

На правах рукописи



ЯИЦКАЯ НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**АНАЛИЗ ОПАСНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
В АЗОВСКОМ И КАСПИЙСКОМ МОРЯХ В XX–XXI ВЕКАХ:
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ, МНОГОЛЕТНЯЯ
ДИНАМИКА И ОЦЕНКА РИСКОВ**

1.6.21 – Геоэкология

1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Сочи – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральном исследовательском центре Южном научном центре Российской академии наук»

**Официальные
оппоненты:**

Сухинов Александр Иванович

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Математика и информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Донской государственный технический университет

Дианский Николай Ардальянович

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Костяной Андрей Геннадьевич

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «24» июля 2026 года в 14:00 на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук 99.0.075.03 при ФГБУН ФНЦ «Владиавказский научный центр РАН», ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова» по адресу: 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а (ГФИ ВНЦ РАН).

Отзывы на автореферат (заверенные печатью, в двух экземплярах) просим направлять по адресу: 364051, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100, на имя ученого секретаря диссертационного совета 99.0.075.03 З.Ш. Гагаевой. E-mail: geodissovet@mail.ru. Факс: 8 (8712) 22-36-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова» и на сайтах: https://gstou.ru/science/dissertation_council/d999.228.03.php и vak.minobrnauki.gov.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

З.Ш. Гагаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно специальному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата приблизительно с 1950 г. в мире, а на территории Российской Федерации с середины 1990-х гг., наблюдается увеличение повторяемости природных опасностей вследствие изменения климата. Лидирующими по количеству человеческих жертв и по размеру причиненного экономического ущерба по данным Всемирной метеорологической организации являются опасные явления, связанные с водой. Прогнозируемые будущие флуктуации климата повлекут изменение частоты, периодов повторяемости и пространственного распределения различных гидрометеорологических переменных и, как следствие, в долгосрочной перспективе – порогов опасности экстремальных феноменов. Поэтому важно понимать механизмы формирования и развития опасных явлений, а также риски от возникновения и возможные последствия в пространственном масштабе как на региональном, так и на глобальном уровне.

Побережья Азовского и Каспийского морей являются густонаселенными районами с развитой инфраструктурой и сетью населенных пунктов. Экономическая деятельность регионов ориентирована на близкое расположение морей и дельт рек Дона и Волги с крупными портами, сухопутные и водные транспортные артерии, связывающие Россию и ближайшие страны. В прибрежных зонах морей расположены туристско-рекреационные кластеры, выделены особо охраняемые природные территории федерального и регионального значения. Многочисленные острова дельт Дона и Волги освоены и вовлечены в экономическую деятельность.

Азовское море и Северный Каспий имеют ряд общих черт – средние глубины составляют около 7 м; наличие крупных речных дельт и водообмена с акваторией с более высокой соленостью (Черное море и Средний Каспий); средняя соленость Азовского моря составляет около 13-14‰, Северного Каспия – 5-8‰; четко выражена сезонность и ежегодно наблюдается лед с декабря по март. Важной проблемой для обеих акваторий являются абразионно-оползневые процессы в прибрежной зоне, которые усиливаются долгопериодными изменениями уровня моря – в Азовском море с тенденцией к повышению, в Каспийском море – межгодовые флуктуации с общей тенденцией к понижению в последнее десятилетие. Главной причиной деградации берегов в морях является штормовое и нагонное воздействие в безледный период. При этом в наиболее штормовые зимние месяцы припайный лед служит своеобразной защитой для прибрежного комплекса, а в Каспийском море ледяной покров является ключевым элементом для размножения каспийского тюленя. Значимое воздействие на хозяйственные комплексы в прибрежной зоне оказывают ледяные торосистые образования, которые возникают при полном промерзании моря и могут повреждать подводные объекты, быть помехой при судоходстве и изменять подводный рельеф.

Описанные опасные гидрометеорологические явления (ОГЯ) могут возникать отдельно, последовательно или одновременно, но все они оказывают негативное воздействие и способствуют развитию абразии, оползней, затоплений, наводнений. Известны критерии опасности и неблагоприятности этих ОГЯ, но отсутствует понимание как многосоставные явления вместе взаимодействуют между собой и какие сочетания характерны для прибрежных областей и акваторий Азовского и Каспийского морей, их пространственно-временная специфика, гидрометеорологические предпосылки возникновения, развитие в комплексе и какие по силе могут быть последствия.

Степень разработанности темы. Вклад в развитие представлений об опасных гидрометеорологических явлениях в Азовском и Каспийском морях на различных этапах развития науки внесли многие авторитетные ученые XX и XXI вв. Ветровое волнение, сгонно-нагонные явления и последствия их проявления изучались Абузьяровым З.К., Архипкиным В.С., Беловым В.П., Бердниковым С.В., Беспаловой Л.А., Вапняром М.У., Германом В.Н., Герштанским Н.Д., Дианским Н.А., Зильберштейн О.И., Ивкиной Н.И., Ивлиевой О.В., Керимовым А.А., Книповичем Н.М., Косаревым А.Н., Левиковым С.П., Лопатухиным Л.И., Мамыкиной В.А., Матишовым Г.Г., Пановым Д.Г., Сафроновой Г.В., Скриптуновым Н.А., Сухиновым А.И., Тамбовцевой Л.П., Терзиевым Ф.С., Федоровым Ю.А., Фоминым В.В., Фоминой Н.Д., Хрустальевым Ю.П., Чикиным А.Л., Шереметевской О.И. На протяжении более 100 лет исследования данных явлений трансформировались по мере развития технологий. Знания о климатических флуктуациях в южном макрорегионе, экстремальных и опасных природных явлениях и последствиях их проявлений базируются на работах академика РАН Г.Г. Матишова. Современные представления о пространственно-временных характеристиках волнения и сгонно-нагонных явлений в морях основаны на результатах спектральных и гидродинамических моделей. Одним из наиболее полных современных справочных изданий по режиму ветра и волнения в морях России является серия, выпущенная Российским морским регистром судоходства (2006), где представлены характеристики ветра и волнения различной обеспеченности. Для периода 1979-2008 гг. в Морском гидрофизическом институте РАН и Севастопольском отделении ГОИН исследованы режимные характеристики ветрового волнения Азовского моря (Дьяков и др., 2010). В результате многолетних работ по исследованию ветрового волнения на географическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова разработан электронный атлас волновой энергии морей России (<https://carto.geogr.msu.ru/wavenergy/>).

Изучению ледового и температурного режимов, а также опасных ледовых явлений Азовского и Каспийского морей посвящены работы Бердникова С.В., Бухарицина П.И., Валлера Ф.И., Веселовой Л.Е., Гинзбурга А.И., Гюль К.К., Думанской И.О., Дьякова Н.Н., Ивкиной Н.И., Книповича Н.М., Костяного А.Г., Кошечкина Б.И., Каракаша Е.С.,

Лавровой О.Ю., Лебедева С.А., Матишова Г.Г., Соловьева Д.В., Огородова С.А., Федоренко А.В., Шеремет Н.А. На основе многолетних наблюдений опубликованы «Атлас льдов Черного и Азовского морей» (1962), «Атлас льдов Каспийского моря» (1961). С начала XXI в. наблюдения за ледовым режимом морей приняли более регулярный характер и публикуются в сети интернет в режиме близком к реальному времени (ЕСИМО (Единая государственная система информации об обстановке в Мировом Океане), НИЦ «Планета», Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт). Современные исследования ледяного покрова Азовского и Каспийского морей опубликованы в циклах работ (Kougaev и др., 2003; Боровская, Лексикова, 2008; Думанская, 2013, 2014; Антонюк, 2014; Дашкевич и др., 2016; Глушков, 2018). На основе глобального реанализа и данных дистанционного зондирования Земли для южных морей России выполнены исследования многолетней изменчивости температуры поверхности морей и ледовых условий с 1982 г. (Гинзбург и др., 2021a, б). Наиболее полное обобщение данных за более, чем вековой период опубликовано в климатических атласах ЮНЦ РАН под редакцией академика РАН Матишова Г.Г. (Атлас ..., 2014; Atlas..., 2014).

Несмотря на активное освоение побережья и акваторий в народохозяйственных целях, а также совершенствующиеся методы ретроспективного анализа и оценки последствий ОГЯ, исследование этих природных экстремальных феноменов остается важной и актуальной задачей, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. В результате выполненного обзора литературных источников автором сформулированы цель и основные задачи исследования.

Цель работы – комплексная оценка опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний в Азовском и Каспийском морях в условиях климатических изменений и антропогенного освоения и их воздействия на прибрежные геосистемы и акватории.

Для достижения цели последовательно решены следующие основные задачи:

1. Оценка современных методов исследования опасных гидрометеорологических явлений.

2. Реконструкция опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний для Азовского и Каспийского морей на основе вековых баз данных, геоинформационных технологий и математических моделей.

3. Создание базы данных ансамблей опасных гидрометеорологических явлений для исследуемых регионов.

4. Выявление закономерностей формирования и эволюции опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний в условиях климатических изменений, оценка взаимосвязи и взаимозависимости процессов в регионах.

5. Районирование побережий и акваторий в зависимости от вероятности возникновения и суммарного эффекта воздействия ансамблей опасных гидрометеорологических явлений.

6. Оценка уязвимости приморских геосистем и научные основы оптимизации оценки воздействия мультиопасных гидрометеорологических явлений на побережье Азовского моря и Северного Каспия в условиях климатических изменений и антропогенного освоения.

Объектами исследования являются Азовское и Каспийское моря, дельты рек Дона и Волги. **Временной период:** с 1979 г. по 2020 г.

Предметом исследования являются такие опасные гидрометеорологические явления и их сочетания (ансамбли / мультиопасные явления), как ветровое волнение, шторма; ледовые явления; нагонные явления.

Научная новизна результатов исследования:

1. Собрана, систематизирована и обобщена в базе геоданных первичная информация о гидрометеорологических характеристиках случаев ОГЯ, данные ретроспективного анализа, полученные на основе геоинформационного анализа и математического моделирования, а также результаты многомерного анализа ОГЯ за период 1979-2020 гг. для Азовского и Каспийского морей. Таким образом создан полноценный инструментарий для выполнения комплексного ретроспективного пространственно-временного анализа опасных и мультиопасных гидрометеорологических явлений в Азовском и Каспийском морях (**1.6.21 Геоэкология**).

2. Впервые для всех случаев штормового волнения и штормовых нагонов выполнен ретроспективный анализ и картирование полей распределения параметров волнения, площадей затопления и величины динамической нагрузки на побережье Азовского и Каспийского морей на основе высокоточной батиметрии, приведено полное описание и численные характеристики (**1.6.17 Океанология**).

3. Впервые для Азовского и Каспийского морей выделены случаи ансамблей опасных гидрометеорологических явлений, выполнено их описание, выявлены закономерности формирования, эволюции и взаимообусловленности для двух акваторий (**1.6.17 Океанология**).

4. Выполнена оценка зимних условий в регионах Азовского и Каспийского морей по комплексу параметров: тип зимы по температурным условиям; значение и дата минимальной температуры воздуха за зимний сезон; среднее значение ледовитости моря за сезон; даты начала, окончания и продолжительностью ледостава. Рассчитаны пороговые значения суровости каждого параметра и зимних условий в целом, обоснованы основные особенности для каждого типа зимы (**1.6.17 Океанология**).

5. Разработан подход к ранжированию мультиопасных гидрометеорологических явлений и определению степени опасности от их возникновения. Выполнена оценка рисков опасности ансамблей ОГЯ в прибрежной зоне для жизнедеятельности и функционирования социально-экономических объектов (**1.6.21 Геоэкология**).

6. Разработана иерархическая схема опасных и мультиопасных гидрометеорологических явлений, характерных для Азовского моря и Северного Каспия и их побережий (**1.6.21 Геоэкология**).

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты расширяют теоретические представления о закономерностях и особенностях многолетней динамики опасных гидрометеорологических явлений, таких как шторма, нагоны, динамическая нагрузка на берег, лед, и их сочетаний в условиях климатических изменений и антропогенного освоения прибрежных зон. Результаты готовы к практическому использованию и призваны внести значительный вклад в решение важной проблемы по адаптации народного хозяйства России к наблюдаемым и прогнозируемым глобальным изменениям климата. Могут быть использованы при разработке программ регионального развития прибрежных территорий Азовского и Каспийского морей, при планировании аварийно-спасательных работ после штормовых явлений, сопровождавшихся значительным ущербом, при оценке экологической емкости территорий или создании систем экологического и геоэкологического мониторинга. Выявленные механизмы формирования ансамблей опасных гидрометеорологических явлений, оценки последствий и собственно степень опасности таких сочетаний могут внести существенный вклад в понимание аналогичных процессов в схожих прибрежных регионах Мирового океана.

Методология и методы исследования. В работе применены статистические, картографические, пространственно-временные методы, в том числе с помощью ГИС, анализа и обработки больших массивов данных – исторических картосхем и карт, справочников о режимных характеристиках исследуемых морей, данных натурных наблюдений, данных дистанционного зондирования Земли. Использованы зарекомендовавшие себя в мировой практике математические модели. Вся информация прошла многоуровневый контроль качества. Анализ и графическое представление результатов выполнялись с помощью программных пакетов обработки данных ArcGIS, QGIS, Microsoft Access, Microsoft Excel и др.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности формирования и эволюции опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний в Азовском и Каспийском морях, и типовые профили развития штормовых сгонно-нагонных событий, выявленные на основе результатов ретроспективного анализа гидрометеорологических параметров (**1.6.17 Океанология**).

2. Климатический сдвиг в многолетней пространственно-временной динамике элементов гидрометеорологического режима Азовского и Каспийского морей с начала 2000-х гг., проявившийся в увеличении максимальных скоростей ветра и высот волн, смещении штормовой активности на теплое время года, увеличении повторяемости мягких зим и уменьшении ледовитости (**1.6.17 Океанология**).

3. Комплексная система ранжирования опасности и частоты ансамблей гидрометеорологических явлений на побережьях Азовского моря и Северного Каспия для оценки последствий их воздействия на объекты отраслей экономики (**1.6.21 Геоэкология**).

4. Комплексное районирование побережий и акваторий Азовского моря и Северного Каспия по величине риска сочетаний опасных гидрометеорологических явлений и интегральные значения геоэкологической опасности для отдельных районов, группы проблем, объектов и геоэкологических последствий, оказывающих воздействие на природные и антропогенные объекты (**1.6.21 Геоэкология**).

Степень достоверности. Результаты исследования опубликованы в 123 научных работах, из них 20 – в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и/или Web of Science, из перечня ВАК по научным специальностям 1.6.21 Геоэкология и 1.6.17 Океанология, соавтор в 4 коллективных монографиях; а также 24 статьи в прочих изданиях.

Исследования по теме диссертационной работы велись в рамках государственного задания Субтропического научного центра РАН, Южного научного центра РАН, Федеральной целевой программы Министерства науки и образования РФ, научных проектов Российского фонда фундаментальных исследований и Российского научного фонда: РНФ 24-17-20015 (2024-2026, руководитель); РНФ 20-77-00083 (2020-2022, руководитель); РФФИ 20-15-50320 (2020-2021, руководитель); РФФИ 18-05-80043 (2018-2021, исполнитель); РФФИ 17-05-41190 (2017-2019, руководитель); РФФИ 16-35-60046 (2016-2018, руководитель); РФФИ 16-35-00318 (2016-2017, руководитель); РФФИ 16-35-50079 (2016, исполнитель); РФФИ 15-35-50687 (2015, исполнитель); ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Соглашение №14.604.21.0050 (2014-2016, исполнитель); РФФИ 14-35-50461 (2014, исполнитель); РФФИ 13-05-90744 (2013, руководитель); Хоздоговор с ММБИ КНЦ РАН в рамках Государственного контракта №2/Е-11-12 от 05.05.2011 г. (2011-2012, исполнитель).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 37 конференциях, семинарах и круглых столах, в том числе 11 конференциях молодых ученых, студентов и аспирантов, 11 всероссийских конференциях, 15 международных конференциях. Среди них: 9th MEDCOAST (Сочи, Россия, 2009); 4th CEMEPE 2013 and SECOTOX Conference (о. Микonos, Греция, 2013); CSIT'2014 (Шеффилд, Великобритания, 2014); European Geoscience Union (Вена, Австрия, 2016); XXXV SCAR 2018 & IASC 2018 (Давос, Швейцария, 2018); Международный круглый стол «Будущее Каспия. Научные проекты и исследования» (Москва, Россия, 2018); I, II, III, IV Международные научные конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова «Опасные явления – I, II, III, IV» (Ростов-на-Дону, Россия, 2019, 2020, 2021, 2022).

Отдельные разделы работы отмечены наградами: Золотая медаль РАН для молодых ученых, область наук – океанология, физика атмосферы и география, за цикл работ «Гидрологический режим Каспийского моря в XX-XXI веках и его экстремальные проявления» (2019); Премия для молодых ученых имени члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова «За выдающиеся достижения в области наук о Земле и наук о жизни», направление «Науки о Земле», за цикл работ «Ледовый режим Азовского и Каспийского морей: условия формирования, многолетняя динамика и опасные явления» (2021); Именная стипендия РГО в номинации «За успехи в научной и образовательной деятельности в сфере географии и смежных наук» (2019); Премия ЮНЦ РАН для молодых ученых имени Панова Дмитрия Геннадьевича – за выдающиеся достижения в области океанографии, геоморфологии и географии (2012).

Работа соответствует пунктам паспорта специальности 1.6.21 Геоэкология: 6; 7; 9; 14; 16.

Работа соответствует пунктам паспорта специальности 1.6.17 Океанология: 3; 5; 14; 15; 17.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 366 страницах, включает 70 рисунков и 15 таблиц, 4 приложения. Список литературы содержит 436 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность за многолетнюю поддержку, советы и конструктивную критику заместителю президента РАН, научному руководителю Южного научного центра РАН академику РАН Г.Г. Матишову. Автор благодарен директору Субтропического научного центра РАН академику РАН А.В. Рындиному за всестороннюю поддержку и содействие, предоставленные возможность и условия проводить исследования, послужившие основой для написания настоящей работы; директору Южного научного центра РАН д.г.н. С.В. Бердникову за ценные советы, наставления, конструктивную критику и многолетнюю всестороннюю помощь. Сотрудникам ЮНЦ РАН и ФИЦ СНЦ РАН к.г.н. А.А. Магаевой, к.г.н. И.В. Шевердяеву, к.т.н. В.В. Кулыгину, к.б.н. Г.В. Ковалевой, к.с.-х.н. Журавлевой Е.Н. и И.А. Третьяковой за всестороннюю многолетнюю помощь и поддержку исследований, оказанную на всех этапах работы. Выражаю благодарность заведующему лабораторией геоэкологии Севера географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова д.г.н. С.А. Огородову и профессору кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета д.г.н. Л.И. Лопатухину за своевременные советы и внимательное отношение к научной работе на всех этапах.

Особая признательность безвременно ушедшим члену-корреспонденту РАН Д.Г. Матишову, д.г.н. Г.Н. Панину и к.ф.-м.н. В.М. Кушнину за советы, наставления и веру в меня.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные защищаемые положения.

Глава 1. История изучения вопроса

В главе выполнен анализ нормативно-правовых документов, регулирующих терминологию в области опасных природных явлений (ОПЯ) в России и за рубежом. Представлен обзор методов классификаций ОПЯ, оценки последствий от их возникновения. В главе рассматриваются наиболее распространенные математические модели для реанализа ветрового волнения и нагонных явлений, их характеристики и преимущества. На основе обзора сделан выбор инструментов для ретроспективного анализа ОГЯ в работе. Выполнен обзор литературных источников и показана степень изученности для Азовского и Каспийского морей исследуемых опасных явлений – ветрового волнения, сгонно-нагонных и ледовых явлений.

Глава 2. Материалы и методы

В главе приведено описание информационной и методологической основы исследования. Работы проводились в соответствии с разработанной схемой комплексной оценки опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний в Азовском и Каспийском морях (рисунок 1).

Базы данных по Азовскому и Каспийскому морям

Океанографические базы данных (ОБД) разработаны и опубликованы при непосредственном участии автора в рамках сотрудничества Южного научного центра РАН и Национальной администрации по океану и атмосфере (NODC NOAA, США) в климатических атласах (Matishov et al., 2014; Атлас, 2014; Яицкая, 2012). ОБД включают соответствующий мировым стандартам контроля качества данных архив первичной океанографической и метеорологической информации за период: по Азовскому морю с 1891 г. по 2020 г; по Каспийскому морю с 1897 по 2011 гг.. Океанографическая база данных, принципы ее создания, контроль качества описаны в ряде публикаций при участии автора (Матишов и др., 2014; Яицкая, 2009; Яицкая, 2012).

Гидрометеорологическая база данных. Информация о непрерывном ветровом воздействии для расчетов параметров волнения, представленная в виде наборов меридиональной (U) и зональной компонент (V) на высоте 10 м над уровнем моря, была выбрана из глобальных реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с 1979 г. по 2019 г.: ERA-Interim (www.ecmwf.int/node/8174) с пространственным разрешением ~80 км; ERA5 (Hersbach et al., 2023) с пространственным разрешением 0.25°. Зональные и меридиональные компоненты ветра реанализов имеют временное разрешение 1 ч. Информация об осадках,

речном стоке, атмосферном давлении и температуре воздуха получена из открытых источников – Единая система информации об обстановке в Мировом океане ВНИИГМИ-МЦД (ЕСИМО) (esimo.ru/portal/), ООО «Расписание погоды» (rp5.ru/), портала Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации (meteo.ru/), оцифрованного банка океанографических данных (Матишов и др., 2014).

Геоинформационные системы (ГИС)

ГИС «Азовское море» и «Каспийское море» разработаны для объединения и пространственно-временного анализа разных типов информации и представляют уникальную среду для сбора, хранения и быстрого доступа к данным. В ГИС включены: векторные, растровые данные, непространственные таблицы. Тематическая модель морской экосистем Азовского и Каспийского морей состоит из основных разделов: «Батиметрия», включающий данные по батиметрии и морфометрии за разные временные периоды; «Гидрология и гидрохимия», включающий поля распределения гидрологических и гидрохимических параметров; «Метеорология», включающий поля распределения метеорологических характеристик; «Модельные оценки», включающий поля распределения, полученные по результатам математического моделирования (Яицкая, 2012).

ГИС «Ледовый режим южных морей России» включает историческую и современную картографическую и численную информацию о положении кромки льда, сроках образования ледяного покрова, продолжительности ледового сезона. По Азовскому морю в ГИС накоплена: численная информация с 1916 г. по 2020 г. на восьми прибрежных гидрометеостанциях (Таганрог, Кагальник, Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк, Тамань, Керчь, Геническ); картографическая информация с 1953 г. по 2020 г. По Каспийскому морю в ГИС накоплена: численная информация с 1810 г. по 2020 г. на пяти прибрежных гидрометеостанциях (Пешной, Астрахань, о. Искусственный, о. Кулалы, о. Тюлений); картографическая информация с 1959 по 2020 гг.

Цифровые модели рельефа дна. Разработаны собственные высокоточные масштабируемые цифровые модели рельефа дна (ЦМР), позволяющие детализировать прибрежные районы и дельтовые области с заданной точностью и включающие самые современные данные о глубинах и береговой линии. Для создания *цифровой модели рельефа дна Азовского моря* использована составленная академиком Г.Г. Матишовым (Матишов, 2006) по новейшим батиметрическим данным модель рельефа дна, дополненная информацией с гидрологических карт и данными эхолотных промеров из морских экспедиционных исследований Южного научного центра РАН в ГИС «Азовское море». Для расчетов ветрового волнения в модели принята расчетная сетка Азовского моря с пространственным разрешением $0.01^\circ \times 0.01^\circ$.

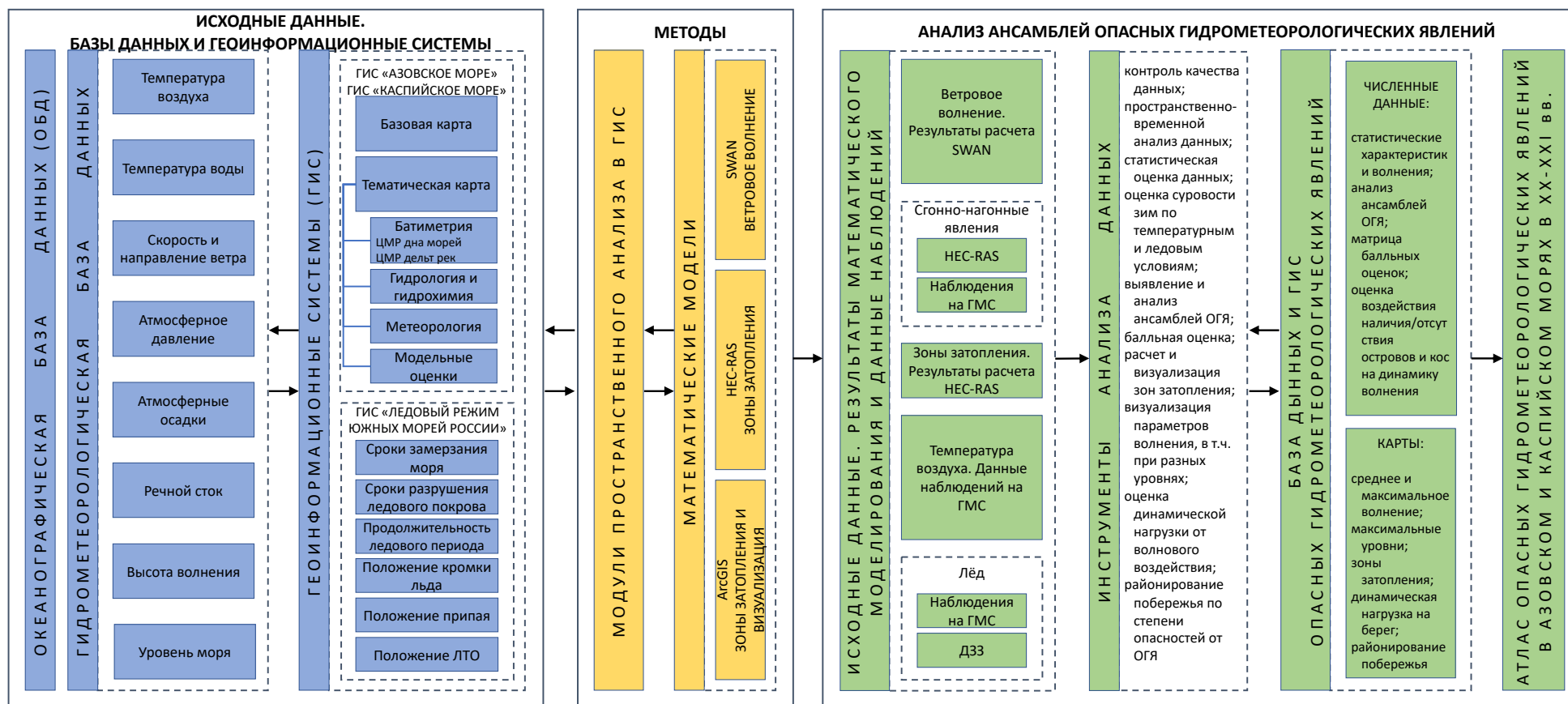


Рисунок 1 – Схема комплексной оценки опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний в Азовском и Каспийском морях в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия на прибрежные геосистемы

Для создания *цифровой модели рельефа дна Каспийского моря* использована информация, накопленная в ГИС «Каспийское море», – оцифрованные гидрографические карты масштаба 1:750 000, 1:200 000, 1:100 000 с дополнениями, опубликованные в 1992-2009 гг. и соответствующие среднему положению уровня моря минус 28 м. Размер ячейки итогового растра ЦМР дна Каспийского моря составил $0.001^{\circ} \times 0.001^{\circ}$ по широте и долготе соответственно. На основе ЦМР созданы шесть разноуровневных сеточных областей для расчетов ветрового волнения. Дополнительно в обеих акваториях был определен ряд ключевых точек, характеризующих различные районы морей и соответствующих гидрологическим разрезам.

Для создания *цифровой модели рельефа дельты р. Волги* использованы топографические карты масштаба 1:100 000, 1:200 000, карты глубин судоходного пути р. Волги. Выполнена оцифровка высот и глубин, горизонталей высот и изолиний глубин, линий обрывов, озер. Для учета речных русел гидрографической сети и особенностей строения поперечного профиля разработана методика построения ЦМР дельты р. Волги. В расчетах зон затопления от нагонных явлений использовалась результирующая регулярная сетка, покрывающая почти 13 тыс. км² территории с пространственным разрешением 500х500 м и состоящая из более 101 тыс. ячеек. Вся расчетная область ограничена с юга изобатой 3 м в Северном Каспии, с севера – район сразу после отделения от р. Волги р. Бузан.

Цифровая модель рельефа дельты р. Дон разработана в ЮНЦ РАН на основе топографических карт масштаба 1:100 000, карт глубин судоходного пути р. Дон, гидрографических карт участков, прилегающих к судоходному пути р. Дон (Шевурдяев и др., 2018), и предоставлена коллегами для реализации настоящего исследования.

Адаптация и верификация математических моделей

Для всех математических моделей сформированы исходные ряды информации с 1979 г. по 2020 г. для Азовского и Каспийского морей в необходимых форматах: цифровые модели рельефа дна моря, профили дельтовых областей рек (картографическая информация); скорость и направление ветра (глобальный реанализ); осадки (данные наблюдений); речной сток (данные наблюдений).

Адаптация и верификация модели ветрового волнения. В работе использована модель SWAN версия 41.31 (<https://swanmodel.sourceforge.io/>). При расчетах волнения использовалась регулярная сетка и система вложенных расчетов. Адаптация модели SWAN к условиям Азовского и Каспийского морей была выполнена в соответствии с разработанным подходом (Yaitskaya, Tretyakova, 2014; Yaitskaya, Tretyakova, 2016.). Для контроля корректности результатов были привлечены данные наблюдений за ветровым волнением в открытом море и на прибрежных гидрометеостанциях, данные дистанционного зондирования Земли. В результате был определен ряд основных физических процессов и

коэффициентов, включенных в итоговые расчеты: линейный рост волны в соответствии с подходом, изложенным в работе (Comen, 1984); диссипация из-за «забурунивания»; опрокидывание волн на мелководье, вызванное изменением глубины; придонное трение, параметризованное константой спектра JONSWAP (Hasselmann, 1973); трех- и четырехволновое взаимодействие волн.

Адаптация и верификация гидрологической модели. Для расчетов нагонных явлений и зон затопления в дельтах рек использована гидрологическая модель HEC-RAS (www.hec.usace.army.mil). Результаты верифицировались по наблюдениям на гидрометеорологическом посту ЮНЦ РАН в дельте р. Дон и данным дистанционного зондирования Земли для дельты р. Волги. Верификация модели выполнялась для среднемноголетних условий речного стока. Расход задавался на верхней границе в два русла с соотношением 2:1 (соответственно, для р. Волги у пос. Нижнелебяжье и р. Бузан у пос. Бузан). На нижней границе, находящейся в Каспийском море, – суточный ход уровня воды. Тестовые расчеты зон затопления при наблюдаемых расходах и уровнях осуществляли для мая и октября – половодном и меженным месяцами. Шероховатость поверхности распределялась на два класса: русла протоков и нерусловые поверхности (суша). В результате экспериментов были определены параметры шероховатости. Адаптация и верификация гидрологической модели HEC-RAS для условий дельты р. Дон описана в (Шевердяев и др., 2017). В настоящей работе использовался готовый комплекс.

Количественные оценки изменения интенсивности штормов при изменении уровня моря

Количественные оценки интенсивности штормовых нагонов в Азовском море и Северном Каспии, включая дельтовые области Дона и Волги, при изменении уровня моря выполнялись для четырех сценариев:

Сценарий 0. Реальные штормовые условия при современных гидрометеорологических и геоморфологических условиях.

Сценарий 1. Повышение уровня моря на 0.5 м, 1.0 м ... 3.0 м относительно современного, затопление некоторых банок и островов.

Сценарий 2. Понижение уровня моря на 0.5 м, 1.0 м ... 3.0 м относительно современного, укрепление оснований и тела кос, увеличение площадей островов.

Сценарий 3. Современное положение уровня моря, но отсутствие части крупных островов и кос в условиях индустриального освоения дельт морей.

Оценка нагрузки на побережье

Расчет ударных волновых нагрузок (t^*c/m^2) на берег от штормового волнения и нагонов, основывается на работе (Кушнир и др., 2013; Федоров, 2016) и осуществлялся по ряду соотношений, приведенных в (Шулейкин, 1953; СНиП 2.06.04-82). При расчетах использованы результаты моделирования параметров недеформированной ветровой волны

конкретного моря (средняя длина волны, значительная высота и средний период волны), полученные с помощью спектральной волновой модели SWAN, и цифровые модели рельефа дна. Параметры недеформированной волны берутся из ближайшего (по направлению нормали) к берегу узла расчетной сетки SWAN. ЦМР дна использованы для определения углов наклона дна, координат узлов береговой линии и углов направления нормали к берегу.

Оценка суровости зим по температурным и ледовым условиям

В основу определения суровости зим по температурным и ледовым условиям положены следующие факторы: сумма среднемесячных температур воздуха (°C) за зимний сезон (декабрь-март); значение и дата минимальной температуры воздуха для прибрежных ГМС за зимний сезон (декабрь-март); среднее значение ледовитости (%) моря за сезон; начало, конец (даты) и продолжительность ледового сезона (дни).

Для работы использованы данные, рассчитанные и обобщенные для Азовского моря по двум прибрежным ГМС Таганрог и Керчь; для Каспийского моря – Атырау, Лагань, Тюлений, Астрахань, Форт-Шевченко (температура воздуха) и Пешной, Искусственный, Тюлений, Астрахань, Кулалы (типы ледового сезона).

Суровость температурных условий определялась по методике А.Н. Лебедева и Г.П. Писаревой (Гидрометеорологический ..., 1962), примененной в (Яицкая, Магаева, 2018; Яицкая, Магаева, 2020; Магаева, 2023), в соответствии с которой для определения критериев суровости используются суммы среднемесячных значений искомого параметра за зиму (декабрь-март) для всего периода исследований. На основе полученных значений для определения критериев суровости находился коридор значений по формуле:

$$\frac{M - avr}{3} + avr, \quad (1)$$

где M – минимальное или максимальное значение суммы средних месячных температур для определения нижнего или верхнего предела порога суровости соответственно; avr – среднее многолетнее значение температуры воздуха.

Значение и дата минимальной температуры воздуха для прибрежных ГМС за зимний сезон, среднее значение ледовитости определялись аналогичным методом.

Типовые ледовые сезоны. В зависимости от сроков начала ледообразования, продолжительности ледового сезона и его окончания выделены пять типов ледовых сезонов, что позволяет по формальным признакам ранжировать зимы для обеих акваторий и выделить характерные общие закономерности в многолетнем ледовом режиме (Яицкая, Магаева, 2018; Яицкая, Магаева, 2020; Магаева, 2023).

Все ледовые и температурные характеристики рассматривались для периода 1950-2020 гг. для получения достоверных значений среднемноголетних значениях и многолетних изменениях.

Матрица балльных оценок опасности

Матрица балльных оценок опасности имеет следующие параметры (основано на (Новожилов, 2015) с дополнениями):

- количество N интервалов значений опасности. Принято 3 категории рисков (допустимый, нежелательный, недопустимый). Задано $N-1$ граничных значений опасности, которые определяются исходя из максимального и минимального значений уровня опасности в матрице;

- количество m интервалов значений частот события. Принято 3 интервала: редкое, вероятное, частое. Задано $m+1$ граничных значений, которые определяются заданными минимальным и максимальным значениями частоты события;

- количество n интервалов значений степени опасности события. Принято 3 категории: малоопасное, неблагоприятное, опасное. Шкалы $n+1$ граничных значений, которые определяются заданными минимальным и максимальным значениями степени опасности.

Районирование по степени геоэкологической опасности

Районирование побережий и акваторий Азовского моря и Северного Каспия по максимальному штормовому волнению, степени динамической нагрузки от штормового волнения, по вероятности встречи припая и ледяных торосистых образований выполнялось на основе кластерного анализа, который заключается в разбиении на однородные районы заданных по пространству значений. Алгоритм представляет собой итеративный процесс вычисления минимального евклидова расстояния при определении принадлежности к определенному кластеру каждого значения. После проверки статистической значимости кластеры с минимальными различиями стандартного отклонения были объединены. В результате экспериментов оптимальным для всех параметров оказалось выделение четырех классов степени геоэкологической опасности – низкая, средняя, высокая, очень высокая, – с соответствующим присвоением баллов от 1 до 4. Районирование по вероятности встречи припая и ледяных торосистых образований выполнено на основе данных, приведенных в работе (Магаева, 2023), и информации, накопленной в ГИС «Ледовый режим южных морей». Комплексное районирование побережий Азовского моря и Северного Каспия по величине риска ансамблей ОГЯ выполнялось путем сложения баллов, присвоенных в результате районирования по степени геоэкологической опасности для отдельных факторов опасности, и баллов из матрицы балльной оценки.

База данных и Атлас опасных гидрометеорологических явлений в Азовском и Каспийском морях в XX-XXI вв.

Все полученные в ходе реализации работы данные, интегрированы в базу геоданных и атлас ансамблей опасных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) (<http://caspien-atlas.com/>), которая свободно взаимодействует с ГИС, описанными выше, и ГИС опасных гидрометеорологических явлений (рисунок 1).

Глава 3. Режим волнения и уровня Азовского и Каспийского морей: многолетняя динамика и экстремальные проявления

В разделе представлен анализ результатов расчетов ветрового волнения. Рассматриваются следующие параметры – значительная высота волн (м), период волнения (сек.), высота (м) и направление (град.) волн. Под средними значениями за сезон понимаются: зима – декабрь, январь, февраль; весна – март, апрель, май; лето – июнь, июль, август; осень – сентябрь, октябрь, ноябрь. Для выявления межгодовых флуктуаций ветрового волнения рассматриваются аномалии от среднемноголетних значений и по десятилетним периодам.

В соответствии с Инструкцией РД 52.04.563-2013 и Перечнем ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» от 26.02.2016 №22, с изменениями, утвержденными приказами от 17.05.2016 №69, от 22.06.2016 №81, от 30.05.2017 №65 и от 12.05.2023 №70 и согласованным с Росгидрометом, в Азовском море сильным волнение принято с высотой волны от 3.0 м и более, опасным нагоном в Таганрогском заливе – уровень 700 см и более; в Каспийском море сильным волнение принято с высотой волны от 4.0 м и более, опасным нагоном – уровень на ГМС о. Тюлений превышает 240 см.

Волновой климат Азовского моря

Среднемноголетняя сезонная динамика волнения

Для основных характеристик ветрового волнения наблюдается четко выраженная сезонность. Максимальные высоты волн до 3.0 м (средние до 0.8 м) характерны для холодного сезона года. С октября по апрель в азовоморском регионе длина волн в центральной части моря может достигать 14 м и более. Лимитирующим фактором и своеобразной защитой для абразионного побережья моря является наличие прочного ледяного покрова. В конце зимы и весной вследствие штормовой активности на побережье Азовского моря нередко наблюдаются навалы льда. В теплую часть года средняя высота волн уменьшается до 0.2 м, часто наблюдается штиль, максимальная высота волн в центральной части моря может достигать 2.0-2.5 м. Единожды с 1979 г. в сентябре 2014 г. наблюдался разрушительный шторм с высотой волн до 3.5 м. В Керченском проливе вследствие узости, наличия кос и обширных отмелей направление волнения отличается. Преобладающими являются северное и южное. Средние и максимальные высоты волн достигают здесь 0.6 м и 2.5 м соответственно. Такое сочетание – активное волнение и небольшая ширина – может приводить к развитию опасных для судоходства условий и частичной или полной остановке экономической деятельности в проливе (например, шторм в ноябре 2007 г.). Наибольших значений высоты волн достигают закономерно в центральной части моря, наименьших – на севере Таганрогского залива и в центральной части Керченского пролива. Эти же районы отличаются наименьшей штормовой активностью. В Таганрогском заливе сезонность параметров волнения отсутствует.

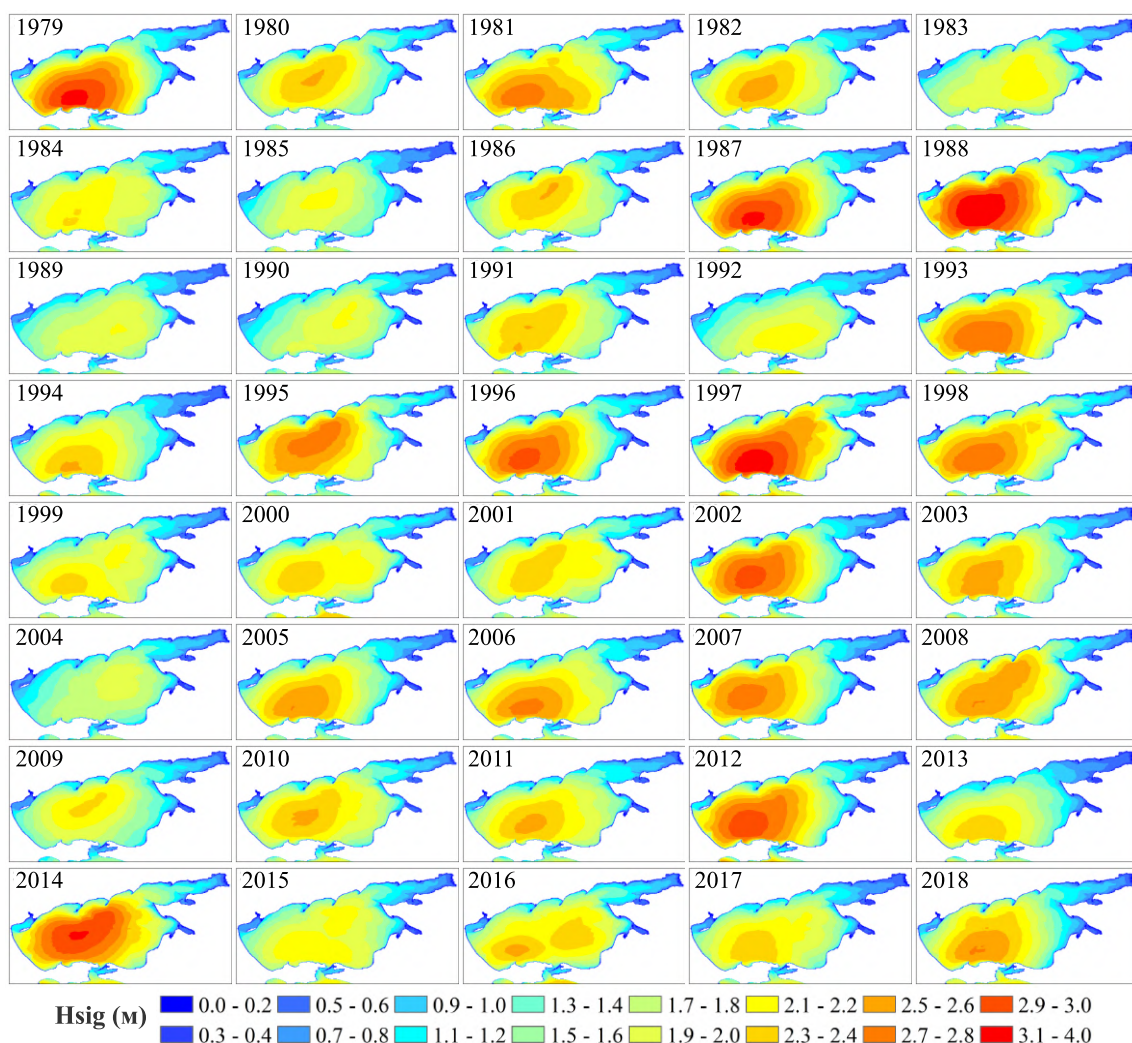


Рисунок 2 – Годовые максимумы высот волн (м) в Азовском море

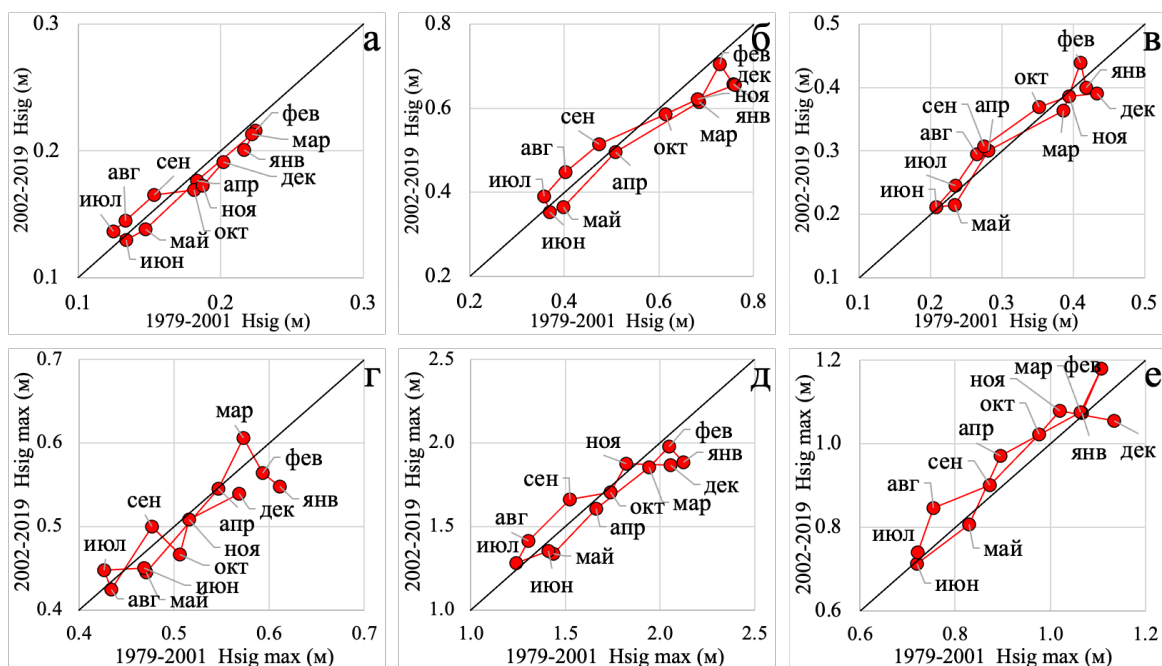


Рисунок 3 – Результаты анализа среднемесячных высот волн (а, б, в) и средних месячных максимумов (г, д, е) для отдельных районов Азовского моря: а, г – Таганрогский залив; б, д – Азовское море; в, е – центр Керченского пролива

Межгодовая динамика и штормовое волнение. С 1979 г. в Азовском море выделено 49 штормов, из них 4 в теплую половину года. 3 наиболее крупных шторма, сопровождавшихся нагонами: 15.11.1992 г., 11.11.2007 г., 24.09.2014 г. На фоне выделенных штормов отмечено 16 сгонов и 15 нагонов в сочетании с ледяным покровом до 20% в зимние периоды. Для межгодовой динамики волнения Азовского моря характерно чередование трех-пятилетних периодов усиления и ослабления волнения (рисунок 2). Наиболее продолжительным периодом является десятилетие с 2002 г. по 2013 г., когда за исключением отдельных лет ежегодно высота волн была ниже среднемноголетних значений. Можно принять этот интервал за некоторую стабилизацию среднегодовых значений. Однако такое явление – следствие своеобразного нивелирования значений внутри года. Максимальное развитие волнения, характерное в среднемноголетнем режиме водоема для холодного сезона, после 2002 г. смещается на летне-осенний период (рисунок 3). Для этого же сезона увеличивается продолжительность волнения высотой от 2.5 м и уменьшается продолжительность штормов с высотой волны до 2.0 м, что связано с сокращением ледового сезона и, как следствие, развитие волнения большую часть года ничем не лимитировано. Годы с наибольшим развитием средних высот волн не совпадают с годами наибольшего развития максимальных высот волн. И после непродолжительного уменьшения с 2008 г. отмечается постепенный рост максимальных высот волн. Это может объясняться аридизацией региона и сопутствующим ростом максимальных скоростей ветра на фоне общего снижения средних скоростей.

В целом динамика волнения для всех районов моря синхронна. За исключением Таганрогского залива. Здесь после 2000 г. максимальные высоты волн стабилизировались или даже уменьшились. При штормовом волнении области с максимальной высотой волн сосредоточены в центральной части моря. Относительная симметричность в конфигурации береговой линии и ограниченность глубин, не дают мигрировать областям с сильным волнением, как, например, в Черном море.

Волновой климат Каспийского моря

Среднемноголетняя сезонная динамика волнения

В Каспийском море характерно два преобладающих режима волнения – для Северного Каспия, для Среднего и Южного Каспия. В северной части моря минимумы параметров волнения достигаются с июня по август (0.3-0.5 м), максимумы – с ноября по февраль (0.5-1.0 м). Длина волн в холодное время года не превышает 13 м. На участках с глубинами менее 10 м высоты волн во время штормов не превышают 2 м. Преобладающее направление волнения так же, как и в Азовском море, соответствует преобладающим направлениям ветра – северо-западному или юго-западному. Режим волнения и штормовые условия Северного Каспия схожи с режимом волнения в Азовском море. Район Мангышлакского порога можно назвать пограничным. Здесь присутствует ярко выраженная сезонность с летним минимумом и зимним максимумом, характерная для Северного Каспия, но

значения превышают северокаспийские – среднемноголетний минимум высот волн 0.5 м, максимум 1.0 м, абсолютный максимум 7.2 м (май 2019 г.). В Северном Каспии, как и в Азовском море, ежегодно образуется сезонный ледяной покров с ноября по март, редко до середины апреля, лимитирующий развитие волнения.

В Среднем Каспии сезонная амплитуда среднемноголетних параметров волнения является максимальной и достигает 0.5 м для высот волн, 11 м – для длин волн. Сезонный минимум значений смещается на май, с июня по август – немного выше и практически одинаковы. Максимум приходится на зиму. Здесь же расположен район наибольшего развития штормов – более 7.0 м, – соответствующий области с максимальными глубинами. Пик штормовой активности происходит с ноября по май. Ледяной покров в Среднем Каспии образуется в суровые зимы, достигая в отдельные годы Апшеронского полуострова. Припай с 1979 г. не наблюдается.

В Южном Каспии сезонность в параметрах волнения практически отсутствует. Минимум значений отмечается в мае (высота волн 0.5 м, длина – 12 м). В остальные месяцы высота волн составляет 0.7-0.8 м, длина – 15-17 м). В Среднем и Южном Каспии преобладающее направление волнения юго-восточное, юго-западное.

Межгодовая динамика и штормовое волнение

Для межгодовой динамики волнения Каспийского моря в целом характерно чередование пяти-шестилетних периодов. Период до 1993 г. несмотря на значительные отрицательные аномалии в среднем волнении в отдельные годы не имеет определенной тенденции. Как и в Азовском море наиболее продолжительным является период с 2000 г. по 2012 г., когда за исключением отдельных лет ежегодно высота волн была ниже среднемноголетних значений (рисунок 4). С 2013 г. наблюдается значительный рост высот волн в Среднем и Южном Каспии, превышающий значения другого периода положительных аномалий 1993-98 гг. В Северном Каспии после уменьшения штормовой активности с 2000 г. по 2008 г. максимумы штормов растут (рисунок 4). Снижение штормовой активности совпадает с уменьшением среднего волнения. В Среднем Каспии после 1990 г. положительный или отрицательный тренд отсутствует. В Южном Каспии с 1992 г. по 2004 г. продолжительный период увеличения максимальных высот волн, с 2005 г. по 2013 г. уменьшение максимальных значений практически на 1.0 м.

Внутри года также происходит перераспределение и смещение среднегодовых значений. В Северном Каспии зимой и весной наблюдается увеличение, летом и осенью – стабилизация и уменьшение межгодовых размахов. В Среднем и Южном Каспии – рост значений параметров волнения зимой, весной и осенью, отсутствие динамики летом. В районе Мангышлакского порога – рост значений во все сезоны. Условно пограничным годом можно указать 2012 г.

После 2013 г. (рисунок 5) средняя высота волн увеличились на всей акватории во все месяцы, кроме января и февраля; в Северном Каспии снижается в июне, сентябре и октябре. Как указывалось выше, в Северном Каспии, в отличие от Азовского моря, динамика средних значений волнения совпадает с динамикой максимальных. Для Среднего и Южного Каспия такая динамика становится схожей только после 2013 г.

С 1979 г. по 2019 г. выделен 71 случай со скоростями ветра эффективных направлений от 10 м/с, что может вызывать нагоны; высота волн от 3 м в открытом море. В Северном Каспии с 1979 г. – 62 случая штормового волнения с высотой волны более 2.0 м, 12 случаев, когда даже в западной части Северного Каспия высота волн достигала 2.0 м. За этот же период в Среднем Каспии наблюдалось 100 случаев с высотой волны от 3.0 м. Наиболее крупные шторма – 26.11.2006 г., 25.01.2017 г., 11-12.05.2019 г. (волнение до 3.0 м в Северном Каспии, до 7.0 м в Среднем Каспии). Области с максимальным волнением сосредоточены в Среднем Каспии (рисунок 4), что объясняется наибольшей ветровой активностью здесь. Вероятность возникновения экстремальных штормовых и нагонных условий наиболее высока в умеренные и мягкие зимы, когда максимальная ледовитость моря не превышает 20%.

Продолжительность штормового волнения в часах существенно отличается как по сезонам, так и по районам моря. В Среднем Каспии постепенно в течение 40 лет увеличивается продолжительность штормового волнения с высотой волн более 3.0 м в зимний период. Учитывая, что в межгодовой динамике волнения здесь тренд отсутствует, можно сделать вывод об увеличении продолжительности штормовых случаев. В Южном Каспии за этот же период снижается продолжительность волнения с высотой волн 2.0-2.5 м, на фоне увеличения волнения 1.0-1.5 м и 3.0-4.0 м.

Штормовые нагоны и затопление прибрежной зоны

Затопление прибрежной зоны Азовского моря всегда имеет тяжелые социально-экономические последствия. Быстрому распространению азовоморских вод в дельту р. Дон способствует орография (небольшие глубины и обширные равнинные участки), наличие большого количества протоков и гирл, через которые вода может распространяться, насыщенность грунтовыми водами. Восстановлены значения для различных сочетаний расходов и уровней нагонов в Таганрогском заливе (рисунок 6), показано, что зоны затопления при различных нагонах схожи. Повышенные расходы воды в р. Дон во время нагонов провоцируют синхронное развитие паводкового затопления территории с севера. Расчеты показали, что даже при минимальных нагонах 0.5-1.0 м и средних расходах р. Дон затоплению подвергается более 50% территории дельты. Любой нагон от 1.0 м и более имеет катастрофические последствия для населенных пунктов в дельте Дона. Бóльший вклад в развитие штормовых нагонов в дельте Дона вносит расход в реке. При этом чем меньше величина нагона, тем большее влияние на площадь затопления дельты оказывает величина речного стока. При среднем расходе стока $600 \text{ м}^3/\text{с}$ и штормовом нагоне 0.5 м площадь

затапливаемой территории составляет 49%. При уровне нагона от 1.0 м и более площадь затопления занимает 50% и более.

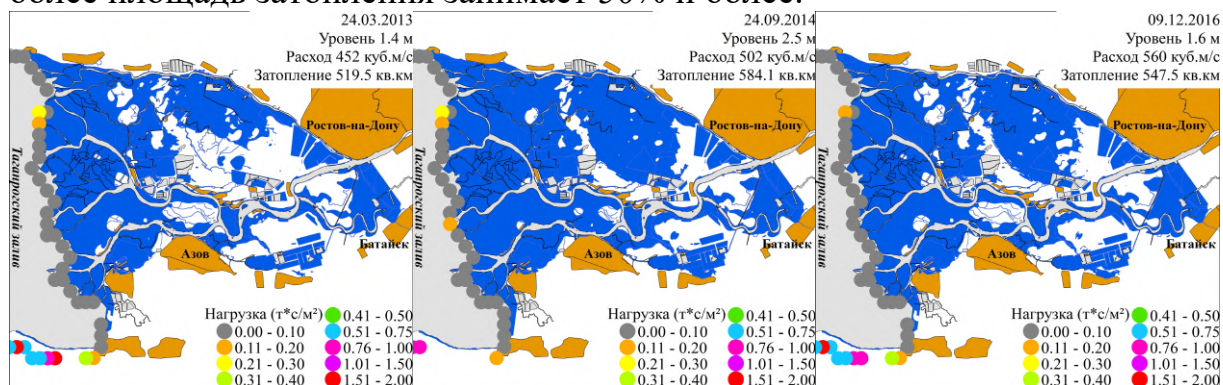


Рисунок 6 – Восстановленные последствия случаев штормовых нагонов в дельте р. Дон: зоны затопления и нагрузка на берег

Максимальных значений (более 80% территории дельты) площадь затопления достигает при нагоне от 3.0 м и расходах Дона от 600 м³/с. Далее при увеличении расходов и уровня площадь затопления дельты варьируется не значительно.

Для реконструкции нагонов в дельте Волги (рисунок 7) использовались суточные наблюдения уровня в ближайших к дельте уровнемерам в Каспийском море (о. Искусственный, о. Тюлений или Лагань). Для учета речного расхода использовались месячные расходы в с. Верхнелебязье в 1979-2019 гг. Абсолютный уровень моря принят по пункту Махачкала. Минимальные площади водного зеркала (менее 10 тыс. км²) характерны для нагонов при уровне ниже минус 27 мБС. Кроме непосредственно колебания уровня в северной части Каспийского моря на площади водного зеркала влияют также расходы в Волге. Так же, как и в Азовском море, при одинаковых уровнях, но существенно различных расходах Волги, площадь затопления будет больше при повышенном расходе.

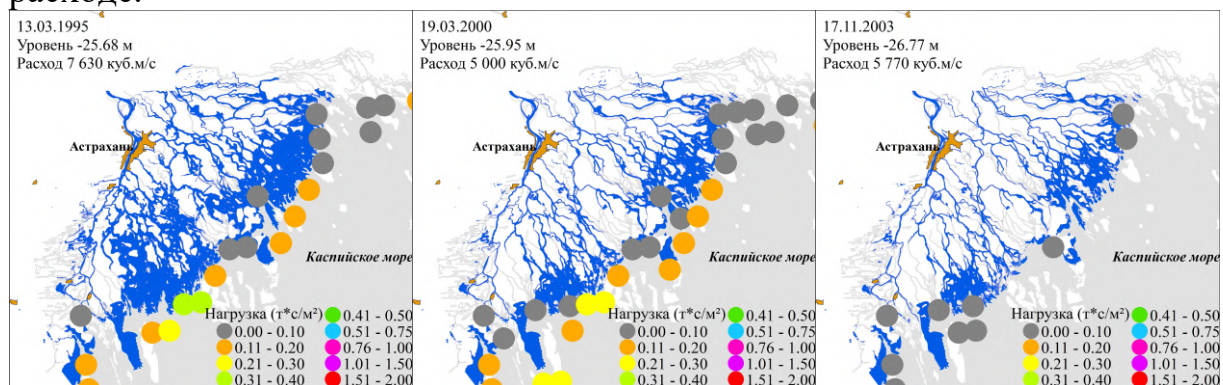


Рисунок 7 – Восстановленные последствия случаев штормовых нагонов в дельте р. Волги: зоны затопления и нагрузка на берег

Типизация штормовых нагонов

На основе полученных результатов расчетов штормовых нагонов выделено три генерализованных варианта случаев.

Тип 1 «Шторм». Самый редкий тип шторма и с наиболее катастрофическими последствиями. Максимум значений высот волн превышает для всех случаев 2.5 м для обоих акваторий.

При быстром развитии штормовых ветров шторм развивается стремительно (24-36 ч), достигает критических отметок и также быстро прекращается (рисунок 8). Все летние шторма и штормовые нагоны относятся к этому типу (1985, 2006 и 2014 гг. в Азовском море и 1991, 2019 гг. в Северном Каспии). До и после пика штормового нагона значения волнения на типовом штормовом профиле приближаются к штилю (менее 0.5 м). В теплое время года графики волнения характеризуются наличием одного пика (максимума) волнения для каждого случая. В холодное время года в течение одного штормового случая возможно неоднократное ослабление ветровой активности и сменой его направления, что отражается на динамике параметров волнения (рисунок 8). В целом в пределах одного случая уровень моря продолжает нарастать.

Тип 2 «Сгон и шторм». Характерной чертой данного типа является длительный сгон (24-36 ч) и затем развитие шторма (36-48 ч). После основного пика волнения в течение 96 ч на море может продолжаться небольшое по силе волнение до 1.5 м. Максимум высот волн от 2.0 до 2.5 м.

Тип 3 «Продолжительный шторм». Наиболее распространенный тип. Возникает при медленном либо продолжительном воздействии ветров эффективных направлений. Длительность развития штормовой ситуации может достигать 72 ч. Перед пиком волнения может развиваться небольшое по силе волнение до 1.5 м (при типе 2 – после максимума). Максимум высот волн – от 1.5 м до 2.0 м.

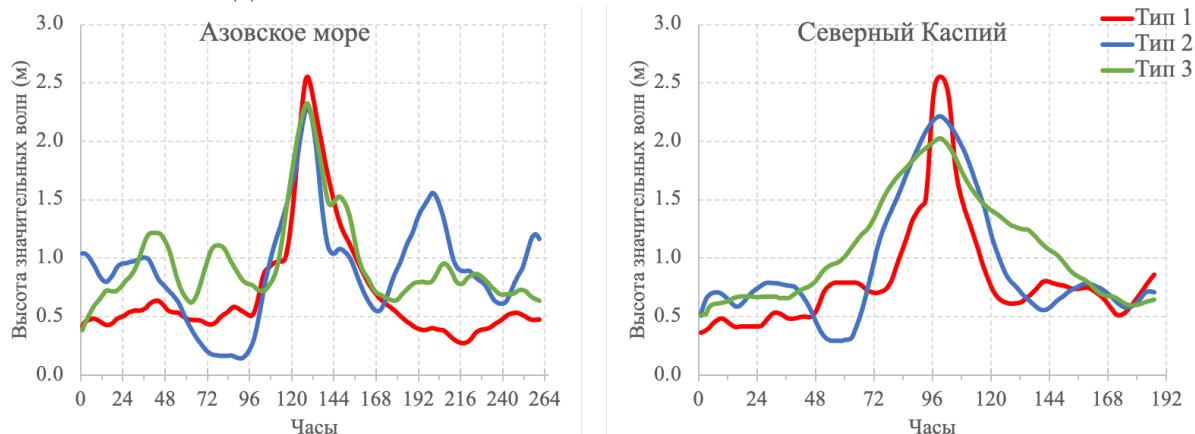


Рисунок 8 – Типовые профили штормов для Азовского моря и Северного Каспия

Нагрузка на берег от штормового волнения

Расчет динамической нагрузки на берег от штормового волнения показал, что при штормах в Азовском море максимальная нагрузка на берег достигает 5-8 т*с/м², в отдельных районах – до 10 т*с/м².

Средняя динамическая нагрузка до 2 т*с/м² приходится на побережье Таганрогского залива и восточный берег Азовского моря. При этом у основания кос нагрузка минимальна, что обусловлено рефракцией волн. Не

всегда максимальная нагрузка достигается во время штормовых нагонов. Так в январе 2007 г. при развитом волнении 2.3 м и одновременном ветровом нагоне существенной нагрузки на южное побережье Таганрогского залива и юго-западный берег собственно моря не наблюдалось. С 2000 г. наиболее слабыми по мощности являлись нагоны 30.12.2014 г. и 03.12.2016 г. Площадь затопления не превысила 50%, речной сток был ниже среднего, а динамическая нагрузка на морской край дельты Дона не превысила 0.25 т*с/м^2 . Во время сгонов (например, 19.04.2003 г. – минус 1.6 м, 24.03.2007 г. – минус 1.4 м), сопровождающихся штормовыми условиями или сильным волнением, вся ударная нагрузка концентрируется на северном побережье Азовского моря, достигая значений не более 1.0 т*с/м^2 . Все косы северного побережья собственно моря, район между п. Кагальник и Павло-Очаковской косой, от Ейского лимана до косы Долгой включительно, север Керченского и Таманского полуостровов относятся к районам с высокой динамической нагрузкой. Здесь во все десятилетия значения достигают 8 т*с/м^2 и более. При этом для этих же районов характерны наибольшие межгодовые изменения с общим трендом к увеличению значений.

Для Каспийского моря общие характеристики воздействия между десятилетиями изменяются не существенно. Главные различия проявляются в Северном Каспии. Выделяются два ключевых района с наибольшим воздействием и одновременно с наибольшими межгодовыми изменениями – междуречье рек Волги и Урала и побережье Дагестана от Кизлярского до Аграханского заливов. Для первого района характерно постепенное увеличение динамического воздействия от $3\text{--}4 \text{ т*с/м}^2$ в 1980-х гг. до $10\text{--}15 \text{ т*с/м}^2$ в 2000-х гг. Для второго, наоборот, характерно постепенное снижение штормовой динамической нагрузки от $> 20 \text{ т*с/м}^2$ в 1980-х гг. до $7\text{--}8 \text{ т*с/м}^2$ в 2000-х гг. Также можно отметить увеличение динамического воздействия в 2000-х гг. на морской край дельты Волги на $1\text{--}2 \text{ т*с/м}^2$. Несмотря на то, что динамическая нагрузка является производной от штормового волнения и его косвенным показателем, это ОГЯ нельзя рассматривать отдельно или в качестве результирующей оценки.

Выполнено картирование всех штормовых ситуаций и сопровождающих их нагонных явлений с оценкой динамической нагрузки на берег.

Глава 4. Температурный и ледовый режим Азовского и Каспийского морей

В главе рассматривается многолетняя динамика зимних условий в Азовском и Каспийском морях – температура воздуха, ледовитость, сроки образования и разрушения льда.

Выполнена оценка зимних условий в регионах Азовского и Каспийского морей по комплексу параметров: тип зимы по температурным условиям; значение и дата минимальной температуры воздуха за зимний сезон; среднее значение ледовитости моря за сезон; даты начала, окончания

и продолжительностью ледостава. Рассчитаны пороговые значения суровости каждого параметра, обоснованы основные особенности для каждого типа зимы. Анализ основных фаз ледового режима позволил установить ряд общих закономерностей, характерных для Азовского и Каспийского морей. Так, при раннем ледообразовании продолжительность ледостава всегда увеличена, реже бывает в пределах среднееголетних значений (норма). При начале ледообразования близком к среднееголетним значениям продолжительность и окончание могут варьироваться как в сторону положительных, так и в сторону отрицательных отклонений от нормы. В случае начала ледостава в пределах среднееголетних значений и увеличенной продолжительности окончание ледового сезона всегда происходит в поздние сроки – для всех ГМС в начале-середине апреля. При начале ледообразования близком к среднееголетним значениям и небольшой продолжительности окончание ледового сезона всегда происходит раньше среднееголетних значений (конец февраля-начало марта). В случаях позднего начала ледостава, даже при небольшой продолжительности, конец ледостава всегда приходится на конец марта/начало апреля (или чуть более ранние сроки в зависимости от пункта).

Азовское море

С 1950 г. по 2020 г. в Азовском море преобладают умеренные зимние периоды (54% для ГМС Таганрог и 63% для ГМС Керчь), которые сменяются мягкими (31% для ГМС Таганрог и 24% для ГМС Керчь) и реже суровыми (11% для ГМС Таганрог и 13% для ГМС Керчь) (рисунок 9).

Суровые зимние периоды. Минимальные среднесуточные температуры воздуха, отмеченные в эти периоды, достигают минус 29.5°C для ГМС Таганрог и минус 19.1°C для ГМС Керчь. Суммы среднемесячных температур воздуха за зимний период изменяются от минус 13.5°C до минус 35.8°C для ГМС Таганрог, от минус 3.1°C до минус 19.3°C для ГМС Керчь. Среднее значение ледовитости за сезон составляет 50%, при этом значительна продолжительность ледового сезона – до 166 дней (среднееголетнее значение 110 дней) для ГМС Таганрог и до 133 дней (среднееголетнее значение 58) для ГМС Керчь.

Умеренные зимние периоды. Все показатели ледового режима изменяются в пределах среднееголетних значений. Минимальные среднесуточные температуры воздуха, характерные для данного класса, составляют минус 28.4°C для ГМС Таганрог и минус 17.4°C для ГМС Керчь (исключение составляет зимний период 2005/2006 гг., когда минимальная среднесуточная температура воздуха составила минус 20.8°C). Суммы среднемесячных температур воздуха для ГМС Таганрог составляют от минус 17.8°C до плюс 3.9°C. На ГМС Керчь сумма среднемесячных температур воздуха в основном положительна и варьируется в пределах от минус 10.5°C до плюс 21.4°C. Ледовитость значительно варьируется 6-50%. Продолжительность ледостава в этот период составляет 67-147 дней для ГМС Таганрог и 10-123 дней для ГМС Керчь.

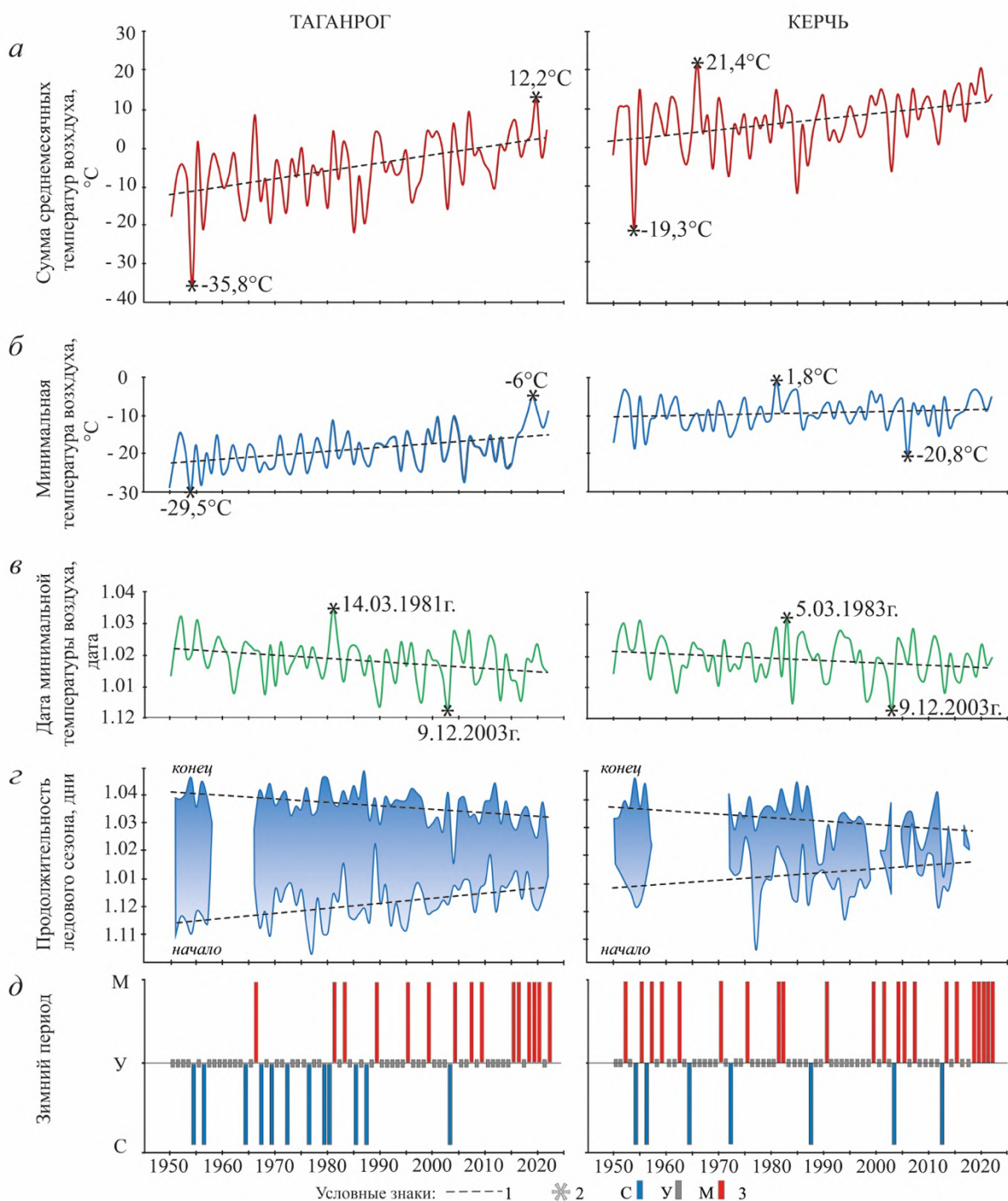


Рисунок 9 – Классификация зимних условий по температурным условиям и ледовым характеристикам для Азовского моря за период 1950-2020 гг. ((Яицкая, Магаева, 2018) с дополнениями)

Примечание к рисункам 13, 14:

1 – линия тренда, 2 – максимальные и минимальные значения параметров,
3 – суровый, умеренный, мягкий

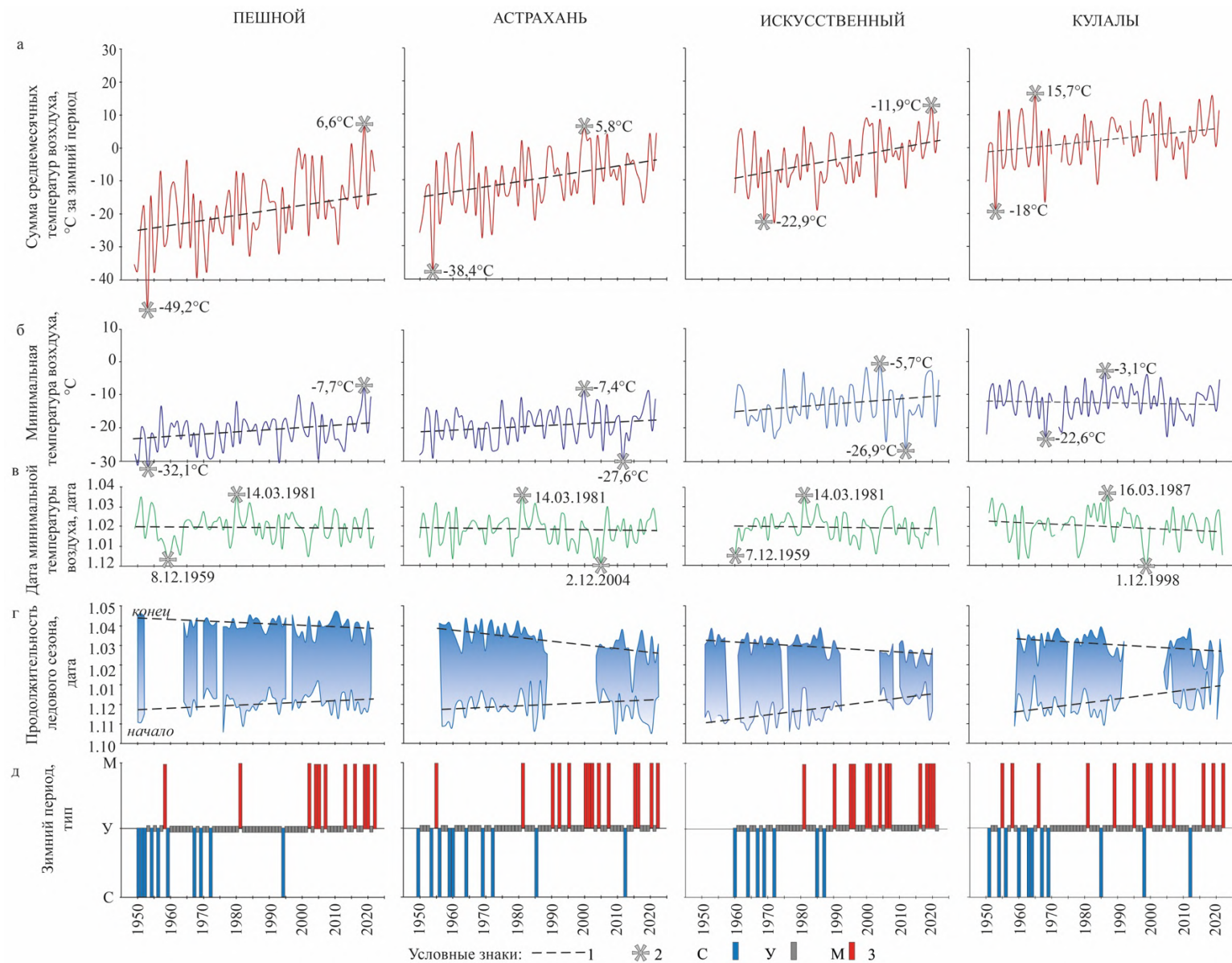


Рисунок 10 – Классификация зимних периодов по температурным условиям и ледовым характеристикам для пунктов Северного Каспия за период с 1950 по 2020 гг. ((Яицкая, Магаева, 2020) с дополнениями)

Мягкие зимние периоды. Главной особенностью данного класса является то, что для него характерен непродолжительный ледовый сезон – от 36 до 140 дней для ГМС Таганрог и 2-95 дней для ГМС Керчь. Значения самых низких температур воздуха здесь отмечаются практически такие же, как и в классе умеренных зимних периодов, и составляют минус 22.6°C для ГМС Таганрог и минус 11.8°C для ГМС Керчь, но сумма среднемесячных температур воздуха при этом практически всегда положительная: из 14 мягкий зимних периодов отрицательная сумма температур отмечена для 2 зим на ГМС Таганрог и не отмечена вовсе на ГМС Керчь. Суммы среднемесячных температур варьируются в пределах от минус 1.0°C до плюс 12.3°C для ГМС Таганрог и от плюс 2.7°C до 20.4°C для ГМС Керчь. Ледовитость Азовского моря составляет 2-20%.

Каспийское море

Во всех пунктах наблюдений преобладают умеренные зимние периоды. Варьируется соотношение суровых и мягких зимних периодов. До 1970-х гг. во всех пунктах наблюдений преобладают суровые зимние периоды. В период 1980-1989 гг. суровые зимние периоды отмечаются в пунктах Искусственный, Тюлений и Кулалы, а затем, до 2010-2020 гг. их количество значительно уменьшается в сравнении с остальными десятилетиями (рисунок 10).

Суровые зимние периоды. Минимальные температуры воздуха составляют от минус 32.1°C на ГМС Пешной до минус 17.2°C на ГМС Тюлений. Сумма среднемесячных температур воздуха находится в диапазоне от минус 49.2°C до минус 24.1°C на ГМС Пешной, от минус 23.0°C до минус 10.8°C на ГМС Искусственный, от минус 18.0°C до плюс 2.6°C на ГМС Кулалы, от минус 14.8°C до 0°C на ГМС Тюлений. При этом минимальные температуры в большинстве случаев характерны для января-февраля. Ледовитость Северного Каспия колеблется в диапазоне 50-90%, а продолжительность ледового сезона – 110-180 дней в восточной части Северного Каспия и 120-140 дней в западной части.

Умеренные зимние периоды. Минимальные температуры воздуха составляют минус 29.6°C на ГМС Пешной, минус 26.9°C на ГМС Искусственный, минус 22.5°C на ГМС Тюлений, минус 22.3°C на ГМС Кулалы. Сумма среднемесячных температур воздуха колеблется в диапазоне от минус 33.3°C до 0°C на ГМС Пешной до от минус 9.2°C до плюс 15.5°C на ГМС Кулалы. Как и для Азовского моря для Каспийского моря в умеренные зимние периоды наблюдается наибольший размах сумм среднемесячных температур. Ледовитость Северного Каспия составляет 30-80%, а продолжительность колеблется в пределах от 94-158 дней в восточной части до 20-155 в западной.

Мягкие зимние периоды. Минимальные температуры воздуха составляют минус 25.4°C на ГМС Пешной, минус 25.0°C на ГМС Искусственный, минус 15.9°C на ГМС Тюлений, минус 10.5°C на ГМС Кулалы. Дата минимальной температуры выпадает преимущественно на январь. Сумма среднемесячных температур воздуха составляет от минус

14.9°C до плюс 6.6°C на ГМС Пешной до от 0°C до плюс 17.5°C на ГМС Тюлений. В западной части Северного Каспия сумма среднемесячных температур стабильно положительная вне зависимости от временного периода. Ледовитость составляет 30-60%. Продолжительность ледового сезона в восточной части Северного Каспия составляет 70-120 дней, а в западной части – 8-66 дней.

Глава 5. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений в Азовском и Каспийском морях

В главе приведены результаты анализа синоптических ситуаций, провоцирующих развитие зимних мультиопасных гидрометеорологических явлений, как наиболее опасного и наименее изученного типа ОГЯ; описан подход к ранжированию и определению степени опасности от возникновения мульти-ОГЯ, и результаты комплексной оценки таких явлений. Также рассматривается связь проявления ОГЯ в регионах Азовского моря и Северного Каспия и климатический сдвиг в гидрометеорологическом режиме обоих водоемов.

Анализ синоптических ситуаций, провоцирующих развитие зимних мультиопасных гидрометеорологических явлений

Азовское море. Рассмотрено 79 синоптических ситуаций (36 зим с 1950 по 2020 гг.) со скоростью ветра 15 м/с и более с западной составляющей на ГМС Таганрог и Приморско-Ахтарск, повышенным атмосферным давлением и различными ледовыми условиями. В соответствии с разработанной классификацией зимних периодов выделенные зимы характеризуются следующими условиями:

- 20 умеренных с максимальной ледовитостью 80% и средней 30%;
- 16 мягких с максимальной ледовитостью 45% и средней 5%.

Наибольшее количество с экстремальными условиями отмечается зимами:

1981/82 гг. (5 случаев, мягкая);	1982/83 гг. (5 случаев, мягкая);
1988/89 гг. (6 случаев, мягкая);	1989/90 гг. (7 случаев, мягкая).

В Таганрогском заливе и в северо-восточной части моря опасные штормовые явления возникают в основном на фоне пониженного атмосферного давления. Это связано с прохождением циклонов над Азовским морем, которые при некоторых траекториях могут приводить к экстремальным явлениям. Как, например, при движении через Черное море и Керченский пролив. Для Азовского моря увеличение уровня моря на 2.0 м и более происходит при практически полном отсутствии льда в водоеме, немного повышенном или близком к нормальному (1013 гПа) атмосферном давлении и 3-ЮЗ направлениях ветра. Увеличение уровня моря в пределах 1.0-2.0 м может происходить в равной степени как на фоне пониженного, так и на фоне повышенного атмосферного давления. При этом в море наблюдается наличие льда до 20% от общей площади. Интересным представляется изменение направления ветра. При пониженном атмосферном давлении преобладающее направление может варьироваться

в диапазоне Ю-З, а при повышенном – ЮЗ-З с максимальными скоростями (более 15 м/с). Увеличение уровня моря в пределах до 1.0 м происходит также, как и в предыдущем случае, на фоне пониженного (с ЮВ и СЗ ветрами), либо повышенного (с ЮЗ ветрами) атмосферного давления. При этом наблюдается увеличение суровости зим, а доля площади моря, занятая льдом, колеблется в широких пределах – от 0 до 40%.

Каспийское море. Рассмотрено 140 синоптических ситуаций (с 1950 г. по 2020 г.), для которых характерны скорости ветра от 15 м/с; эффективное направление по отношению к берегу; высота волн от 3.0 м в открытом море и от 2.0 м в Северном Каспии. Сочетание синоптических условий для возникновения мультиопасных гидрометеорологических явлений в зимний период наблюдаются практически ежегодно. В среднем количество случаев за зимний сезон составляет два-три. Наибольшая повторяемость (количество случаев в год) отмечается в 2000-е гг. Зимой 2005/06 гг. наблюдалось наибольшее за более, чем пол века количество случаев – 8. С увеличением повторяемости мягких зим с 1980-х гг. постепенно возрастает количество и продолжительность. Так за пятнадцать лет с 2000 г. количество случаев, продолжительностью более 27 ч, составило 12 (для сравнения, всего с 1950 г. по 1999 г. – 8 случаев). Максимум зафиксирован в умеренную зиму 2004/05 гг. (январь), когда продолжительность составила более четырех суток (105 ч). А в умеренную зиму 2005/06 гг. (январь) продолжительность составила более 70 ч. Средняя продолжительность случаев при полном отсутствии ледяного покрова или при наличии отдельных плавающих льдин составляет 5 ч. Только в 9 случаях из 140 отмечается штормовая ситуация, охватившая все море, при этом ледовитость в Северном Каспии составляла более 50%. Наименьшая повторяемость наблюдается в конце 1980-х гг. – начале 1990-х гг. на фоне увеличившейся в этот период максимальной высоты волны и постепенно роста и стабилизации уровня моря, отсутствии суровых зим. Величина нагонного превышения уровня моря также уменьшается.

Чаще всего метеорологические условия, приводящие к возникновению опасных нагонов в сочетании со штормовым волнением, возникают в умеренные по температурным условиям месяцы и годы, когда акватория не занята припаем. В среднем внутри сезона распределение количества случаев примерно одинаковое – максимум приходится на март (36 случаев), в остальные месяцы от 23 до 26. Максимальная продолжительность синоптических ситуаций характерна для января. Но между десятилетиями внутрисезонная динамика существенно отличается. Это связано с преобладающими атмосферными процессами в регионе, определяющими скорость и направление ветра, температурные и ледовые условия, объемом выносимого речного стока и величиной уровня моря. Характерной чертой каждого десятилетия является максимум случаев в марте, когда в море уже нет устойчивого ледяного покрова.

С учетом тенденций выделено 19 случаев возникновения синоптических ситуаций, способствующих развитию мультиопасных

гидрометеорологических явлений над акваториями Азовского и Каспийского морей практически в одни и те же сроки с разбросом в пределах 10 дней. Для всех зим характерны мягкие либо умеренные условия по ледовым характеристикам. Чаще всего такие события отмечаются в 1950-е гг. и 2000-е гг. Три раза за более, чем пол века во всем южном макрорегионе наблюдалась штормовая ситуация одновременно в обоих морях. Все случаи приходятся на март, когда лед полностью отсутствовал или уже практически полностью растаял.

Комплексная оценка ансамблей опасных гидрометеорологических явлений в Азовском море и Северном Каспии

В рамках работы опасность предлагается рассматривать как сочетание частоты возникновения нежелательного события и его последствий, выраженных через степень неблагоприятности (опасности) события. Под событием в работе понимается явление, возникающее один раз в три часа. В качестве продолжительности в настоящей работе рассматривается период времени, когда один из феноменов достигает значений «неблагоприятного явления» на этапе развития и пока на этапе вырождения значения не станут ниже таковых отметок.

Для каждого события определен суммарный итоговый балл и балл в зависимости от частоты встречаемости. Для Азовского моря выделяется 15 сочетаний ОГЯ различной опасности и повторяемости, для Северного Каспия – 17 (таблица 1). Наиболее опасными с точки зрения опасности и частоты повторяемости для Азовского моря (итоговый балл опасности 3) являются: штормовое волнение 2.0-2.5 м в суровые зимы с ледовитостью 50%, в сочетании с нагоном в мягкие зимы, в сочетании со сгоном в умеренные зимы с ледовитостью 6-25%; штормовое волнение >2.5 м в умеренные зимы с ледовитостью 6-50% либо в сочетании со сгоном в мягкие безледные зимы или теплый период. Для Северного Каспия (итоговый балл опасности 4): штормовое волнение 2.0-2.5 м со сгоном в суровые зимы с ледовитостью 50% или с нагоном в умеренные зимы с ледовитостью 5-50%. Наименее опасными явлениями (итоговый балл опасности 1.5) для Азовского моря и Северного Каспия является штормовое волнение 2.0-2.5 м, распространяющееся в Таганрогский залив и Керченский пролив (в восточную часть Северного Каспия соответственно), в мягкие безледные зимы или теплый период (для Северного Каспия мягкие с ледовитостью до 25%).

Таблица 1. Балльная оценка сочетаний ОГЯ в Азовском море и Северном Каспии

Итоговый балл	Сочетания опасных гидрометеорологических явлений	
	Азовское море	Северный Каспий
1	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в мягкие безледные зимы или теплый период. Для Северного Каспия с ледовитостью до 25%	
1.5	Штормовое волнение 2.0-2.5 м, распространяющееся в Таганрогский залив и Керченский пролив / в восточную часть Северного Каспия, в мягкие безледные зимы или теплый период (для Северного Каспия с ледовитостью до 25%)	

Итоговый балл	Сочетания опасных гидрометеорологических явлений	
	Азовское море	Северный Каспий
2	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в умеренные зимы с ледовитостью 6-50%	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в умеренные зимы с ледовитостью 6-50%
	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в сочетании со сгоном в мягкие безледные зимы или теплый период	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в сочетании со сгоном в мягкие безледные зимы или теплый период
	Штормовое волнение > 2.5 м в мягкие безледные зимы или теплый период	Штормовое волнение > 2.5 м в мягкие безледные зимы или теплый период
	Нагоны в мягкие зимы с ледовитостью 6-25%	Нагоны в умеренные зимы с ледовитостью 6-50%
2.5	Штормовое волнение 2.0-2.5 м, распространяющееся в Таганрогский залив и Керченский пролив / в восточную часть Северного Каспия, в умеренные зимы с ледовитостью 6-25%	
		Штормовое волнение 2.0-2.5 м со сгоном, распространяющееся в восточную часть Северного Каспия, в мягкие безледные зимы
		Штормовое волнение > 2.5 м, распространяющееся в восточную часть Северного Каспия, в мягкие безледные зимы
3	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в суровые зимы с ледовитостью 50%	
	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в сочетании с нагоном в мягкие зимы. В Северном Каспии с ледовитостью 0-25%	
	Штормовое волнение 2.0-2.5 м в сочетании со сгоном в умеренные зимы с ледовитостью 6-25%	
	Штормовое волнение > 2.5 м в умеренные зимы с ледовитостью 6-50%	
	Штормовое волнение > 2.5 м в сочетании со сгоном в мягкие безледные зимы или теплый период	
3.5	Штормовое волнение > 2.5 м, распространяющееся в Таганрогский залив и Керченский пролив, в умеренные зимы с ледовитостью 6-25%	Штормовое волнение 2.0-2.5 м, распространяющееся в восточную часть Северного Каспия, в суровые зимы с ледовитостью 25-50%
4	Штормовое волнение > 2.5 м в суровые зимы с ледовитостью 50%	Штормовое волнение 2.0-2.5 м со сгоном в суровые зимы с ледовитостью 50%
	Штормовое волнение > 2.5 м в сочетании со сгоном в умеренные зимы с ледовитостью 50%	Штормовое волнение 2.0-2.5 м с нагоном в умеренные зимы с ледовитостью 5-50%
	Штормовое волнение > 2.5 м в сочетании с нагоном в мягкие безледные зимы или теплый период	
4.5		Штормовое волнение 2.0-2.5, распространяющееся в восточную часть Северного Каспия, с нагоном в умеренные зимы с ледовитостью 5-50%
5		Штормовое волнение 2.0-2.5 м с нагоном в суровые зимы с ледовитостью 25-50%
5.5		Штормовое волнение 2.0-2.5 м, распространяющееся в восточную часть Северного Каспия, с нагоном в суровые зимы с ледовитостью 25-50%

Примечание. Цветовые обозначения явлений в таблице соответствуют цветовым обозначениям из матриц балльных оценок: голубой – допустимый риск; желтый – нежелательный риск; красный – недопустимый риск

Связь мультиопасных гидрометеорологических явлений в каспийском и азовоморском регионах

Суммарно за 40 лет в обоих акваториях наблюдалось 130 случаев выделенных сочетаний ОГЯ. Если сравнивать моря, в основном эти случаи не имеют связи между собой. Отмечается явная разнонаправленная динамика как для сезонов в целом, так и для отдельных месяцев – при увеличении количества ОГЯ в одном регионе уменьшается количество таковых в другом. Из всех случаев, 13 – ОГЯ, возникающие последовательно в одной и другой акватории с разницей до 7 дней; 3 случая – одновременного наступления ОГЯ в обоих морях 01-05.12.2002 г., 23-24.03.2013 г., 30.11-01.12.2018 г., которые возникали в умеренные или мягкие по температурным и ледовым условиям зимы, волнение не достигало максимального развития, но сопровождалось сильными нагонами. До 2000 г. таких случаев не отмечено. Учитывая климатические изменения и сопровождающие их перестройки гидрологических режимов, автор считает возможным предположить, что в будущем одновременные ОГЯ в Азовском море и Северном Каспии будут возникать чаще.

Прямой связи между количеством случаев мульти-ОГЯ и суровостью зим не выявлено. Неблагоприятные и опасные нагоны в сочетании со штормовым волнением могут возникать как при наличии ледового покрова, так и без него. Исключение составляет установление припая на акватории. Настоящее исследование показало, что внутри сезона выделяется несколько декад, в которые происходит наибольшее количество мульти-ОГЯ. То есть явления из года в год возникают практически в одни и те же календарные сроки. К декадам с наибольшей повторяемостью явлений (суммарно более 20 случаев) относятся: вторая и третья декада ноября, вторая и третья декада января, последняя декада февраля и первая и вторая декада марта.

Климатический сдвиг в гидрометеорологическом режиме Азовского и Каспийского морей

Обобщение полученных в ходе исследования данных позволяет утверждать о наличии климатического сдвига в гидрометеорологическом режиме обоих морей, происходящем с начала 2000-х гг. и проявившемся в ряде значимых изменений (рисунок 11). Увеличение высоты значительных волн на фоне общего снижения количества и продолжительности штормов в Азовском море и увеличения количества и продолжительности в Каспийском. Существенное уменьшение в Азовском море (до 8 раз) суммарной продолжительности зимних мультиопасных явлений, что также может быть связано с изменением штормовых условий. При этом увеличивается количество штормовых нагонов и повторяемость мягкости зим. Из чего следует, что решающим фактором, определяющим характеристики мульти-ОГЯ в Азовском море, является штормовая активность, провоцируемая циклонической деятельностью и лишь отчасти это объясняется смещением сезона мульти-ОГЯ на теплое время года.

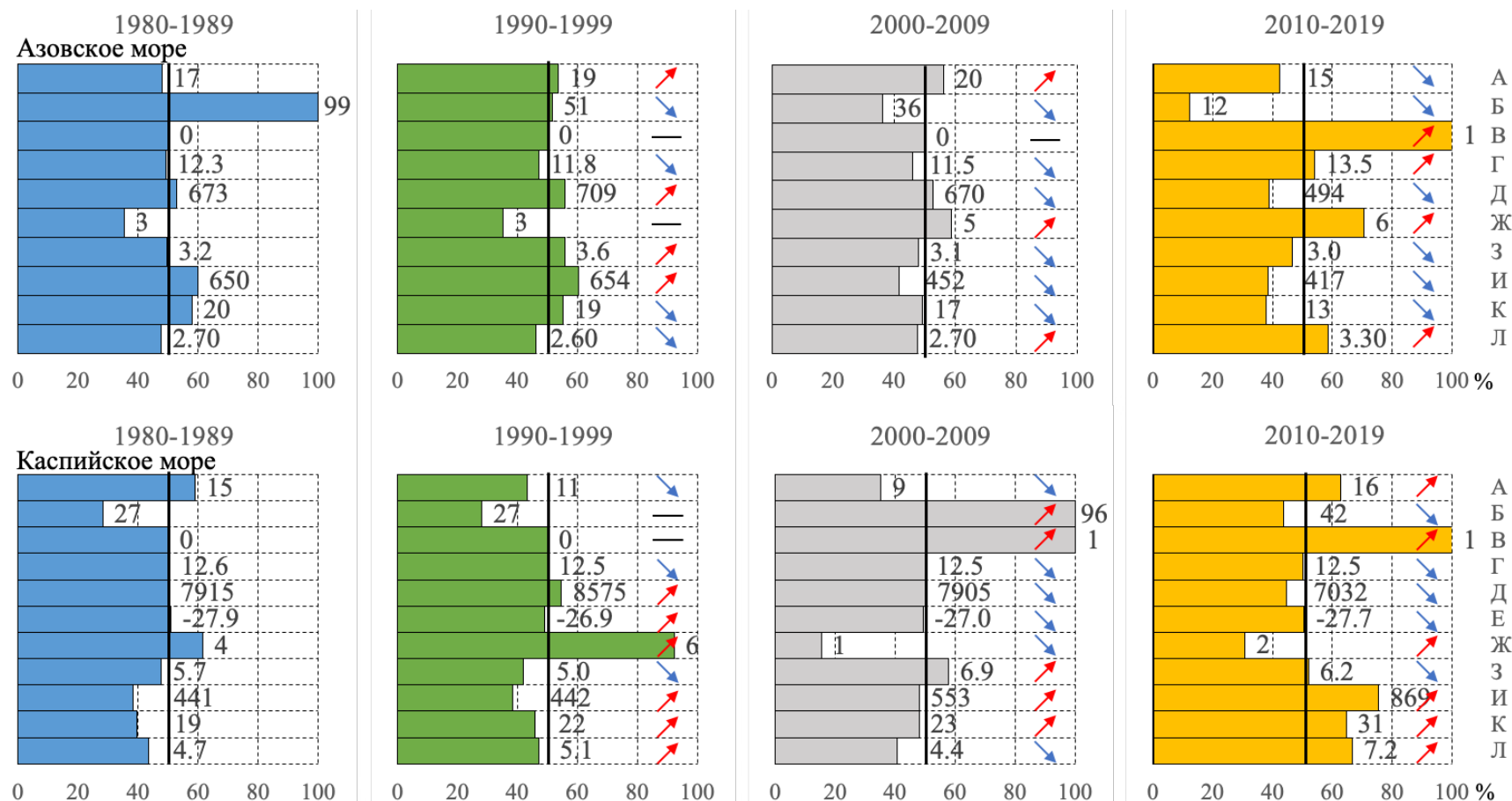


Рисунок 11 – Климатический сдвиг в гидрометеорологическом режиме Азовского и Каспийского морей

По оси Y: А – суммарное количество ансамблей ОГЯ за период в Азовском море и Северном Каспии;

Б – суммарная продолжительность зимних ОГЯ (ч); В – суровость зимних условий по температурным и ледовым характеристикам;

Г – средняя солёность (собственно море в Азовском море (по Бердников и др., 2022), средняя для моря – Каспийское море) (‰);

Д – среднегодовой расход р. Дон (ст. Раздорская) и р. Волги (Верхнее Лебяжье) (м³/с); Е – среднемноголетний уровень моря (Махачкала) (м);

Ж – количество экстремальных штормовых нагонов в дельтах р. Дон и р. Волги; З – среднемноголетняя скорость ветра (Таганрог и о. Тюлений) (м/с);

И – суммарная продолжительность штормов с высотой волны: Азовское море ≥ 2 м, Каспийское море ≥ 3 м (ч);

К – суммарное количество штормов с высотой волны: Азовское море ≥ 2 м, Каспийское море ≥ 3 м; Л – максимальная высота значительных волн(м).

По оси X: нормированные значения параметров. В подписях данных на графике приведены абсолютные значения параметров. Сплошной черной линией обозначены среднемноголетние значения («норма»). Стрелками – тенденция в междесятилетней динамике

Такие значимые для мелководного Азовского моря с развитой прибрежной инфраструктурой и хозяйственной деятельностью изменения происходят на фоне дефицита пресного стока, возрастающей солености и роста уровня. Характерным для моря является относительная стабильность режима в течение 1980-89 гг. и 1990-99 гг. С 2000 г. гидрологический режим моря претерпевает изменения. Можно сделать вывод, что в настоящее время гидрологический режим моря находится в промежуточном переходном состоянии из одного режима в другой.

Для Каспийского моря два десятилетия 1980-99 гг. после глобального климатического режимного сдвига можно обозначить как переходный период. Увеличение циклонической активности в регионе, которое привело к росту почти на 2 м максимальных высот волн и продолжительности штормового волнения на фоне уменьшения интенсивности штормовых нагонов и продолжительности зимних мульти-ОГЯ и увеличения суммарного количества мульти-ОГЯ, смещение штормового периода и сезона мульти-ОГЯ на теплое время года. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что в Каспийском море переходный период из одного состояния в другое уже произошел и дальнейшие изменения в гидрологическом режиме моря будут вызваны преимущественно межгодовыми колебаниями уровня моря. Наибольшее количество случаев мульти-ОГЯ характерно для пояса о. Тюлений – Форт-Шевченко. При штормовых условиях скорость ветра может достигает 20 м/с и более, а ледяной покров в Севером Каспии отсутствует или отмечается наличие небольшого количества плавающих льдин. Здесь же развиваются наибольшие по силе штормовые нагоны. Также, как и для Азовского моря, в Каспийском море не всегда максимальный уровень опасности при нагоне достигается после пика ветрового волнения.

Общим для обеих акваторий является снижение пресного стока (менее значительное в Каспии), увеличение повторяемости мягких зим, сокращение продолжительности ледового сезона, а сроки образования и разрушения льда сдвинулись на более поздние и более ранние соответственно.

Глава 6. Оценка уязвимости приморских геосистем и научные основы оптимизации оценки воздействия ансамблей опасных гидрометеорологических явлений на побережье Азовского моря и Северного Каспия

В главе рассматриваются результаты количественной оценки изменения интенсивности штормовых нагонов в Азовском море и Северном Каспии при изменении уровня моря в условиях антропогенного освоения и климатических изменений по заданным сценариям; описана предложенная иерархическая схема опасных гидрометеорологических явлений, характерных для Азовского моря и Северного Каспия и их побережий, их сочетаний (мультиопасные гидрометеорологические явления) и геоэкологических последствий; представлены результаты районирования побережий и акватории морей по степени геоэкологической опасности.

Количественные оценки изменения интенсивности штормов в Азовском море и Северном Каспии при изменении уровня моря в условиях антропогенного освоения и климатических изменений

Влияние изменения уровня в глубоководной части морей и на мелководьях различно. На устьевых взморьях и в придельтовых областях различия в значениях волнения и уровня определяются главным образом продолжительностью и характером ветрового воздействия. Различия в значениях штормового волнения при изменении относительного уровня моря для типа 2 «сгон и шторм» и 3 «продолжительный шторм» на мелководьях наблюдаются уже от 0.1 м. Максимумы волнения даже при минимальном уровне во всех случаях превышают средние значения каждого случая, что, по-видимому, связано с длительным однонаправленным действием ветров эффективных направлений. В глубоководных областях, в центре Азовского моря и на границе Северного и Среднего Каспия, влияние изменения уровня практически не проявляется, незначительно (на 10% от реальных значений на пиках) – при понижении уровня моря на 4 м. Уровень нагона при понижении уровня моря для всех типов выступает компенсационным фактором в соотношении 1:1. Зоны затопления также зависят от продолжительности ветрового воздействия. При значительном уменьшении уровня моря и отступании береговой линии в придельтовых областях даже при сильных нагонах уровень затопления для населенных пунктов не достигает опасных отметок. Эксперименты, выполненные в ходе работ, показали, что для штормовых нагонов при антропогенном изменении части островов штормовой нагон естественным образом проникает дальше вглубь дельты, увеличивая уровень затопления.

Воздействие ансамблей опасных гидрометеорологических явлений в регионе на хозяйственную деятельность

Для объективного анализа воздействия на основе балльной оценки предложена иерархическая схема опасных гидрометеорологических явлений, характерных для Азовского моря и Северного Каспия и их побережий, их сочетаний (мультиопасные гидрометеорологические явления) и геоэкологических последствий. Возникающие в Азовском море и Северном Каспии ОГЯ предлагается разделить на явления I и II уровня, и мульти-ОГЯ. В результате воздействия ОГЯ и их сочетаний для прибрежных районов исследуемых акваторий выделено три группы проблем – экономические, социальные и геоэкологические; десять групп объектов, подверженных ОГЯ; 27 групп последствий. Возникающие последствия из разных групп проблем взаимосвязаны между собой и также могут проявляться последовательно или усугублять друг друга независимо от того возникает единичное ОГЯ или его сочетание.

Районирование побережий и акваторий Азовского моря и Северного Каспия по степени геоэкологической опасности

Для пространственной оценки степени геоэкологической опасности ОГЯ и определения уязвимости прибрежных геосистем от их возникновения выполнено комплексное районирование побережий и акваторий Азовского

моря и Северного Каспия по величине риска ансамблей ОГЯ, объединившее результаты балльной оценки ОГЯ, районирований по: максимальному штормовому волнению, степени динамической нагрузки от штормового волнения, по вероятности встречи припая и ледяных торосистых образований. При районировании побережья припай оценивался как фактор, препятствующий разрушению берега, поэтому низкая вероятность появления припая у берега оценивалась максимальным баллом, высокая вероятность – минимальным. Результат районирования может стать основой для регионального экологического и экономического планирования.

Описание районов дополнено опубликованными сведениями о геоморфологии берегов морей и скоростями абразии из литературных источников (Матишов, Голубева, 2008; Артюхин и др., 2006; Архипова и др., 2011; Бердников и др., 2022; Беспалова, Ивлиева, Цыганкова, 2024; Леонтьев, Маев, Рычагов, 1977; Лукьянова, 1979), результаты которых основаны на многолетних натурных наблюдениях. В качестве идентификации границ при районировании побережья приняты населенные пункты или географические объекты (для Северного Каспия).

В результате проведенного комплексного районирования Азовского моря и Северного Каспия по величине риска ансамблей ОГЯ получены значения интегрального балла и показателя геоэкологической опасности по выделенным районам.

В пределах береговой зоны Азовского моря выделено 20 районов (рисунок 12А, таблица 2). Интегральный балл геоэкологической опасности варьируется от 3 до 10 баллов. В пределах береговой зоны Северного Каспия выделено 9 районов (рисунок 12Б, таблица 3). Интегральный балл геоэкологической опасности варьируется от 5 до 10 баллов.

Районирование побережья и акватории Азовского моря по степени геоэкологической опасности

Главным отличием побережья Азовского моря от побережья Северного Каспия является большое количество населенных пунктов, включая крупные промышленные города, разветвленная сеть автомобильных и железных дорог. Практически все побережье Азовского моря относится к ООПТ различного уровня, здесь расположены зоны рекреации и туризма.

Район Таганрогского залива от Мариуполя до Ейска, включая дельту Дона (районы 1, 2, 20). Характеризуется средним интегральным показателем геоэкологической опасности. Берега Таганрогского залива, за исключением кос и приустьевых областей мелких рек, являются обрывистыми и прямолинейными. Высота обрывов изменяется от 1.5-2 до 20-35 м. Полоса пляжей узкая шириной 5-10 м, редко – до 20 м. Типы берегов в Таганрогском заливе абразионно-обвальные, абразионно-оползневые и аккумулятивные. Средняя скорость абразии для района 20 (северный берег Таганрогского залива) составляет 0.1-0.5 м/год, максимальная – 2 м/год (с. Весело-Вознесенка). Средняя скорость абразии для района 2 (южный берег Таганрогского залива) составляет 0.3-0.6 м/год, максимальная – 0.5 м/год (х. Павло-Очаково). Район 1 (дельта р. Дон) является аккумулятивной формой,

перерезанной русловыми водотоками. Несмотря на то, что высоты волн здесь уже не достигают критических значений, динамическая нагрузка минимальна, а в зимние месяцы часто наблюдается устойчивый припай (самая высокая вероятность образования припая для всего моря), здесь ярко проявляются нагонные явления, что является ключевым фактором в формировании рельефа побережья в этом районе. Динамическая нагрузка на берег составляет до $2 \text{ т}^*\text{с}/\text{м}^2$. В дельте Дона расположена особо охраняемая природная территория регионального значения «Природный парк Донской». В устьевой области Дона расположены крупные порты и рыбохозяйственные предприятия, здесь ведется добыча полезных ископаемых. Таганрог и Мариуполь являются крупными портами Таганрогского залива. В акватории Таганрогского залива осуществляется активная судоходная деятельность, прерываемая в особо суровые зимы (например, 2011/12 гг.) или во время штормовой активности (например, сентябрь 2014 г.).

Район от Ейска до Должанской, включая косу Долгую (район 3). Характеризуется высоким интегральным показателем геоэкологической опасности с интегральным баллом 7. Берега являются преимущественно абразионными, побережья косы Долгой и Ейской косы – аккумулятивные формы. Скорость абразии составляет от 0.4 до 1.7 м/год. Ключевыми факторами опасности здесь являются нагонные и штормовые явления. Динамическая нагрузка на берег составляет в среднем $6 \text{ т}^*\text{с}/\text{м}^2$, максимум – $11 \text{ т}^*\text{с}/\text{м}^2$. Коса Долгая является ООПТ регионального значения. Ейск и Должанская – зона рекреации и туризма в теплое время года.

Район от Должанской до Ачуево (районы 4, 5) – низкий интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл 3). Для прибрежного района характерны минимальные значения степени геоэкологической опасности для всех рассматриваемых показателей, в южной части района опасные ледовые явления не наблюдаются вообще. Район 4 (от косы Долгой до Приморско-Ахтарска) характеризуется абразионным берегом, перемежающимся с отмершим береговым обрывом. Северное побережье Бейсугского лимана – аккумулятивный берег. Для района 4 характерны большие скорости абразии – до нескольких метров в год. В районе 5 (от Приморско-Ахтарска до Ачуево) берега преимущественно аллювиально-морские, лишь в районе Приморско-Ахтарска – абразионные. Максимальные скорости абразии составляют от 2.5 м/год в районе Приморско-Ахтарска до 4 м/год (западный берег Должанской косы) и 6.2 м/год (участок Морозовский). В среднем – 3.7 м/год. Динамическая нагрузка на берег минимальна и составляет до $1 \text{ т}^*\text{с}/\text{м}^2$. В районе Ахтарского лимана ледяные торосистые образования не возникали с 2000 г.

Район от Ачуево до Темрюка, включая дельту р. Кубань (район 6). Средний интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл 5). Берег аллювиально-морской. Район представляет собой систему гирл и лиманов. Протяженность дельтовой равнины р. Кубань составляет 150 км, а морского края дельты – 34 км. Рельеф представлен сложным сочетанием береговых баров и приустьевых валов. Средняя скорость

размыва берега составляет 1-2 м/год, достигая 5-7 м/год. Динамическая нагрузка на берег – от 2 до 6 т*с/м². Здесь высока вероятность образования припая. В этом районе расположена особо охраняемая природная территория «Приазовский государственный природный заказник», крупный порт Темрюк.

Район от Темрюка до Ильича (район 7). Небольшой район, при этом показатели существенно отличаются от соседних районов. Интегральный показатель геоэкологической опасности – высокая степень опасности, интегральный балл – 8. Берег абразионный и абразионно-оползневой. Рельеф представляет собой плоские низменные равнины, разделяющие возвышенности. Наиболее пониженные участки заняты лиманами, отделенными от моря пересыпями. У основания оползней сформированы пляжи шириной 5-15 м. Максимальная скорость абразии составляет 0.025-0.6 м/год. Динамическая нагрузка на берег – от 10 т*с/м² и более. В прибрежной зоне возможно образование припая и опасных торосистых образований.

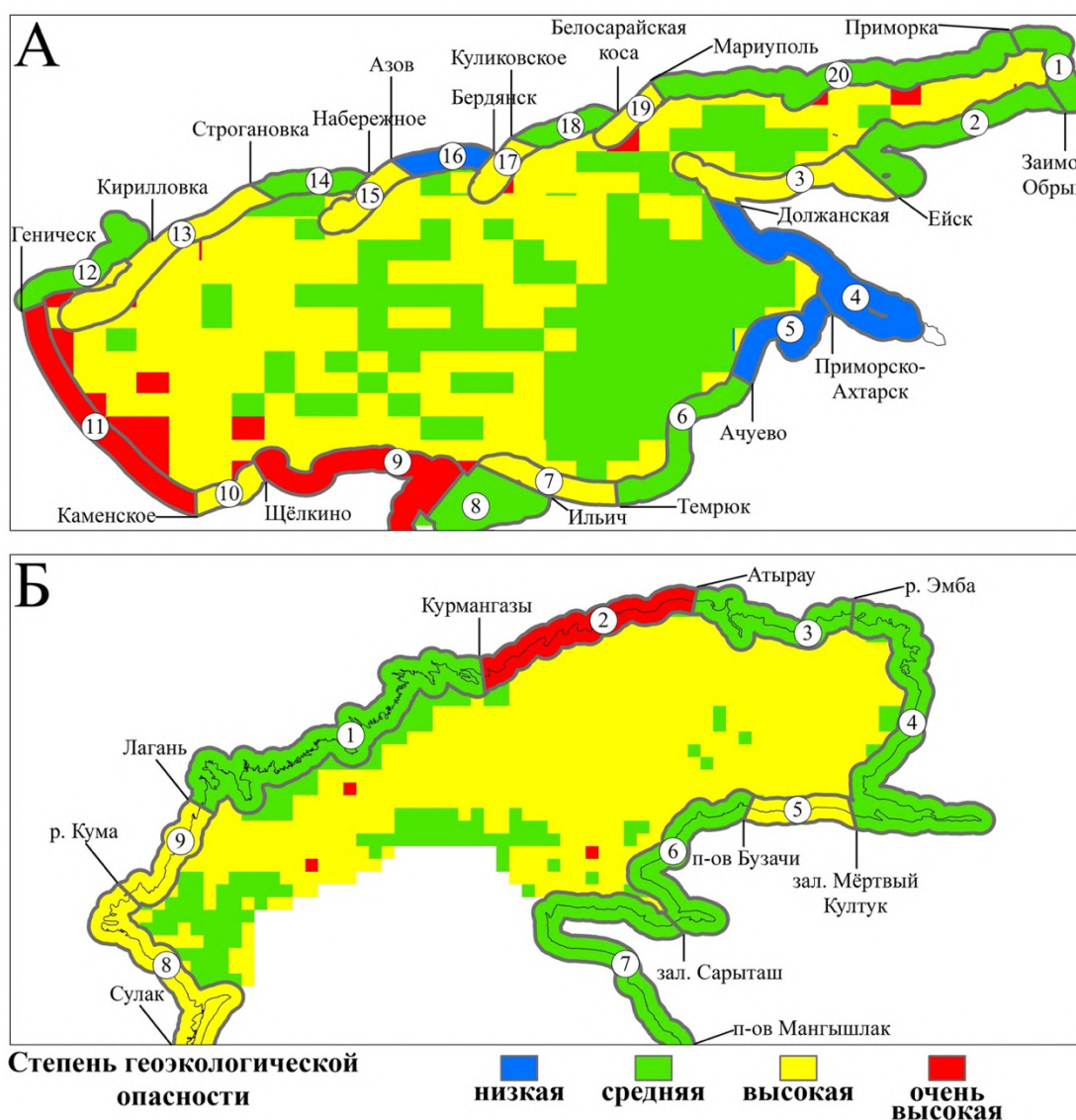


Рисунок 12 – Комплексное районирование побережья и акваторий Азовского моря (А) и Северного Каспия (Б) по степени геоэкологической опасности ансамблей ОГЯ

Район от Ильича до Весёловки (район 8). Восточное побережье Керченского пролива. Интегральный показатель геоэкологической опасности средний (6 баллов). Берег абразионно-оползневой с аккумулятивными формами (косы). Часто возникают штормовые явления. Лед и припай образуются в суровые и очень суровые зимы. Динамическая нагрузка колеблется в пределах от 4 до 6 т*с/м² в зависимости от конкретного участка берега. Район является рекреационной зоной, на побережье Таманского п-ова расположены грязевые вулканы и особо охраняемая природная территория федерального значения. Стратегически важный объект – Крымский мост.

Район от Заветного до Геническа (Керченский полуостров и коса Арабатская стрелка) (районы 9, 10, 11). Высокий и очень высокий интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл 8 для района 10, 9 и 10 для остальной территории). Тип берега абразионно-обвальный на юго-западе, абразионно-оползневой и оползневой на востоке и северо-востоке Керченского п-ова, аккумулятивный берег представлен на пересыпях и косах. Береговая линия сильно изрезана. Ширина пляжей сильно колеблется в зависимости от района от 15 м до 70 м. Наблюдения за абразией ведутся на отдельных участках. Максимальные скорости составляют для побережья Керченского пролива района 9 – до 1.5 м/год, Казантипского залива района 9 – до 1.9 м/год, района 10 – 0.3 м/год. Здесь часто возникают штормовые явления. Лед и припай возникают в суровые и очень суровые зимы, часто наблюдается возникновение ледяных торосистых образований, торосов и гряд торосов. Динамическая нагрузка на берег достигает на побережье Керченского пролива максимальных значений – более 11 т*с/м², на остальном участке – от 4 до 11 т*с/м². Именно такое сочетание – не ежегодное замерзание моря и высокая динамическая нагрузка – предопределили высокую геоэкологическую опасность. На побережье Керченского пролива расположен крупный порт – Керчь. В пределах районов 9-11 расположено большое количество природных парков и заказников федерального и регионального значения. Наиболее известные: на косе Арабатская стрелка – государственный природный заказник «Арабатский», на мысе Казантип – природный заказник федерального значения Казантипский морской заказник. Керченский полуостров, также, как и Таманский, являются зонами активного отдыха.

Все лиманы и заливы северного побережья Азовского моря (районы 12, 14, 16, 18) (Утлюкский лиман, Обиточный лиман, Бердянский залив, Белосарайский залив). Характеризуются низким и средним интегральным показателем опасности (интегральный балл 4, 5). Берег абразионный и абразионно-оползневой. В районе Обиточного и Бердянского заливов ледяные торосистые образования возникают очень редко. Динамическая нагрузка составляет от 3 до 6 т*с/м². Северное побережье моря является густонаселенным районом, имеется ряд ООПТ федерального и регионального значения.

Косы северного побережья Азовского моря (районы 13, 15, 17, 19) (коса Бирючий остров, Обиточная коса, Бердянская коса, Белосарайская коса) характеризуются высоким интегральным показателем опасности

(интегральный балл 7, 8). Эти аккумулятивные объекты являются чувствительными к любым гидродинамическим воздействиям, здесь расположено наибольшее количество объектов рекреации, а штормовые нагоны, навалы льда на берег и продолжительное стояние припая наиболее опасны для этих районов.

Районирование побережья и акватории Северного Каспия по степени геоэкологической опасности

Дельта р. Волги (район 1) характеризуется средним интегральным показателем геоэкологической опасности (интегральный балл – 5). Район отличается протяженностью территории, существенное влияние на гидрологический режим которой оказывают сгонно-нагонные явления, усугубляющиеся динамической нагрузкой от штормового волнения, в суровые зимы приустьевой участок дельты Волги покрыт льдом. Дельта Волги представляет собой аккумулятивную форму, перерезанную сетью дельтовых протоков и гирл. При понижении уровня Каспийского моря в дельте могут возникать эрозионные борозды с косами и островками. Так же вследствие динамики уровня моря возникают слабопроточные участки – култуки. Максимальная динамическая нагрузка достигает $5 \text{ т}^*\text{с}/\text{м}^2$. В открытой части моря высокая и очень высокая опасность возникновения торосов. Является крупным ООПТ – государственный природный биосферный заповедник и водно-болотное угодье международного значения. В дельте ведется активная наودохозяйственная деятельность. Здесь проходит судоходный Волго-Каспийский канал, соединяющий Каспийское море с портами Оля и Астрахань.

Район от Курмангазы до Атырау (район 2). Единственный район в Северном Каспии с очень высокой степенью геоэкологической опасности (интегральный балл геоэкологической опасности – 10), обусловленный очень высокой степенью динамической нагрузки и очень высокой степенью проявления опасных ледовых явлений как в прибрежной части, так и в открытом море. Берега в пределах района являются сильно отмелыми, осушными и неровными. На побережье практически отсутствуют населенные пункты и дороги.

Район от устья р. Урал до залива Мертвый Култук (районы 3, 4). Характеризуется средним интегральным показателем геоэкологической опасности (балл 5, 6). Прибрежные районы представляют собой плоскую равнину с практически нулевыми уклонами. Север района 4 – равнина древней р. Эмбы, разделенная руслами сухих протоков. Их современная связь с морем осуществляется только во время сильных нагонов. Абразия здесь практически отсутствует. Отличительной особенностью этого района является средняя и высокая степень проявления опасных ледовых явлений. Практически ежегодно образуется лед и припай. Динамическая нагрузка на берег здесь минимальна и составляет до $1 \text{ т}^*\text{с}/\text{м}^2$. Восточное побережье Северного Каспия. На побережье района отсутствуют крупные населенные пункты, проходят судоходные пути в Казахстан. В прибрежной зоне района 3 расположен Государственный природный резерват Акжайык.

Таблица 2. Описание сочетаний видов геоэкологической опасности, характерных для районов Азовского моря

№ района пп	Границы		Географический объект	Интегральный показатель геоэкологичес- кой опасности	Интегральный балл геоэкологичес- кой опасности	Степень динамического воздействия	Степень опасности припая	Степень проявления опасных ледовых явлений
	начальная точка	конечная точка						
20	Мариуполь	Приморка	Северное побережье Таганрогского залива	Средняя	6	Низкая	Низкая	Высокая
1	Приморка	Заимо-Обрыв	Дельта р. Дон	Средняя	6	Низкая	Низкая	Высокая
2	Заимо-Обрыв	Ейск	Южное побережье Таганрогского залива	Средняя	6	Средняя	Низкая	Средняя
3	Ейск	Должанская	Ейская коса Коса Долгая	Высокая	7	Очень высокая	Низкая	Низкая
4	Должанская	Приморско- Ахтарск	Ясенский залив, Бейсугский лиман	Низкая	3	Низкая	Низкая	Низкая
5	Приморско- Ахтарск	Ачуево	Лиман Ахтарский, лиманы	Низкая	3	Низкая	Средняя	нет
6	Ачуево	Темрюк	Дельта р. Кубань, Темрюкский залив	Средняя	5	Низкая	Высокая	Низкая
7	Темрюк	Ильич		Высокая	8	Очень высокая	Очень высокая	Низкая
8	Ильич	Весёловка	Таманский п-ов	Средняя	6	Средняя	Средняя	Средняя
9	Заветное	Щёлкино	Керченский п-ов	Очень высокая	10	Очень высокая	Очень высокая	Средняя
10	Щёлкино	Каменское	Арабатский залив	Высокая	8	Средняя	Очень высокая	Высокая
11	Каменское	Геническ	Арабатская стрелка, залив Сиваш	Очень высокая	9	Высокая	Средняя	Очень высокая
12	Геническ	Кирилловка	Утлюкский лиман	Средняя	5	Средняя	Низкая	Средняя
13	Кирилловка	Строгановка	Коса Бирючий остров, Молочный лиман	Высокая	7	Высокая	Средняя	Средняя
14	Строгановка	Набережное	Обиточный залив	Средняя	5	Средняя	Высокая	нет
15	Набережное	Азов	Обиточная коса	Высокая	7	Высокая	Средняя	Низкая
16	Азов	Бердянск	Бердянский залив	Низкая	4	Средняя	Средняя	нет

№ района пп	Границы		Географический объект	Интегральный показатель геоэкологичес- кой опасности	Интегральный балл геоэкологичес- кой опасности	Степень динамического воздействия	Степень опасности припая	Степень проявления опасных ледовых явлений
	начальная точка	конечная точка						
17	Бердянск	Куликовское	Бердянская коса	Высокая	8	Очень высокая	Средняя	Низкая
18	Куликовское	Белосарайская коса	Белосарайский залив	Средняя	5	Средняя	Средняя	Низкая
19	Белосарайская коса	Мариуполь	Белосарайская коса	Высокая	7	Высокая	Очень высокая	Средняя

Таблица 3. Описание сочетаний видов геоэкологической опасности, характерных для районов Северного Каспия

№ района по пп	Границы		Географический объект	Интегральный показатель геоэкологичес- кой опасности	Интегральный балл геоэкологичес- кой опасности	Степень динамического воздействия	Степень опасности и припая	Степень проявления опасных ледовых явлений
	начальная точка	конечная точка						
1	Лагань	Курмангазы	Дельта р. Волги	Средняя	5	Средняя	Средняя	нет
2	Курмангазы	Атырау		Очень высокая	10	Очень высокая	Низкая	Очень высокая
3	Атырау	Устье р. Эмба	От устья р. Урал до устья р. Эмба	Средняя	6	Средняя	Низкая	Высокая
4	Устье р. Эмба	зал. Мёртвый култук	Восточное побережье Северного Каспия, зал. Мёртвый култук	Средняя	5	Низкая	Средняя	Средняя
5	зал. Мёртвый култук	п-ов Бузачи		Высокая	8	Очень высокая	Низкая	Высокая
6	п-ов Бузачи	зал. Сарыташ	п-ов Бузачи	Средняя	5	Средняя	Низкая	Средняя
7	зал. Сарыташ	п-ов Мангышлак	п-ов Мангышлак	Средняя	6	Высокая	Высокая	нет
8	Сулак	Устье р. Кума	Кизлярский залив, Аграханский залив, о. Чечень	Высокая	8	Очень высокая	Очень высокая	нет
9	Устье р. Кума	Лагань		Высокая	8	Высокая	Низкая	Высокая

Примечание к таблицам 2 и 3. Пунктиром обозначены границы между районами, которые в результате комплексной оценки геоэкологической опасности предлагается объединить.

Район от залива Мертвый Култук до п-ова Бузачи (район 5). Характеризуется высоким интегральным показателем геоэкологической опасности (интегральный балл 8). Берега в пределах района являются сильно отмелыми, осушными и неровными. Практически ежегодно образуется лед и припай. Динамическая нагрузка максимальная и составляет 12 т*с/м^2 и более, степень проявления опасных ледовых явлений – высокая.

Район от п-ова Бузачи до п-ова Мангышлак включительно (районы 6, 7). Средний интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл 5, 6). Рельеф отличается сложным строением. В районе залива Сарыташ и Форта-Шевченко – это берега выровненные, с примкнувшей аккумулятивной террасой. Рельеф п-ова Тюб-Караган характеризуется абразионно-аккумулятивными формами перемежающимися с выровненными лагунными участками. Ледяной покров образуется в суровые зимы. В районе побережья Мангышлакского п-ова опасные ледовые явления отсутствуют, но могут наблюдаться в районе акватории, прилегающей к району. Динамическая нагрузка колеблется от средних ($3\text{--}5 \text{ т*с/м}^2$) до максимальных (12 т*с/м^2 и более) значений в зависимости от конфигурации побережья.

Район от Сулака до Лагани (районы 8, 9). Западное побережье Северного Каспия. Весь район характеризуется высоким интегральным показателем геоэкологической опасности (балл 8). В районе Аграханского п-ова (южная оконечность района 8) выровненные лагунные берега с развитой сетью протоков в междуречье Старого Терека и Терека. Основная часть района 8 относится к сильно отмелым, осушным, неровным берегам, подверженным абразионным процессам. Для района 9 характерны обширные отмелые аккумулятивные побережья. Очень высокая степень динамического воздействия ($\text{более } 12 \text{ т*с/м}^2$) и опасности припая в сочетании с абразионно-оползневой или аккумулятивным типом берега. На побережье и в акватории расположена сеть федеральных и региональных ООПТ. Наиболее значимые – Дагестанский государственный природный заповедник Кизлярский залив, Аграханский заказник. От р. Сулак на север в пределах Республики Дагестан – густонаселенный район, с развитой сетью автомобильных дорог и туристско-рекреационными зонами.

В **Заключении** представлены основные результаты, полученные в рамках исследования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, включенных в базы Scopus, Web of Science, перечень ВАК (по специальностям 1.6.21 Геоэкология, 1.6.17 Океанология)

1. **Yaitskaya N., Magaeva A., Misirov S.** Coastal Erosion of the Sea of Azov in 2000-2025: Dynamics and Hydrometeorological Factors // Water. 2026. Vol. 18. No 1. Pp. 58. DOI: 10.3390/w18010058 (Q1, УБС 1).

2. **Яицкая Н.А.** Районирование акваторий и берегов Азовского моря и Северного Каспия для оценки воздействия ансамблей опасных гидрометеорологических явлений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2025. № 4. С. 112–124. DOI: 10.18522/1026-2237-2025-4-112-124 (УБС 2). **(1.6.21 Геоэкология, 1.6.17 Океанология)**
3. **Яицкая Н.А.** Комплексная оценка ансамблей опасных гидрометеорологических явлений в Азовском море и Северном Каспии // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2026. Т. 11. №1(43). С. 84–90. DOI:10.25744/genb.2026.43.1.014 (УБС 3). **(1.6.21 Геоэкология)**
4. Misirov S., **Yaitskaya N.**, Kulygin V., Magaeva A., Berdnikov S., Besspalova L. Synergistic Forcing and Extreme Coastal Abrasion in the Sea of Azov: A Multi-Source Geospatial Assessment // Water. 2025. Vol. 17. No 24. Pp. 3518. DOI:10.3390/w17243518 (Q1, K1).
5. **Яицкая Н.А.**, Магаева А.А. Климатический сдвиг гидрометеорологического режима Азовского и Каспийского морей // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46. №1. С. 105–113. DOI: 10.15372/GIPR20250110 (Q3, УБС 2) **(1.6.21 Геоэкология)**
6. **Yaitskaya N.**, Magaeva A. Wind, Wave, and Ice Impacts on the Coastal Zone of the Sea of Azov // Water. 2025. Vol. 17. No 1. Pp. 36. DOI: 10.3390/w17010036 (Q1, УБС 1).
7. **Yaitskaya N.** The Wave Climate of the Sea of Azov // Water. 2022. Vol. 14. No 4. Pp. 555. DOI: 10.3390/w14040555 (Q1, УБС1).
8. **Yaitskaya N.A.**, Sheverdyayev I.V. Digital Elevation Model Development of the Volga and Don River's Delta and Application in Hydrological Modeling // Geography, Environment, Sustainability. 2022. Vol. 15. No 4. Pp. 181–187. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-035 (Q3, УБС 1).
9. Venevsky S., Berdnikov S., Sorokina V., Kulygin V., Kleshchenkov A., Sheverdyayev I., Arkhipova O., Dashkevich L., Gerasyuk V., Mesropyan K., Ukrainsky P., **Yaitskaya N.** Coastal Deltas of Big Rivers as Synergetic Transformation Elements of the Earth System – (An Example of the Don River Delta) // Advances in Science, Technology & Innovation. 2022. Pp. 79–81. DOI:10.1007/978-3-030-72543-3_18 (Q4).
10. **Яицкая Н.А.**, Магаева А.А. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: нормативно-правовые аспекты, терминология и классификация (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38. № 3. С. 256–275. DOI:10.22449/0233-7584-2022-3-256-275 (УБС 1). **(1.6.17 Океанология)**
11. **Яицкая Н.А.**, Магаева А.А. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: математическое моделирование, системы поддержки принятия решений, геоинформационные системы // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38. № 4. С. 372–388. DOI:10.22449/0233-7584-2022-4-372-388 (УБС 1). **(1.6.17 Океанология)**
12. **Яицкая Н.А.**, Шевердяев И.В., Магаева А.А., Бригида В.С. Реконструкция опасных нагонов в Северном Каспии на основе цифровых

моделей рельефа дна и гидрологического моделирования // Наука юга России. 2021. Т. 17. № 3. С. 18-29. DOI: 10.7868/S25000640210303 (УБС 1). **(1.6.17 Океанология)**

13. Ogorodov S.A., Magaeva A.A., Maznev S.V., **Yaitskaya N.A.**, Vernyayev S., Sigitov A., Kadranov Y. Ice Features of the Northern Caspian under Sea Level Fluctuations and Ice Coverage Variations // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 13. No 3. Pp. 129-138. DOI: 10.24057/2071-9388-2020-77 (Q3, УБС 1).

14. Яицкая Н.А., **Магаева А.А.** Ледовый режим Северного Каспия // Вестник МГУ. Серия География. 2020. № 6. С. 63-72 (Q3, УБС 1). **(1.6.17 Океанология, 1.6.21 Геоэкология)**

15. Лопатухин Л.И., **Яицкая Н.А.** Волновой климат Каспийского моря. Входные данные по ветру для гидродинамического моделирования и некоторые результаты расчетов // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 12-21. DOI: 10.31857/S0030-157459112-21 (Q3, УБС 1). **(1.6.17 Океанология)**

16. Лопатухин Л.И., **Яицкая Н.А.** Адаптация гидродинамических моделей для расчета режима волнения Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 54-61. DOI: 10.3103/S1068373918040052 (Q3, УБС 2). **(1.6.17 Океанология)**

17. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sheverdyaev I.V., Tretyakova I.A., **Yaitskaya N.A.** Ex-mare - Forecasting System of Natural Hazards in the Azov Sea Region // Geography, Environment, Sustainability. 2018. Vol. 11. No 2. Pp. 29-45. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-2-29-45 (Q3, УБС 1).

18. Матишов Д.Г., **Яицкая Н.А.**, Бердников С.В. Изменение температуры и солености вод Каспийского моря в XX веке // Океанология. 2018. Т. 58. № 6. С. 864–874. DOI: 10.1134/S0030157418060114 (Q3, УБС 1). **(1.6.17 Океанология)**

19. **Яицкая Н.А.** Ретроспективный анализ ветрового волнения в Каспийском море во второй половине XX – начале XXI вв. и связь с региональными проявлениями изменения климата // Географический вестник. 2017. №2(41). С. 57-70. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-57-70 (УБС 2). **(1.6.21 Геоэкология)**

20. **Яицкая Н.А.** Результаты ретроспективного анализа ветрового волнения в Азовском море (на примере зим 2015-2017 гг.) // Наука Юга России. 2017. Том 13. №4. С. 60-70. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-60-70 (УБС 1). **(1.6.17 Океанология)**

Прочие публикации, включенные в базы Scopus, Web of Science, перечень ВАК

21. Лопатухин Л.И., **Яицкая Н.А.** Данные ре-анализа полей ветра над Каспийским морем для расчета режима ветрового волнения // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. №6. С. 598-604. DOI: 10.31857/S0321-0596466598-604 (Q3, УБС 1).

22. **Яицкая Н.А.**, Магаева А.А. Межгодовая динамика ледового режима Азовского моря в XX-XXI вв. // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 373-386. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-373-386 (Q2, УБС 1).

23. Матишов Г.Г., **Яицкая Н.А.**, Бердников С.В. Особенности внутривекового режима солёности Каспийского моря // Доклады академии наук. 2012. Т. 444. № 5. С. 549-553. DOI: 10.1134/S1028334X12060141 (Q3, УБС1).

24. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Степаньян О.В., Курапов А.А., Архипова О.Е., Сорокина В.В., Цыганкова А.Е., Дашкевич Л.В., Поважный В.В., Бирюкова С.В., Кулыгин В.В., Сапрыгин В.В., **Яицкая Н.А.** Разработка инструментария для комплексной оценки воздействия на экосистему Северного Каспия при освоении морских нефтегазовых месторождений // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 1. С. 5-20 (УБС 4).

Монографии в соавторстве

25. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В., **Яицкая Н.А.** Природные катастрофы в Азово-Черноморском бассейне в начале XXI века. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. 160 с. ISBN 978-5-4358-0149-1.

26. Matishov, G.G., Berdnikov, S.V., Zhichkin, A.P., Dzhenyuk, S.L., Smolyar, I.V., Kulygin, V.V., **Yaitskaya, N.A.**, Povazhnyi, V.V., Sheverdyaev, I.V., Kumpan, S.V., Tret'yakova, I.A., Tsygankova, A.E., D'yakov, N.N., Fomin, V.V., Klochkov, D.N., Shatohin B. M., Plotnikov, V.V., Vakul'skaya, N.M., Luchin, V.A., Kruts, A.A. (2014). Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827-2013). Matishov, G.G., Sherman, K., Levitus, S. (Eds.), NOAA Atlas NESDIS 78, 131 pp. DOI: 10.7289/V5Q52MK5.

27. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В., **Яицкая Н.А.**, Поважный В.В., Шевердяев И.В., Кумпан С.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878-2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское моря. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. 256 с. ISBN: 978-5-4358-0080-7.

28. Матишов Г.Г., Авксентьев В.А., Афанасенко В.И., Горюшина Е.М., Кринко Е.Ф., Магаева А.А., Пащенко И.В., Семенов В.С., Семенова О.В., Суций С.Я., Хорошев О.А., Челпанова Д.Д., Чуклина Э.Ю., **Яицкая Н.А.** Опасные природные явления и социальные процессы в Причерноморье, Приазовье и Прикаспии: проблемы взаимозависимости и взаимной обусловленности. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2021. 520 с. ISBN 978-5-4358-0212-2.