

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Рыбалко Александра Дмитриевна

**Климатические спектры ветрового волнения
в Черном и Азовском морях**

1.6.17. Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре океанологии
Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Мысленков Станислав Александрович,*
кандидат физико-математических наук
- Официальные оппоненты** – *Нестеров Евгений Самойлович,*
доктор географических наук, зав. отделом
морских гидрологических прогнозов Гидрометеорологического научно-исследовательского центра
Российской Федерации
- Шокуров Михаил Викторович,*
доктор физико-математических наук,
с.н.с., ведущий научный сотрудник отдела
взаимодействия атмосферы и океана
Морского гидрофизического института РАН
- Григорьев Александр Валентинович,* кандидат
физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник, зав. лабораторией гидродинамики
прибрежной зоны Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова

Защита диссертации состоится «7» ноября 2024 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)9392238, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3118>

Автореферат разослан «1» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Информация о ветровом волнении всегда была необходима для безопасной и эффективной хозяйственной деятельности в прибрежной зоне и в открытом море [Бухановский, Лопатухин, 2016]. Кроме того, ветровое волнение является активным компонентом климатической системы, играя критическую роль как в энергетическом и газовом обмене системы океан-атмосфера [Gulev, Hasse, 1998; Xu et al., 2021], так и в перемешивании океана [Studholme et al., 2021].

Важной задачей в изучении ветрового волнения Мирового океана является исследование региональных характеристик волнения и их изменчивости в локальных областях с учетом особенностей поля ветра, рельефа дна и геометрии бассейна. Черное и Азовское моря являются внутренними акваториями, интенсивно используемыми в хозяйственной, рекреационной и военно-политической деятельности. Оба моря являются бесприливными полузамкнутыми водоемами, соединенными с другими частями Мирового океана относительно узкими проливами. Несмотря на то, что интегральные параметры ветрового волнения в Черном и Азовском морях хорошо изучены, исследований, посвящённых анализу пространственно-временной изменчивости частотных и частотно-направленных спектров, остается немного.

Спектры ветрового волнения несут в себе наиболее полную информацию о состоянии взволнованной поверхности [Goda, 1999]. Так как в настоящей работе анализируются только спектры ветровых волн, далее они будут называться просто «спектрами». Спектры позволяют получать интегральные параметры волнения (высота, длина, период и т.д.), определять системы волн (собственно ветровые волны и зыбь), а также анализировать частоту основного пика энергии, что необходимо для решения ряда инженерных задач [Goda, 1999]. Например, при одинаковой значительной высоте волн формы спектров могут существенно отличаться в зависимости от продолжительности и силы ветра, стадии развития и затухания волнения, наличия зыби [Ochi, Hubble, 1976].

Цель диссертационной работы — получить климатические спектры на основе классификации и анализа повторяемости классов частотных спектров в Черном и Азовском морях за 38 лет.

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

1. создание базы данных частотных спектров в Черном и Азовском морях за период с 1983 по 2020 гг. на основе расчетов волновой модели WAVEWATCHIII;
2. оценка точности воспроизведения моделью спектров и интегральных параметров ветрового волнения;
3. разработка методики анализа климатических спектров для исследуемых морей на основе классификации;

4. анализ пространственной изменчивости повторяемости различных классов спектров;
5. анализ сезонной и межгодовой изменчивости повторяемости различных классов спектров.

Объектом исследования являются Черное и Азовское моря, **предметом исследования** — климатические спектры в исследуемых акваториях.

Климатический спектр — вероятность появления тех или иных спектров в зависимости от условий волнообразования на определенной акватории за продолжительный период времени. Климатический спектр может быть получен при длительном осреднении спектров, либо на основе типизации или классификации спектров [Лопатухин и др., 2016]. В данной работе климатические спектры определяются как совокупность статистических показателей, описывающих пространственно-временную изменчивость повторяемости классов частотных спектров.

Методология исследования. На основе расчетов волновой модели WAVEWATCHIII [Tolman et al., 2019] была создана база данных частотных спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях за период с 1983 по 2020 гг. на сетке из 14581 узлов и с пространственным разрешением 10–15 км в центральной части Черного моря, 6 км в центральной части Азовского моря и до 1.5 км в прибрежной зоне обоих морей. Дополнительно для проведения численных экспериментов использовалась спектральная волновая модель SWAN.

Разработка классификации для анализа изменчивости спектров выполнена с помощью агломеративного кластерного анализа с использованием евклидового расстояния на основе выборки из частотных спектров в 10 точках Черного и Азовского морей, соответствующих разным режимам ветрового волнения. Были получены 23 референтных спектра, отличающихся друг от друга по значению спектральной энергии пика, частоте основного пика и форме спектра. Определение класса для каждого частотного спектра из всей базы данных за 38 лет осуществлялось по поиску минимального расстояния между спектром, который необходимо классифицировать, и референтными спектрами. Затем был проведен анализ пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости полученных классов частотных спектров в исследуемых акваториях.

В данной работе под «высотой волн» подразумевается высота значительных волн, под «спектральной плотностью» — спектральная плотность пика.

Научная новизна и практическая значимость. Впервые частотные спектры ветрового волнения в Черном и Азовском морях исследовались на сетке с высоким пространственным разрешением за продолжительный период с 1983 по 2020 гг. Оценки точности расчетов модели были выполнены по спутниковым данным и

измерениям буев, в том числе по уникальному для рассматриваемого региона продолжительному (около года) ряду данных волномерного буя в районе м. Малый Утриш в северо-восточной части Черного моря.

В работе предложена оригинальная классификация, созданная с учетом особенностей диапазонов частот и энергии ветровых волн в Черном и Азовском морях, которая разделяет имеющиеся в базе данных спектры по частоте основного пика и по величине спектральной плотности. Этот подход позволяет оценить сезонную и межгодовую пространственную изменчивость частотных спектров в исследуемых акваториях.

Полученные данные о пространственно-временной изменчивости частотных спектров могут быть использованы для расчетов, связанных с нагрузкой на различные сооружения, оценкой потока волновой энергии, динамикой разрушения берегов и др. Разработанная методика классификации может применяться для любой акватории.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе кластерного анализа разработана оригинальная методика классификации частотных спектров ветрового волнения для Черного и Азовского морей. Выделено 23 класса, отличающихся по частоте и спектральной плотности основного пика. Методика позволяет статистически описать многообразие спектров на исследуемых акваториях.

2. Повторяемость частотных спектров со средней спектральной плотностью пика $<0.3 \text{ м}^2/\text{Гц}$ составляет от 65% до 90% в Азовском море и от 43% до 85% в Черном море. Повторяемость спектров с наибольшей энергией и низкими частотами (спектральная плотность пика $>10 \text{ м}^2/\text{Гц}$ и частота основного пика $\sim 0.1 \text{ Гц}$) составляет от 0 до 1.5%, больше всего таких спектров наблюдаются на юго-западе Черного моря.

3. Существует выраженная сезонная изменчивость частотных спектров ветрового волнения. В Черном и Азовском морях максимальное количество классов спектров выявлено в феврале, минимальное — в июле. В феврале максимальная спектральная плотность пика в Черном море превышает июльские максимумы в 10 раз, а в Азовском море — в 5 раз. Частоты основного пика зимой ниже, чем в другие сезоны, в обоих морях.

4. В межгодовой изменчивости положительный значимый тренд повторяемости классов с небольшой спектральной плотностью получен для большей части Черного моря. Значимое увеличение классов спектров с низкими частотами и большими значениями спектральных плотностей характерно для северо-восточной части Черного моря. Это свидетельствует о разнонаправленных изменениях ветро-волнового режима в разных районах Азово-Черноморского региона.

Личный вклад автора. Автор диссертации принимала непосредственное участие в создании классификации частотных спектров ветрового волнения для

Черного и Азовского морей, а также в выполнении расчетов спектров с использованием волновой модели. Лично автор проводила оценку качества расчетов модели по спутниковым данным и измерениям волномерных буев, анализировала изменчивость частотных спектров в исследуемых акваториях и визуализировала полученные результаты.

Публикации соискателя по теме диссертации и апробация работы. Основные идеи и положения диссертации изложены в 6 научных работах автора, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.016.2 по специальности 1.6.17. Океанология, а также в 6 тезисах и докладах на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 189 источников. Работа изложена на 162 страницах текста. В ней содержится 106 рисунков и 10 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю к.ф.-м.н. С.А. Мысленкову за плодотворную работу и помощь в написании диссертации. Автор благодарит к.г.н. В.С. Архипкина за помощь с методологией и обсуждение работы, а также д.ф.-м.н. С.И. Бадулина за научные консультации. Автор выражает благодарность академику С.А. Добролюбову, коллективу кафедры океанологии Географического факультета МГУ и соавторам за всестороннюю помощь, советы и важные замечания. Автор выражает благодарность своему первому научному руководителю к.ф.-м.н. С.В. Станичному за бесценные знания и неоценимую помощь на разных этапах становления в науке.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность работы, ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, обозначен личный вклад автора, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Ветровое волнение. Современная изученность ветрового волнения в Черном и Азовском морях

В **разделе 1.1** приведен обзор современных представлений о ветровом волнении. Спектральный подход в изучении ветровых волн рассматривает морское волнение как сложный процесс, представляющий собой суперпозицию бесконечно большого числа независимых друг от друга элементарных волн с различными частотами, амплитудами, направлениями распространения и случайными фазами [Режим..., 2013]. Приходящая на единицу площади энергия всех волновых цугов с угловыми частотами от σ до $\sigma+d\sigma$, распространяющихся в интервале углов между θ и $\theta+d\theta$, называется двумерным или частотно-направленным спектром $E(\sigma, \theta)$. В случае, если направление не

рассматривается, говорят о частотном спектре (или одномерном энергетическом спектре) $E(\sigma)$ [Боуден, 1988]. Параметры спектра ветрового волнения зависят от множества условий: силы, направления и продолжительности действия ветра, длины разгона, глубины и существования или отсутствия волн зыби и т.д.

В разделе 1.2 обозначены основные подходы к анализу спектров. В последнее время возрос интерес к исследованию волнового климата через климатические спектры [Hamilton, 2010; Portilla et al., 2009; Бухановский и др., 2016]. В целом, можно выделить два подхода в исследовании продолжительных рядов спектров ветрового волнения. Первый подход заключается в осреднении спектров [Buckley, 1988]. Однако вероятностная функция распределения спектров не подчиняется нормальному закону распределения, следовательно, при осреднении могут быть получены не совсем адекватные результаты. Второй подход предполагает описание спектров, например, через классификацию и последующую оценку статистической повторяемости набора признаков (классов) [Бухановский, Лопатухин, 2016; Hamilton, 2010 и др.].

В разделе 1.3 описаны физико-географические особенности и волновой режим Черного и Азовского морей. Черное и Азовское моря являются внутренними квазизамкнутыми бесприливными морями и относятся к бассейну Атлантического океана. Среди особенностей развития ветрового волнения в данных морях необходимо отметить часто ограниченный разгон, относительно небольшие скорости ветра и слабое развитие зыби. Главные отличия Азовского моря — его мелководность (максимальная глубина составляет 13 м [Добровольский, Залогин, 1982]), относительно малые размеры, значительно более интенсивные ледовые процессы зимой и наличие стонно-нагонных колебаний уровня.

В разделе 1.4 приведен краткий обзор работ по ветровому волнению в Черном и Азовском морях, описаны основные характеристики волнового режима. Ветровое волнение в исследуемых акваториях хорошо изучено в терминах интегральных параметров (высота, период, длина волн и т.д.) на основе результатов численного моделирования и натурных измерений как для всей акватории, так и в отдельных частях морей (например, [Атлас волнения, течений..., 2012; Дивинский, Косьян, 2015; Дьяков и др., 2015; Rusu 2015; Лопатухин и др., 2006; Мысленков и др. 2016; Шокуров и др., 2016; Гиппиус, Архипкин, 2017; Akpınar, Bingölbali, 2016; Divinsky, Kosyan, 2017; Onea, Rusu, 2017; Дивинский и др., 2020; Gippius, Myslenkov, 2020; Дивинский и др., 2021; Badulin et al., 2021; Rybalko et al. 2023; Myslenkov et. al., 2023; Дулов и др., 2024]). Работ, посвящённых изучению спектров ветрового волнения как Черного, так и Азовского морей, недостаточно [Yilmaz, Ozhan, 2014]. Среди основных можно перечислить [Amarouche, Akpınar, 2023; Бухановский, Лопатухин, 2016; Kos'yan et al.,

1998; Yılmaz, Özhan, 2014; Babanin, Soloviev, 1998; Efimov, 1999; Shokurov, Efimov, 1999].

Глава 2. Данные и методы

В разделе 2.1 приведены сведения о спектральной волновой модели WAVEWATCHIII [Tolman et al., 2019], которая была использована как основная, указаны основные настройки, описаны входные и выходные данные. Для генерации волн применялась схема ST6; для расчета нелинейных взаимодействий использовалась параметрическая схема DIA; для учета придонного трения применялась стандартная схема JONSWAP и для учета льда — схема IC0. Спектральное разрешение модели составило 36 направлений с постоянным шагом, равным 10° , частотный диапазон составил 36 интервалов от 0.03 до 0.84 Гц. Расчет проводился на нерегулярной вычислительной сетке (59690 узлов) с пространственным разрешением до 15 км для открытой части Черного моря, 3–5 км для открытой части Азовского моря и 200–400 м вдоль всего побережья обоих морей. Рельеф дна был получен в результате оцифровки карт, изданных Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны России.

В качестве входных данных использовались поля ветра на высоте 10 метров из реанализа NCEP/CFRS/CFRv2 [Saha et al., 2014]. Данные о концентрации морского льда были получены из реанализа ESA SST CCI and C3S [Good et al., 2020], который был дополнительно откорректирован по экспертным ледовым картам Гидрометцентра России [Оперативный модуль ЕСИМО...].

В результате расчетов модели WAVEWATCHIII была создана база данных частотных спектров с 1983 по 2020 гг. с шагом по времени 3 ч для 14581 точки спектральной сетки. Шаг по пространству спектральной сетки составил 10–15 км для открытой части Черного моря, 6 км для открытой части Азовского моря и 1–1.5 км вдоль всего побережья обоих морей. Для каждого частотного спектра в базе данных содержится также направление максимума спектральной плотности и значение разброса направлений («directional spread»). Кроме частотных спектров, были рассчитаны основные интегральные параметры (высота, период и длина волн), которые использовались для оценки качества работы модели и для сопоставления значений интегральных параметров с выделенными классами для их описания. Для отдельных точек были рассчитаны частотно-направленные спектры, использованные для оценки качества расчетов модели на основе данных волнового буя в прибрежной зоне.

В разделе 2.2 описана модель SWAN [Booij, 1999], которая использовалась дополнительно для изучения эволюции классов частотных спектров при разных условиях и оценки влияния полей течений на ветровое волнение. При специально подобранных настройках результаты модели SWAN и WAVEWATCHIII для

исследуемых акваторий идентичны. Для модели SWAN задавались следующие настройки: шаг по направлению 5° , шаг по частотам от 0.03 до 1 Гц. Применялся режим GEN3, использована параметризация [Komen et al., 1984], донное трение было описано согласно JONSWAP [Hasselmann et al., 1973].

В разделе 2.3 описаны данные, используемые для оценки качества работы модели. Это измерения двух волномерных буев: 1) Spoodrifter Spotter, установленного недалеко от города Геленджик на глубине около 72 м в 6000 м от берега [Saprykina et al., 2020], и 2) Datawell DWRG-4, установленного вблизи мыса Малый Утриш сначала на глубине 18 м на расстоянии 800 м от берега, а затем переставленного дальше от берега на расстояние около 1500 м в точку с глубиной 42 м. Кроме измерений на буйках, использовались данные высокоточного океанографического альтиметра AltiKa, установленного на спутнике SARAL [Steunou et al., 2015].

Раздел 2.4 посвящён описанию методики классификации, которая проходила в три этапа: 1) кластерный анализ выборки, 2) поиск референтных спектров и 3) определение класса для каждого спектра из базы данных. На этапе кластеризации была создана выборка спектров за 2020 г. в 10 точках в разных районах Черного и Азовского морей, характеризующихся разными ветро-волновыми и физико-географическими условиями, к которым был применен агломеративный кластерный анализ с использованием евклидового расстояния [Everitt, 1980]. На втором этапе внутри каждого класса выбирался референтный спектр, то есть модельный спектр, который максимально близок к осредненному спектру по всему классу. В результате были получены 23 референтных спектра, отличающихся друг от друга по спектральной энергии и частоте основного пика. На третьем этапе на основе референтных спектров производилась классификация частотных спектров для всей базы данных путем расчета расстояния Махаланобиса [Mahalanobis, 1936] по модифицированной формуле между спектром, который необходимо классифицировать, и референтным спектром:

$$\frac{\sum_{f=0.058}^{f=0.63} (E(f)_{spectrum} - E(f)_{reference_i})^2}{R_{(spectrum,reference_i)}^2}, \quad (1)$$

где f – частота, Гц, $E(f)$ – спектральная плотность на частоте f , $m^2/Гц$; $spectrum$ – частотный спектр, который надо классифицировать, $reference_i$ – референтный спектр конкретного класса, i – индекс референтного спектра от 1 до 23, R – коэффициент корреляции. Спектральная плотность на частотах, не входящих в диапазон от 0.058 до 0.63 Гц, не учитывалась, так как для Черного и Азовского морей ветровые волны с подобными характеристиками, как правило, не встречаются. Модификация классической формулы для расчета расстояния Махаланобиса была выполнена для оптимального соотношения влияния формы спектра и сдвига по уровню

энергии. Подбор осуществлялся в результате тестирования множества комбинаций. Спектр попадал в тот класс, для которого значение (1) было минимально. Пример распределения спектров по классам показан на рис. 1. Необходимо отметить, что все спектры рассматривались как однопиковые. Все спектры со спектральной плотностью до $0.2 \text{ м}^2/\text{Гц}$ независимо от частоты основного пика были отнесены к классу 1.

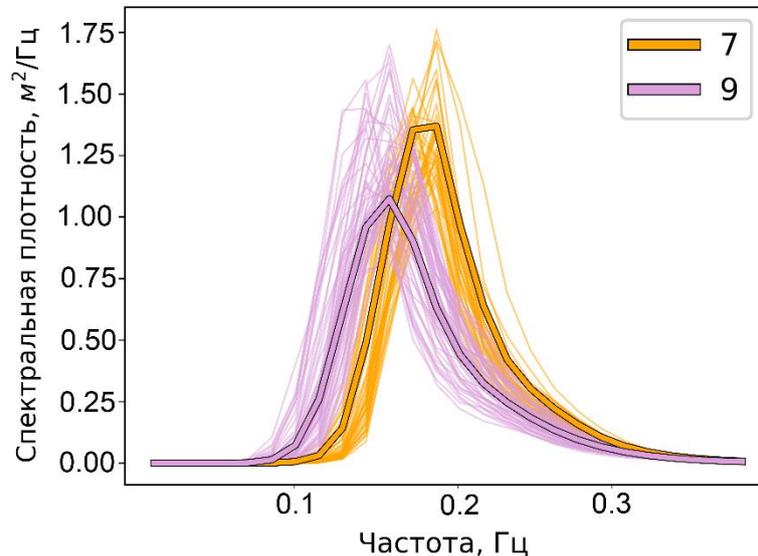


Рисунок 1. Результат классификации на примере двух соседних классов: 7 и 9. Жирными линиями с черной обводкой показаны референтные спектры классов, тонкими – спектры, отнесённые к этим классам в результате классификации.

В разделе 2.5. описана методика определения спектров с более чем 1 пиком спектральной плотности. Были выбраны 3 критерия: 1) соотношение абсолютной энергии второго пика больше $1/7$ к энергии главного пика; 2) разность по частотам главного и второго пика $>0.05 \text{ Гц}$; 3) соотношение относительной энергии главного и второго пика больше $1/10$. Определение количества пиков выполнялось только для спектров, у которых спектральная плотность $>0.2 \text{ м}^2/\text{Гц}$.

Таким образом, основой данного исследования является база данных частотных спектров, полученных при помощи модели WAVEWATCHIII. Была разработана оригинальная методика классификации спектров на основе кластерного анализа и методика определения спектров с несколькими волновыми системами. Все спектры из базы данных после процедуры классификации были отнесены к одному из классов, что позволило в дальнейшем проанализировать пространственно-временную изменчивость повторяемости классов.

Глава 3. Оценка качества моделирования интегральных параметров и спектров ветрового волнения

В разделе 3.1 приводятся результаты оценки качества моделирования интегральных параметров волнения. Так, для оценки качества моделирования высоты

волн анализировались систематическая ошибка (*bias*), средняя абсолютная ошибка (*MAE*), среднеквадратичное отклонение (*RMSE*) и коэффициент корреляции (*R*) по формулам:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MOD_i - OBS_i), \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MOD_i - OBS_i)^2}, \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |MOD_i - OBS_i|, \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{MOD_i - \overline{MOD}}{\sigma_{MOD}} \right) \cdot \left(\frac{OBS_i - \overline{OBS}}{\sigma_{OBS}} \right), \quad (5)$$

где *MOD* — результаты моделирования, *OBS* — измеренное значение, σ — стандартное отклонение. *i* — это номер элемента. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения статистических параметров оценки качества расчетов модели.

| Буй | сроки | <i>Bias</i> , м | <i>MAE</i> , м | <i>RMSE</i> , м | <i>R</i> |
|--|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------|
| У м. Малый Утриш (Datawell DWRG-4) | 17.07.2020–22.10.2020 | 0.07 | 0.18 | 0.24 | 0.52 |
| | 27.10.20–18.02.2021 | 0.34 | 0.43 | 0.62 | 0.77 |
| | 15.03.2021–17.06.2021 | 0.09 | 0.27 | 0.44 | 0.73 |
| У г. Геленджик (Spoondrifter Spotter) | 23.07.2020–01.11.2020 | 0.2 | 0.23 | 0.51 | 0.8 |

Кроме периода работы буя в районе м. Малый Утриш с 17.07.2020–22.10.2020, коэффициент корреляции пар данных модель-буй демонстрировал высокие значения, более 0.7. Систематическая ошибка не превышала 0.34, среднеквадратичное отклонение было ≤ 0.62 . В среднем модель завышала значения высоты волн в прибрежной зоне близ м. Малый Утриш [Рыбалко, Мысленков, 2021а, 2021б]. Оценка качества моделирования периода волн T_{zero} , определяемого точкой перехода уровня через ноль, за весь период работы буя в районе мыса Малый Утриш также показала, что модель несколько завышает значения. При постановке буя в районе м. Малый Утриш дальше от берега (период 15.03.2021–17.06.2021), точность воспроизведения высоты волны и периода моделью увеличивается [Rybalko et al., 2023a].

Оценки точности расчетов высоты волн по данным спутниковой альтиметрии проводились для периода с 2013 по 2016 гг. для 61289 пар точек, находящихся на расстоянии друг от друга не более чем 8 км по пространству и в пределах 1 час по времени. Полученный коэффициент корреляции составил около 0.9 за весь период и от 0.89 до 0.92 по отдельным годам. Значения систематической ошибки за весь период равно -0.07 м [Rybalko, Myslenkov, 2023].

В разделе 3.2 показано, что учет течений в Черном море не улучшает результаты модели, поэтому было решено не добавлять поля течений при моделировании [Рыбалко, Мысленков, 2020; Rybalko, Myslenkov, 2023].

Оценка качества воспроизведения частотных спектров моделью приводится в разделе 3.3. Сопоставление модельных частотных спектров с измерениями волномерных буев было выполнено для отдельных сроков в разные сезоны (рис. 2). Полученные результаты позволяют считать, что модель адекватно воспроизводит частоту основного пика и максимум спектральной энергии. В отдельных случаях модель воспроизводит не все пики, которые присутствуют в данных измерений [Рыбалко, Мысленков, 2021б].

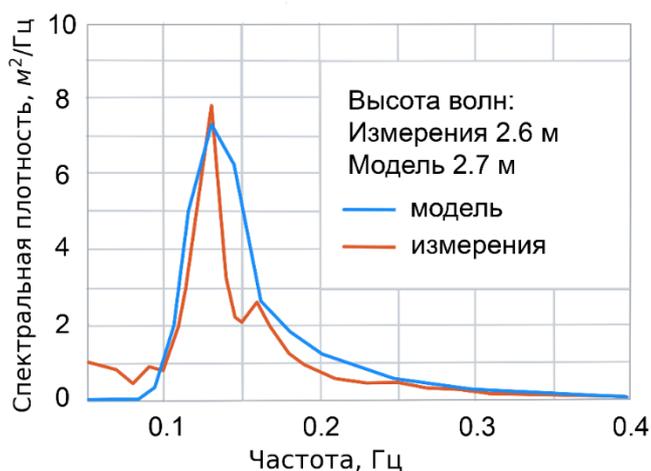


Рисунок 2. Сопоставление спектров в районе мыса Малый Утриш
11.02.2020 08:00.

Кроме сопоставления по срокам, было проведено сравнение осредненных частотных спектров с 17.07.2020 по 17.06.2021 в месте постановки буя в районе м. Малый Утриш. Для каждой пары измеренного и рассчитанного спектров был определен *bias*. Модель продемонстрировала небольшие занижения значений спектральной плотности (*bias* до -0.25 м²/Гц) в диапазоне частот от 0.04 до 0.2 Гц и небольшие завышения значений (*bias* до 0.25 м²/Гц) для высоких частот. Коэффициент корреляции *R* превышал 0.8 для частот от 0.1 до 0.35 Гц и находился в диапазоне от 0.65 до 0.8 для более высоких частот [Рыбалко, Мысленков, 2021а; Amarouche et al., 2023].

В разделе 3.4 приводятся оценки качества воспроизведения моделью осредненных по месяцам частотно-направленных спектров. Показано, что модель воспроизводит частоты, порядки значений спектральной плотности и направлений пиков спектральной плотности (с погрешностью 5–10°), кроме направлений с севера и северо-востока (направления рассматриваются «откуда»). Стоит, однако, отметить, что место установки буя в районе м. Малый Утриш имело крайне сложный рельеф дна, который, в отсутствие промеров, был не до конца известен при создании вычислительной сетки.

В результате был сделан вывод, что модель в заданной реализации достаточно точно воспроизводит как интегральные параметры, так и частотные и частотно-направленные спектры как во всей акватории, так и для прибрежной зоны, даже в местах со сложной батиметрией.

Глава 4. Классификация частотных спектров ветрового волнения

В разделе 4.1 описаны полученные 23 референтных спектра, отличающиеся по частоте пика и значению спектральной плотности, используемые для классификации (рис. 3). Финальное количество референтных спектров и, соответственно, классов было определено путем тестирования разного количества кластеров. Именно такое количество классов позволило подробно анализировать изменчивость частотных спектров ветровых волн в исследуемых акваториях. Характеристики классов, полученных на основе референтных спектров, такие как средняя частота основного пика и средние значения максимумов спектральной плотности, представлены в табл. 2.

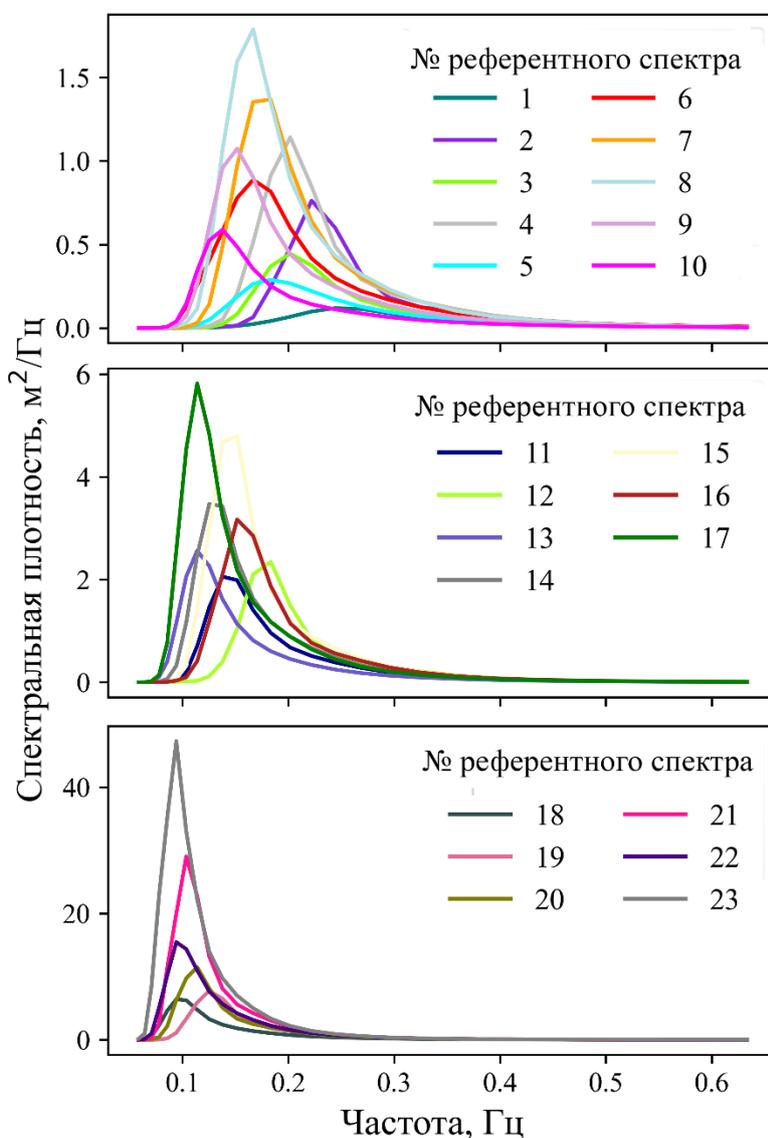


Рисунок 3. Референтные спектры, по которым выполнялась классификация.

Референтные спектры нумеровались от характеризующихся наибольшей частотой максимума спектральной плотности (самых коротких волн) до наименьшей частоты максимума (длинных волн), а внутри каждой частоты дополнительно выделялись референтные спектры по значению максимума спектральной плотности. Таким образом, например, получившиеся классы 3 и 4, 5 и 6 являются парными, характеризующимися примерно одним значением частоты основного пика, но разными значениями спектральной плотности [Рыбалко и др, 2024а].

Таблица 2. Характеристики выделенных классов.

| № класса | Средняя частота основного пика в классе, Гц | Среднее значения максимума спектральной плотности в классе, м ² /Гц | Примерный диапазон значение максимума спектральной плотности в классе, м ² /Гц | Средняя скорость ветра, м/с | Медиана скорости ветра, м/с |
|----------|---|--|---|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0.25 | 0.15 | до 0.30 | 4.1 | 3.9 |
| 2 | 0.22 | 0.76 | 0.30–0.85 | 10.0 | 9.8 |
| 3 | 0.20 | 0.44 | 0.20–0.65 | 7.3 | 7.5 |
| 4 | 0.20 | 1.14 | 0.65–1.35 | 10.3 | 10.2 |
| 5 | 0.18 | 0.30 | 0.20–0.60 | 4.6 | 4.5 |
| 6 | 0.17 | 0.90 | 0.60–1.05 | 6.9 | 7.1 |
| 7 | 0.18 | 1.35 | 1.05–1.55 | 9.7 | 9.7 |
| 8 | 0.17 | 1.79 | 1.15–1.95 | 9.6 | 9.7 |
| 9 | 0.15 | 1.03 | 0.65–1.40 | 5.7 | 5.7 |
| 10 | 0.14 | 0.60 | 0.20–0.80 | 4.3 | 4.1 |
| 11 | 0.14 | 2.05 | 1.00–3.20 | 7.3 | 7.5 |
| 12 | 0.18 | 2.34 | 1.00–2.75 | 12.8 | 12.5 |
| 13 | 0.10 | 2.50 | 1.25–3.75 | 5.7 | 5.6 |
| 14 | 0.12 | 3.26 | 2.25–5.00 | 8.7 | 8.9 |
| 15 | 0.15 | 4.08 | 3.15–6.00 | 12.8 | 12.6 |
| 16 | 0.12 | 3.31 | 2.05–4.15 | 11.9 | 11.7 |
| 17 | 0.11 | 5.09 | 3.95–8.85 | 8.6 | 8.8 |
| 18 | 0.09 | 6.27 | 5.00–9.25 | 6.6 | 6.2 |
| 19 | 0.12 | 7.65 | 6.15–9.25 | 12.8 | 12.8 |
| 20 | 0.11 | 10.98 | 7.00–13.5 | 12.6 | 12.8 |
| 21 | 0.10 | 29.00 | 12.00–35.00 | 16.7 | 16.8 |
| 22 | 0.094 | 15.46 | 9.00–25.00 | 11.3 | 12.0 |
| 23 | 0.09 | 47.00 | более 25 | 17.3 | 17.2 |

Анализ скоростей ветра, при которых наблюдался тот или иной класс, показал, что скорости ветра не могут быть однозначно соотнесены с тем или иным классом, так как существует еще много параметров среды, влияющих на форму и характеристики спектра ветровых волн. Тем не менее, можно отметить, что спектры класса 1 образуются при малых скоростях ветра, в среднем до 4–5 м/с. Также при малых

скоростях ветра наблюдаются классы 5, 9, 10, 13. При средних скоростях более 15 м/с наблюдаются классы 21 и 23. Класс 22 наблюдается при разных скоростях ветра, от 3 до 20 м/с, со средним значением около 11 м/с. Это может свидетельствовать о большем количестве волн зыби в этом классе, которые не связаны непосредственно с ветром. Сопоставление интегральных параметров (высоты, длины и среднего периода) волн с классами, к которым были отнесены спектры этих волн, показало, что полученные классы не могут быть однозначно определены интегральными параметрами, так как диапазоны всех трех интегральных характеристик для большинства классов довольно значительны и пересекаются со значениями для соседних классов.

В **разделе 4.2** описаны эксперименты, проведенные с помощью модели SWAN, для выявления условий образования различных классов спектров. Для точки на глубокой воде в центре моря были выполнены тестовые расчеты развития спектров со стационарным ветром для периода в 1 сутки и затем еще 1 сутки штиля. Ветер был направлен во всех экспериментах на север, а значения скорости были выбраны характерными для исследуемых акваторий в разные сезоны: 5, 8, 10 и 15 м/с. Частотные спектры и высота волн выводились каждый час. Типичный для большей половины года ветер со скоростью 5 м/с способен генерировать только класс 1. Продолжительный стационарный ветер со скоростью 8 м/с вызывает спектры ветрового волнения до класса 3, со скоростью 10 м/с — до класса 8, а достаточно сильный ветер со скоростью 15 м/с генерирует спектры класса 20 через 20 часов после начала действия. Классы 13, 10 и 5 соответствуют затухающему волнению при разных скоростях ветра.

В **разделе 4.3** рассмотрена эволюция модельных спектров и изменчивости классов на примере реальных ветровых условий в 2-х точках в Черном (42.5° с.ш. и 40.8° в.д., глубина 1500 м) и Азовском морях (46.39° с.ш. и 37.26° в.д., глубина 12 м). Показано, что сменяемость классов была другой по сравнению с экспериментами при стационарном ветре, так как развитие волнения определялось и другими условиями волнообразования, такими как разгон, изменения направления и скорости ветра, глубина.

Возможность использования классификации только с однопиковыми референтными спектрами исследовалась в **разделе 4.4** путем исследования повторяемости спектров с двумя и более пиками, т.е. с несколькими системами волн на примере 2020 г. Повторяемость таких спектров в Черном море в среднем не превышала 1.5%, а максимум (до 19%) наблюдался зимой в его восточной части, у берегов Грузии. В Азовском море спектры с несколькими пиками, удовлетворяющие выбранным критериям, отсутствовали. Надо отметить, что полученные результаты количества спектров с несколькими волновыми системами расходятся с литературными данными, например, [Amarouche, Akpinar, 2023]. Это объясняется выбором критериев в настоящем исследовании, а именно тем, что спектры с максимумом спектральной

плотности менее $0.2 \text{ м}^2/\text{Гц}$ не рассматривались, в то время как именно среди них обнаруживается наибольшее количество многопиковых спектров. Однако такие спектры наблюдаются при высоте волн, не представляющей угроз для хозяйственной деятельности человека, и, следовательно, не имеют большого практического интереса. Невысокая повторяемость спектров с несколькими системами волн позволила использовать классификацию с однопиковыми референтными спектрами в рассматриваемых акваториях.

Таким образом, были получены 23 референтных спектра, которые были определены кластерным анализом. Такое количество референтных спектров позволило наиболее полно описать пространственно-временную изменчивость спектров в исследуемых акваториях. Референтные спектры отличались по частоте основного пика и значению спектральной плотности, характерных для Черного и Азовского морей. Полученные на основе референтных спектров классы не могут быть однозначно определены скоростью ветра или интегральными параметрами волн.

Глава 5. Сезонная изменчивость спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях

В главе анализируется сезонная изменчивость повторяемости классов спектров на примере 2020 года. Согласно [Myslenkov et al., 2023] 2020 год характеризуется средней штормовой активностью. В работе используются стандартные сезоны: зима – декабрь, январь и февраль; весна — март, апрель; май, лето — июнь, июль, август; осень — сентябрь, октябрь, ноябрь.

В разделе 5.1 рассмотрена сезонная изменчивость повторяемости классов спектров на всей акватории исследуемых морей. Для этого спектры классифицировались, затем определялось количество классов для всех точек морей по месяцам. В Азовском море во все месяцы 2020 года класс 1, к которому относятся частотные спектры ветрового волнения со спектральной плотностью в среднем до $0.3 \text{ м}^2/\text{Гц}$ не зависимо от частоты основного пика, значительно превышал все другие классы и составлял в разные месяцы от 75% до 98% случаев. Наименьший процент от всех случаев был получен в декабре и феврале, наибольший процент — в летние месяцы. В Черном море сезонная изменчивость количества спектров класса 1 была выше, чем в Азовском море. Наибольший процент спектров класса 1 был получен в период с апреля по сентябрь, в июне процент был максимален и составил 90%. Наименьший процент соответствовал февралю (46%).

Повторяемость по месяцам остальных классов определялась как:

$$\text{повторяемость класса}_i = \frac{\text{количество спектров класса}_i}{\text{суммарное количество спектров классов}_{2-23}}, \quad (6)$$

где i принимает значения от 2 до 23, то есть класс 1 не учитывался. Полученные таким

образом повторяемости для обоих морей представлены на рис. 4.

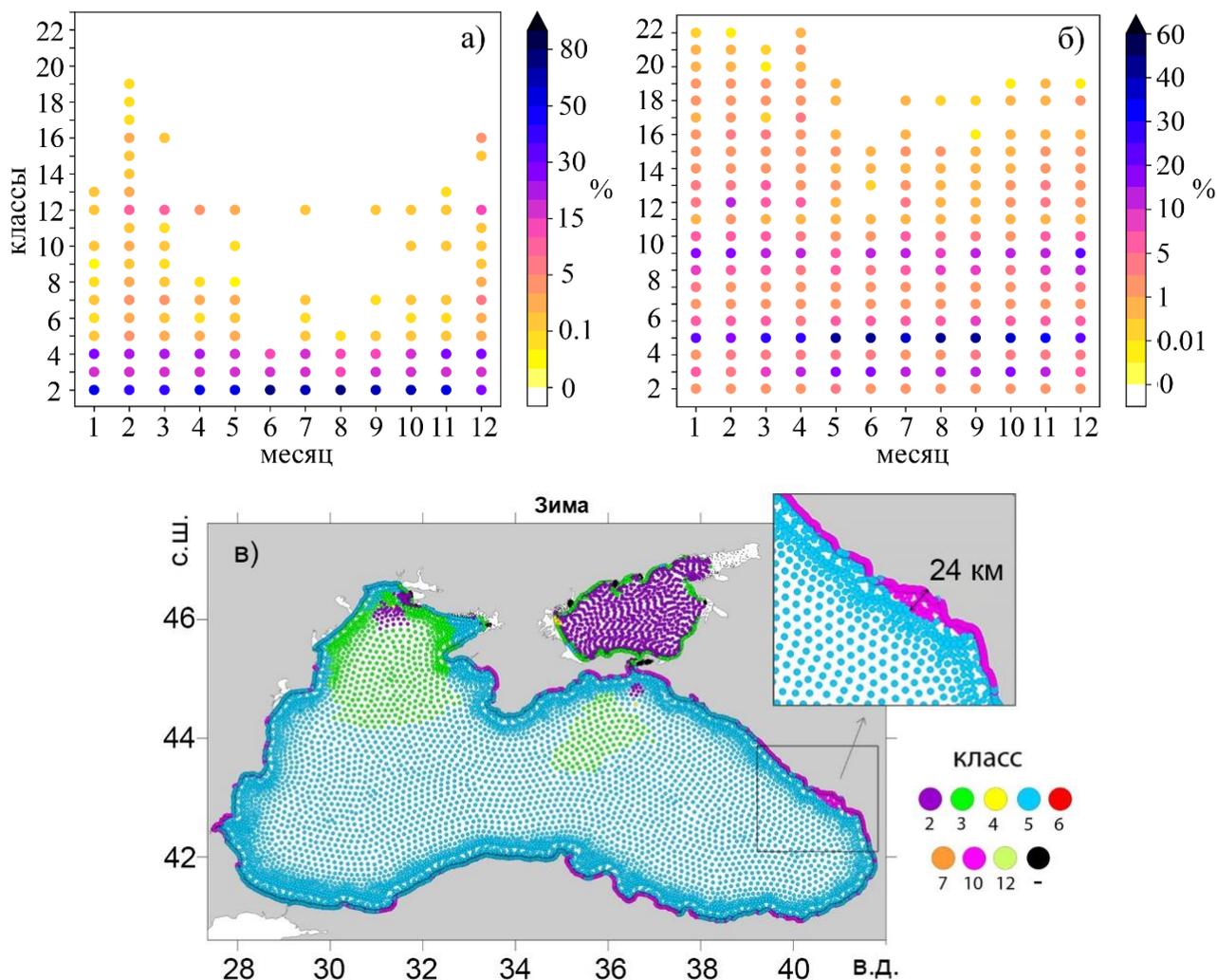


Рисунок 4. Доля частотных спектров в каждом конкретном классе со 2 по 23 от 0 до 100% в 2020 г. в: а) Азовском море и б) Черном море. в) Пространственное распределение вторых по повторяемости классов в зимний сезон.

В Азовском море во все месяцы наблюдались классы 2, 3 и 4. Их количество отрицательно коррелировало с количеством спектров класса 1: увеличивалось зимой и уменьшалось летом. Спектры классов 5, 6 и 7 также наблюдались практически во все месяцы, кроме некоторых летних, однако, случаев обнаружения этих классов было значительно меньше. Наибольшее количество классов в 2020 году в Азовском море было выявлено в феврале, до класса 19. Классы с 17 по 19 наблюдались в небольшом количестве даже в феврале и относились к конкретным, единичным штормам. Наименьшее количество классов было выявлено в июне, помимо класса 1 в этом месяце наблюдались только классы 2, 3 и 4. То есть для периода с апреля по октябрь в 2020 г. в Азовском море обнаруживались спектры с частотой основного пика от 0.14 до 0.22 Гц, причем спектров с частотами основного пика <0.2 Гц было значительно меньше, чем спектров с частотами ≥ 0.2 Гц. Спектральная плотность в этот период не превышала $2.5 \text{ м}^2/\text{Гц}$, а в среднем составляла $\sim 0.5\text{--}0.9 \text{ м}^2/\text{Гц}$. В период с ноября по март

спектральные плотности были выше, а частоты основного пика ниже, в том числе обнаруживались спектры с частотой основного пика около 0.1 Гц и значением спектральной плотности более 8 м²/Гц.

В Черном море было выявлено большее количество классов. Во все месяцы, помимо класса 1, были выявлены классы со 2 по 12 и классы 14, 15 и 16. Во все месяцы, кроме отдельных летних, были обнаружены классы 13, 17 и 19. Для всех перечисленных классов характерно увеличение количества с октября по апрель и уменьшение в период с мая по сентябрь. То есть, в конце весны и летом в Черном море обнаруживаются спектры с частотами основного пика от 0.11–0.12 Гц и выше со значениями спектральных плотностей до 7–9 м²/Гц. В зимние месяцы частоты были ниже, а спектральные плотности выше. Классы 21, 22 и 23 характерны только для зимних месяцев. Отдельно стоит отметить большую повторяемость классов 5 и 10 во все месяцы. Эти классы характеризуются низкими значениями спектральных плотностей (в среднем около 0.3 и 0.6 м²/Гц, соответственно) при низких значениях частот основного пика. Скорее всего эти классы включают в себя случаи затухающего волнения.

Также анализировалось пространственное распределение вторых по повторяемости классов в разные сезоны (рис. 4в).

В разделе 5.2 анализ пространственного распределения сезонной изменчивости повторяемости классов по месяцам проводился на основе исследований 8 отдельных репрезентативных точек: 2 в Азовском море и 6 в Черном (рис. 5).

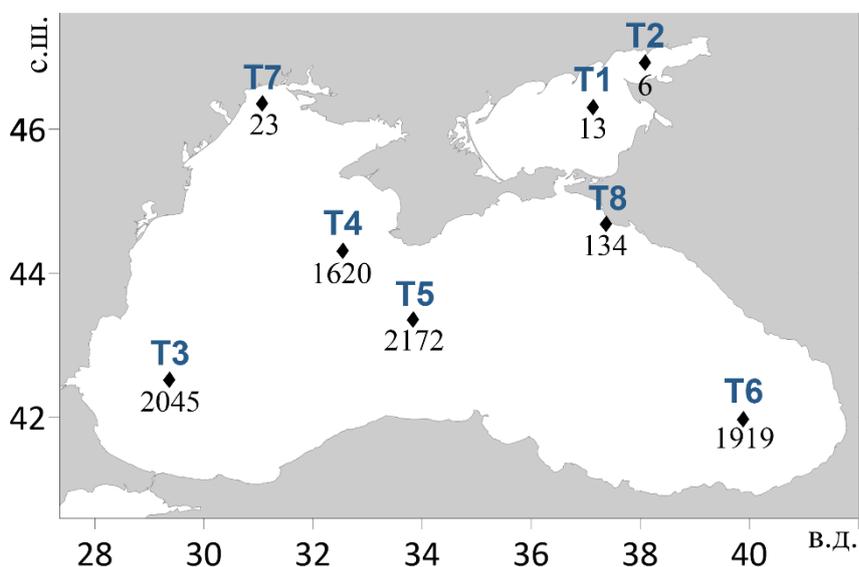


Рисунок 5. Местоположение репрезентативных точек в Черном и Азовском морях для анализа изменчивости частотных спектров. Цифрами обозначена глубина (м).

В этих точках была проанализирована изменчивость спектров в зависимости от направления распространения волн. Точки выбирались таким образом, чтобы при небольшом количестве наиболее полно продемонстрировать разнообразие ветро-

волновых условий в Черном море. Основой для выбора именно этих районов послужили ранее выполненные исследования [Rybalko, Myslenkov, 2022] и литературные источники, например, схема районирования Азово-Черноморского бассейна, используемая для гидрометеорологического обеспечения морской деятельности [Евстигнеев и др., 2017].

Наибольшее количество классов, более низкие частоты и более высокие максимальные спектральные плотности были обнаружены в глубоководной части Черного моря, прежде всего в точках Т3 и Т5, в меньшей степени — в точках Т4, Т6 и Т8. Максимальные спектральные плотности в феврале в точке Т3 составили $\geq 15 \text{ м}^2/\text{Гц}$ при частоте пика менее 0.1 Гц, а максимальные значения в июле составили $\sim 2 \text{ м}^2/\text{Гц}$ при частоте $\sim 0.14 \text{ Гц}$. Точка Т7 на северо-западном шельфе имела переходные черты между сезонной изменчивостью классов в Черном и Азовском морях. Тут были определены классы до 19 (кроме классов 13, 17 и 18) в феврале, и всего 3 (класс 1, 2 и 4) в июле. Наименьшее количество классов на протяжении года было обнаружено в точке Т2, в Таганрогском заливе Азовского моря. Даже в феврале максимальные спектральные плотности составляли всего $\sim 2.4 \text{ м}^2/\text{Гц}$ при частоте 0.18 Гц.

В этих же 8 репрезентативных точках была рассмотрена сезонная изменчивость повторяемости классов с учетом направления распространения волн (рис. 6). Направления рассматривались в значении «откуда». Конечно, наибольший интерес представляют направления распространения волн, спектры которых имеют большую энергию. В точке Т1 в «глубоководной» части Азовского моря зимой преобладают волны восточного направления, однако спектры классов 15 и 16, которые имеют наибольшую спектральную плотность из всех выявленных в данной точке (около 4 и 3.5 $\text{ м}^2/\text{Гц}$), приходят с юго-западного сектора [Рыбалко и др., 2024а]. В точке Т2 в Таганрогском заливе зимой с запада и запада-юго-запада наблюдалось значительно меньше волн, чем с востока-северо-востока, однако именно с первого направления приходили спектры классов, отличных от класса 1, — классы 2, 4, 7 и 12. В точке Т3 в юго-западной части Черного моря преобладали случаи с северо-восточного сектора, и именно для этого направления характерны спектры с наибольшей энергией, в том числе, классов 21–23. Весной класс 23 наблюдался с восточного направления. В точке Т4 к юго-западу от Крымского полуострова зимой спектры с наибольшей энергией (класс 22) приходят с юго-западного и северо-западного направления. Класс 20 наблюдался также с юго-восточного направления. В точке Т5 в центральной части Черного моря во все сезоны практически отсутствовали волны с южного сектора, а также волны с севера. Зимой спектры с наибольшей энергией приходили с западного сектора, с северо-востока и в меньшей степени — с востока [Рыбалко и др., 2024а]. В точке Т6 на юго-востоке Черного моря спектры с наибольшей энергией приходили с

западного сектора. В точке Т7 на северо-западном шельфе Черного моря, ожидаемо, преобладающими направлениями во все сезоны являлось направление южного сектора. В точке Т8 в северо-восточной части Черного моря из-за ограниченного разгона волны с северо-восточного сектора не образуются, а редкие спектры этого направления относятся к классу 1 [Рыбалко и др., 2024а].

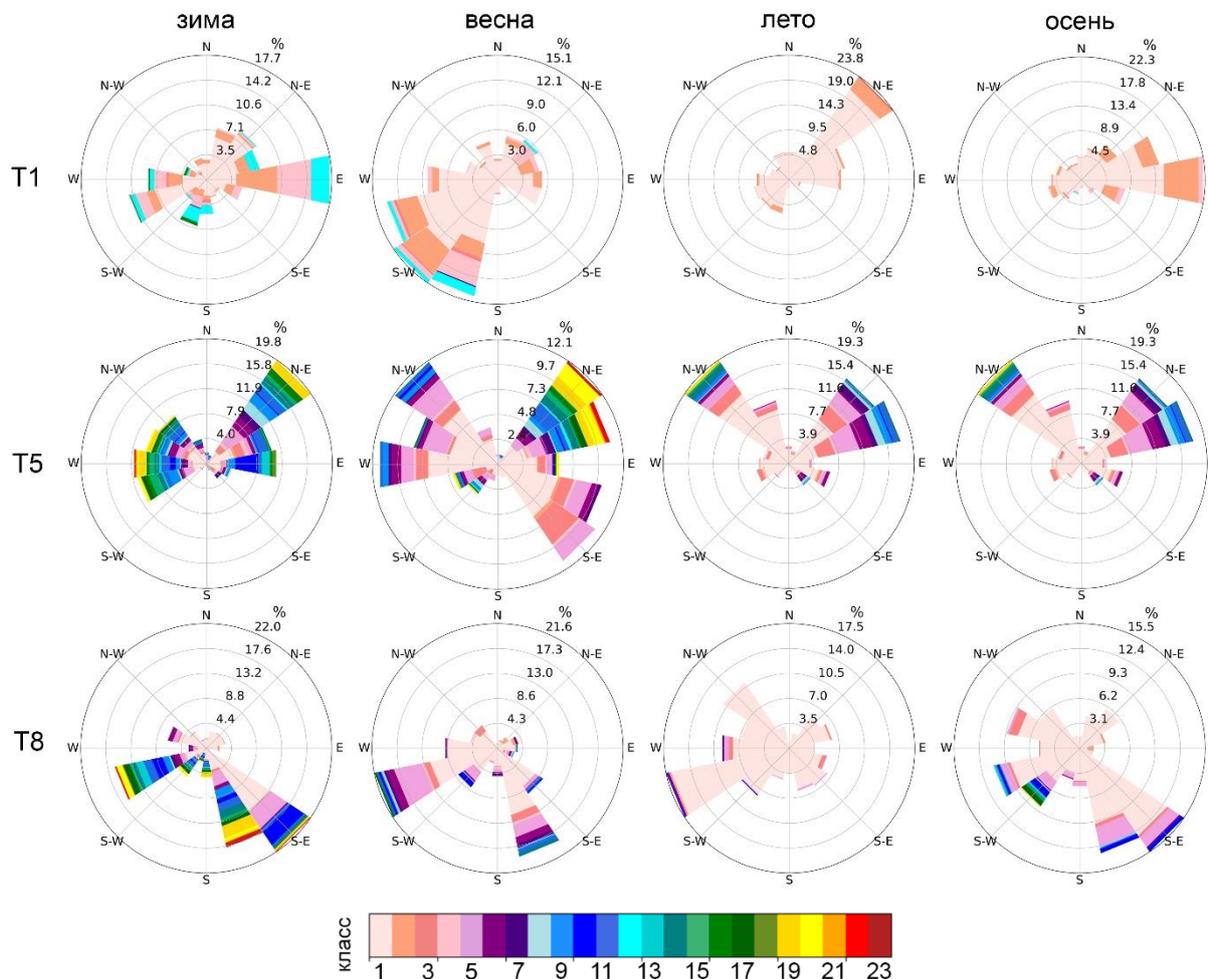


Рисунок 6. Повторяемость классов спектров ветрового волнения по сезонам в 2020 году в зависимости от направления волн для точек Т1, Т5 и Т8.

В данной работе основные результаты получены для спектров без учета направления, однако разработанная методика позволяет использовать ту же классификацию, но для каждого направления отдельно. Учет направлений при анализе повторяемости классов позволяет оценивать повторяемость спектров с той или иной частотой основного пика и значением максимума спектральной плотности с разных направлений, что может иметь большую практическую значимость [Рыбалко и др., 2024а].

Таким образом, и в Черном, и в Азовском морях наблюдалась сезонная изменчивость спектров ветрового волнения. Во все месяцы в обоих морях преобладал класс 1, однако в Азовском море его повторяемость варьировалась от 75% в зимние

месяцы до 99% в летние, а в Черном море — от 47% зимой до 90% летом. В феврале максимальная спектральная плотность пика в Черном море превышала июльские значения в ~10 раз, а в Азовском море — в ~5 раз. Разница объясняется малыми разгонами в Азовском море и тем, что оно относится к замерзающим, а значит зимой возможность развития ветрового волнения ограничена. В Черном море было выявлено большее количество классов, чем в Азовском, во все месяцы. Классы с наибольшей энергией (более 15 м²/Гц — классы 21, 22 и 23) были обнаружены только с января по апрель. Однако даже в эти месяцы количество этих спектров было невелико. В обеих акваториях с увеличением глубины возрастает количество обнаруживаемых классов, однако для Черного моря также существует разница между западной и восточной частями акватории.

Глава 6. Описание климатических спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях

В главе анализируются частотно-направленные спектры за период с 1983 по 2020 гг. В разделе 6.1 рассмотрены пространственная изменчивость первого, второго и третьего по повторяемости класса по многолетним расчетам (рис. 7). Наиболее повторяемым во всей акватории исследуемых морей стал класс 1. Как уже отмечалось, это класс с наименьшей энергией, в среднем спектральная плотность в нем <0.3 м²/Гц. В прибрежных районах Азовского моря его повторяемость составляет >90%. В центральной части моря повторяемость уменьшается, но даже в наиболее глубокой части Азовского моря составляет >65%. В Черном море пространственная изменчивость повторяемости класса 1 согласуется с пространственным распределением средней высоты волн. В восточной части акватории повторяемость класса 1 выше, чем в западной части, где это значение меньше 45%. В наиболее мелководной северо-западной части Черного моря повторяемость класса 1 составляет 60–85%, что ближе к значениям в Азовском море.

На основной части акватории Черного моря вторым по повторяемости классом стал класс 5. Частота максимума спектральной плотности класса 5 составляет в среднем 0.18 Гц, а максимальная спектральная плотность характеризуется невысокими значениями (<0.5 м²/Гц). Повторяемость класса 5 составляет 12–16% вдоль Турецкого побережья, к северу это значение уменьшается. Такое распределение согласуется с распределением средне многолетних значений среднего периода волн, которые составляют около 4 с на юге Черного моря и 3.2–3.6 с на севере [Мысленков и др., 2018]. В северо-западной части Черного моря преобладает класс 3 как второй по повторяемости, а также встречаются классы 2 и 4. Для узкой прибрежной полосы многих районов Черного моря вторым по повторяемости стал класс 10 (до 6–8%). Этот класс характеризуется спектральной плотностью до 0.7 м²/Гц, средняя частота

основного пика составляет около 0.13 Гц, что ниже, чем у упомянутых ранее классов. Вероятным объяснением преобладания в этих районах более длинных волн с низкой спектральной плотностью может быть ветровая тень, создаваемая берегом, которая препятствует развитию коротких волн от берега [Рыбалко и др., 2024в].

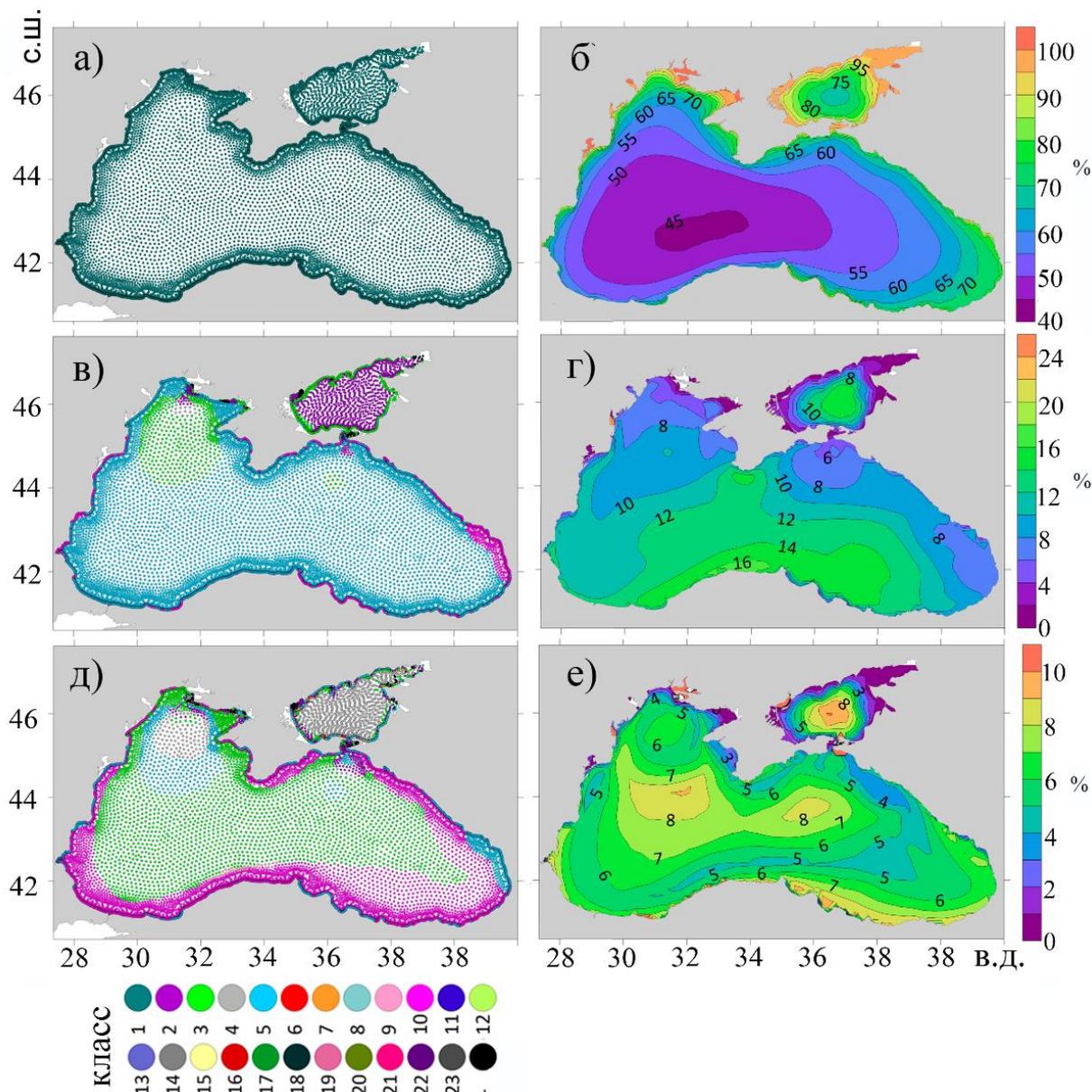


Рисунок 7. Пространственное распределение наиболее повторяемых классов в Черном и Азовском морях за 1983–2020 гг. и их повторяемость в процентах. а) первый по повторяемости класс и б) его повторяемость в %, в) вторые по повторяемости классы и г) их повторяемость в %, д) третьи по повторяемости классы и е) их повторяемость в %.

Третий по повторяемости класс показан на рис. 7д, и на долю этих классов в каждой конкретной точке приходится не более 10% от всех спектров. Третьим по повторяемости в Азовском море является в основном класс 4, в Черном море картина довольно разнообразна: встречаются 3, 4, 5 и 10 классы. Распределение повторяемости

этих классов в пространстве характеризуется максимумами в западной и восточной части Черного моря и максимумом в центре Азовского моря. Эта картина отчасти напоминает распределение 95-го перцентиля и максимальной многолетней высоты волн или средней высоты волн в осенне-зимний период [Myslenkov et al., 2023].

Отдельно была рассмотрена повторяемость в процентах классов 20–23, максимальная спектральная плотность которых в среднем превышает $10 \text{ м}^2/\text{Гц}$ (рис. 8). Именно волны, характерные для этих классов спектров, представляют собой опасность и наибольший интерес для хозяйственной деятельности человека.

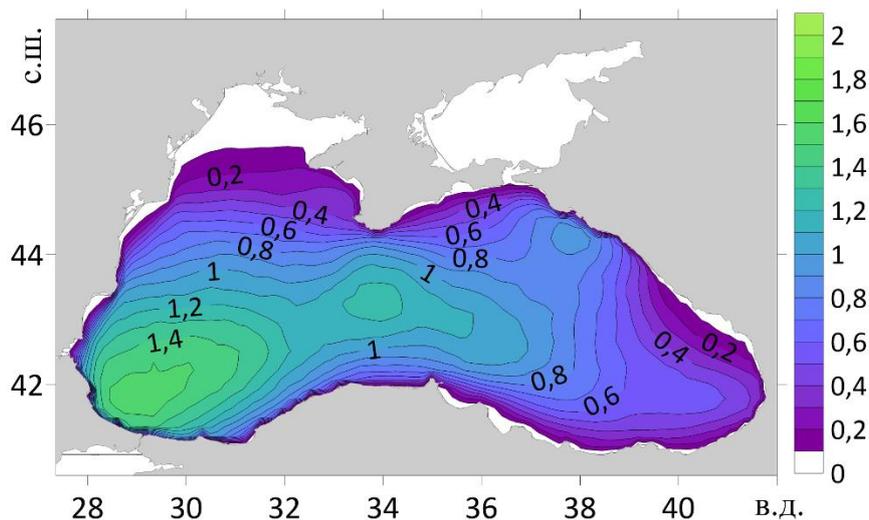


Рисунок 8. Суммарная повторяемость классов 20–23 за весь исследуемый период, %.

В Азовском море за весь исследуемый период эти классы выявлены не были. В Черном море максимальная суммарная повторяемость классов 20–23 определена в юго-западной части и составляла 1.5%. Классы 22 и 23, для которых характерна не только высокая спектральная плотность, но и частота основного пика $<0.1 \text{ Гц}$, выявлены лишь в южной половине Черного моря, и их доля от общего количества сроков составила до 0.3%.

В разделе 6.2 была оценена межгодовая изменчивость наиболее повторяемых классов для 8 репрезентативных точек, выявленных на предыдущих этапах исследования. Для Азовского моря это классы с 1 по 5, для Черного моря – классы с 1 по 5 и 10. Для Черного моря также анализировались классы 20–23. Для каждого ряда повторяемости класса в точках по годам оценивался линейный тренд, стандартное отклонение и дисперсия:

$$\text{линейный тренд вида } y = ax + b, \tag{7}$$

$$\text{дисперсия} = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}, \tag{8}$$

$$\text{стандартное отклонение} = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}}, \tag{9}$$

где \bar{x} — среднее ряда, n — количество элементов ряда, a, b — коэффициенты.

Значимость линейного тренда оценивалась по критерию Стьюдента. Порог параметра значимости – 0.05. Результаты показаны в таблице 3. Пример межгодовой изменчивости для точки Т8 в северо-восточной части Черного моря показан на рис. 9.

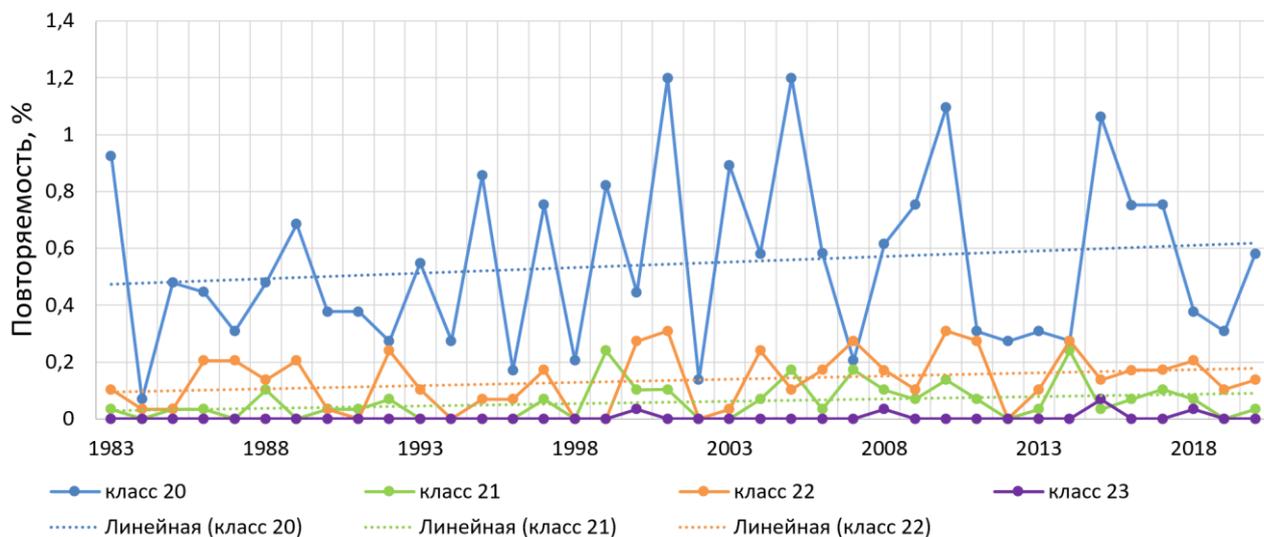


Рисунок 9. Пример межгодовой изменчивости повторяемости классов 20-23 в точке Т8 в северо-восточной части Черного моря. Пунктиром показаны линии тренда.

Таблица 3. Оценка трендов в межгодовой изменчивости повторяемости классов: ↑ — увеличение, ↑ — значимое увеличение, ↓ — уменьшение, ↓ — значимое уменьшение, ~ — изменения близки к 0, х — данных недостаточно для оценки.

| | Классы | | | | | | | | | |
|----|--------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| T1 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | х | х | х | х | х | х |
| T2 | ↑ | ↓ | х | ↓ | х | х | х | х | х | х |
| T3 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ |
| T4 | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ~ | ~ | х |
| T5 | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ~ | ~ | х |
| T6 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ~ | ~ | х |
| T7 | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | х | х | х | х |
| T8 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | х |

За исключением точки Т7, везде наблюдается рост повторяемости класса 1, хотя эти изменения незначимы, кроме точки Т3. В точке Т3 также значимо уменьшается класс 2. Повторяемость классов 20–23 почти везде уменьшается, кроме точки Т8. В ней повторяемость этих классов увеличивается, а для класса 21 это увеличение значимое.

В целом, за период исследования наблюдается увеличение повторяемости спектров с наименьшими значениями спектральной плотности и наибольшими частотами. Это хорошо соотносится с выводами об уменьшении штормовой

активности в исследуемых акваториях представленными в работах [Дивинский и др., 2021; Myslenkov et al., 2023]. Повторяемость классов с большой энергией в целом уменьшается, кроме некоторых районов Черного моря. За исключением точки Т7, везде наблюдается рост повторяемости класса 1, хотя эти изменения незначимы, кроме точки Т3. В точке Т3 также значимый отрицательный тренд — класс 2. Повторяемость классов 20–23 почти везде уменьшается, кроме точки Т8. В ней повторяемость классов увеличивается, а для класса 21 это увеличение значимое.

Отдельно изменчивость повторяемости классов 20–23 была рассмотрена для всей акватории Черного и Азовского морей для двух равных временных периодов: с 1983 по 2001 гг. и с 2002 по 2020 гг. (рис. 10). Для каждого периода времени рассчитывалась повторяемость классов 20–23, а затем было проанализировано, как изменилась повторяемость во втором периоде относительно первого. Эти изменения были выражены в процентах.

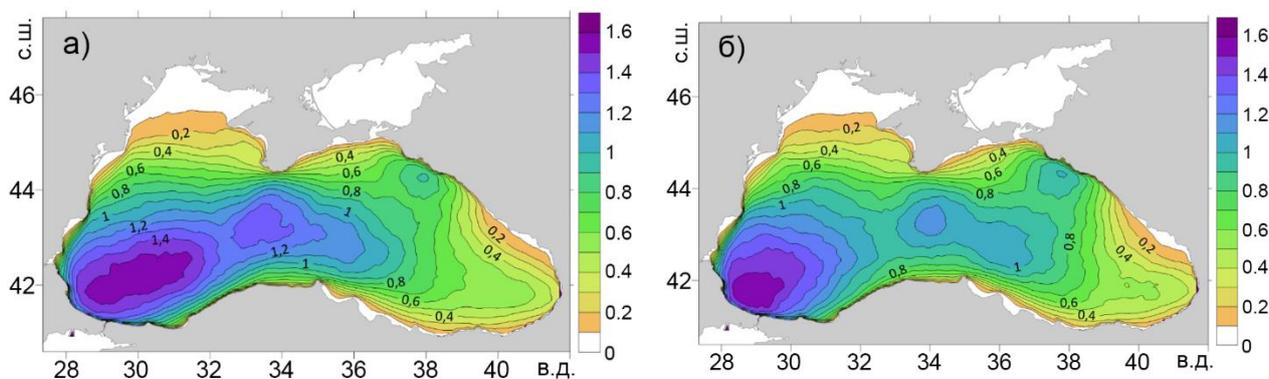


Рисунок 10. а) Суммарная повторяемость классов 20–23 за: а) 1983–2001 гг., %, б) 2002–2020 гг., %.

Показано, что процент повторяемости классов 20–23 увеличился в северо-восточной части Черного моря (на 19%), в северо-западной (на 27%) в районе положения струи Основного черноморского течения, и в прибрежной зоне северо-восточной части Турецкого побережья. Небольшие увеличения также наблюдались в западной части Черного моря и в восточной, между 36° и 39° в.д. При этом в центральной части Черного моря, напротив, наблюдается уменьшение повторяемости данных классов, на <22%. Уменьшение также наблюдаются вдоль Южного берега Крыма, в юго-восточной части и в узкой прибрежной зоне на западе Черного моря [Рыбалко и др., 2023; Рыбалко и др., 2024в]. Однако необходимо учитывать, что это относительные изменения, а в абсолютных значениях это от 1.2 до 1.5%.

Рассмотренная в репрезентативных точках межгодовая изменчивость повторяемости классов в зависимости от направления волн за период с 2017 по 2020 гг. показала, что при определенной межгодовой изменчивости, преобладающие направления распространения волн и направления определенных классов во всех точках демонстрировали сильную схожесть за рассматриваемые 4 года.

Таким образом, в Черном и Азовском морях при рассмотрении повторяемости спектров за продолжительный период (38 лет) было выявлено, что класс 1, характеризующийся наименьшими спектральными плотностями, преобладает над остальными во всех точках рассматриваемых акваторий. Значения энергии вторых по повторяемости классов также малы, а частоты пиков зависят от местоположения района. В многолетней изменчивости наблюдаются разнонаправленные изменения волнового режима в разных районах Азово-Черноморского региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы проведенного исследования.

1. Создана база данных частотных спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях с 1983 по 2020 гг. с шагом по времени 3 ч для 14581 точки в исследуемых акваториях. Шаг по пространству составил 10–15 км для открытой части Черного моря, 6 км для открытой части Азовского моря и 1–1.5 км вдоль всего побережья обоих морей.

2. Оценка качества расчетов модели показала небольшое занижение высоты волн (систематическая ошибка составила -0.07 м) для всей акватории в целом и небольшое завышение в прибрежной зоне (систематическая ошибка — в среднем 0.17 м). Модель показала небольшие занижения значений спектральной плотности (до -0.25 м²/Гц) в диапазоне частот от 0.04 до 0.2 Гц и небольшие завышения значений (до 0.25 м²/Гц) для высоких частот. Коэффициент корреляции превышал 0.8 для частот от 0.1 до 0.35 Гц и находился в диапазоне от 0.65 до 0.8 для более высоких частот. Было показано, что модель способна воспроизводить значения спектральной плотности и частоты основного пика даже в прибрежной зоне со сложной батиметрией.

3. Разработана методика классификации, включающая выделение референтных спектров с помощью кластерного анализа. Для Черного и Азовского морей получены 23 референтных спектра, отличающиеся друг от друга по частоте основного пика и значению максимума спектральной плотности, которые описывают разнообразие частотных спектров в исследуемых акваториях. По полученным спектрам была проведена классификация для определения повторяемости классов и выявления изменчивости спектров. Предложенная методика классификации может применяться для различных акваторий с учетом их особенностей.

4. Получены оценки повторяемости спектров с двумя и более пиками, т.е. с несколькими системами волн. В Черном море доля таких спектров в 2020 г. в среднем не превышала 1.5%. В Азовском море многопиковые спектры, удовлетворяющие выбранным в исследовании критериям, отсутствовали. Невысокая повторяемость

спектров с несколькими системами волн позволила использовать классификацию, основанную на однопиковыми референтными спектрами.

5. В рассматриваемых морях наблюдалась выраженная сезонная изменчивость спектров ветрового волнения, согласующаяся с сезонным ходом ветрового режима в Черном и Азовском морях. В целом, для зимних месяцев характерны наибольшие спектральные плотности и наименьшие частоты основного пика, а для летних месяцев — наоборот. В Черном и Азовском морях максимальное количество классов спектров выявлено в феврале. В Азовском море в этом месяце были выявлены 19 классов, спектральная плотность пика достигала $>7 \text{ м}^2/\text{Гц}$ на частотах $\sim 0.12 \text{ Гц}$. В Черном море — все 23 класса, спектральная плотность пика достигала $>25 \text{ м}^2/\text{Гц}$ на частотах $\sim 0.1 \text{ Гц}$. Минимальное количество классов было выявлено в июле: в Черном море — 15 классов, в Азовском море — 3.

6. С увеличением глубины, увеличивается количество обнаруживаемых классов. В Черном море в западной части классов обнаруживается больше, чем в восточной, энергия спектров в среднем выше. Для Азовского моря характерны частоты пика выше, чем в Черном море. Во всех районах исследуемых акваторий преобладают спектры с наименьшей энергией (спектральная плотность пика $\leq 0.3 \text{ м}^2/\text{Гц}$). При этом в узкой прибрежной полосе в качестве второго преобладающего класса были выявлены классы с более низкими частотами при малых значениях спектральной плотности. Особенно это характерно для восточной части Черного моря. Это может объясняться тем, что берег препятствует развитию волн при ветре, дующем с берега, и приходом зыби с западного направления.

7. За период с 1983 по 2020 гг. был получен положительный значимый тренд повторяемости классов с небольшой спектральной плотностью для юго-западной, центральной и юго-восточной частей Черного моря. Значимое увеличение классов спектров с низкими частотами и большими значениями спектральных плотностей характерно для северо-восточной части Черного моря.

8. Анализ сезонной и межгодовой изменчивости повторяемости классов с учетом направлений показал существование выраженной сезонной изменчивости направлений. Межгодовая изменчивость была небольшая, преобладающие направления за период с 2017 по 2020 гг. в целом стабильны.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Рыбалко А.Д.** Моделирование параметров ветрового волнения в Черном море с учетом течений / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 40–53. 1,62 п.л. SJR = 0.24, доля участия 1/2.
2. **Rybalko A.** Analysis of current influence on the wind wave parameters in the Black Sea based on SWAN simulations / Rybalko A., Myslenkov S. // Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 2023. Vol. 9. № 1. P. 145–163. 2,19 п.л. SJR = 0.47, доля участия 1/2.
3. **Rybalko A.** Assessment of SWAN and WAVEWATCH-III models regarding the directional wave spectra estimates based on Eastern Black Sea measurements / Amarouche K., Akpinar A., Rybalko A., Myslenkov S. // Ocean Engineering. 2023. Vol. 272. P. 113944. 1,73 п.л. SJR = 1.21, доля участия 1/4.
4. **Rybalko A.** Wave buoy measurements at short fetches in the Black Sea nearshore: Mixed sea and energy fluxes / Rybalko A., Myslenkov S., Badulin S. // Water. 2023. Vol. 15. № 10. P. 1834. 3,00 п.л. SJR = 0.72, доля участия 1/3.
5. **Rybalko A.D.** Seasonal variability of wind wave spectra in the Black Sea and Sea of Azov / Rybalko A.D., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S. // Oceanology. 2023. Vol. 63. Suppl. 1. P. S72–S82. 1,27 п.л. SJR = 0.40, доля участия 1/3.
6. **Рыбалко А.Д.** Использование классификации для анализа сезонной изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А., Архипкин В.С. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 24–40. 1,96 п.л. ИФ РИНЦ = 0.66, доля участия 1/3.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях и сборниках конференций:

7. **Рыбалко А.Д.** Моделирование волнения в Черном море с учетом поля течений / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А. // Материалы молодежной научн. конф. «Морские исследования и рациональное природопользование». М.: Изд-во Моск. ун-та, 2018. С. 156–157. 0,23 п.л. ИФ = 0, доля участия 1/2.
8. **Рыбалко А.Д.** Сезонная изменчивость волновых спектров по данным моделирования и измерений в районе Геленджика и Утриша / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А. // Труды X Международной научно-практич. конф. «Морские исследования и образование». Т. 1, Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2021. С. 121–124. 0,46 п.л. ИФ = 0, доля участия 1/2.

9. **Рыбалко А.Д.** Сравнение спектров ветрового волнения по данным моделирования и измерений в районе Геленджика и Утриша / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А. // Материалы VI Всероссийской научн. конф. молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана». М.: ИО РАН, 2021. С. 172–173. 0,23 п.л. ИФ = 0, доля участия 1/2.
10. **Рыбалко А.Д.** Классы частотных спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А., Архипкин В.С. // Материалы VII Всероссийской научн. конф. молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана». СПб.: Своё Издательство, 2023. С. 159–160. 0,23 п.л. ИФ = 0, доля участия 1/3.
11. **Рыбалко А.Д.** Особенности пространственной изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях по данным 2020 г. / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А., Архипкин В.С. // Труды XII Международной научно-практич. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)» Том II(IV). Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2024. С. 17–23. 0,81 п.л. ИФ = 0, доля участия 1/3.
12. **Рыбалко А.Д.** Применение классификации для изучения многолетней изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях / Рыбалко А.Д., Мысленков С.А., Архипкин В.С. // Доклады VIII Всероссийской научн. конф. молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана». Владивосток: ННЦМБ ДВО РАН, 2024. С. 199–200. 0,23 п.л. ИФ = 0, доля участия 1/3.