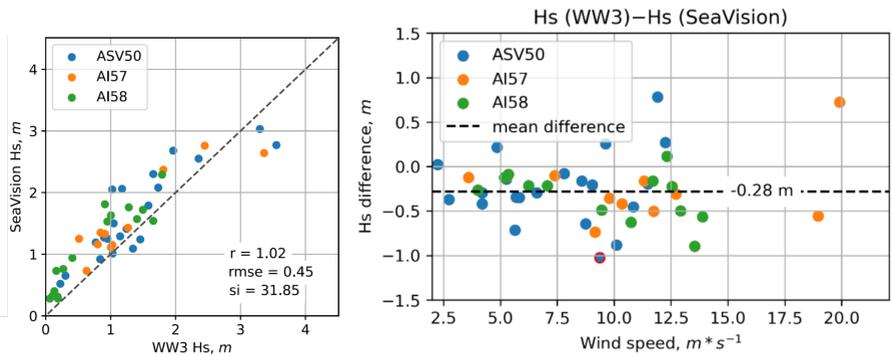
Арктике (для региона Баренцева и Карского морей) в высоком разрешении. Несмотря на большое число модельных экспериментов, проблема развития волн под воздействием ветра в реальных морских условиях изучена недостаточно. Основной причиной этого является сложность процесса взаимодействия волн с воздушным потоком и невозможностью обеспечивать в реальных условиях синхронные измерения в разных точках волнового поля всех необходимых параметров волнового спектра и пограничного слоя атмосферы. Одним из источников оперативной информации о состоянии поверхности моря является радиолокационная система SeaVision [6, 7], разрабатываемая при участии соискателя в лаборатории ЛВОАМКИ (ИОРАН), которая позволяет проводить непрерывный мониторинг ветрового волнения на основе оперативного анализа данных, поступающих с судового навигационного радара. Для моделирования волнения в Субполярной Северной Атлантике и в Арктике также использовалась модель WW3. Описание конфигурации эксперимента представлено в работе [7].

Для моделирования волнения в Субполярной Северной Атлантике и в Арктике также использовалась модель WW3. Описание конфигурации эксперимента представлено в **разделе 4.1**.

В **разделе 4.2** приводится оценка точности модели, для верификации которой впервые использовались данные SeaVision, полученные в трёх экспедициях ИО РАН в период 2020–2021 (данные находятся в открытом доступе <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.939620>). При проведении экспериментов использовались измерения дрейфующего буя волнографа Spotter и данные спутниковой альтиметрии.

Помимо высот волн было проведено сравнение направлений распространения и периодов волн, полученных по данным модели и радара. На рис. 9,а показана диаграмма рассеяния значительных высот волн по данным радарных измерений и модели. Из рис. 9,а видно, что для высот волн коэффициент регрессии принимает значение 1.02, среднеквадратическая ошибка в высотах волн достигает значения 0.45. На рис. 9,б показаны разности высот волн в зависимости от скорости ветра для пары «WW3-радар SeaVision». Различия между радаром и моделью составляют 28 см (в среднем). Причины полученных расхождений объясняются исходными частотными спектрами радара, буя и модели, на основании которых были получены оценки высот волн и, возможно, связаны с данными реанализа ERA5, который использовался в качестве форсинга модели.

Обнаружено, что модель WW3 недооценивает малые высоты волн и периоды, но с высокой точностью воспроизводит умеренные волны (2–3.5м) и направления распространения.



- а) Диаграмма рассеяния значительных высот волн по радару и модели
- б) Отклонения значительной высоты волны по модели от измеренной радаром в зависимости от скорости ветра

Рис. 9 — Расхождения в оценке значительных высот волн между радаром SeaVision и моделью WW3

В **закл<sup>ю</sup>чении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана конфигурация модели WW3, обеспечивающая адекватное воспроизведение климатических характеристик ветрового волнения, что подтверждается сравнением с данными буев и спутниковой альтиметрии.
2. Впервые проведены многолетние эксперименты с фиксированной конфигурацией модели и 4 различными массивами граничных условий.
3. Математическое моделирование показало все 4 климатологии обеспечивают похожие пространственные распределения как для средних, так и для экстремальных среднегодовых высот волн. Однако оценки высот волн массива CFSR-WW3 показывают максимальные расхождения с эталонной климатологией ERA5-WW3, завывая экстремальные волны на 1.2 м в умеренных широтах обоих полушарий. Массив MERRA2-WW3 недооценивает средние высоты волн эталонного ERA5-WW3 и хорошо согласуется с оценками экстремальных высот волн в Северном полушарии.
4. Установлено, что для зимнего и летнего сезонов максимальные расхождения в зонально осредненных значительных высотах волн также характерны для массива CFSR-WW3. Разности достигают 0.6 м для средних и 1 м для экстремальных характеристик в умеренных широтах Северного полушария в зимний период.
5. Предложена и апробирована методология валидации ретроспективных прогнозов спектральной волновой модели по данным попутных судовых наблюдений, что позволило впервые провести сравнение с

глобальными визуальными наблюдениями с учетом их неоднородности.

6. Разработаны региональная конфигурация и произведена настройка спектральной модели волнения WW3 для прибрежной области Баренцева моря и субполярной Северной Атлантики.

## Список публикаций автора по теме диссертации

*Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК:*

1. Григорьева В., Гулев С., **Шармар В.** Верификация глобальной спектральной волновой модели WAVEWATCHIII по данным попутных судовых наблюдений // *Океанология*. – 2020. – Т. 60. – № 1. – С. 14–26. DOI: 10.31857/S003015742001013X
2. **Sharmar V.**, Markina M. Validation of global wind wave hindcasts using ERA5, MERRA2, ERA-Interim and CFSRv2 reanalyzes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – V. 606 – Issue 012056 – P. 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012056
3. **Sharmar V.D.**, Markina M., Gulev S.K. Global ocean wind-wave model hindcasts forced by different reanalyses: a comparative assessment // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2021. – V. 126. – Issue 1. – P. 1–19. DOI: 10.1029/2020JC016710
4. Badulin, S., Kostianoy, A., Shabanov, P., **Sharmar, V.**, Grigorieva, V., Lebedev, S. Self-and inter-crossover points of jasons’ missions as new essential add-on of satellites altimetry in the sub-arctic seas and the Southern Ocean // *Remote Sensing*. – 2021. – V.13(4). – Issue 658. – P. 1–23. DOI: 10.3390/rs13040658
5. **Sharmar V.**, Markina M. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980–2019 // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2021. –V. 21. – Issue ES2002. – P. 1–11. DOI: 10.2205/2020ES000741
6. Ивонин, Д., Гавриков, А., **Шармар В.**, Салаватова, Л., Тилинина, Н., Гулев, С. Мониторинг состояния поверхности моря в Северной Атлантике с использованием средств судовой навигации // *Океанология*. – 2021. – Т. 61. – № 3. – С. 305–307. DOI: 10.31857/S0030157421030059
7. Tilinina N., Ivonin D., Gavrikov A., **Sharmar V.**, Gulev S., Suslov A., Fadeev V., Trofimov B., Bargman S., Salavatova L., Koshkina V., Shishkova P., Razorenova O., Tereshenkov V., Sokov A. Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with Spotter wave buoy and WaveWatch III // *Earth System Science Data*, – 2022. – V. 14. – P. 3615–3633. DOI: 10.5194/essd-14-3615-2022

8. Morim, J., Erikson, L.H., Hemer, M., Young, I., Wang, X., Mori, N., Shimura, T., Stopa, J., Trenham, C., Mentaschi, L., Gulev, S., **Sharman V.D.**, Brichenno, L., Wolf, J., Aarnes, O., Bidlot, J., Semedo, A., Reguero, B., Whal, T. A global ensemble of ocean wave climate statistics from contemporary wave reanalysis and hindcasts // Scientific Data. – 2022. – V. 9. – Issue 358. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41597-022-01459-3
9. Erikson, L.H., Morim, J., Hemer, I., Young, I., Wang, X., Mentaschi, L., Mori, N., Semedo, A., Stopa, J., Grigorieva, V., Gulev, S., Aarnes, O., Bidlot, J., Breivik, Ø., Brichenno, L., Shimura, T., Menendez, M., Markina, M., **Sharman V.**, Trenham, C., Wolf, J., Appendini, C., Caires, S., Groll, N., Webb, A. Global ocean wave fields show consistent regional trends between 1980 and 2014 in a multi-product ensemble // Nature: Communications Earth and Environment – 2022. – V. 3. – Issue 320. P. 1–14. DOI: 10.1038/s43247-022-00654-9
10. Badulin S.I., Grigorieva V.G., Shabanov P.A., **Sharman V.D.**, Karpov I.O. Sea state bias in altimetry measurements within the theory of similarity for wind-driven seas // Advances in Space Research. – 2022. – V. 68. – Issue 2. – P. 978–988. DOI: 10.1016/j.asr.2019.11.040  
*Глава в монографии:*
11. Веземская П.С., Гулев С.К., Селиванова Ю.В., Тилинина Н.Д., Маркина М.Ю., Криницкий М.А., **Шарман В.Д.** Прогноз и анализ изменений климата в Российской части Баренцева моря. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF) – 2019. – 611 с. ISBN 978-5-6041734-6-6  
*Опубликованные тезисы докладов:*
12. Маркина М.Ю., **Шарман В.Д.** Взаимодействие ветрового волнения и морского льда в Арктике в современном климате // Сборник трудов X Международной научно-практической конференции: Морские исследования и образование. – 2021. – Т. I. – № 3, – С. 172–175. ISBN: 978-5-6047776-1-9