

на правах рукописи



МАГАЕВА Анастасия Алексеевна

**ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ АЗОВСКОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ:
МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА И ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ**

1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в лаборатории информационных технологий и математического моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН).

Научный руководитель:

Яицкая Наталья Александровна

кандидат географических наук, заместитель директора по науке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

Афанасьев Виктор Викторович

доктор географических наук, заведующий лабораторией береговых геосистем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Островская Елена Васильевна

кандидат географических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения «Каспийский морской научно-исследовательский центр»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова", г.Москва

Защита диссертации состоится «17» марта 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.049.02 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института географии РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр.4 и на сайте института: <http://igras.ru/defences>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью) просим направлять по адресу 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр.4 ученому секретарю диссертационного совета 24.1.049.02 и по e-mail: d00204603@igras.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук



Е.А. Белоновская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Азовское и Каспийское моря – периодически замерзающие акватории, которые в силу географического положения имеют важное геополитическое, стратегическое и экономическое значение для нашей страны. Здесь широко развита морская транспортная сеть, в Северном Каспии производится разработка месторождений углеводородов, на побережье расположены туристско-рекреационные комплексы, в акватории морей ведется рыбный промысел, в Керченском проливе построен самый длинный в Европе автомобильный мост.

Морской лед является лимитирующим фактором антропогенной деятельности в акваториях и береговой зоне этих водоемов, от площади, сроков образования и разрушения льда зависит планирование морехозяйственной деятельности. Помимо этого, ледяной покров является одним из источников экологической опасности для прилегающих территорий – экстремальные ледовые явления крайне усложняют судоходство, нарушают работу гидротехнических сооружений, и могут являться причиной катастроф в портовых комплексах, районах добычи и транспортировки углеводородов, на мостовых переправах. Для обеспечения безопасного мореплавания в зимний период на акваториях морей организована ледовая проводка судов. По данным Министерства транспорта Российской Федерации, наибольшее число ледовых проводок осуществляется в азовском бассейне за счет возможности использования караванного метода.

Вследствие современных флуктуаций климата в азово-каспийском регионе наблюдается рост температуры воздуха в предзимний и зимний периоды, сокращение площади ледяного покрова и изменение сроков образования и разрушения льда, а также увеличение повторяемости опасных гидрометеорологических природных явлений в зимний период. В будущем это может привести к перестройке гидрологического режима и геоморфологических характеристик морей, нарушению биологического баланса и биоразнообразия. Такие изменения необходимо учитывать при морском пространственном планировании для устойчивого развития южного макрорегиона.

Все это определяет актуальность исследования многолетней динамики ледового режима и опасных ледовых явлений Азовского и Каспийского морей.

Степень разработанности темы.

Изучению ледового режима Азовского и Каспийского морей и его многолетней динамики уделяли внимание многие авторитетные ученые XX и XXI вв. (Бердников С.В., Бухарицин П.И., Валлер Ф.И., Веселова Л.Е., Гюль К.К., Думанская И.О., Дьяков Н.Н., Ивкина Н.И., Книпович Н.М., Кошечкин Б.И., Каракаш Е.С., Матишов Г.Г., Соловьев Д.В., Огородов С.А., Федоренко А.В.). Первые обобщающие работы, где собраны данные наблюдений и карты авиаразведок, были опубликованы во второй половине XX в. в виде «Атласа льдов Черного и Азовского морей» (1962) и «Атласа льдов Каспийского моря» (1961). Позднее, на основе накопленных архивов выпускались комплексные гидрометеорологические справочники (Гидрометеорологический..., 1962; Гидрометеорологические..., 1986; Гидрометеорология..., 1991), в которых дано подробное описание ледовых условий Азовского и Каспийского морей и факторов его определяющих. Эти работы до сих пор не потеряли своей значимости.

С начала XXI в. наступил качественно новый этап в наблюдениях за ледовыми условиями морей – стали широко доступны данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют проводить регулярный мониторинг состояния ледяного покрова. Результаты дешифрирования космоснимков в виде картосхем предоставляют ЕСИМО (Единая государственная система информации об обстановке в Мировом Океане) и НИЦ «Планета». Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт публикует региональные ледовые карты по отдельным морям, которые доступны в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду. Казахстанская компания «LLP ICEMAN.KZ» проводит мониторинг дрейфа льда и

ледяных торосистых образований на акватории Северного Каспия для обеспечения ледовой и гидрометеорологической поддержки морехозяйственной деятельности. Исследованию ледяного покрова Азовского и Каспийского морей на основе данных ДЗЗ посвящены работы (Кочгаев и др., 2003; Боровская, Лексикова, 2008; Дашкевич и др., 2016; Yaitskaya и др., 2014; Антонюк, 2014).

На сегодняшний день, накопленные и опубликованные (Атлас ..., 2014; Atlas..., 2014; Думанская, 2014, Атлас льдов..., 2015) данные позволяют выявить основные особенности ледового режима рассматриваемых акваторий. В целях гидрометеорологического обеспечения морской деятельности на Каспийском море разработан электронный «Атлас ледовых явлений и образований Северного Каспия и дельты Волги» (Болдырев, 2009; Бухарицин, 2012), выполнен анализ рисков при строительстве и эксплуатации нефтегазовых сооружений (Анисимов и др., 2015). Описание ледовых условий на основных судоходных трассах представлено в работах (Думанская, 2013, 2014; Глушков, 2018).

Однако остается не решенным ряд вопросов о межгодовой динамике ледового режима Азовского и Каспийского морей, интенсивности проявления и воздействия опасных ледовых явлений на компоненты природной среды, гидротехнические сооружения и морехозяйственную деятельность в условиях современного изменения климата и увеличения антропогенной нагрузки в регионе.

Цель работы – изучение пространственно-временной изменчивости параметров ледового режима и опасных ледовых явлений Азовского и Каспийского морей как факторов экологической опасности для морехозяйственной деятельности на основе многолетних архивов данных, аккумулированных в базу геоданных и геоинформационную систему.

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

1) Создать базу геоданных параметров ледового режима Азовского и Каспийского морей за период инструментальных наблюдений и геоинформационную систему (ГИС) для пространственного анализа и визуализации данных.

2) Выполнить пространственно-временной анализ и картирование основных параметров ледового режима и опасных ледовых явлений Азовского и Каспийского морей и факторов, их определяющих, в условиях многолетних климатических изменений.

3) Определить степень экологической опасности ледовых явлений на акваториях Азовского и Каспийского морей в современный период для морехозяйственной деятельности.

Объект исследования – Азовское и Каспийское моря.

Предмет исследования – многолетняя динамика ледового режима и опасные ледовые явления в условиях изменения климата как факторы экологической опасности для морехозяйственной деятельности.

Научная новизна результатов исследования:

- С применением современных технологий и программных средств создана вековая база геоданных и геоинформационная система характеристик ледового режима Азовского и Каспийского морей «Ледовый режим южных морей России», которая включает картографический (1370 картосхем) и численный материал (12126 значений) за период 1916-2022 гг., и инструментарий для анализа пространственно-временной информации.

- Разработан комплект ледовых карт для специализированного обеспечения безопасности морских операций в Азовском и Каспийском морях в ледовый период для современных климатических условий 2000-2020 гг.

- Впервые выполнен пространственный анализ опасных ледовых явлений Азовского и Каспийского морей, как фактора экологической опасности для

морехозяйственной деятельности, и районирование акваторий по степени проявления опасных ледовых явлений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты научного исследования расширяют теоретические представления о многолетней динамике ледовых условий Азовского и Каспийского морей в условиях климатических изменений. Сведения об опасных ледовых явлениях (в том числе картографический материал) на акваториях Азовского и Каспийского морей могут быть использованы для комплексной оценки воздействия опасных гидрометеорологических явлений (штормовое волнение, краткосрочные колебания уровня) на береговую зону исследуемых морей. Карты вероятности встречи льда и припая, построенные для современного периода 2000-2020 гг., и карты районирования акваторий по степени проявления опасных ледовых явлений имеют практическую значимость, так как могут быть использованы для морского пространственного планирования, обеспечения безопасности природопользования и эксплуатации морских и прибрежных гидротехнических сооружений.

Методология и методы исследования. Изучение ледового режима морей опирается на традиционные (математический, статистический, описательный, картографический) и современные (пространственно-временной анализ с помощью ГИС-технологий) методы анализа и обработки большого объема данных – исторических картосхем, ежегодных справочников о режимных характеристиках исследуемых морей, данных дистанционного зондирования Земли.

В работе использованы специализированные программные средства пространственно-временного анализа данных и графического представления результатов (ArcGIS, Microsoft Access, Microsoft Excel и др.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Выделены **пять типовых ледовых сезонов** с различными сроками образования и разрушения льда, гидрометеорологическими условиями в предзимний и зимний периоды, и **уровнем экологической опасности**, которые характерны для многолетней динамики ледового режима Азовского и Каспийского морей.

2. Установлено, что с начала XXI в. в Азовском и Каспийском морях произошел **режимный сдвиг ледового сезона**, фиксируемый по вековой базе геоданных, который выражен в сокращении площади ледяного покрова, продолжительности и изменении сроков ледового сезона на фоне роста гидрометеорологических характеристик в предзимний и зимний периоды.

3. Оценена повышенная **вероятность встречи льда и припая** в Азовском и Каспийском морях для **современного периода 2000-2020 гг.**, на основе специально разработанной геоинформационной системы «Ледовый режим южных морей России».

4. Определены **зоны с высокой и очень высокой степенью проявления опасных ледовых явлений** на акваториях Азовского и Каспийского морей, оказывающих негативное воздействие **на морехозяйственную деятельность**.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается 8 публикациями по теме диссертационного исследования в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science (в том числе 6 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК).

Исследования по теме диссертационной работы велись в рамках государственного задания ЮНЦ РАН и ряда научных проектов Российского фонда фундаментальных исследований:

- 16-35-00318 мол_а «Исследование влияния ветрового волнения и нагонных явлений на процессы образования и разрушения ледового покрова в Азовском море»;

- 17-05-41190 РГО_а Исследование кумулятивных опасных природных явлений в зимний период и их воздействие на береговую зону Каспийского моря;

- 18-05-80082 Опасные явления Закономерности формирования опасных береговых процессов в Азовском море и социально-экономические последствия их проявлений;

- 19-35-90131 Аспиранты Влияние гидрометеорологических условий в предзимний период на формирование и динамику ледового режима Азовского моря в многолетнем аспекте;

- 19-35-50086 мол_нр Ледяной покров Каспийского моря: формирование, динамика, воздействие на берега и дно;

- 20-15-50320 Экспансия Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: реанализ и прогноз.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на 9 российских и международных конференциях: IV International Conference GeoiD'2016 (Сухум, Абхазия, 2016), Международная научно-практическая конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований» (Санкт-Петербург, Россия, 2017), POLAR 2018 Open Science Conference (Давос, Швейцария, 2018), Молодежная научная конференция «Морские исследования и рациональное природопользование» (Севастополь, Россия, 2018), XIV ежегодная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Достижения и перспективы молодых ученых в интересах развития Юга России» (Ростов-на-Дону, Россия, 2018), Всероссийская научная конференция «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования» (Севастополь, Россия, 2019), Международная научная конференция «Опасные явления» (Ростов-на-Дону, Россия, 2020), XIII Всероссийская конференция «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» (п.Дюрсо, Россия, 2020), Международная конференция «Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions» - POAC 2021 (Москва, Россия, 2021).

Личный вклад автора. Постановка целей и задач исследования, разработка и создание базы геоданных и геоинформационной системы, работа с ней, обработка и картирование полученных данных, обобщение и интерпретация результатов были выполнены лично автором или при его непосредственном участии в ходе реализации ряда научных проектов Российского фонда фундаментальных исследований и государственного задания ЮНЦ РАН.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 1.6.21 Геоэкология по пунктам: 9. Динамика, механизмы, факторы и закономерности развития опасных природных, природно-техногенных и техногенных процессов, оценка их активности, опасности и риска проявления. Разработка методов и технологий оперативного обнаружения и прогноза возникновения катастрофических природно-техногенных процессов, последствия их проявления и превентивные мероприятия по их снижению, инженерная защита территорий, зданий и сооружений; 12. Оценка состояния водного режима территорий и геоэкологические последствия его изменения в связи с изменениями климатических параметров. Геоэкологический анализ влияния регулирования речного стока на водные, прибрежно-водные и наземные экосистемы и обоснование путей сохранения и восстановления водных и наземных экосистем; 16. Моделирование геоэкологических процессов и последствий хозяйственной деятельности для природных комплексов и их отдельных компонентов. Современные методы геоэкологического картирования, ГИС-технологии и информационные системы в геоэкологии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 162 страницах, включает 63 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 223 наименования.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность директору ЮНЦ РАН д.г.н. С.В. Бердникову и научному руководителю ЮНЦ РАН академику РАН Г.Г. Матишову за предоставленную возможность работать над диссертацией. Автор

искренне благодарен научному руководителю к.г.н. Н.А. Яицкой за помощь в постановке цели и задач исследования, критику работы, терпение, всестороннюю поддержку и помощь, оказанную на всех этапах работы. Считаю своим долгом выразить благодарность и признательность д.г.н. С.А. Огородову, к.г.н. И.В. Шевердяеву, С.А. Мисирову, к.г.н. С.В. Мазневу, В.Г. Лаврешину, Н.В. Лихтанской, которые помогали автору на различных этапах подготовки диссертации.

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 Обзор состояния изученности проблемы

В разделе 1.1 описана история изучения ледового режима Азовского и Каспийского морей, приводится обзор справочников, обобщающих монографий и атласов, а также электронных ресурсов и баз данных. В разделе 1.2 представлены современные подходы к исследованию опасных природных явлений (ОПЯ), подробно рассмотрены методы картографирования ОПЯ. Дан обзор работ, посвященных анализу природных опасностей, обусловленных ледяным покровом, и оценке рисков их проявлений для морской деятельности.

Глава 2 Материалы и методы

В главе приведено описание базы геоданных и геоинформационной системы «Ледовый режим южных морей России»; подробно рассмотрены источники данных и методы их обработки.

С целью хранения и систематизации разнородной и разновременной информации о ледяном покрове, пространственного анализа и визуализации данных создана ГИС «Ледовый режим южных морей России». Все первичные данные, полученные в ходе исследования, систематизированы в базе геоданных (БГД) – физическом хранилище географически распределенной информации, — которая является подсистемой ГИС и позволяет осуществлять обработку и анализ пространственных данных. База геоданных, включает следующие наборы данных: векторные данные (пространственные классы и наборы данных); растровые данные (наборы растров и каталоги растров); непространственные таблицы (первичные данные и результаты их анализа).

ГИС содержит следующую информацию о ледяном покрове: картографическая, представленная картосхемами ледовой обстановки в морях за период 1953-2022 гг. с обозначением положения кромки льда, форм плавучего льда, сплоченности льда в баллах, ледяных торосистых образований, всего 1370 картосхем; табличная (численная), представленная данными многолетних наблюдений (1916-2022 гг.) за характеристиками ледового режима на прибрежных гидрометеостанциях (ГМС; даты появления льда, даты окончательного очищения моря ото льда, число дней в ледовый период со льдом, даты образования устойчивого припая, даты окончательного разрушения припая, ширина припая, наибольшая измеренная толщина льда). Вся информация тематически сгруппирована в два ГИС-проекта по Азовскому и Каспийскому морям, которые дают возможность просмотра, анализа и визуализации пространственных данных.

Источники данных – историческая информация, доступная в библиотечных архивах на бумажных носителях, открытые электронные ресурсы и базы данных:

1. Справочное издание «Основные гидрометеорологические сведения о морях СССР»;
2. Ежегодное периодическое издание «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек»;
3. Климатический атлас Азовского моря (Атлас..., 2014);

4. Атласы льдов Черного и Азовского морей (Атлас..., 1962; Атлас..., 2015);
5. Атлас льдов Каспийского моря (Атлас..., 1961);
6. Единая система информации об остановке в Мировом океане (ЕСИМО);
7. Информационная система Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» (НИЦ «Планета»);
8. Мировой центр данных по морскому льду (<http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> – Архив региональных ледовых карт ААНИИ // Мировой центр данных по морскому льду);
9. Информационная система LLP ICEMAN.KZ;
10. Глобальный реанализ льда OSI-450 (1979-2015);
11. Результаты расчетов балансовой гидрологической модели Азовского моря (Бердников, 2004).
12. ВНИИ Гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (meteo.ru) (Булыгина и др.).

Накопленные первичные данные имеют различный формат – численный, векторный, растровый (преимущественно без картографической привязки), поэтому обработка данных проводилась в несколько этапов.

Работа с картографическим материалом выполнялась последовательно: именование картосхем; географическая привязка картосхем; оцифровка картосхем; перепроецирование и расчет площади льда; оцифровка ледяных торосистых образований (ЛТО).

Работа с численной информацией и статистический анализ данных наблюдений. В табличном виде были получены некоторые данные о площади ледяного покрова, а также сведения об основных ледовых фазах: сроки образования и разрушения льда, продолжительность ледового сезона. Вся информация переведена в цифровой формат, и прошла контроль качества на выбросы и корректность значений, затем экспортирована в базу геоданных. Рассчитаны среднемноголетние значения, максимумы, минимумы, среднеквадратические ошибки и отклонения, климатические нормы, аномалии для каждого параметра ледового режима исследуемых морей по годам и десятилетиям. Климатические нормы рассчитаны для периодов, рекомендуемых Всемирной метеорологической организацией – 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. Расчет аномалий производился путем нахождения разности между среднемноголетним значением и данными за определенный год/период наблюдений.

Типизация зим по степени суровости. Взаимосвязь ледового режима и температурных условий региона обуславливает необходимость проведения типизации зим по степени суровости, которая позволяет унифицировать и обобщить длительный ряд наблюдений, выявить тенденции внутривековых изменений температуры воздуха. Для вычисления критериев суровости был использован ряд наблюдений средних месячных значений температуры воздуха за зимний период (декабрь, январь, февраль, март) по трем метеопунктам: для Азовского моря – Таганрог, Геническ, Керчь; для северной части Каспийского моря – Астрахань, Атырау, Махачкала.

Период наблюдений составил 123 года, с 1892/93 гг. по 2019/20 гг. с некоторыми перерывами (периоды Гражданской и Великой Отечественной войн). Наибольшие отклонения от средней многолетней суммы температур за зимний период как в сторону максимальных, так и в сторону минимальных сумм температур делятся на три равные части, которые характеризуют мягкие, умеренные и суровые зимы. Рассчитанные таким образом критерии дают общее представление о степени суровости, так как значения на отдельных пунктах не всегда характеризуют температурный режим всего моря.

Типовые ледовые сезоны были выделены на основе количественных показателей основных ледовых фаз Азовского и Каспийского морей и их сочетаний путем определения среднемноголетних значений (норма), положительных и отрицательных

аномалий (отклонения от нормы). На основе полученных результатов выделено 5 **типовых ледовых сезонов** (рис.1).

Тип I. Все параметры фаз ледового режима находятся в пределах нормы (средне многолетних значений).

Тип II. Аномально большая продолжительность ледового сезона – раннее начало ледового сезона, большая продолжительность, позднее окончание.

Тип III. Сдвиг ледового сезона на ранние сроки – начало ледового сезона раньше средне многолетних значений, большая (в некоторых случаях в пределах нормы) продолжительность, окончание в пределах нормы.

Тип IV. Сдвиг ледового сезона на поздние сроки – начало в пределах нормы, большая продолжительность (в некоторых случаях в пределах нормы), окончание позже средне многолетних значений.

Тип V. Аномально малая продолжительность ледового сезона – позднее начало ледового сезона, небольшая продолжительность и раннее окончание.

Метод IPTA (Innovative Polygonal Trend Analysis) – сравнение статистических параметров данных многолетних наблюдений, разделенных на 2 временных ряда (Sen et al., 2019; Achite et al., 2021). Применен для анализа среднемесячных температур воздуха и воды холодного периода (октябрь-апрель) с целью выявления закономерностей гидрометеорологических условий для каждого типа ледового сезона. В работе в качестве 1 ряда используются среднемесячные температуры воздуха и воды для 1 типа ледового сезона, ледовые условия которого наиболее близки к средне многолетним, а в качестве 2го ряда – остальные типы, характеризующиеся положительными или отрицательными аномалиями (см. главу 4, рис. 4.13, 4.15). Определение уровней экологической опасности каждого типа ледового сезона выполнено путем экспертной оценки.

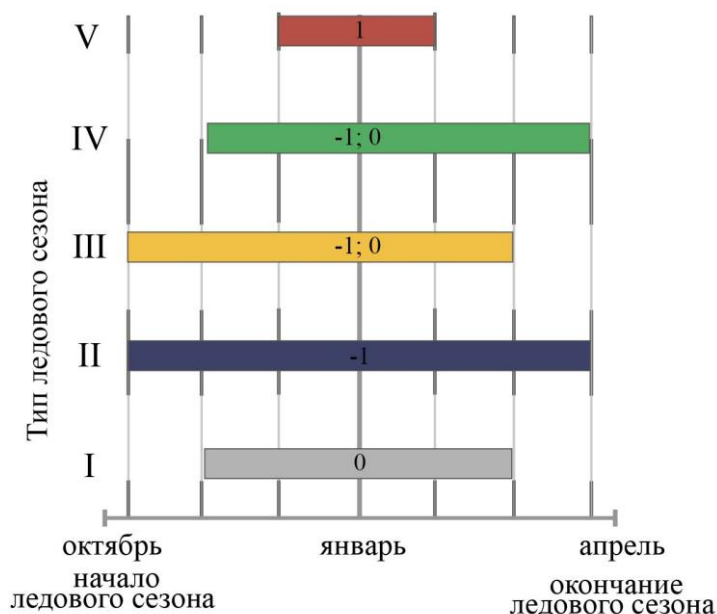


Рисунок 1 – Схематичное изображение типовых ледовых сезонов.

Цифрами внутри блоков обозначена продолжительность ледового сезона
«- 1» - отрицательная аномалия, «0» - в пределах средне многолетних значений,
«1» - положительная аномалия

Для создания карт вероятности встречи льда, припая и районирования по степени проявления опасных ледовых явлений акватории исследуемых морей разбиты на ячейки (полигоны), размером 10х10 км. Всего 442 ячейки для Азовского моря и 1371 ячейка для Северного Каспия. Для каждой ячейки был выполнен расчет вероятности наличия ледяного покрова и припая для каждого месяца (ноябрь-апрель) по формуле (1):

$$P_k = \frac{N_k}{n_k} * 100\% \quad (1)$$

где N_k – число встреч льда, припая, n_k – количество наблюдений в k -й ячейке.

На основе полученных данных построены карты вероятности формирования ледяного покрова для ноября-апреля и припая для декабря – марта (см. главу 4, рис. 4.16, 4.19, 4.22, 4.24).

На сегодняшний день отсутствует общепринятая методика прогнозирования и оценки риска проявления опасных природных явлений (ОПЯ). Более того, в нормативных документах Росморречфлота и Росгидромета не указано какие ледовые условия можно считать легкими, средними, тяжелыми (или опасными). Наиболее распространенными являются метод балльных или экспертных оценок, а также районирование территории по степени опасности, где выделены районы с одинаковой вероятностью развития какой-либо опасности.

На исследуемых акваториях в пространственно-временном масштабе наиболее распространены следующие опасные ледовые явления (ОЛЯ):

1) установление ледяного покрова, непроходимого судами и ледоколами, в период навигации на судовых трассах и в районе промысла, т.е. припай;

2) ледяные торосистые образования, как результат активного торошения льда, которые угрожают морским портовым, нефтепромысловым и береговым сооружениям.

Исходя из этого, для каждой ячейки акватории рассчитана вероятность встречи каждого ОЛЯ по формуле (1). Далее, полученные показания были ранжированы по формулам (2,3):

$$(P_{kmax}-P_{kavr})/3+P_{kavr} = X1 \quad (2)$$

$$(P_{kmin}-P_{kavr})/3+P_{kavr} = X2; \quad (3)$$

$V_{l;p} < X1$ – 1 балл низкая степень экологической опасности,

$X1 < V_{l;p} < X2$ – 2 балла средняя степень экологической опасности,

$V_{l;p} > X2$ – 3 балла высокая степень экологической опасности

где, min – минимальная вероятность возникновения ОЛЯ;

max – максимальная вероятность возникновения ОЛЯ;

avr – средняя вероятность возникновения ОЛЯ;

$X1, X2$ – пороговые значения для определения интегрального показателя экологической опасности, выраженного в баллах от 1 до 3;

V_l – степень экологической опасности ледяных торосистых образований;

V_p – степень экологической опасности припая;

Для составления комплексной карты районирования по степени проявления опасных ледовых явлений выполнено суммирование баллов. В результате комплексный показатель экологической опасности варьируется от 1 до 6 баллов:

1 балл – очень низкая степень экологической опасности,

2 балла – низкая,

3 балла – средняя,

4 балла – высокая,

5 баллов – очень высокая,

6 баллов – чрезвычайно высокая.

Глава 3 Физико-географическое описание

В главе представлено три раздела. В первом разделе даны общие сведения и геоморфологическое описание Азовского и Каспийского морей. Во втором разделе рассмотрены климатические особенности исследуемых акваторий. В третьем разделе на основе литературных источников, коллективных работ при участии автора и данных

натурных и экспедиционных наблюдений приведен анализ гидрометеорологических условий.

Температура воздуха характеризуется интенсивным потеплением с середины 70-х гг. по настоящее время. Для Азовского моря наибольший вклад в повышение годовых температур воздуха внес рост средних зимних и весенних температур. Для Каспийского моря за последние 30 лет средняя многолетняя температура воздуха стала выше на 1-2 °С, аномально увеличились температуры в холодное время года, особенно в январе, феврале, марте и октябре.

Среднегодовое количество осадков для азовского региона устойчиво растет с начала 1970-х гг. Однако, после 2010 г., наблюдается снижение среднегодового количества осадков. На Каспийском море количество осадков период 2003–2017 гг. уменьшилось примерно на 38 мм, что эквивалентно уменьшению уровня Каспия примерно на 4 см за этот период (Гинзбург, Костяной, 2018).

Ветровая активность в холодный период года характеризуется снижением средних и максимальных скоростей на ГМС Азовского моря (Таганрог, Геничск, Приморско-Ахтарск и Темрюк). Наблюдается увеличение повторяемости юго-восточных ветров и снижение повторяемости северо-восточных, для остальных румбов тенденции разнонаправленные. Для ГМС Каспийского моря (Астрахань, Махачкала и Дербент) также наблюдается снижение средних и максимальных скоростей ветра от 1970-х гг. к современному периоду. Исключение составил ГМС о. Тюлений, для которого в настоящее время наблюдается небольшой рост средних скоростей ветра для всех рассматриваемых месяцев и большинства румбов. Для всех рассматриваемых станций в современный период в повторяемости направлений ветра можно отметить рост доли юго-восточных ветров и снижение доли северных, для остальных румбов тенденции разнонаправленные.

Температура воды, ввиду мелководности исследуемых акваторий (средняя глубина составляет около 8 метров для обеих морей), характеризуется синхронной динамикой с температурой воздуха, что определяет интенсивность и величину осенне-зимнего охлаждения вод, а, следовательно, сроки и мощность ледообразования. В многолетней динамике температуры воды Азовского и Каспийского морей наблюдается тенденция роста с середины 1990-х годов. Положительные аномалии достигают 3.2°С на ГМС Таганрог и 3.3°С на ГМС Лагань (ноябрь 2010 г.). Сроки ледообразования при этом также характеризуются положительными аномалиями с середины 1990-х годов. Коэффициент корреляции температуры воды ноября и сроков ледообразования на ГМС Таганрог составляет 0.7; на ГМС Пешной– 0.6 (для периода 1938-1993 гг.).

В многолетней динамике выделяют периоды опреснения и осолонения вод исследуемых акваторий. В настоящее время Азовское море находится в очередном периоде осолонения – в 2019 году соленость Азовского моря возросла до 14‰ (среднемноголетнее значение – 11‰). Соленость вод Северного Каспия в период 1996-2015 гг. возросла в среднем на 2 ‰ вследствие снижения объемов речного стока.

Уровень Азовского моря по разным оценкам растет со скоростью от 1.7 до 2.6 мм/год. Для Таганрогского залива Азовского моря свойственны кратковременные колебания уровня в пределах 0.8-1.0 м, вследствие продолжительного действия западных и юго-западных ветров. В зимний период возможно увеличение уровня в пределах 1.0-2.0 м, площадь ледяного покрова при этом не превышает 20%. Увеличение уровня до 2,0 м как правило происходит при отсутствии ледяного покрова.

Уровень Каспийского моря с начала проведения инструментальных наблюдений и до XX в. колебался в среднем около отметки минус 25.8 м. С конца XIX в. в многолетнем ходе наблюдалась тенденция понижения, продлившаяся до 1977 г., когда уровень моря находился на самой низкой отметке – минус 29.0 м.

Положение уровня моря играет одну из ключевых ролей в локализации ледяных торосистых образований (ЛТО) Северного Каспия. В ходе исследования, выполненного

автором совместно с коллегами из НИЛ Геоэкологии Севера Географического факультета МГУ, проанализированы ЛТО для периода 2013-2019 гг., который характеризуется повышением уровня моря $\approx$ на 1 м и сокращением ледовитости по сравнению с периодом 1973-1980 гг. В результате, установлено, что локализация ЛТО в равной степени объясняется динамикой положения уровня моря и ледовитостью.

Глава 4 Ледовый режим: многолетняя динамика и фактор экологической опасности

В главе рассмотрены основные параметры ледового режима и их динамика в многолетнем аспекте: сроки образования и разрушения льда, продолжительность ледового сезона, площадь ледяного покрова (или ледовитость), и припая. Выделено пять типовых ледовых сезонов, каждый из которых характеризуется различными сроками образования и разрушения льда, гидрометеорологическими условиями в предзимний и зимний периоды, и различными уровнями экологической опасности. Представлено описание каждого типа ледового сезона и их количественные показатели.

Азовское и Каспийское моря относятся к периодически замерзающим водоемам. Ключевой фактор формирования ледового режима морей – динамика атмосферных процессов, определяющая температурные условия в регионе. Это обуславливает схожую в многолетнем аспекте продолжительность ледового сезона – с конца ноября по март. Ввиду мелководности и низкой солености акватории быстро реагируют на изменения температур – спустя несколько дней после установления отрицательных температур воздуха в прибрежных районах образуется ледяной покров. Дополнительное воздействие оказывает ветровая активность – северные ветра способствуют быстрому охлаждению поверхности моря, а устойчивые ветра восточного направления – взлому припая, образованию торосов, стамух и наслоений льда.

Типизация зим по степени суровости. В соответствии с полученными результатами с 1900 г. по 2020 г. в регионах Азовского и Каспийского морей в целом преобладают зимы умеренного типа (табл.1), но в междесятилетней динамике изменяется соотношение суровых, мягких и умеренных зим. Обработка и анализ более, чем векового ряда натурных наблюдений позволяют сделать вывод о том, что количество суровых зим уменьшается, и с 1960 г. они отмечаются раз в 15-20 лет (рис.2), при этом 2-3 сезона подряд повторяются умеренные и мягкие зимы.

Самой суровой зимой в исследуемом районе является зима 1953/1954 гг. Сумма среднемесячных температур воздуха для трех пунктов Северного Каспия (Астрахань, Атырау, Махачкала) составила минус 100.7°C (при абсолютном максимуме – минус 33°C 2 февраля 1954 г. в пункте Астрахань), для пунктов Азовского моря (Таганрог, Геническ, Керчь) – минус 84.3°C (при абсолютном максимуме – минус 29.5°C 2 февраля 1954 г. в пункте Таганрог). Самая теплая зима в исследуемом регионе – зима 2019/2020 гг. Сумма среднемесячных температур воздуха Азовского моря составила 48.7°C, для Северного Каспия – 31.4°C.

Таблица 1 Градации и количество зим различной суровости в Азовском и Каспийском морях

Тип	АЗОВСКОЕ МОРЕ			КАСПИЙСКОЕ МОРЕ		
	$\sum t_{\text{вздох.}}, ^\circ\text{C}$	Количество	%	$\sum t_{\text{вздох.}}, ^\circ\text{C}$	Количество	%
Суровая	≤ -31.3	14	12.4	≤ -51.6	16	13.8
Умеренная	от -31.3 до 12.9	66	58.4	от -51.6 до -7.5	73	63.0
Мягкая	≥ 12.9	33	29.2	≥ -7.5	27	23.2

Примечание: $\sum t, ^\circ\text{C}$ – сумма температур воздуха

В зависимости от суровости зимы варьируется площадь ледяного покрова – коэффициент корреляции сумм среднемесячных температур воздуха и ледовитости составляет -0.87 для Азовского моря и -0.72 для Северного Каспия. Ледовитость Азовского моря в суровые зимы в среднем составляет ~ 53%, в умеренные ~ 30%, в мягкие ~12% (см. главу 4, рис. 4.5-4.7). Ледовитость Северного Каспия в среднем для зим составляет: суровые ~ 75%, умеренные ~ 60%; мягкие ~ 46% (см. главу 4, рис. 4.7-4.10). Таким образом, изменение количества суровых зим, а значит изменение температурных условий, ведет к изменению ледовых характеристик исследуемых морей.

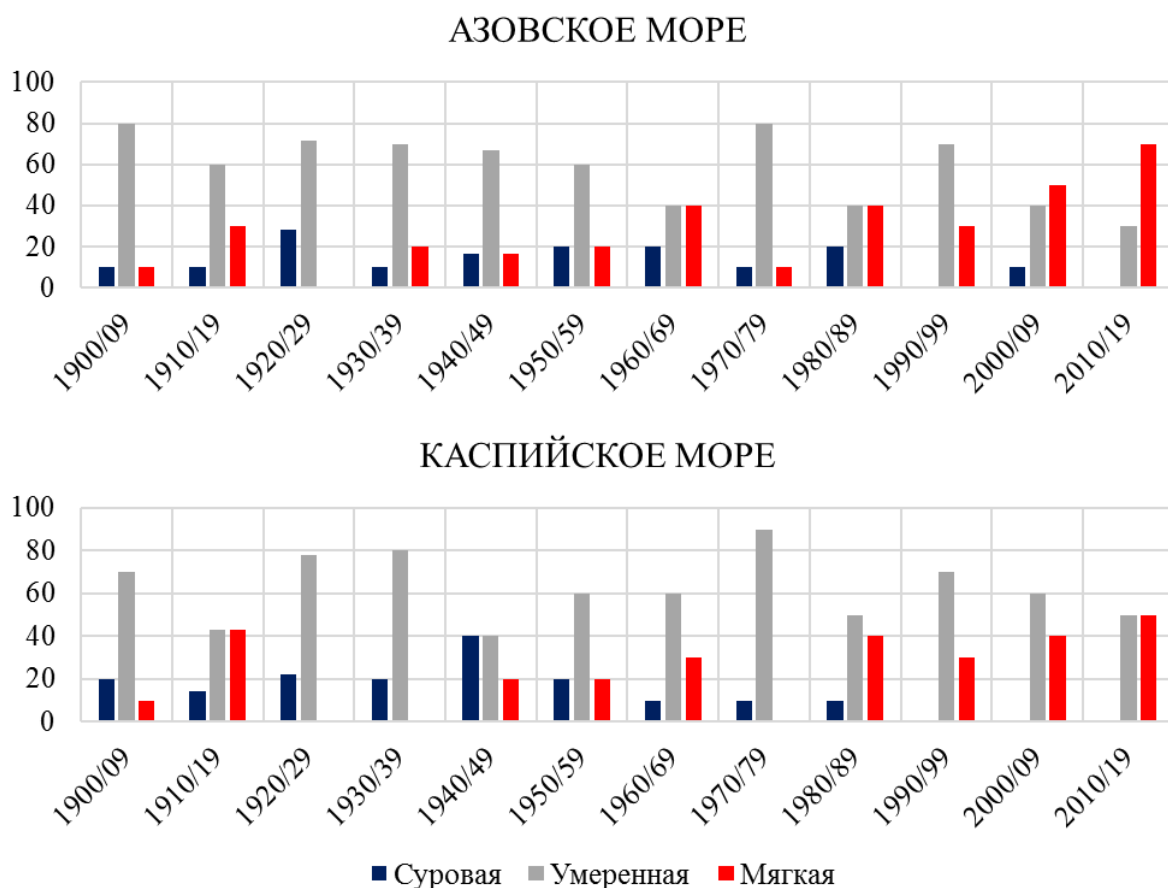


Рисунок 2 – Типизация зим по степени суровости с 1900 по 2019 гг.
ось Y – количество зим каждого типа, выраженное в %

Сроки образования и разрушения льда на Азовском и Каспийском морях проанализированы за период 1950-2020 гг. по данным наблюдений на прибрежных ГМС. Для обоих рассматриваемых акваторий установлено, что за более, чем полвека продолжительность ледового сезона сократилась на всех пунктах наблюдений. С начала 1980-х годов началось смещение сроков образования и разрушения льда с интенсивностью 5-7 дней за 10 лет вследствие увеличения повторяемости мягких по температурным условиям зим. В результате, в современный период 2000-2020 гг. увеличилась повторяемость V типа ледового сезона – от 40% (ГМС Таганрог) до 50% (ГМС Пешной) ледовых сезонов относится к этому типу, когда ранее – всего лишь 5-15%. Данный тип характеризуется образованием льда позже среднемноголетних значений на 7-15 дней (в зависимости от ГМС), и малой продолжительностью ледового сезона: 48-68 дней для Азовского моря и 40-90 дней для Северного Каспия (при среднемноголетних значениях 85-110 и 89-122 соответственно). Стоит отметить, что данный тип ледового сезона имеет наибольшую вероятность проявления в основных портах Азовского – Таганрог и Керчь, и Каспийского морей – Оля (табл.2). Однако

наибольшую экологическую опасность для портовых комплексов представляет II и III типовые ледовые сезоны, в течение которых вероятна приостановка морской навигации и рыбного промысла, повреждение портовой инфраструктуры и судов, обледенение малых судов.

Таблица 2 Характеристики типовых ледовых сезонов Азовского и Каспийского морей и их экологической опасности

Тип ледового сезона		II	III	IV	V
Общее описание ледового сезона		аномально большая продолжительность ледового сезона	сдвиг ледового сезона на ранние сроки	сдвиг ледового сезона на поздние сроки	аномально малая продолжительность ледового сезона
Характеристика ледовых условий		раннее ледообразование + продолжительность больше или равно 150 дней	раннее ледообразование + продолжительность больше или равно 130 дней	наличие льда в конце марта-начале апреля	продолжительность менее 90 дней
Гидрометеорологические условия		отрицательные аномалии температуры воздуха и воды в октябре-ноябре	отрицательные аномалии температуры воздуха и воды в течение всего холодного периода с октября по март	отрицательные аномалии температур в декабре и марте	положительные аномалии температуры воздуха и воды в октябре-ноябре и марте-апреле
Вероятность проявления, %	Порт Таганрог	9	11	12	18
	Порт Керчь	5	10	23	30
	Порт Оля	15	3	19	24
Уровень экологической опасности		высокий		средний	низкий
Вероятные последствия		приостановка морской навигации и рыбного промысла, повреждение портовой инфраструктуры и судов, обледенение малых судов		подъем уровня воды при позднем таянии льда, низкие температуры воды и негативное воздействие на биоту	временное ограничение морской навигации

Среднемноголетнее значение ледовитости Азовского моря составляет 27% (1950-2020 гг.), Северного Каспия (1940-2020) – 55%. Для анализа многолетних изменений рассчитаны аномалии ледовитости исследуемых морей относительно среднемноголетнего значения, построена интегральная кривая. Установлено устойчивое

сокращение площади льда на рассматриваемых акваториях с начала 1990-х гг. по настоящее время. В результате ледовитость сократилась на ~ 10% по отношению к среднемуголетнему значению 1950-2020 гг. В Азовском море увеличилась повторяемость малоледных зим (с отрицательной аномалией ледовитости). Установлено сокращение вероятности встречи льда в ноябре, декабре, марте и апреле для современного периода 2000-2020 гг. по сравнению с 1947-1958 гг.

Площадь припая проанализирована для современного периода 2000-2020 гг. Среднеголетняя площадь припая Азовского моря составляет 1800 км² (площадь моря – 39300 км²), Каспийского моря – 20500 км² (площадь северной части – 90080 км²). В последние годы на фоне роста суммы среднемесячных температур воздуха за зимний период площадь припая сокращается – на Азовском море площадь не превышает 400 км² за сезон, а в зиму 2019/2020 г. припай вовсе не наблюдался.

За период 1950-2020 гг. в многолетней динамике ледового режима Азовского и Каспийского морей и факторов, его определяющих (рис.3), выделены следующие закономерности:

Период 1950-1979 гг. 5 из 8 суровых (т.е. более 60%) зим, отмеченных для 1950 – 2020 гг., приходятся на этот период. Самая суровая зима для азово-каспийского региона отмечена в 1953/54 гг. – акватории Азовского моря и Северного Каспия были полностью покрыты припаем, толщиной 30-40 см и 60-65 см соответственно. В этот период ледовитость Азовского моря составила в среднем 32% (табл.3), положительные аномалии ледовитости достигают 20-25%. Ледовитость северной части Каспийского моря – 65%, положительные аномалии 15-30%. Наибольшую повторяемость имеют II и III типы ледовых сезонов, характеризующиеся ранним ледообразованием и продолжительным ледовым сезоном. Максимальная продолжительность ледового сезона отмечена в 1953/54 гг. на ГМС Таганрог – 166 дней, в 1949/50 гг. на ГМС Пешной – 179 дней.

Таблица 3 Сравнительные характеристики параметров ледового режима Азовского и Каспийского морей

Параметр/Период	АЗОВСКОЕ МОРЕ			КАСПИЙСКОЕ МОРЕ		
	1950-2020	1950-1979	1991-2020	1950-2020	1950-1979	1991-2020
$\sum t_{\text{вздх. декабрь-март, } ^\circ\text{C}}$	2.5	– 4.9	11.1	– 19.7	– 30.9	– 10.2
Т воды в ноябре, $^\circ\text{C}$	4.1	3.9	4.4	7.2	6.7	7.8
Ледовитость, %	27	32	21	55	65	46
Продолжительность ледового сезона, дни	110	124	96	121	130	110

Период 1980-1990 гг. С этого периода начинается увеличение повторяемости мягких по температурным условиям зим. В динамике ледовитости наблюдается переход от роста к снижению. На фоне роста суммы зимних среднемесячных температур воздуха началось смещение сроков образования и разрушения льда в сторону более поздних и ранних дат соответственно.

Период 1991-2020 гг. Увеличивается повторяемость мягких зим. В этот период на Северном Каспии суровые зимы не наблюдались, на Азовском море – единожды в сезон 2002/2003. Минимальные температуры воздуха зимой наблюдаются непродолжительный период в середине января. С начала 1990-х годов началось устойчивое сокращение ледовитости – отрицательные аномалии превышают положительные и достигают 20-25%. Площадь припая также сокращается, а в последние годы даже не наблюдается на Азовском море. С начала 2000-х годов увеличилась повторяемость V типа ледового сезона – от 40% (ГМС Таганрог) до 50% (ГМС Пешной)

ледовых сезонов относится к этому типу, когда ранее – всего лишь 5-15%. При этом продолжительность ледового сезона составляет 68 дней на ГМС Таганрог и 95 дней на ГМС Пешной.

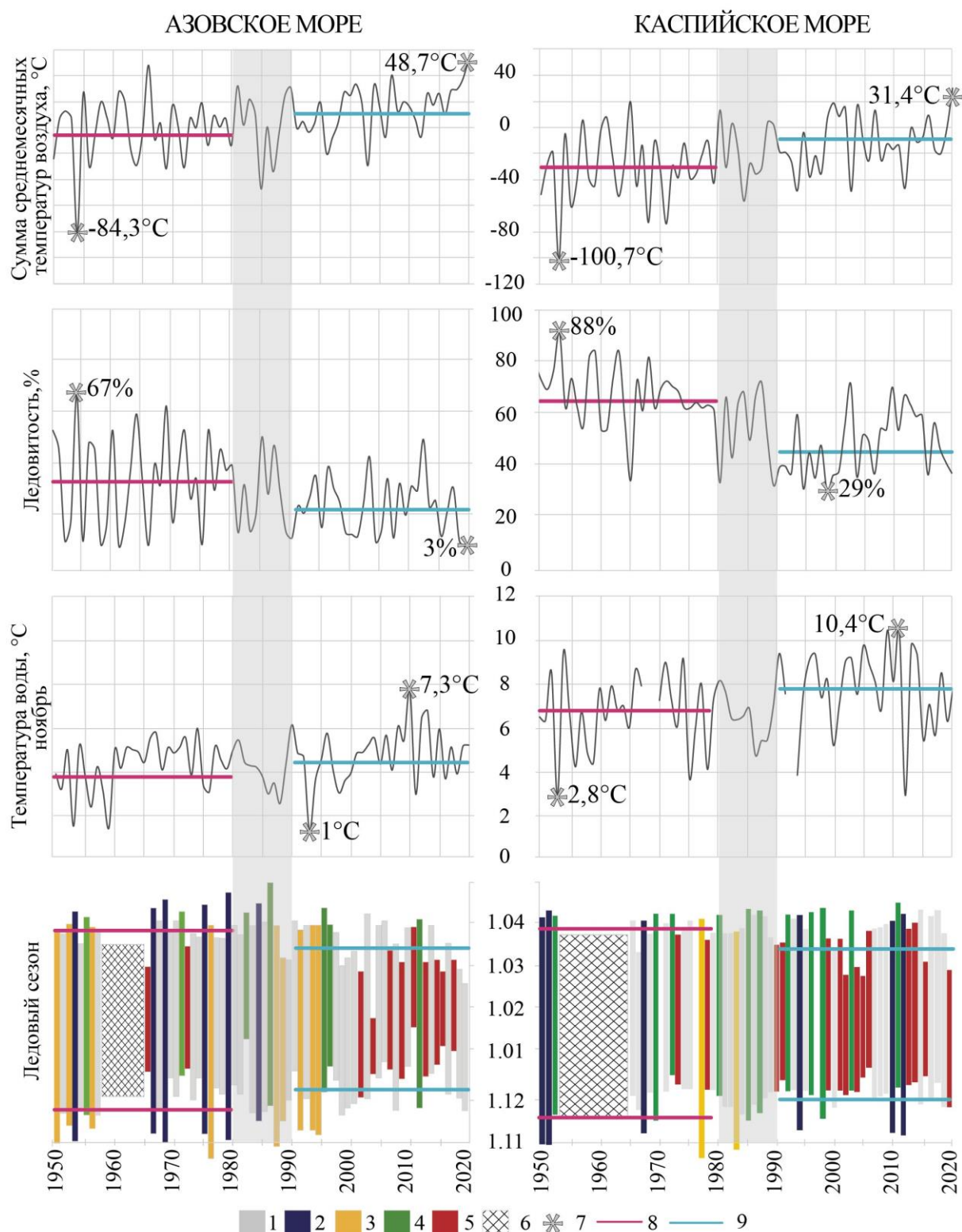


Рисунок 3 – Гидрометеорологические и ледовые параметры Азовского и Каспийского морей

1-5 – типы ледовых сезонов, 6 – нет данных,
7 – максимальные и минимальные значения,
8 – среднееголетние значения для периода 1950-1979,
9 – среднееголетние значения для периода 1991-2020 гг.

Таким образом, для Азовского и Каспийского морей выделены **пять типовых ледовых сезонов**, каждый из которых характеризуется различными сроками образования и разрушения льда, гидрометеорологическими условиями в предзимний и зимний периоды, **и уровнем экологической опасности**; определены закономерности проявления во внутривековой динамике. Установлен **режимный сдвиг ледового сезона, произошедший после 1991 г.**, который выражен в сокращении площади ледяного покрова, продолжительности и изменении сроков ледового сезона на фоне роста гидрометеорологических характеристик (температуры воздуха и воды) в предзимний и зимний периоды. Стоит отметить, что аналогичные закономерности получены для Охотского, Баренцева и Каспийского (на основе оценки изменения толщины льда) морей.

Глава 5 Опасные ледовые явления и морехозяйственная деятельность

Для эффективного морского пространственного планирования, обеспечения безопасности природопользования и эксплуатации морских и прибрежных гидротехнических сооружений необходимы знания о проявлениях опасных природных явлений. Говоря об ОПЯ, причиной которых является морской лёд, традиционно рассматривают арктические и субарктические регионы, где риски, связанные с деятельностью человека и ледовыми процессами, являются наибольшими. Применительно к Азовскому и Каспийскому морям к опасным явлениям, связанным со льдом, можно отнести как аномально большую площадь ледяного покрова, так и аномально малую, которая с одной стороны не препятствует судоходству, а с другой – не защищает береговую зону от волновой нагрузки; торошение и навалы льда на берега, что создает опасность для прибрежной инфраструктуры; раннее ледообразование и большую продолжительность ледового сезона.

В разделе 5.1 представлены различные определения термина «опасное природное явление», найденные в литературе. Рассмотрен перечень опасных ледовых явлений, определенный Росгидрометом. В разделе 5.2 описано влияние ледяного покрова на окружающую среду и морехозяйственную деятельность (табл. 4).

Для обеспечения безопасного мореплавания на акваториях в зимний период организована ледовая проводка судов. Но иногда, ледовые условия бывают настолько сложными для судоходства, что ледоколы не справляются со своей задачей. Например, в январе 2008 г. около 150 судов ожидало ледокольной проводки у кромки льда в Керченском проливе (Думанская, 2014). В экстремально суровую зиму 1953/1954 гг. вся акватория Северного Каспия была занята припаем толщиной 60-65 см, ледокольная проводка была приостановлена ввиду ее неэффективности, несколько нефтяных вышек были разрушены. Зимой 2012/2013 гг. на Северном Каспии в результате подвижек ЛТО были повреждены четыре нитки трубопровода, проложенные по дну без заглублия. Таким образом, наибольшую экологическую опасность для морехозяйственной деятельности представляют активное торошение льда, в результате которого образуются ледяные торосистые образования, и устойчивый ледяной покров – припай, которые могут значительно препятствовать судоходству, нарушать безопасную эксплуатацию морских и прибрежных инженерных и гидротехнических сооружений, что ведет к экономическим потерям.

Для оценки потенциальных угроз и рисков на основе данных ГИС «Ледовый режим южных морей России» выполнено районирование исследуемых акваторий по степени проявления ОЛЯ, которое представлено в разделе 5.3. Выполнен анализ вероятности их проявления, определены интегральные показатели экологической опасности. Путем суммирования баллов был определен комплексный показатель экологической опасности и составлены карты районирования акваторий по степени проявления ОЛЯ.

Таблица 4 Виды воздействия опасных ледовых явлений на окружающую среду и морехозяйственную деятельность

ОПАСНОЕ ЛЕДОВОЕ ЯВЛЕНИЕ ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ	Раннее ледообразование	Торошение льда	Припай*
ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ	- нарушение процесса миграции и нагула рыб; - нарушение транспорта наносов	- экзарация дна и берегов; - транспорт наносов	- защита береговой зоны от разрушения; - замор, нарушение миграции и промысла рыбы
Биоразнообразие	X		X
Геоморфология		X	
ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МОРЕХОЗЯЙСТВЕННУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ		- повреждение трубопроводов, морских судов и портовой инфраструктуры; - разрушение нефтяных вышек, мостовых переходов	- повреждение морских судов, ограничение их эксплуатации; - остановка морской навигации, разрушение береговой инфраструктуры
Судоходство	X	X	X
Трубопроводы, мостовые переходы		X	X
Рыбный промысел	X	X	X
ПОСЛЕДСТВИЯ	- изменение рельефа дна и берегов; - нарушение биопродуктивности; - экономические потери; - риск техногенных катастроф с человеческими жертвами		

Примечание. * – Установление ледяного покрова, непроходимого судами и ледоколами, в период навигации на судовых трассах и в районе промысла.

Для акватории Азовского моря высокая и очень высокая степень экологической опасности характерны для всего побережья Таганрогского залива и его восточной части – здесь расположены крупные порты, сосредоточены судоходные пути и каналы, районы рыбного промысла (рис. 4). Малые глубины – до 5 м еще больше усложняют здесь морехозяйственную деятельность в зимний период. Побережье Арабатской стрелки и Утлюкского лимана также подвержены высокой и очень высокой степени экологической опасности, но морехозяйственная деятельность здесь минимальна по сравнению с Таганрогским заливом. Вероятно, в этих районах ледяной покров активно оказывает экзарационное воздействие на берега и дно, однако этот вопрос требует дополнительных исследований, в первую очередь полевых.

Керченский пролив характеризуется средней и высокой степенью экологической опасности. Через пролив проходит Керчь-Еникальский канал – судоходный путь между Азовским и Черным морями, годовой транзит судов по каналу достигает 19 тыс. проходов. Здесь расположен второй по грузообороту в России порт в Азово-Черноморском бассейне – порт Кавказ, а также порт Керчь. Через Керченский пролив проходит важная для юга страны транспортная переправа – Крымский мост.

Ледяной покров в проливе может значительно осложнять морехозяйственную деятельность – в 1944 г. мост через Керченский пролив уже строился, но в феврале 1945 г. после 15 дней непрерывающихся штормовых условий вместе с движением ледовых полей этот мост был деформирован и разрушен. Современные технологии позволяют осуществлять строительство и эксплуатацию таких инженерных конструкций, однако знания о возможных проявлениях опасных ледовых явлений позволят избежать негативных последствий. Для центральной части моря характерна очень низкая степень экологической опасности, что обусловлено малой вероятностью встречи припая и в целом сокращением площади ледяного покрова на современном этапе.



Рисунок 4 – Районирование Азовского моря по степени проявления опасных ледовых явлений

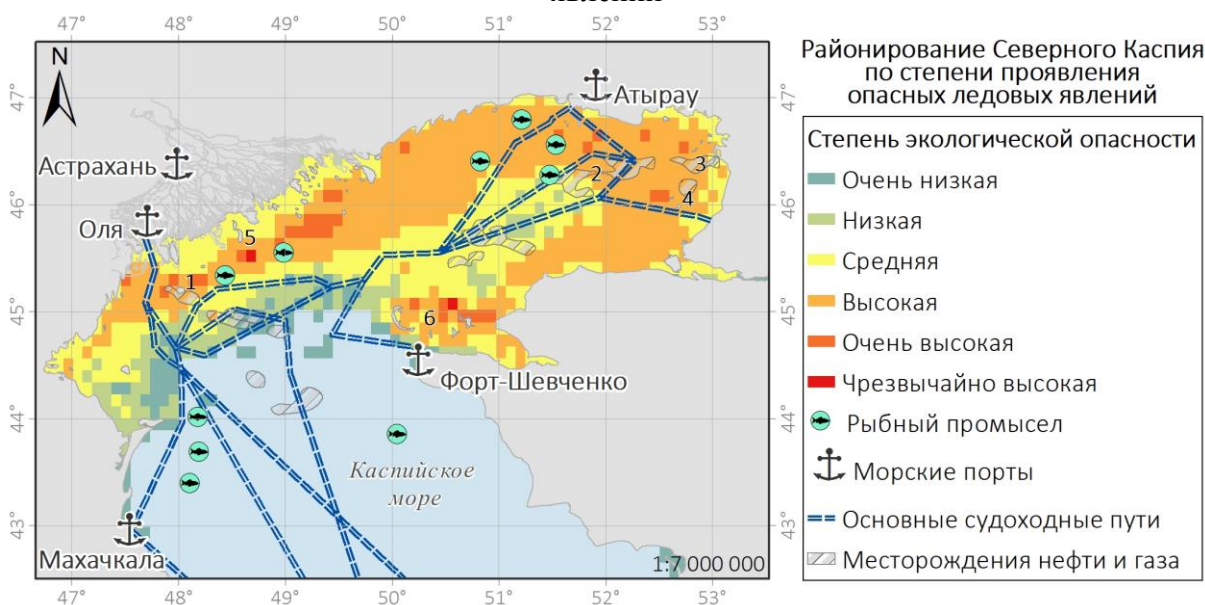


Рисунок 5 – Районирование Северного Каспия по степени проявления опасных ледовых явлений

Месторождения нефти и газа: 1 – Западно-Ракушечная, 2 – Кашаган, 3 – Кайран, 4 – Актоты;

5 – о. Большой Сетной, 6 – Тюленьи острова

Большая часть акватории Северного Каспия подвержена высокой, местами очень высокой степени экологической опасности (рис. 5), что обусловлено динамичностью припая в течение зимнего сезона и как следствие активному торошению льда. Это мелководные районы акватории, глубина которых не превышает 5 м. В этих

местах располагаются рыбопромысловые районы и месторождения Западно-Ракушечная (российский сектор), Кашаган, Кайран и Актоты (казахстанский сектор), а также подходы к портам Оля и Атырау.

Чрезвычайно высокая степень экологической опасности характерна для очень малых областей вблизи острова Большой Сетной на взморье дельты Волги и острова Морской (Тюленьи острова), что обусловлено геоморфологией дна – глубины не превышают 1 м. При стонно-нагонных колебаниях уровня ЛТО могут заноситься на мелководье, а затем при падении уровня садиться на дно, и даже оказываться на суше.

Средняя степень экологической опасности присуща району взморья дельты Волги и впадине Уральская бороздина, где располагаются месторождения Абай и Исатай, проходят судоходные пути. Низкая и очень низкая степени экологической опасности свойственны западному побережью от острова Чечень до порта Махачкала и южной части Северного Каспия.

Таким образом, с помощью разработанной геоинформационной системы «Ледовый режим южных морей России» выполнена оценка и картирование **вероятности встречи льда и припая** в Азовском и Каспийском морях **для современного периода 2000-2020 гг.** для обеспечения эффективного управления морехозяйственной деятельностью и устойчивого развития южного макрорегиона. В результате проведенного комплексного пространственно-временного анализа **выявлены зоны, подверженные высокой и очень высокой степени проявления опасных ледовых явлений** на акваториях Азовского и Каспийского морей.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы исследования:

1) Создана база геоданных и геоинформационная система «Ледовый режим южных морей России», которая включает весь накопленный картографический и численный материал за период с 1916 по 2022 гг. ГИС разработана как уникальная среда, для сбора, хранения, анализа и мониторинга пространственно-временной динамики ледовых условий Азовского и Каспийского морей. Для визуализации данных настроен картографический шаблон.

2) С помощью ГИС-технологий создан комплект ледовых карт Азовского и Каспийского морей:

- ежемесячные карты вероятности встречи льда и припая,
- карты типовой ледовой обстановки для зим различной суровости,
- карты распределения ледяных торосистых образований,
- карты вероятности проявления опасных ледовых явлений.

Карты имеют самостоятельную ценность для специализированного обеспечения безопасности морских операций в Азовском и Каспийском морях в ледовый период.

3) Выполнена оценка и картирование вероятности встречи льда и припая для современного периода 2000-2020 гг., выполнен сравнительный анализ с ранее опубликованными данными. В результате показано сокращение вероятности встречи льда в ноябре, марте и апреле на Азовском море. В прибрежных восточных районах средней части Каспийского моря ледяной покров наблюдается в 25% случаев или не наблюдается вовсе.

4) Проанализировано местоположение ледяных торосистых образований северной части Каспийского моря для современных ледовых условий (2013-2020 гг.). Показано, что площадь ледяного покрова и положение уровня моря в равной степени оказывают влияние на локализацию ледяных торосистых образований.

5) Выполнена типизация зим по степени суровости как показатель температурных условий в регионе. Для Азовского моря зима является суровой, если среднее значение суммы температур за зиму ниже минус 31.3°C, а при сумме 12.9 C и выше зима является мягкой. Сумма температур, находящаяся между этими значениями, означает, что зима умеренная. Для северной части Каспийского моря зима является суровой, если среднее

значение суммы температур за зиму менее минус 51.6°C, а при сумме минус 7.5°C и более зима является мягкой. Умеренную зиму характеризует сумма температур, находящаяся между этими значениями. В соответствии с полученными градациями в регионах Азовского и Каспийского морей преобладают зимы умеренного типа, но изменяется повторяемость суровых и мягких зим. Обработка и анализ более, чем векового ряда натурных наблюдений позволяют сделать вывод о том, что 2-3 сезона подряд повторяются умеренные и мягкие зимы, при этом количество суровых зим уменьшается, и с 1960 г. они отмечаются раз в 15-20 лет, что может говорить о некотором потеплении в регионе.

6) Установлена взаимосвязь температуры воды в ноябре и сроков ледообразования на прибрежных ГМС – коэффициент корреляции температуры воды ноября и сроков ледообразования на ГМС Таганрог (Азовское море) составляет 0.7; на ГМС Пешной (северная часть Каспийского моря) – 0.6 (для периода 1938-1993 гг.).

7) Проанализированы основные ледовые фазы для Азовского и Каспийского морей. Установлено сокращение продолжительности ледового сезона, смещение сроков образования и разрушения льда в сторону более поздних и ранних дат соответственно. На всех прибрежных ГМС исследуемых морей интенсивность смещения сроков составляет 5-7 дней за 10 лет. В результате, в современный период 2000-2020 гг. на Азовском море образование льда начинается на 7-15 дней (в зависимости от ГМС) позже среднемноголетних значений, а продолжительность ледового сезона сократилась на ~ 1-1,5 месяца. На ГМС Керчь в период 2000-2020 гг. в 35% случаев ледяной покров вовсе не наблюдался. На южных ГМС северной части Каспийского моря образование льда начинается на 10-20 дней позже среднемноголетних значений, а продолжительность ледового сезона сократилась на ~ 1-1,5 месяца.

8) Выделено пять типовых ледовых сезонов, характеризующихся различными количественными показателями фаз ледового режима, для каждого типа установлены закономерности гидрометеорологических условий. С начала 2000-х годов увеличилась повторяемость V типа ледового сезона, который характеризуется малой продолжительностью: 48-68 дней для Азовского моря и 40-90 дней для Северного Каспия. Для Азовского моря причиной V типа ледового сезона являются положительные аномалии температуры воздуха в октябре-декабре (1,1°C и 1,6°C соответственно) и марте (0,2°C), что в итоге приводит к сокращению продолжительности ледового сезона и его сдвига на более поздние и ранние сроки. В северной части Каспийского моря положительные аномалии температуры воздуха характерны для всего холодного периода с октября по март.

9) Выполнена оценка вероятности и последствия проявления типовых ледовых сезонов для основных портов Азовского – Таганрог и Керчь, и Каспийского морей – Оля. Определены уровни экологической опасности – высокий уровень характерен для II и III типовых ледовых сезонов, в течение которых вероятна приостановка морской навигации и рыбного промысла, повреждение портовой инфраструктуры и судов, обледенение малых судов.

10) Проанализирована многолетняя динамика ледовитости Азовского и Каспийского морей за период 1950-2020 гг. С начала 1990-х гг. на исследуемых акваториях наблюдается устойчивое сокращение ледовитости. Установлено сокращение ледовитости на ~ 10% по отношению к среднемноголетнему значению. Площадь припая Азовского и северной части Каспийского морей рассмотрена за период 2000-2020 гг. – на фоне роста среднемесячных температур воздуха зимнего периода площадь припая сокращается, при этом в зиму 2019/2020 г. на Азовском море припай вовсе не наблюдался.

11) На основе вековой базы геоданных установлен режимный сдвиг ледового сезона – в климатический период 1991-2020 гг. на фоне роста температур воздуха и воды

ледовитость сократилась на 6-9%, продолжительность ледового сезона – на 11-14 дней для Азовского и Каспийского морей соответственно.

12) Проанализированы опасные ледовые явления на акваториях Азовского и Каспийского морей и их влияние на окружающую среду и морехозяйственную деятельность. Последствия проявления ОЛЯ выражены в изменении рельефа дна и берегов, нарушении биопродуктивности, экономических потерях из-за приостановки морской навигации и повреждении морского флота и гидротехнических сооружений, увеличении риска техногенных катастроф с человеческими жертвами.

13) Выявлены наиболее повторяющиеся в пространственно-временном масштабе ОЛЯ – припай и ледяные торосистые образования. Установлена их вероятность проявления. Разработан и реализован метод районирования акваторий по степени проявления опасных ледовых явлений. Построены карты районирования по степени опасности припая отдельно и совместного воздействия припая и ледяных торосистых образований. Выявлены зоны, подверженные высокой и очень высокой степени проявления опасных ледовых явлений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, включенных в базы Scopus, Web of Science, из перечня ВАК:

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

2. Яицкая Н.А., **Магаева А.А.** Ледовый режим Северного Каспия // Вестник МГУ. Серия 5 География. 2020. №6. С. 63-72.

3. 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. Т. 13. № 3. С. 129-138. DOI: 10.24057/2071-9388-2020-77

4. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Динамика припая Азовского моря в XXI веке // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 74–84. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-74-84

5. **Magaeva A.A.**, Yaitskaya N.A. Hydrometeorological hazards during the winter periods in the Sea of Azov and dynamics under the influence of climatic changes // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. 2021. P.1-7.

6. 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

7. Яицкая Н.А., **Магаева А.А.** Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: математическое моделирование, системы поддержки принятия решений, геоинформационные системы (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т.38, № 4. С. 372-388. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-4-372-388

8. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Гидрометеорологические опасные природные явления Северного Каспия в зимний период на фоне климатических изменений // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 709–718. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-709-718

Иные публикации:

1. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А., Лихтанская Н.В., Дашкевич Л.В. Развитие геоинформационной системы ледового режима южных морей России // Экология, экономика, информатика. Сборник статей: В 3 Т. - Ростов-на-Дону. Изд-во Южного

федерального университета, 2015. Т.3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг, 2015. С. 269-275.

2. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Типизация зим в регионе Азовского моря по степени суровости // Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Сб. материалов III Всерос. конф. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. С. 240–248.

3. **Магаева А.А.** Предварительный анализ параметров ледового режима Каспийского моря // XIII Ежегодная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки передовых научных направлений»: тезисы докладов (г. Ростов-на-Дону, 17–27 апреля 2017 г.). – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. С. 46 - 47.

4. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Классификация зимних периодов в зависимости от ледовых условий в Азовском море // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований», посвященной 220-летию выдающегося русского мореплавателя, географа, вице-председателя Русского географического общества Ф.П. Литке в рамках XIII Большого географического фестиваля. – СПб: Свое издательство, 2017. [Электронное издание]. С. 84-87.

5. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Типизация зим по степени суровости в Каспийском регионе // Материалы научных мероприятий, приуроченных к 15-летию Южного научного центра Российской академии наук. 2017. С. 258-260.

6. Яицкая Н.А., **Магаева А.А.** Типизация зим по степени суровости Азовского и северной части Каспийского морей // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий. Том 4: Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции (1–3 ноября 2017 г., Сочи). Сочи: ГКУ КК «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», Дониздат, 2017. С. 311 – 314.

7. Яицкая Н.А., Третьякова И.А., **Магаева А.А.**, Шагаров Л.М., Лычагина Ю.М., Лесной А.С., Макаровский Г.В. Некоторые результаты исследования гидрологического режима Азовского и Каспийского морей во второй половине XX-начале XXI вв. и его экстремальных проявлений // Моря России: наука, безопасность, ресурсы / Тезисы докладов научной конференции. г. Севастополь, 3-7 октября 2017 г. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. С. 173-175.

8. Yaitskaya N.A., **Magaeva A.A.** Interannual Dynamics of the Ice Regime of the Sea of Azov in the XX-XXI Century // POLAR 2018: Where the Poles come together - Abstract Proceedings. P.1710.

9. **Магаева А.А.** Ранжирование ледовых фаз Азовского моря //Достижения и перспективы молодых ученых в интересах развития Юга России Тезисы докладов. Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук. 2018. С. 45.

10. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Исследование ледовых фаз Азовского и Каспийского морей // Морские исследования и рациональное природопользование Материалы молодежной научной конференции. 2018. С. 124-126.

11. Яицкая Н.А., Третьякова И.А., **Магаева А.А.** Особенности подхода к выявлению и анализу опасных гидрометеорологических явлений с кумулятивным эффектом // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2018. № 3. С.86-89.

12. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Классификация зим Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2019. № 4. С. 147-151.

13. Maznev S., **Magaeва A.**, Ogorodov S., Yaitskaya N. Ice gouging conditions of the Northern Caspian depending on the severity of winters // Proceedings of the 25th International Symposium on Ice. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). Trondheim, Norway, 23rd – 25th November 2020— 2020. P. 935-943.

14. **Магаева А.А.**, Огородов С.А., Мазнев С.В., Яицкая Н.А., Верняев С., Сигитов А., Кадранов Е. Ледяные торосистые образования Северного Каспия в условиях колебания уровня и ледовитости // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (Опасные явления – II): материалы II Международной научной конференции. ЮНЦ РАН Ростов-на-Дону, 2020. С. 177–181.

15. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Использование данных реанализа для исследования ледяного покрова Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 37-42.

16. Яицкая Н.А., **Магаева А.А.** Ледовые условия Северного Каспия как основа классификации зим // Вестник Краснодарского регионального отделения Русского географического общества. 2020. С. 85-91.

17. **Магаева А.А.**, Яицкая Н.А. Влияние ледяного покрова на морехозяйственную деятельность Азовского и Каспийского морей // Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии) («Опасные явления – IV») памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова: материалы IV Международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 5–9 сентября 2022 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2022. С.81-84.