

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

На правах рукописи

Бразовская Яна Евгеньевна
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ВЛИЯНИЯ МОРСКОГО СУДОХОДСТВА НА АРКТИЧЕСКУЮ ПРИРОДНУЮ
СРЕДУ

Специальности: 1.6.21 – Геоэкология

Диссертация
на соискание степени кандидата географических наук

Научный руководитель
доктор географических наук
Поздняков Шамиль Рауфович

Санкт-Петербург, 2025 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Теоретические подходы и методические приемы геоэкологической оценки влияния морского судоходства на арктическую природную среду	10
1.1. Теоретико-методологические предпосылки	10
1.2. Теория геоэкологической оценки и состояние изученности проблемы влияния морского судоходства на арктическую природную среду	12
1.3. Методика обоснования выбора судоходных маршрутов и морских судов на основе геоэкологической оценки влияния на арктическую природную среду при морском судоходстве	23
1.4. Методические положения прогноза изменений в компонентах природной среды на основании геоэкологического районирования арктических морей	32
Вывод к главе 1	42
ГЛАВА 2. Экономико-географическая и геоэкологическая характеристика природно-ресурсного и транспортного потенциала российской Арктики	44
2.1. Природные условия региона исследования	44
2.2. Климатические и метеорологические условия	48
2.3. Основные маршруты морского судоходства в российской Арктики и показатели морского судоходства в арктической зоне	66
2.4. Международно-правовое регулирование экологической безопасности Арктики (международное сотрудничество в Арктике)	78
2.5. Особенности правового режима судоходства в российской Арктике	86
Вывод к главе 2	91
ГЛАВА 3. Прогнозирование и оценка изменений арктической природной среды от морского судоходства	94
3.1. Оценка возможного влияния на качественный состав атмосферы	94
3.2. Прогнозируемые нарушения морского биоразнообразия	101
3.3. Изменение гидрохимических и гидрофизических характеристик арктического бассейна Северного Ледовитого океана	109
3.4. Комплексная геоэкологическая оценка состояния арктического бассейна Северного Ледовитого океана	115

Вывод к главе 3	120
ГЛАВА 4. Разработка предложений по снижению антропогенной нагрузки на арктическую природную среду от морского судоходства	122
4.1. Разработка методики по оценке геоэкологического состояния арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства	122
4.2. Сертификация морских судов, эксплуатируемых в арктическом бассейне	129
4.3. Разработка методики по оценке антропогенной нагрузки и возмещению вреда в Арктической зоне	139
Вывод к главе 4	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	148
ПРИЛОЖЕНИЯ № 1-4	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современный этап освоения арктических территорий протекает в условиях существенных противоречий. С одной стороны, геостратегические и экономические интересы арктических держав стимулируют интенсивное развитие транспортной инфраструктуры и наращивание судоходных операций. С другой стороны, накопленная научная база свидетельствует об исключительной уязвимости арктических экосистем, их ограниченном потенциале самовосстановления и значительных рисках необратимых трансформаций вследствие техногенного воздействия.

Существующие в настоящее время подходы к оценке геоэкологических последствий судоходства в Арктике отличаются существенной фрагментарностью. Методологическая основа оценки строится на разобщенных критериях: обоснование маршрутов осуществляется по одним параметрам, оценка судов – по другим. Отсутствие единой системы создает препятствия для проведения сквозной количественной оценки, исключает возможность сопоставления экономической целесообразности с множественными экологическими рисками. Многофакторная природа проблемы и противоречие между экономическими и экологическими приоритетами свидетельствуют о недостаточности традиционного методологического инструментария. Данное обстоятельство обуславливает острую потребность в формировании комплексного подхода, основанного на методах многокритериального анализа, что позволит объективно сопоставлять и ранжировать альтернативные решения (маршруты, суда, технологии) в условиях повышенной неопределенности, характерной для арктических условий.

Научная задача исследования состоит в формировании комплексного научно-методического инструментария для снижения антропогенной нагрузки морского судоходства по Северному морскому пути посредством совершенствования системы оценки геоэкологических рисков судоходной

деятельности.

Объект исследования – арктическая природная среда в условиях интенсификации морского судоходства по Северному морскому пути.

Предмет исследования – геоэкологическое состояние арктической природной среды, характер антропогенного воздействия морского судоходства, причинно-следственные связи между судоходной деятельностью и изменениями арктической природной среды, а также механизмы предупреждения и минимизации антропогенной нагрузки.

Цель исследования – комплексная геоэкологическая оценка воздействия судоходства на прибрежные зоны арктических морей, формирование научно-методического аппарата для снижения антропогенной нагрузки от морского судоходства посредством совершенствования системы оценки геоэкологических рисков от судоходной деятельности.

Достижение поставленной цели предполагает последовательное решение следующих задач:

1. Анализ теоретико-методологических подходов к геоэкологической оценке воздействия морского судоходства на арктическую природную среду.
2. Исследование существующих методик обоснования выбора судоходных маршрутов и морских судов на основе геоэкологической оценки.
3. Исследование экономико-географической и геоэкологической характеристика природно-ресурсного и транспортного потенциала российской Арктики.
4. Оценка динамики состояния арктической природной среды при взаимодействии с морскими судами.
5. Формирование интегративного подхода к оценке воздействия морского судоходства в российской Арктике.
6. Создание комплексного научно-методического аппарата для снижения антропогенной нагрузки от морского судоходства по Северному морскому пути.

7. Разработка методик оценки антропогенной нагрузки и возмещения ущерба от судоходства в Арктической зоне.

Материалы и методы исследования. Методологическую основу исследования составил междисциплинарный подход, базирующийся на совокупности общенаучных и специальных методов:

- системный подход для рассмотрения арктической природной среды и судоходства как взаимосвязанных систем;
- статистический анализ для обработки больших массивов данных;
- методы экспертных оценок для получения квалифицированных суждений специалистов;
- геоэкологический анализ для исследования взаимосвязей между антропогенной деятельностью и природной средой;
- прогнозирование и оценка рисков для предвидения последствий и разработки мер по их минимизации;
- сравнительно-географический метод для анализа международного опыта.

Научная новизна исследования.

1. Обосновано применение метода многокритериального анализа решений PROMETHEE II для интегральной геоэкологической оценки состояния арктической морской среды. В отличие от существующих однокритериальных подходов, данная методология обеспечивает интеграцию разнородных критериев (от тонн выбросов до процентных изменений и качественных оценок) в единую систему, что создает возможности для проведения полного ранжирования и анализа динамики экологических изменений во времени.

2. Создан комплексный научно-методический аппарат, включающий три взаимосвязанных инструмента:

- Методика ФAGES – для интегральной оценки общего геоэкологического состояния арктической морской среды по семи ключевым критериям, формирующая основу для долгосрочного мониторинга.

– Методика FAGES-TECH («Арктический эко-стандарт») – для практической сертификации и ранжирования морских судов по уровню экологической безопасности и технологической пригодности для работы в Арктике.

– Методика FAGES-MONITOR – для оценки и расчета справедливой компенсации экологического ущерба на основе «Индекса экологического вреда», учитывающего специфику Арктики.

3. Обоснована концепция создания целевого «Арктического экологического фонда компенсации», формируемого за счет средств, рассчитываемых на основе методики FAGES-MONITOR. Данное решение обеспечивает практический механизм реализации принципа полной ответственности за нанесенный ущерб и создает финансовую основу для проведения восстановительных мероприятий.

Теоретическая значимость работы. В ходе диссертационного исследования решена проблема фрагментарности существующих подходов к оценке антропогенного воздействия в Арктике. Работа развивает теорию геоэкологии посредством адаптации и применения методов многокритериального анализа для решения сложных, многофакторных задач в условиях высокой неопределенности. Систематизирован комплексный характер воздействия судоходства на арктическую природную среду и обоснована необходимость перехода к интегральным методологиям оценки.

Практическая значимость работы. Результаты исследования обеспечивают возможность оценки экологического состояния арктической среды и могут использоваться для принятия управленческих решений. Созданный «Арктический эко-стандарт» (FAGES-TECH) представляет готовый инструмент для внедрения системы экологической сертификации судов, стимулирующий судовладельцев к модернизации флота. Методика FAGES-MONITOR может применяться регулирующими органами и страховыми компаниями для объективного расчета ущерба и определения размера компенсаций. Внедрение разработанных методик создает основу для

эффективного экологического нормирования и устойчивого развития судоходства в Арктике.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования и научных выводов обеспечивается обработкой значительного объема статистических и аналитических материалов, а также применением системного подхода. Полученные выводы подтверждаются вычислениями, выполненными с помощью методов математического моделирования.

Основные защищаемые положения

1. Система критериев и методика интегральной геоэкологической оценки арктической морской среды (FAGES) на основе метода PROMETHEE II, обеспечивающая комплексный мониторинг и количественную оценку динамики состояния экосистемы под влиянием судоходства.

2. Методика оценки и сертификации морских судов «Арктический эко-стандарт» (FAGES-TECH) как практический инструмент для ранжирования судов по уровню экологической безопасности и технологической пригодности к эксплуатации в Арктике.

3. Методика оценки антропогенной нагрузки и возмещения ущерба (FAGES-MONITOR), основанная на расчете «Индекса экологического вреда», и концепция «Арктического экологического фонда компенсации» как механизм обеспечения полной ответственности за экологический ущерб.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тема диссертационного исследования и его содержание соответствует требованиям паспорта специальности ВАК 1.6.21 – Геоэкология по следующим пунктам: пункт 6 «Разработка научных основ рационального использования и охраны водных, воздушных, земельных, биологических, рекреационных, минеральных и энергетических ресурсов Земли», пункт 8 «Разработка теории, методологии и методов комплексных инженерных изысканий для геоэкологической характеристики природно-техногенной среды», пункт 14 «Научные основы организации геоэкологического мониторинга природотехнических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля

состояния окружающей среды», пункт 15 «Научное обоснование государственного нормирования и стандартов в области геоэкологических аспектов природопользования. Разработка научных основ государственной геоэкологической экспертизы и контроля».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования представлены в материалах более 20 межрегиональных, всероссийских и международных научно-практических конференций в период с 2017 по 2025 годы.

По теме исследования опубликовано 11 научные работы, включая 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, одна в Scopus и издано одно учебное пособие.

Структура исследования обусловлена целью и задачами исследования и состоит из введения, четырех глав, каждая из которых посвящена отдельному аспекту исследования и вносит свой вклад в достижение поставленной цели исследования, заключения и библиографического списка, приложений. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста, включает таблицы, диаграммы, рисунки и приложения.

Глава 1. Теоретические подходы и методические приемы геоэкологической оценки влияния морского судоходства на арктическую природную среду

1.1. Теоретико-методологические предпосылки

В условиях глобальных климатических трансформаций Арктический регион претерпевает существенные изменения, открывая новые возможности для экономической деятельности и одновременно ставя перед научным сообществом сложнейшие вопросы оценки экологических последствий антропогенного вмешательства. Сокращение площади многолетних льдов, увеличение продолжительности навигационного периода и технологический прогресс в судостроении создают предпосылки для значительного роста объемов грузоперевозок по северным морским маршрутам, которые становятся все более привлекательными в логистическом и экономическом аспектах.

Масштабы и скорость климатических изменений в Арктике заслуживают особого внимания. Согласно последним исследованиям, потепление Арктического океана происходит преимущественно за счет поглощения антропогенных парниковых газов, причем океан абсорбировал 90% тепла от увеличенных выбросов, что привело к значительному повышению температуры. Климатические изменения оказывают существенное влияние на Арктический океан, ускоряя скорость его потепления в 2-3 раза по сравнению с глобальным показателем, что приводит к повышению уровня моря, изменению климатических моделей и усилению экстремальных погодных явлений¹. Приведем данные из отчета Программа мониторинга и оценки Арктики за 2024 год на рисунке 1.1.

¹ Ye, X., Zhang, B., Dawson, J., Amon, C.D., Ezechukwu, C., Igwegbe, E., Kang, Q., Song, X., Chen, B. Arctic Oceanic Carbon Cycle: A Comprehensive Review of Mechanisms, Regulations, and Models. *Water* 2024, 16, 1667. <https://doi.org/10.3390/w16121667>

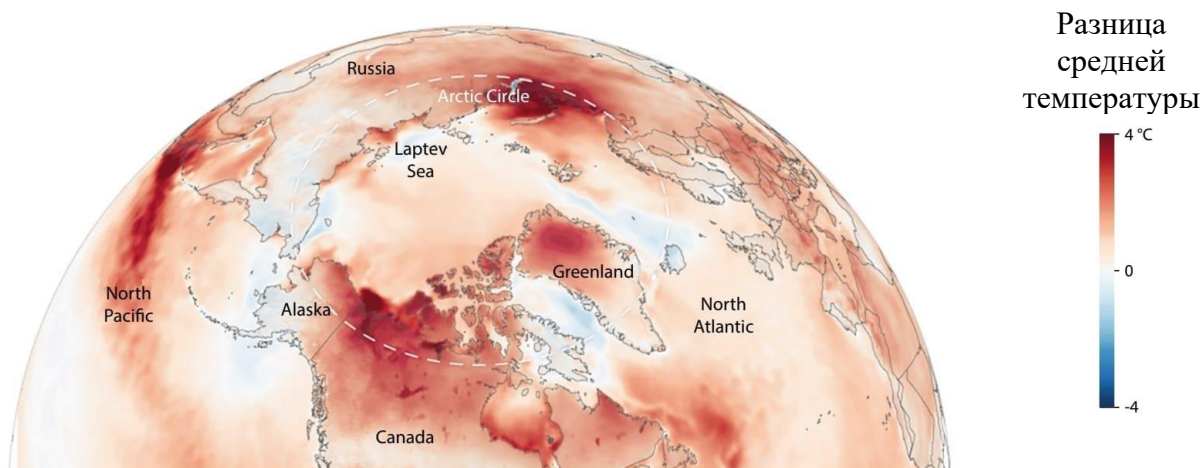


Рисунок 1.1. Экстремальные температуры в Арктике летом 2023 года².

Современная парадигма освоения арктических пространств формируется на стыке противоречивых тенденций. С одной стороны, геостратегические и экономические интересы арктических государств стимулируют развитие транспортной инфраструктуры и увеличение присутствия в регионе. С другой — научные данные свидетельствуют о крайней хрупкости и уязвимости арктических экосистем, их ограниченной способности к самовосстановлению и высоком риске необратимых изменений вследствие техногенных воздействий.

Именно в этом контексте возрастает необходимость разработки фундаментальных и прикладных аспектов геоэкологической оценки влияния судоходства, которая должна учитывать множественные факторы воздействия — от прямых эмиссий загрязняющих веществ и физического нарушения ледового покрова до сложных трансформаций структуры и функционирования морских и прибрежных биоценоза. Полимасштабный характер таких воздействий требует комплексного междисциплинарного подхода, интегрирующего методы географии, гидрологии, экологии, геоинформатики и математического моделирования.

В рамках настоящей главы предпринята попытка систематизации существующих теоретических концепций и методических разработок в области

² Источник: Доклад АМАР об изменении климата в Арктике за 2024 год: основные тенденции и последствия. ISBN – 978-82-7971-203-9, Thoman et al. (2023).

оценки экологических последствий морского судоходства в Арктике. Особое внимание уделяется анализу регионально-специфичных особенностей природной среды, определяющих дифференцированную реакцию экосистем на антропогенное воздействие.

Данная глава структурирована в соответствии с логикой последовательного раскрытия проблематики — от теоретического обоснования и анализа современного состояния проблемы до рассмотрения вопросов геоэкологического районирования акваторий арктических морей.

1.2. Теория геоэкологической оценки и состояние изученности проблемы влияния морского судоходства на арктическую природную среду

В современных условиях интенсификации освоения арктического пространства вопросы геоэкологической оценки влияния антропогенной деятельности, в частности морского судоходства, на уникальные и уязвимые экосистемы Арктики приобретают особую актуальность. **Геоэкологическая оценка** как междисциплинарный **научный подход сформировалась** на стыке географии, экологии и системного анализа и представляет собой комплексную систему методов и критериев, направленных на анализ взаимодействия природных и техногенных систем. Согласно фундаментальным работам В.Б. Сочавы, геоэкологическая оценка базируется на принципе геосистемного анализа, который рассматривает природные комплексы как целостные функциональные системы с многочисленными прямыми и обратными связями³. Развивая данное направление, А.Г. Исаченко обосновал необходимость рассмотрения техногенного влияния в контексте ландшафтно-экологического подхода, что позволяет определить потенциальную устойчивость природных комплексов к различным видам антропогенного воздействия⁴.

³ Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007798947>

⁴ Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001573830>

Арктический регион обладает рядом специфических особенностей, определяющих его повышенную уязвимость к техногенным воздействиям. На восстановление арктических экосистем требуется значительно больше времени, чем в других климатических зонах. В этой связи стоит отметить исследование, проведенное в 2020 году В.А. Мязиным, согласно которому, низкие температуры (около $+10^{\circ}\text{C}$ в летний период) замедляют процессы биodeградации загрязняющих веществ. Исследование показывает, что даже в лабораторных условиях за 3 месяца происходит снижение содержания углеводородов нефти всего на 10-45% в прибрежной почве и на 18-43% в песке. При этом прибрежные почвы особенно чувствительны к загрязнению тяжелой нефтью, компоненты которой сорбируются органическим и минеральным веществом, что в условиях низкой биологической активности затрудняет их биodeградацию. Песчаный субстрат более чувствителен к загрязнению легкой нефтью, компоненты которой могут оказывать токсическое воздействие на микроорганизмы⁵. Эти данные приобретают особую актуальность в свете прогнозируемого роста судоходства по Северному морскому пути, где, согласно прогнозам В. В. Путина, в 2030 году грузопоток достигнет 70–100 млн тонн⁶. Интенсификация морских перевозок неизбежно повышает риски аварийных разливов нефти и нефтепродуктов в акватории арктических морей, что при неэффективности мероприятий по локализации может привести к загрязнению береговой линии и долгосрочным экологическим последствиям для уязвимых прибрежных экосистем.

Морское судоходство как специфический вид антропогенной деятельности оказывает комплексное воздействие на все компоненты арктической природной среды. Анализ современных исследований позволяет выделить следующие основные категории воздействия:

1 - химическое загрязнение (разливы нефтепродуктов, сбросы сточных

⁵ Мязин В. Исследование способности прибрежных арктических экосистем к самовосстановлению после нефтяного загрязнения // URL: <https://www.researchgate.net/publication/>

⁶ Владимир Путин выступил на пленарном заседании VI Международного арктического форума «Арктика – территория диалога» URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/76554>

вод, выбросы в атмосферу);

2 - физическое воздействие (шумовое загрязнение, нарушение ледового покрова);

3 - биологическое загрязнение (интродукция чужеродных видов через балластные воды).

Касаемо арктического судоходства стоит отметить, что согласно исследованию А.И. Статуто (2020), морское судоходство в Арктике представляет серьезную экологическую угрозу, несмотря на экономические преимущества Северного морского пути (СМП), сокращающего расстояние из Мурманска в Иокогаму с 24 тыс. км (через Суэцкий канал) до 11 тыс. км. Основными экологическими рисками являются разливы нефтепродуктов и выбросы выхлопных газов энергетическими установками судов.

Химическое загрязнение морской среды при судоходстве происходит прежде всего за счет эмиссии поллютантов с судовыми выбросами и сбросами. Наиболее значимым является загрязнение нефтепродуктами, которое может происходить как при аварийных разливах, так и при штатной эксплуатации судов. Физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов в условиях низких температур Арктики имеют существенные особенности, требующие особого внимания. Согласно исследованиям И.Г. Ященко, в Арктической зоне России наблюдаются значительные региональные различия в свойствах нефтей. Сравнительный анализ показал, что более тяжелыми и вязкими являются нефти европейской части, где вязкость при 20°C для тяжелой нефти составляет 752.87 мм²/с, а для вязкой нефти достигает экстремально высоких значений — 2548.38 мм²/с. В сибирской части Арктики эти показатели значительно ниже — 396.87 мм²/с для тяжелой и 268.11 мм²/с для вязкой нефти соответственно.

Критически важной характеристикой для условий Арктики является температура застывания — нефть европейской части обладают положительной температурой застывания (5.70°C для тяжелой и 10.56°C для вязкой нефти), что существенно ухудшает их реологические свойства при низких температурах. В то время как нефть сибирской части имеют отрицательную температуру

застывания (-30.88°C и -29.41°C соответственно).

Химический состав также имеет региональные особенности: содержание парафинов в парафинистой нефти европейской части Арктической зоны России достигает 11.15%, в сибирской — 9.39%; при этом смолистая, асфальтеновая и сернистая нефть сибирской части обладают на 20-28% большим содержанием смол (20.63% против 15.93%), асфальтенов (15.96% против 12.71%) и серы (4.66% против 3.35%) по сравнению с аналогичной европейской нефтью. Содержание асфальтенов, серы и металлов в нефти европейской части также более высокое по сравнению с нефтью сибирской части Арктической зоны России⁷.

Таким образом, различия в физико-химических свойствах нефти, наблюдаемые между европейской и сибирской частями Арктической зоны России, оказывают существенное влияние на их поведение в суровых климатических условиях: от вязкости и температуры застывания до химического состава. Эти особенности определяют как динамику загрязнения морской среды, так и сложность ликвидации последствий разливов, что требует разработки специализированных подходов к мониторингу и борьбе с химическим загрязнением в Арктике.

Все эти особенности определяют специфику поведения нефти при разливах в арктических условиях — повышенная вязкость при низких температурах значительно затрудняет процессы естественной дисперсии и эмульгирования, высокое содержание парафинов может приводить к образованию твердых отложений при низких температурах, а высокая концентрация серы и металлов усиливает токсическое воздействие на морские экосистемы. Установленные отличия в свойствах нефти разных регионов Арктической зоны необходимо учитывать при разработке технологий добычи, перевозке и ликвидации аварийных разливов нефти в условиях критически низких арктических температур.

⁷ Ященко И.Г. Физико-химические свойства трудноизвлекаемой нефти в Арктике URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-svoystva-trudnoizvlekaemoy-nefti-v-arktike>

Особо опасным фактором по мнению А.И. Статуто является использование топочного мазута, который «практически не растворяется в воде и оказывает более губительное влияние на фауну, чем разлив сырой нефти», а из-за низких температур в СЛО (Северный ледовитый океан) «биологическое разложение нефти практически отсутствует», при этом «самоочищение среды в холодных водах СЛО может происходить десятилетиями». А.И. Статуто подчеркивает, что для 80% шельфовых месторождений нефти и газа «просто отсутствуют разработанные технологии и стандарты безопасного освоения», а для борьбы с разливами углеводородов «мало наличия специально оборудованного судна, нужен ещё ледокол или даже несколько ледоколов», что существенно усложняет и затягивает процесс ликвидации загрязнений⁸.

Суммировать вышеназванные исследования для наглядности эмпирических данных, можно посредством табличных граф:



Рисунок 1.1. Скорость деградации нефтяного загрязнения в арктических экосистемах по экспериментальным данным лабораторных исследований

⁸ Статуто А.И. Обзор роли арктического судоходства и обеспечение его экологической безопасности URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-rol-i-arkticheskogo-sudohodstva-i-obespechenie-ego-ekologicheskoy-bezopasnosti>

с учетом региональных особенностей различных типов субстрата

Важно отметить, что загрязнение арктической морской среды ртутью представляет также серьезную проблему, причем основным источником являются не местные выбросы, а трансграничный перенос. Согласно данным исследований Арктической программы мониторинга и оценки (АМАР), глобальные выбросы ртути в атмосферу распределены крайне неравномерно. По данным 2005 года, из общемирового объема выбросов ртути около 1200 тонн в год на Азию приходилось более 65% всех выбросов, в то время как на Европу - менее 10%, Северную Америку - около 7%, Россию - около 5%. Причем за период с 1990 по 2005 год объемы выбросов ртути в Азии выросли почти в 1,5 раза, что совпадает с периодом интенсивного промышленного развития Китая⁹.

Выбросы в атмосферу от морских судов включают оксиды серы (SO_x), оксиды азота (NO_x), твердые частицы (PM) и парниковые газы, преимущественно CO₂. Особенностью распространения этих загрязнителей в арктической атмосфере является частое формирование температурных инверсий, которые препятствуют вертикальному перемешиванию воздушных масс и способствуют накоплению загрязняющих веществ в приземном слое. Согласно данным исследования Е. Норкиной, на арктический регион приходится 10% нефти и газа, добываемых традиционным способом, а также 16% мировых запасов нефти, 30% газа и 38% природного газоконденсата из числа неразведанных, но возобновляемых запасов. Особую проблему создает увеличение объемов морских перевозок, которые значительно увеличивают количество выбросов парниковых газов. В исследовании отмечается, что сажа является вторым по масштабу после CO₂ источником загрязнения антропогенного характера, и прогнозируется, что к 2050 г. объем выбросов черного углерода морскими судами возрастет в пять раз по сравнению с

⁹ Reiersen L.-O., Guardans R., Sydnes L.K. The Arctic Monitoring and Assessment Programme // Chemistry International. 2020. Vol. 42, Issue 2. P. 8-14. DOI: 10.1515/ci-2020-0202

показателями 2004 г.

Как указано в статистических данных исследования Норкиной Е., только за 2019 год было зафиксировано 34 нарушения требований по выбросам SO_x, не повлекших задержания судов, и 193 нарушения процедуры замены топлива, что свидетельствует о масштабности проблемы загрязнения атмосферы в Арктике¹⁰. Данная тенденция к увеличению подобных случаев имеет место и на сегодняшний день, в силу увеличения грузопотока по акватории Северного морского пути, который по прогнозам генерального директора, председателя правления компании «Совкомфлот» Игоря Т., составит около 63 млн тонн нефти и нефтепродуктов в 2025 году¹¹.

Кроме выбросов в атмосферу, существенный риск для морской среды Арктики представляют разливы опасных веществ, перевозимых морским транспортом. Например, акрилонитрил (ACN, C₃H_{3.5}N) — химическое вещество, широко используемое в производстве пластмасс, каучуков и углеродных волокон, с годовым объемом производства более 5 миллионов тонн — обладает высокой токсичностью для морских организмов. Согласно токсикологическим исследованиям, представленным Wang & Meng (2022), значения 96-часовой полулетальной концентрации (LC₅₀) для различных морских видов рыб варьируются от 6,07 до 19,64 мг/л, что по классификации GESAMP соответствует умеренной или высокой токсичности. Для *Dicentrarchus labrax* (европейский морской окунь) 96-часовая LC₅₀ составляет 8,1 мг/л, для *Paralichthys olivaceus* (японская камбала) — 6,07 мг/л. Учитывая низкие температуры арктических вод, которые замедляют процессы биodeградации, даже относительно небольшие разливы подобных веществ могут иметь долгосрочные последствия для арктических экосистем¹².

¹⁰ Норкина Е. Опасное загрязнение. Правовые режимы и изменение климата в Арктике URL: https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/opasnoe-zagryaznenie-pravovye-rezhimy-i-izmenenie-klimata-v-arktike/?sphrase_id=130264781

¹¹ «Совкомфлот» намерен перевезти 63 млн тонн нефти и нефтепродуктов в 2025 году URL: <https://www.finam.ru/publications/item/sovkomflot-nameren-perevezti-63-mln-tonn-nefti-i-nefteproduktov-v-2025-godu-20250328-1456/>

¹² Wang X. and Meng F. (2022) Emergency responses to acrylonitrile maritime spills from the perspective of marine ecological protection. *Frontiers in Marine Science*. 9:996263. DOI: 10.3389/fmars.2022.996263

Физическое воздействие судоходства на арктическую природную среду проявляется прежде всего в нарушении естественной структуры ледового покрова ледоколами и судами ледового класса. Разрушение ледового покрова изменяет термический режим подледного слоя воды, что влияет на фотосинтетическую активность фитопланктона и условия обитания криопелагических организмов. Результаты исследования Алексеевой Т.А. и соавторов (2024), свидетельствуют о том, что интенсивное судоходство в арктическом регионе оказывает существенное влияние на морской лед и водный баланс. Физическое воздействие судов приводит к образованию стабильной, труднопроходимой полосы льда в районе $73-76^{\circ}$ с.ш. и $71-73^{\circ}$ в.д., где многократно колотый, раздробленный и смерзшийся лед препятствует нормальному движению судов, снижая их скорость до менее чем 4 узлов. Такие процессы сопровождаются регулярным разрушением первоначального ледового покрова, что стимулирует формирование новых ледовых слоев с изменёнными физико-химическими характеристиками.

Интенсификация арктического судоходства создает шумовое загрязнение, которое оказывает существенное влияние на морских млекопитающих, использующих акустическую коммуникацию и эхолокацию. На протяжении многих лет в водах Арктики животные издают звуки высокой частоты (от 20 до 250 кГц), которые служат им ориентиром, выявляя препятствия с помощью эхолокации, и способствуют обнаружению пищи и нахождению своих сородичей. Однако с приходом индустриализации в регион Арктическое пространство начало наполняться резкими режущими звуками, которые негативно влияют на жизнь морских обитателей и «загрязняют» окружающую среду. Данные звуки являются низкочастотными (от 10 кГц до 1 мГц), шумы производятся в районе от 200 до 400 дБ (для человека пределом является 130 дБ), и в силу огромной разницы с естественными звуками животных, они повреждают сенсорные рецепторы и приводят к хроническим

нарушениям либо же полной утрате слуха¹³.

Согласно недавним исследованиям, уровень подводного шума удвоился всего за шесть лет, что вызывает серьезную озабоченность, так как относительно нетронутый звуковой ландшафт Арктики в сочетании с уникальными характеристиками распространения звука позволяет морским животным обнаруживать суда на больших расстояниях, и они с большей вероятностью реагируют на отдельные суда, чем животные в других регионах¹⁴.

Инвазии чужеродных видов представляют одну из наиболее серьезных угроз для биоразнообразия в современном мире, и этот вопрос особенно актуален для Арктики с ее чувствительными к любому воздействию экосистемами. Морская среда Арктики характеризуется особой уязвимостью перед биологическими загрязнениями, и с течением времени актуальность данной проблемы будет только возрастать. Научное сообщество относит инвазивные виды к одной из четырех основных угроз для мирового океана наряду с загрязнением морской среды с суши, чрезмерной эксплуатацией морских биологических ресурсов и изменением морских экологических систем.

Среди основных источников **биологического загрязнения** особое место занимают балластные воды судов. В настоящее время по всему миру перевозится приблизительно 10 миллиардов тонн балластных вод в год, вместе с которыми каждый час перемещается огромное количество разнообразных водных растений, микробов и животных. Исторические наблюдения показывают, что еще в 1903 году одноклеточная водоросль *Odontella sinensis* была обнаружена в проливе Скагеррак, а затем в 1909 году зарегистрирована у Плимута в Англии¹⁵. Этот организм стал одним из первых зафиксированных случаев водных инвазий. Биообрастание судов также является значимым

¹³ Степанова Д.В. Шумовое загрязнение и его влияние на морских обитателей Арктического региона URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shumovoe-zagryaznenie-i-ego-vliyanie-na-morskih-obitateley-arkticheskogo-regiona>

¹⁴ Mannherz F., Knol-Kauffman M., Rafaly V., Ahonen H., Kruke B.I. Noise pollution from Arctic expedition cruise vessels: understanding causes, consequences and governance options // npj Ocean Sustainability. 2024. Vol. 3. № 51. P. 1-11.

¹⁵ Куделькин Н.С. Правовая охрана морской среды Арктики от загрязнения чужеродными видами // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). 2019; (1): 110-119. <https://doi.org/10.17803/2311-5998.2019.53.1.110-119>. С. 110-112.

источником переноса чужеродных видов. Кроме экологических угроз, оно приводит к увеличению расхода топлива и эмиссии парниковых газов до 50% по сравнению с гладким корпусом судна.

Преднамеренная интродукция видов человеком также представляет серьезную проблему. Ярким примером служит камчатский краб *Paralithodes camtschaticus*, интродуцированный в Баренцево море с Дальнего Востока в 1960-х годах для повышения биопродуктивности северных морей. К 2022 году его численность в российских водах достигла примерно 100 миллионов особей¹⁶. Этот чужеродный вид представляет потенциальную опасность для местной экосистемы, истребляя местные виды, усиливая конкуренцию за ресурсы и изменяя структуру донных сообществ.

Проникновение чужеродных видов в несвойственную для них среду обычно происходит незаметно, а последствия могут проявиться спустя длительное время, когда их масштабы уже достигнут уровня экологической катастрофы. Устранение таких последствий чрезвычайно сложно или вовсе невозможно.

Пространство за пределами континентального шельфа, как естественного продолжения материковой части суши, характеризуются меньшим биоразнообразием, чем прибрежная зона. В таких районах разнообразие биотопов (участок суши или водоёма с относительно однородными для обитающих там организмов условиями) более скудное, что снижает шансы инвазивных организмов освоиться. Чем больше расстояние до берега, тем выше вероятность, что чужеродные организмы будут уничтожены местными обитателями.

Состояние изученности проблемы влияния морского судоходства на арктическую природную среду характеризуется неравномерностью в различных аспектах. Менее изученными остаются вопросы комплексного

¹⁶ Как камчатский краб покорил Баренцево море и стал угрозой экосистеме 04.04.2025 URL: https://www.ixbt.com/live/flora_and_fauna/kak-kamchatskiy-krab-pokoril-barencevo-more-i-stal-ugrozoy-ekosisteme.html

влияния судоходства на биоразнообразие, в особенности на низших трофических уровнях экосистем (позиции организмов в пищевых цепях). Международное сотрудничество в области изучения и регулирования воздействия судоходства на арктическую природную среду развивается в рамках Арктического совета. Рабочая группа по защите арктической морской среды (РАМЕ) реализует проект «Арктическое морское судоходство», направленный на комплексную оценку экологических последствий судоходства в Арктике.

Важно отметить, что последние исследования в области охраны морских экосистем Арктики демонстрируют переход к более систематическому подходу. Примером такой инициативы является проект ArcNet, представляющий собой сеть приоритетных участков для сохранения (Priority Areas for Conservation, PACs), охватывающую около 5,9 миллионов км² и включающую 83 выделенных участка, что составляет примерно 31% площади Северного Ледовитого океана и прилегающих морей. Сетевой дизайн ArcNet основан на анализе 818 пространственных слоев данных, систематически отобранных для представления различных аспектов арктического биоразнообразия. Такой масштабный подход к планированию охраняемых территорий на уровне всего океана является беспрецедентным и может служить основой для разработки более детальных схем геоэкологического районирования и оценки воздействия судоходства¹⁷.

Анализ актуального состояния изученности проблемы влияния морского судоходства на арктическую природную среду показывает необходимость разработки интегрированного подхода оценки, учитывающего специфику арктических условий, совокупность всех видов воздействия и комплексность ответных реакций экосистем.

¹⁷ James T.D., Sommerkorn M., Solovyev B., et al. Whole-ocean network design and implementation pathway for Arctic marine conservation // npj Ocean Sustainability. 2024. Vol. 3. № 25. P. 1-13. <https://doi.org/10.1038/s44183-024-00047-9>

1.3. Методика обоснования выбора судоходных маршрутов и морских судов на основе геоэкологической оценки влияния на арктическую природную среду при морском судоходстве

Рациональный выбор судоходных маршрутов и типов используемых морских судов представляет собой ключевой фактор минимизации негативного воздействия судоходства на арктическую природную среду. Методологический инструментарий такого выбора должен базироваться на комплексной геоэкологической оценке, интегрирующей физико-географические, гидрометеорологические, навигационные и экологические параметры в единую систему принятия решений. В основе данной методики должна лежать комплексная геоэкологическая оценка, обеспечивающая оптимальный баланс между экономической эффективностью морских перевозок и минимизацией негативного воздействия на уязвимые арктические экосистемы.

Методологический аппарат выбора оптимальных судоходных маршрутов в акватории Северного морского пути представляет собой комплексный инструментарий, включающий многокритериальный анализ с применением географических информационных систем (ГИС) и морских идентификационных систем (АИС). В исследовании Е.О. Ольховика, А.Б. Афолина и А.Л. Тезикова, предлагается информационная модель транспортных потоков Северного морского пути предназначена для контроля за судами и получения достоверной оперативной информации, необходимой для снижения навигационных и экологических рисков в полярных водах.

Информационной основой ГИС служат ежедневные данные о судах и их координатах, поступающие в Администрацию СМП. Как отмечается в исследовании, «в качестве дополнительной информации используется название судна, его ледовый класс и осадка. Таким образом, в базе данных (БД) ГИС формируются ежедневные слои, показывающие местонахождения судов». Сопоставление этих слоёв позволяет выявлять основные транспортные потоки и оценивать их параметры, включая плотность, скорость и интенсивность.

Функциональные возможности разработанной ГИС позволяют формировать различные запросы к базе данных по значениям параметров движения отдельных групп судов. По запросу на фиксированную дату можно получить значение плотности потока на выбранном участке акватории, данные о количестве судов, которые не имели хода, количестве ледоколов, судов с заданной осадкой и другую информацию. Авторы исследования отмечают, что «при необходимости на экране можно проследить маршруты движения одного судна, группы судов или всех судов, относящиеся к заданному интервалу времени».

Статистический анализ, проведенный с использованием данной ГИС, позволил авторам исследования выявить важные закономерности в распределении судов в акватории СМП. Например, было установлено, что «с 2013 по 2017 г. произошло перераспределение судовых потоков, что повлекло за собой существенный рост плотности и интенсивности судоходства в Карском море и общее снижение показателей в восточной части акватории СМП». Такие данные имеют важное значение для планирования маршрутов и оценки рисков¹⁸.

При выборе оптимальных судоходных маршрутов, руководствуясь результатами данного исследования, предполагается учитывать следующие геоэкологические критерии:

- удаленность от особо охраняемых природных территорий и акваторий;
- степень уязвимости прибрежных экосистем на прилегающих участках маршрута;
- гидрографическую изученность и глубоководность маршрута для минимизации рисков повреждения корпуса судна;

¹⁸ Ольховик Е.О., Афонин А.Б., Тезиков А.Л. Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-model-morskih-transportnyh-potokov-severnogo-morskogo-puti>

– ледовые условия и возможность снижения объемов ледокольной проводки для уменьшения физического воздействия на ледовый покров.

Анализ мелководных районов арктических морей приобретает особое значение не только для безопасности судоходства, но и для минимизации воздействия на хрупкую экосистему Арктики. Согласно исследованию Андреевой Е.В., Исауловой К.Я., Тезикова А.Л., большая часть акваторий арктических морей имеет глубины менее 200 метров, что требует комплексного подхода к определению оптимальных маршрутов. Методика обоснования выбора судоходных маршрутов должна учитывать, как навигационную безопасность, так и геоэкологические аспекты. Исследование предлагает подход, который может быть расширен для включения экологических критериев. Высокоширотные маршруты СМП с различными характеристиками морского дна имеют разный уровень допустимых уклонов. Например, на участках с глубинами 44-50 метров допустимое уклонение может превышать 50 км, тогда как в районах с глубинами 20-27 метров оно составляет лишь 2,5 км. Это имеет прямое отношение к геоэкологической безопасности: более узкий коридор движения в мелководных районах снижает риск посадки на мель и последующего экологического ущерба¹⁹.

Исследование Liu et al. (2022) предоставляет количественные данные о физических механизмах, влияющих на образование и устойчивость припайного льда в арктических морях. Авторы установили, что для минимизации физического воздействия судоходства на структуру ледяного покрова необходимо учитывать не только глубину акватории, но и геометрию береговой линии при выборе оптимальных маршрутов²⁰.

В части выбора морских судов для арктического плавания

¹⁹ Андреева Е.В., Исаулова К.Я., Тезиков А.Л. Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-vliyaniya-gidrograficheskoy-izuchennosti-na-bezopasnost-plavaniya-kрупnotonnazhnyh-sudov-v-akvatorii-severnogo-morskogo-puti>

²⁰ Liu, Y., Losch, M., Hutter, N., & Mu, L. (2022). A new parameterization of coastal drag to simulate landfast ice in deep marginal seas in the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2022JC018413. <https://doi.org/10.1029/2022JC018413>

методологический подход основывается на экологической безопасности судовых технических систем и соответствии требованиям Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс), вступившего в силу с 1 января 2017 года. Кодекс устанавливает обязательные требования к конструкции, оборудованию и эксплуатации судов в полярных водах, а также содержит положения по предотвращению загрязнения, выходящие за рамки требований конвенции МАРПОЛ 73/78²¹. Данный подход дополняется исследованиями В.Н. Никитиной и коллег, которые подчеркивают, что для обеспечения безопасности судоходства в полярных водах необходимо соблюдение требований Полярного кодекса, касающихся конструкции судов с учетом обледенения, прочности винтов и рулевого устройства, а также навигационных средств и средств связи²².

Методика оценки судов включает анализ следующих параметров: ледовый класс судна, конструктивные особенности корпуса и гребных винтов, автономность плавания по условиям экологической безопасности, наличие и эффективность систем очистки сточных вод, выбросов в атмосферу и балластных вод. Особое внимание уделяется типу используемого судового топлива, учитывая, что в рамках Полярного кодекса содержатся рекомендации воздерживаться от перевозки и использования мазута в арктических водах²³.

Наглядно представить средний уровень загрязнения можно с помощью следующей диаграммы:

²¹ Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс) URL: <https://docs.cntd.ru/document/420376046>

²² Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г., Панкина Е.Н. Некоторые аспекты обеспечения безопасности судоходства в полярных водах URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-obespecheniya-bezopasnosti-sudohodstva-v-polyarnyh-vodah>

²³ Подкомитет ИМО. Подкомитет ИМО согласовал запрет на использование тяжелого мазута в арктических водах с 2024 г. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/2234>

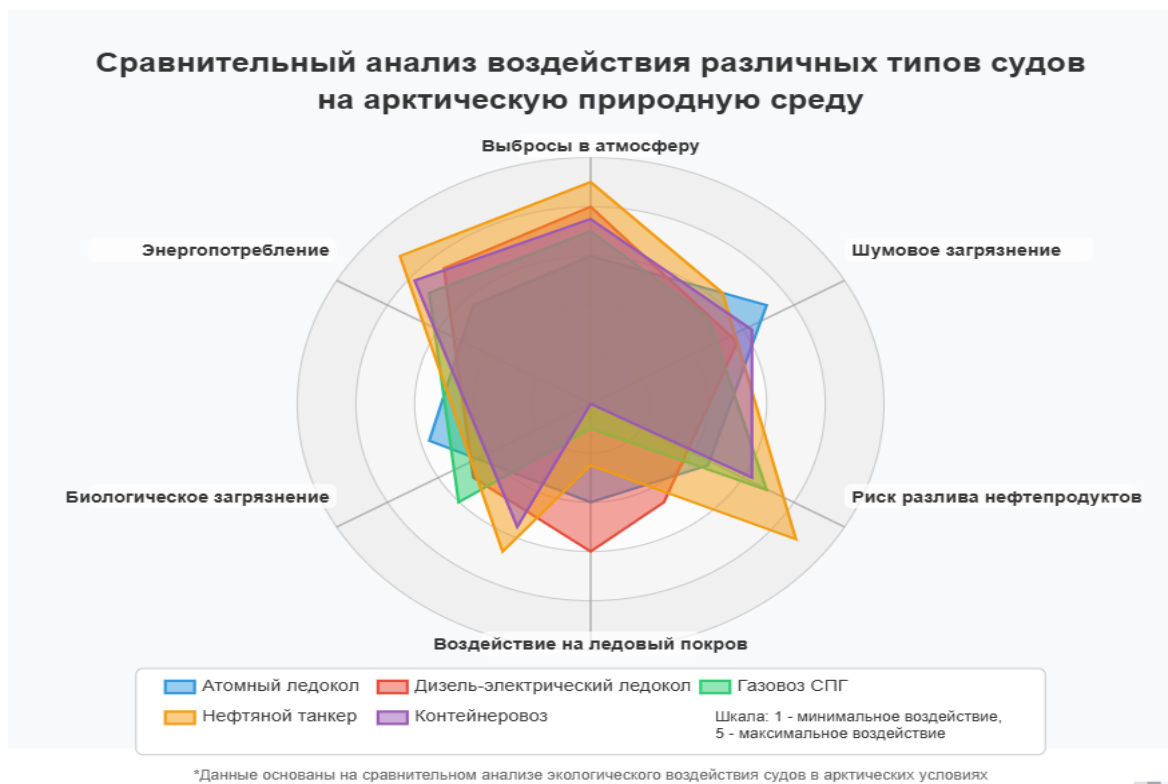


Рисунок 1.2. Сравнительная диаграмма воздействий различных типов судов

На радарной диаграмме представлена относительная оценка пяти типов судов (атомный ледокол, дизель-электрический ледокол, газовоз СПГ, нефтяной танкер и контейнеровоз) по шести ключевым параметрам экологического воздействия. Атомные ледоколы демонстрируют минимальные выбросы в атмосферу при максимальном шумовом загрязнении и значительном воздействии на ледяной покров. Дизель-электрические ледоколы характеризуются высокими показателями выбросов и энергопотребления. Нефтяные танкеры закономерно имеют наивысший риск разливов нефтепродуктов и значительное биологическое загрязнение, связанное с балластными водами. Контейнеровозы показывают высокие значения по большинству параметров, особенно по энергопотреблению и выбросам. Газовозы СПГ демонстрируют более сбалансированный профиль воздействия. Представленная визуализация подтверждает необходимость применения методики многокритериальной оптимизации при выборе типов судов для

арктического плавания, учитывающей комплексное воздействие на уязвимые экосистемы региона. Данные основаны на усредненных сравнительных оценках экологического воздействия судов в арктических условиях.

Следует отметить, что исследования показывают, что ледоколы являются исключительным источником шума в Арктике. Согласно измерениям, проведенным для научно-исследовательского ледокола в Северном Ледовитом океане, при маневрах отступления и таранения из-за кавитации при работе гребных винтов на заднем ходу или в противоположных направлениях, уровни шума достигают 200 дБ отн. 1 мПа в диапазоне частот от 10 до 100 Гц. При этом наблюдается общее увеличение шумового спектра в диапазоне от 20 до 2000 Гц. Эрбе и Фармер идентифицировали пузырьковую систему и кавитацию гребного винта при большой нагрузке как два основных источника шума ледокола, с медианными уровнями источника 192 дБ отн. 1 мПа между 100 Гц–20 кГц для пузырьковой системы и 197 дБ отн. 1 мПа между 100 Гц–22 кГц для кавитации гребного винта. При этом самый громкий шум кавитации составлял 205 дБ отн. 1 мПа во время неудачного таранения²⁴.

Для судоходства в сложных климатических условиях несомненно важно учитывать такой параметр как автономность плавания судов, представляющий собой комплексный параметр, определяющий период, в течение которого судно может эксплуатироваться без необходимости захода в порт для сдачи накопленных загрязнений. Данный показатель определяется по трем основным видам загрязнений, образующихся в процессе эксплуатации судна: нефтесодержащие воды, сточные воды и мусор. К нефтесодержащим водам относятся льяльные воды машинных отделений, балластные воды, промывочные воды грузовых танков нефтеналивных судов, а также отработанные масла и другие нефтепродукты, интенсивность образования которых зависит от типа, размера и технического состояния судна. Сточные

²⁴ Mannherz F., Knol-Kauffman M., Rafaly V., Ahonen H., Kruke B.I. Noise pollution from Arctic expedition cruise vessels: understanding causes, consequences and governance options // npj Ocean Sustainability. 2024. Vol. 3. № 51. P. 1-11.

воды образуются в результате жизнедеятельности экипажа и пассажиров, включая «черные воды» (фекальные стоки) и «серые воды» (от душевых, камбузов, прачечных), причем объем их генерации напрямую зависит от численности людей на борту. Мусор включает различные категории твердых отходов: пищевые отходы, бытовой мусор, эксплуатационные отходы, остатки груза, пластик, а интенсивность его образования варьируется в зависимости от типа судна и характера перевозимых грузов.

Расчет автономности производится на основе комплексной методики, учитывающей несколько взаимосвязанных факторов. Во-первых, учитываются объемы накопительных цистерн и контейнеров для хранения различных типов загрязнений, которые определяют физическую возможность судна сохранять загрязнения на борту. Во-вторых, важнейшую роль играет производительность бортовых систем очистки, таких как сепараторы льяльных вод и установки очистки сточных вод, позволяющие обрабатывать часть загрязнений непосредственно на судне. В-третьих, принимается во внимание интенсивность образования загрязнений в различных эксплуатационных режимах, зависящая от множества факторов, включая мощность главных двигателей, численность экипажа и условия эксплуатации²⁵.

В контексте методики обоснования выбора судоходных маршрутов в Арктике показатель автономности по экологической безопасности приобретает особую значимость в связи с повышенной уязвимостью арктических экосистем. Низкая температура воды и ледовый режим существенно замедляют процессы естественной деградации загрязняющих веществ, особенно нефтяных углеводородов, что делает последствия загрязнений гораздо более долгосрочными и серьезными по сравнению с другими морскими акваториями. Это обстоятельство повышает требования к эффективности судовых систем очистки и обуславливает необходимость более тщательного планирования маршрутов с учетом экологических факторов.

²⁵ Определение автономности плавания судов по условиям экологической безопасности URL: <http://www.ecolognatural.ru/enats-58-1.html>

Как справедливо отмечает в своих исследованиях А.Л. Тезиков, поиск оптимальных судоходных маршрутов в Арктике должен осуществляться среди множества угроз и проблем, с применением цифровых технологий для исследования судовых потоков²⁶.

Ограниченная портовая инфраструктура Арктического региона представляет дополнительную сложность при планировании судоходства. Недостаточное количество портов и приемных сооружений для судовых загрязнений делает критически важным правильный расчет автономности для предотвращения аварийных и незаконных сбросов. Длительные переходы между портами, имеющими необходимую инфраструктуру для приема судовых отходов, требуют либо увеличенных объемов накопительных емкостей, либо высокоэффективных систем очистки на борту. Суровые климатические условия Арктики – экстремальные температуры и тяжелая ледовая обстановка – могут негативно влиять на работоспособность очистного оборудования и увеличивать риск экологических инцидентов, что также должно учитываться при расчете автономности.

Таким образом, расчет автономности плавания по экологической безопасности позволяет оптимизировать логистические схемы арктического судоходства, выбирать наиболее экологически безопасные маршруты с учетом расположения портов, имеющих приемные сооружения, и предотвращать потенциальные сбросы загрязняющих веществ в уязвимую арктическую природную среду. Данный подход не только соответствует требованиям Полярного кодекса Международной морской организации, но и обеспечивает устойчивое развитие морских перевозок в Арктике, балансируя экономические интересы судоходных компаний с необходимостью сохранения уникальных арктических экосистем. Интеграция показателя автономности плавания по экологической безопасности в методику обоснования выбора судоходных маршрутов позволяет реализовать принцип предосторожности при

²⁶ Тезиков А.Л. Исследование закономерностей формирования судоходных маршрутов на современном этапе развития Северного морского пути URL: <https://rosacademtrans.ru/sevmorput/>

планировании морских операций в этом чувствительном регионе и минимизировать антропогенное воздействие, связанное с развитием судоходства в полярных водах.

Планирование безопасных маршрутов в арктических водах требует точного прогнозирования ледовой обстановки. Исследование Liu et al. (2021) демонстрирует, что прогностическая способность современных моделей глубокого обучения достигает 9 дней для ежедневного прогноза концентрации морского льда (SIC). Авторы отмечают, что модели, использующие алгоритм PredRNN++ с функцией потерь на основе градиента (Grad-loss), демонстрируют наименьшую среднюю абсолютную ошибку (MAE) при прогнозировании и наиболее медленное нарастание погрешности с течением времени. Это имеет важное значение для оптимизации планирования траекторий судов, поскольку более длительные и точные прогнозы позволяют охватить более обширные районы при планировании маршрутов и снижают вероятность попадания в локальные оптимумы при неблагоприятной ледовой обстановке. Интеграция таких моделей прогнозирования в системы навигации способствует повышению безопасности судоходства и минимизации рисков, связанных с ледовыми условиями в арктических маршрутах²⁷.

Суммируя вышесказанное, можно отметить, что интегрированный подход к выбору судоходных маршрутов и судов предполагает применение методов многокритериальной оптимизации, включающих как количественные показатели (расход топлива, время в пути, стоимость ледокольной проводки), так и качественные критерии экологической безопасности. При этом целесообразно использование весовых коэффициентов, отражающих приоритетность экологических аспектов при принятии решений.

²⁷ Liu Q., Zhang R., Wang Y., Yan H., Hong M. Short-Term Daily Prediction of Sea Ice Concentration Based on Deep Learning of Gradient Loss Function // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. Article 736429. DOI: 10.3389/fmars.2021.736429

1.4. Методические положения прогноза изменений в компонентах природной среды на основании геоэкологического районирования арктических морей

По мнению многих ведущих исследователей арктической экологии, геоэкологическое районирование арктических морей представляет собой научно-методическую основу для прогнозирования изменений в компонентах природной среды под воздействием морского судоходства. Согласно распространенной в научном сообществе точке зрения, **сущность районирования** заключается в выделении относительно однородных по природным условиям и характеру реакции на антропогенное воздействие акваторий, что предположительно позволяет дифференцировать подходы к оценке и прогнозу последствий судоходства.

Как отмечают специалисты в области арктических исследований, современная методология геоэкологического районирования арктических морей основывается на интеграции различных параметров природной среды с учетом их взаимосвязи и взаимозависимости. Согласно исследованиям, проведенным в последние годы, можно выделить несколько ключевых критериев для районирования. По мнению Вихмы Т., наиболее существенными являются: климатические условия, ледовый режим, гидрологические и гидрохимические характеристики, особенности донных отложений, биологическое разнообразие и чувствительность экосистем к внешним воздействиям²⁸.

Как подчеркивают Макарова И. и соавторы в своем исследовании, в контексте прогнозирования изменений, связанных с судоходством, особое значение приобретает выделение районов с различной степенью уязвимости к воздействию морского транспорта. Авторы подчеркивают, что основным загрязнителем атмосферного воздуха является черный углерод (сажа),

²⁸ Vihma T. Effects of Arctic Sea Ice Decline on Weather and Climate: A Review URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9284-0>

выделяемый при использовании морского дизельного топлива, который для арктических территорий приводит не только к увеличению заболеваний населения, но и к загрязнению снега и льда. Согласно их методологии, дифференцированный подход к природоохранным мерам позволит снизить выбросы оксидов азота и черного углерода на 60% и 15% соответственно при использовании эмульсионного топлива с содержанием 16% воды²⁹.

На основании анализа современных научных работ можно сделать вывод, что методологический аппарат геоэкологического районирования арктических морей включает ГИС-технологии, дистанционное зондирование и математическое моделирование³⁰. По мнению Ларсена Л. и соавторов, эти инструменты позволяют не только классифицировать акватории по степени их уязвимости к воздействию судоходства, но и прогнозировать возможные изменения в экосистемах при различных сценариях развития морских перевозок³¹. Хотя стоит признать, что точность таких прогнозов во многом зависит от качества исходных данных и адекватности используемых моделей, однако опыт моделирования «арктического путешествия», предложенный и рассмотренный в исследовании, подтверждает апробированную эффективность подобных инструментов.

Результаты недавних исследований, в части эффективности Полярного кодекса, показывают, что интенсивность арктического судоходства ежегодно увеличивается примерно на 7%, при этом значительно растет количество судов, эксплуатируемых в экстремальных погодных и ледовых условиях³². Можно констатировать, что эта тенденция действительно диктует необходимость

²⁹ Makarova I., Makarov D., Buyvol P., Barinov A., Gubacheva L., Mukhametdinov E., Mavrin V. Arctic Development in Connection with the Northern Sea Route: A Review of Ecological Risks and Ways to Avoid Them URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10101415>

³⁰ Ольховик Е.О., Афонин А.Б., Тезиков А.Л. Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-model-morskih-transportnyh-potokov-severnogo-morskogo-puti>

³¹ Larsen L.H., Kvamstad-Lervold B., Sagerup K., Gribkovskaia V., Bambulyak A., Rautio R., Berg T.E. Technological and environmental challenges of Arctic shipping—a case study of a fictional voyage in the Arctic URL: <https://doi.org/10.3402/polar.v35.27977>

³² Müller M., Knol-Kauffman M., Jeuring J. et al. Arctic shipping trends during hazardous weather and sea-ice conditions and the Polar Code's effectiveness URL: <https://doi.org/10.1038/s44183-023-00021-x>

разработки более детальных и точных методов геоэкологического районирования, учитывающих не только пространственную, но и временную динамику факторов воздействия.

Современная методика прогнозирования изменений в природной среде арктических морей под влиянием судоходства должна учитывать комплексный характер воздействия и включать анализ исходного состояния компонентов природной среды, оценку интенсивности и характера воздействия судоходства, моделирование реакции экосистем на воздействие, разработку прогнозных сценариев изменений и системы индикаторов для мониторинга прогнозируемых изменений. Представляется, что такой всеобъемлющий подход имеет серьезные основания, но может быть затруднителен в практической реализации из-за недостатка исходных данных о состоянии экосистем в отдаленных районах Арктики.

Согласно исследованию Скрин Дж. и Симмондса И., на основе данных о существующих и прогнозируемых судопотоках, технических характеристиках используемых судов и режимах их эксплуатации следует проводить количественную оценку предполагаемых нагрузок на компоненты природной среды. Их исследования показывают, что при глобальном потеплении на 2-3°C судоходство в арктических водах станет значительно интенсивнее, что увеличит антропогенную нагрузку на экосистемы региона ³³. Однако необходимо учитывать, что прогнозы изменения климата имеют определенную степень неопределенности, что может существенно влиять на долгосрочные оценки.

Для корректного прогнозирования изменений в компонентах природной среды Арктики необходимо учитывать **фундаментальные климатические процессы**, происходящие в регионе. Согласно исследованиям Цао, Бянь и Чжао (2019), сокращение арктического морского льда существенно усилило взаимодействие между морским льдом и атмосферой в арктическом

³³ Screen J.A., Simmonds I. Declining summer snowfall in the Arctic: causes, impacts and feedbacks URL: <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1105-2>

пограничном слое, особенно увеличив поток тепла от моря к атмосфере в осенний период. Анализ данных, полученных во время шести китайских арктических экспедиций, позволил выявить ключевые параметры радиационного и теплового баланса в центральной части Арктики. Исследователи выявили значительную корреляцию между потоком тепла и протяженностью морского льда в Арктике³⁴. Представленные в исследовании данные продемонстрировали, сокращение морского льда приводит к изменениям в тепловом потоке, что в свою очередь вызывает нагревание атмосферы и повышение температуры атмосферного пограничного слоя над Арктикой³⁵.

Количественное моделирование, проведенное Liu et al. (2022), демонстрирует значимые региональные различия в толщине припайного льда в различных морях Арктики, что необходимо учитывать при геоэкологическом районировании. По результатам моделирования, максимальная средняя толщина припайного льда составляет около 1 м в Карском и Бофоровом морях, 1,5 м в море Лаптевых и достигает 2 м в Восточно-Сибирском море. При сравнении моделей с параметризацией припайного льда и без неё, было выявлено, что добавление специальных параметризаций бокового трения приводит к изменению общего объема морского льда в Арктике на 1,9%, что указывает на значимость физических процессов, связанных с припайным льдом, для всего арктического региона. Эти региональные различия следует учитывать при разработке методических положений по прогнозированию изменений в компонентах природной среды в различных геоэкологических районах арктических морей³⁶.

При сопоставлении результатов исследований Цао и соавторов с данными

³⁴ Коэффициент корреляции составил 0,61 (при размере выборки в 35 наблюдений) и достиг 99% уровня достоверности. Кроме того, была обнаружена тесная связь между потоком тепла и температурой в Арктике с коэффициентом корреляции 0,55 при том же уровне достоверности.

³⁵ Cao Y., Bian L., Zhao J. Impacts of Changes in Sea Ice and Heat Flux on Arctic Warming URL: <https://doi.org/10.4236/acs.2019.91006>

³⁶ Liu, Y., Losch, M., Hutter, N., & Mu, L. (2022). A new parameterization of coastal drag to simulate landfast ice in deep marginal seas in the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2022JC018413. <https://doi.org/10.1029/2022JC018413>

геоэкологического районирования арктических морей становится очевидным, что эти процессы имеют прямое отношение к прогнозированию последствий судоходства в Арктике. Увеличение интенсивности судоходства, особенно в периоды с экстремальными погодными и ледовыми условиями, может усилить воздействие на и без того хрупкий тепловой баланс арктических экосистем. В контексте разработки методических положений прогноза изменений в компонентах природной среды необходимо интегрировать данные о радиационном и тепловом балансе арктических морей в модели, учитывающие антропогенное воздействие судоходства. Данное позволит более точно оценить кумулятивный эффект природных и антропогенных факторов на экосистемы Арктики.

Многие эксперты в области безопасности арктического судоходства считают, что особое место в системе прогнозирования изменений компонентов природной среды занимает оценка рисков и последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Как отмечается в одном из отчетов ПАО «НК «Роснефть» от 2014 года, учитывая высокую уязвимость арктических экосистем и ограниченные возможности для ликвидации разливов в сложных ледовых условиях, данный аспект требует детальной проработки³⁷. С этой позицией трудно не согласиться, учитывая катастрофические последствия, которые могут иметь такие разливы для хрупких арктических экосистем.

Согласно методологическим подходам, обсуждаемым в исследованиях по оценке ущерба природным ресурсам, методика прогнозирования последствий разливов нефти и нефтепродуктов в условиях арктических морей должна включать моделирование распространения разливов с учетом ледовой обстановки, оценку воздействия на компоненты морских экосистем и разработку сценариев ликвидации разливов. Можно предположить, что такой комплексный подход способен обеспечить адекватную оценку рисков, хотя его реализация требует значительных ресурсов и междисциплинарного

³⁷ Rosneft and ExxonMobil have discovered oil and have started production in commercial quantities in the Kara Sea
URL: <https://www.rosneft.com/press/releases/item/153643/>

сотрудничества.

Важным компонентом системы прогнозирования последствий разливов химических веществ в арктических условиях является быстрая оценка масштабов распространения загрязнителя. На основе эмпирических данных по разливам акрилонитрила, Wang & Meng (2022) предлагают методику прогнозирования зон распространения загрязнителя в морской воде. Согласно их исследованию, при разливе 1 тонны акрилонитрила концентрация 1 мг/л (потенциально опасная для некоторых морских организмов) может распространиться на расстояние до 500 м от источника, а концентрация 0,1 мг/л — до 5000 м. При разливе 10 тонн эти расстояния увеличиваются до 1000 м и 10000 м соответственно, при разливе 100 тонн — до 2000 м и 20000 м, а при катастрофическом разливе 1000 тонн — до 4000 м и 40000 м. Учитывая специфические гидрологические условия арктических морей — наличие ледового покрова, низкие температуры и стратифицированность водных масс — эти значения могут существенно отличаться, что требует адаптации существующих моделей к арктическим условиям. Данный подход позволяет не только оперативно оценить масштаб потенциального воздействия на морские экосистемы, но и определить приоритетные зоны для проведения мониторинга и защитных мероприятий³⁸.

Согласно исследованиям, представленным в работе Губайдуллина М., современная модель OSCAR (The Oil Spill Contingency And Response model / Модель ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с разливами нефти, и реагирования на них), разработанная норвежской компанией SINTEF, позволяет моделировать и прогнозировать поведение нефти при разливах в ледовых условиях Арктики. Как отмечается в исследовании, при разработке плана действий по предотвращению и ликвидации разлива может быть выбран сценарий, основанный на 95-процентной оценке максимального загрязнения нефтью береговой линии. Исследования показывают, что методы

³⁸ Wang X. and Meng F. (2022) Emergency responses to acrylonitrile maritime spills from the perspective of marine ecological protection. *Frontiers in Marine Science*. 9:996263. DOI: 10.3389/fmars.2022.996263

механического сбора нефти могут быть достаточно эффективными при разливе в условиях сплошного ледяного покрова, а также в мелкобитом льду. При планировании действий в случае возможных аварий рассматриваются различные альтернативные стратегии возможного реагирования на разлив с учетом баланса в них экономических показателей и экологических преимуществ³⁹.

Для моделирования распространения опасных веществ при разливах в морской среде могут быть использованы различные программные комплексы. Wang & Meng (2022) описывают применение таких инструментов как Программу для моделирования распространения опасных веществ, связанных с аварийными выбросами⁴⁰ и Программу для прогнозирования распространения инфекционных заболеваний, основанная на алгоритмах машинного обучения для прогнозирования распространения веществ в водной и воздушной среде. Например, при моделировании разлива акрилонитрила объемом около 2273 л. через отверстие диаметром 152 мм в резервуаре, расположенном на судне, система ALOHA прогнозирует, что зона потенциально опасной концентрации в воздухе (оранжевая зона опасности по классификации Emergency Response Planning Guidelines, ERPG-2) может распространиться на расстояние до 1196 м по направлению ветра. Наиболее опасная зона (красная зона опасности, ERPG-3) распространяется на 791 м, а зона с минимальной опасностью (желтая зона, ERPG-1) — на 2,4 км. Программа для прогнозирования распространения инфекционных заболеваний, в свою очередь, позволяет оценить потенциальное воздействие на морские организмы. Адаптация таких моделей для условий Арктики с учетом ледовой обстановки и низких температур позволит более точно прогнозировать риски для уникальных арктических экосистем⁴¹.

³⁹ Губайдуллин М. Моделирование возможных аварийных разливов и оценка применения механического сбора нефти в арктических ледовых условиях URL: <https://territoryengineering.ru/razumnoe-pririodopolzovanie/modelirovanie-vozmozhnyh-avarijnyh-razlivov-i-otsenka-primeneniya-mehanicheskogo-sbora-nefti-v-arkticheskikh-ledovyh-usloviyah/>

⁴⁰ ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) — компьютерная программа для моделирования распространения опасных веществ, связанных с аварийными выбросами.

⁴¹ Wang X. and Meng F. (2022) Emergency responses to acrylonitrile maritime spills from the perspective of marine ecological protection. *Frontiers in Marine Science*. 9:996263. DOI: 10.3389/fmars.2022.996263

Согласно рекомендациям Арктического совета, необходимо проводить анализ потенциального воздействия разливов на различные компоненты морских экосистем, включая бентосные сообщества, планктон, рыб, морских птиц и млекопитающих. По мнению экспертов Совета, особое внимание должно уделяться видам, внесенным в Красную книгу, а также видам, имеющим ключевое значение для традиционного природопользования коренных народов Севера. С этой позицией трудно не согласиться, учитывая культурную и экологическую значимость традиционных видов использования природных ресурсов для коренных народов Арктики⁴².

Анализ научных публикаций по вопросам охраны морских экосистем Арктики показывает, что геоэкологическое районирование арктических морей необходимо учитывать при планировании природоохранных мероприятий. Согласно исследованию Соловьева Б.А. и соавторов (2017), прибрежная зона имеет огромное влияние на морское биоразнообразие российской Арктики благодаря таким процессам как формирование припайного льда, полыньи и речной сток. В контексте районирования авторы не использовали единую схему биорегионализации, которая применялась в других крупномасштабных исследованиях, а вместо этого применили несколько независимых классификаций местообитаний в различных комбинациях. Важно отметить, что океанографические характеристики (водные массы и фронтальные зоны) использовались не для определения интегральных биорегионов, а для корректировки «стоимости» планировочных единиц при проведении анализа MARXAN. Такой подход позволил выделить 47 приоритетных для сохранения районов, распределенных относительно равномерно по всем российским арктическим морям и охватывающих как прибрежные, так и морские экосистемы - от небольших мелководных прибрежных лагун и фьордов до обширных территорий, покрывающих различные биотопы в зонах шельфа и

⁴² Арктический Совет провел исследование проблемы разливов нефти в Арктике URL: <https://arcticuniverse.com/ru/news/20200826/30486.html>

верхнего склона⁴³.

Таким образом, проведенный анализ методических положений прогноза изменений в компонентах природной среды на основании геоэкологического районирования арктических морей позволяет сделать ряд существенных выводов. Геоэкологическое районирование представляет собой фундаментальную научно-методическую основу для прогнозирования трансформаций природной среды под воздействием морского судоходства, интегрирующую физико-географические, гидрометеорологические и биологические параметры в единую систему пространственного анализа. Современная методология районирования базируется на комплексе взаимосвязанных критериев, включающих климатические условия, ледовый режим, гидрологические и гидрохимические характеристики, особенности донных отложений и биологическое разнообразие.

Методологический аппарат геоэкологического районирования в настоящее время существенно расширяется за счет применения ГИС-технологий, дистанционного зондирования и математического моделирования, что, согласно исследованиям Ольховика Е.О., Афолина А.Б. и Тезикова А.Л., позволяет не только классифицировать акватории по степени их уязвимости, но и прогнозировать потенциальные изменения в экосистемах при различных сценариях развития морских перевозок. Ежегодный рост интенсивности арктического судоходства, составляющий около 7%, диктует необходимость разработки более детальных и точных методов районирования, учитывающих как пространственную, так и временную динамику факторов воздействия.

Комплексная методика прогнозирования изменений в природной среде должна включать анализ исходного состояния компонентов среды, оценку интенсивности и характера воздействия судоходства, моделирование реакции экосистем и разработку прогнозных сценариев. Особую значимость

⁴³ Solovyev B.A., Spiridonov V.A., Onufrenya I., Belikov S., Chernova N., Dobrynin D., Gavrilov M.V., Glazov D., Krasnov Y., Mukharamova S., Pantyulin A., Platonov N.G., Saveliev A., Stishov M., Tertitski G. Identifying a network of priority areas for conservation in the Arctic seas: Practical lessons from Russia URL: <https://doi.org/10.1002/aqc.2806>

приобретает учет фундаментальных климатических процессов, в частности, данных о радиационном и тепловом балансе арктических морей, что позволяет более точно оценить кумулятивный эффект природных и антропогенных факторов.

Оценка рисков и последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов требует особого внимания, учитывая высокую уязвимость арктических экосистем и ограниченные возможности для ликвидации разливов в сложных ледовых условиях. Современные программные комплексы, такие как OSCAR, позволяют моделировать поведение нефти при разливах в арктических условиях и разрабатывать оптимальные стратегии реагирования.

Современные подходы к выделению приоритетных участков для сохранения в Арктике включают применение программного обеспечения Marхаn — широко используемого инструмента поддержки принятия решений по охране природы. Например, в рамках проекта ArcNet с использованием Marхаn был разработан дизайн сети морских охраняемых территорий, покрывающий участки с различным уровнем национальной юрисдикции: в исключительной экономической зоне Канады — 40,7% территории, Гренландии — 44,5%, Норвегии (включая Шпицберген и Ян-Майен) — 50,6%, России — 24,4%, США (Аляска) — 37,8%, а также 14,5% международных вод в центральной части Арктики. Такой подход обеспечивает экологическую связность и репрезентативность в масштабе всего Северного Ледовитого океана, что критически важно при геоэкологическом районировании и прогнозировании изменений в морских экосистемах⁴⁴.

При планировании природоохранных мероприятий необходимо учитывать результаты геоэкологического районирования и выделение приоритетных для сохранения участков. Как показывают исследования Соловьева Б.А. и соавторов (2017), применение комбинированных подходов к

⁴⁴ James T.D., Sommerkorn M., Solovyev B., et al. Whole-ocean network design and implementation pathway for Arctic marine conservation // npj Ocean Sustainability. 2024. Vol. 3. № 25. P. 1-13. <https://doi.org/10.1038/s44183-024-00047-9>

классификации местообитаний позволяет выделить ключевые районы, требующие особого внимания при организации судоходства в арктических морях, с учетом сохранения видов, внесенных в Красную книгу, и видов, имеющих значение для традиционного природопользования коренных народов Севера.

Выводы к главе

Теоретико-методологический анализ проблемы геоэкологической оценки влияния морского судоходства на арктическую природную среду позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Современная парадигма геоэкологической оценки воздействия судоходства на арктические экосистемы формируется в условиях неразрешенного противоречия между растущими экономическими интересами, стимулирующими интенсификацию судоходства, и доказанной высокой уязвимостью при низкой способности арктических экосистем к самовосстановлению.

2. Комплексный анализ воздействия морского судоходства на арктическую природную среду выявил следующие основные категории негативного влияния:

- химическое загрязнение (нефтепродукты, выбросы SO_x, NO_x, PM, сажа);
- физическое воздействие (нарушение ледового покрова, шумовое загрязнение);
- биологическое загрязнение (интродукция чужеродных видов через балластные воды).

Каждый из этих факторов требует отдельного учёта при оценке совокупной антропогенной нагрузки.

3. Проведенный анализ продемонстрировал, что существующие методики оценки опираются на разрозненный набор критериев: отдельно для выбора судоходных маршрутов (например, удаленность от охраняемых зон,

ледовые условия) и отдельно для оценки типов судов (ледовый класс, тип топлива, автономность). Методики не объединены в единую систему и не позволяют проводить сквозную количественную оценку, сопоставляя экономическую эффективность с многочисленными и противоречивыми экологическими рисками.

4. Проведенное исследование выявило многофакторность проблемы и конфликт между экономическими и экологическими приоритетами. Следует констатировать, что существует научная и практическая необходимость в разработке комплексного подхода, основанного на методах многокритериального анализа решений. Такая методология необходима для объективного сравнения и ранжирования альтернатив (маршрутов, судов, технологий) в условиях высокой неопределенности, характерной для Арктики.

5. Отсутствие единой методологической основы для комплексной оценки, в свою очередь, формирует запрос на создание новых, практически применимых инструментов управления и регулирования. Требуется разработка стандартизированной системы, способной формализовать и количественно выразить уровень экологической безопасности судов и маршрутов. Данное может создать основу для эффективного экологического нормирования и стимулирования перехода судоходных компаний к внедрению передовых природосберегающих технологий.

Глава 2. Экономико-географическая и геоэкологическая характеристика природно-ресурсного и транспортного потенциала российской Арктики

2.1. Природные условия Арктики через призму морского судоходства

Российская Арктика представляет собой обширную территорию, простирающуюся вдоль северного побережья Евразии и охватывающую значительную часть акватории Северного Ледовитого океана под юрисдикцией Российской Федерации. Согласно Указу Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296, к сухопутным территориям Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) относятся полностью или частично территории Республики Карелия, Республики Коми, Республики Саха (Якутия), Мурманской и Архангельской областей, Красноярского края, Ненецкого, Ямало-Ненецкого и Чукотского автономных округов⁴⁵ (визуализация представлена на Рисунке 2.1. Российская Арктика).



Рисунок 2.1. Российская Арктика

⁴⁵ О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 (с изменениями и дополнениями от 5 марта 2020 г. № 164). – URL: <https://base.garant.ru/70647984/>

Морская акватория российской Арктики включает шесть морей Северного Ледовитого океана (визуализация представлена на Рисунке 2.2. Карта морей российского сектора Арктики): Баренцево, Белое, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское. Общая площадь морских вод в пределах юрисдикции Российской Федерации в Арктике (без учета Берингова моря) составляет 3 832 719 км². Большую часть арктических шельфовых морей занимают поверхностные арктические водные массы — результат смешения пресного материкового стока и океанических вод. В современную геологическую эпоху значительная часть пространств арктических морей находится в пределах шельфа и имеет глубины менее 200 м, при этом глубины и ледовитость морей различаются. Наиболее ледовиты моря Лаптевых и Восточно-Сибирское, а значительная часть Баренцева моря остается свободной ото льда даже зимой⁴⁶.

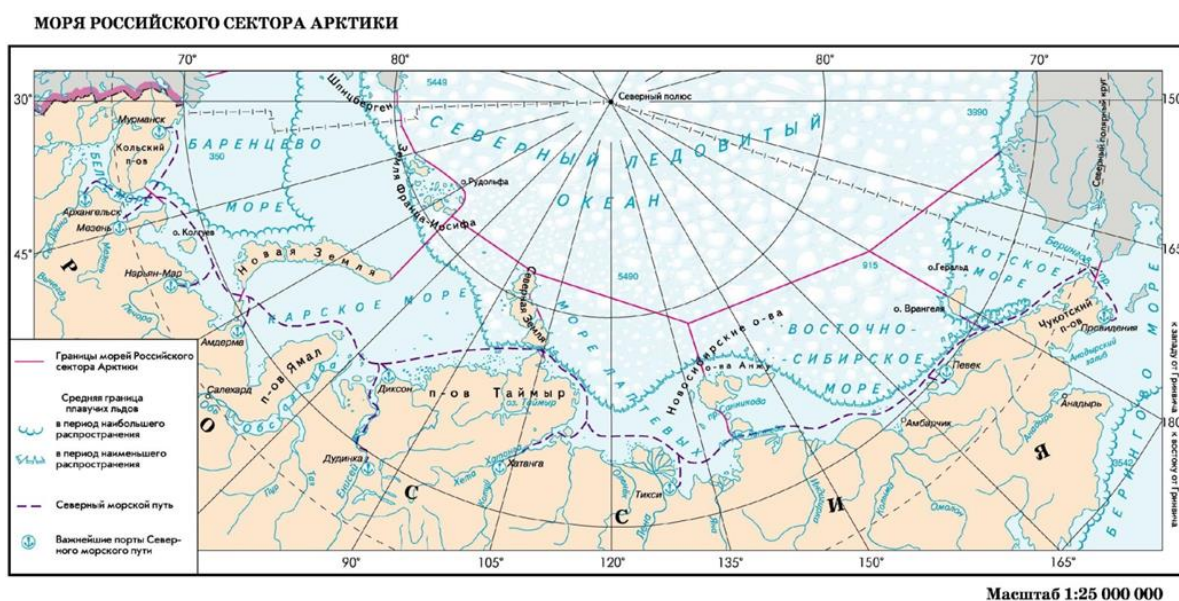


Рисунок 2.2. Карта морей российского сектора Арктики

Фауна российской Арктики, несмотря на «безраздельное царство льда и холода», отличается разнообразием и уникальностью животного мира. В Российской Арктике обитает 85 видов млекопитающих, относящихся к пяти

⁴⁶ Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. – Москва: WWF России, 2011. – 64 с. – URL: https://wsbs-msu.ru/res/DOCFOLDER120/atlas_biol_ros_arkt_web.pdf

отрядам: хищные, зайцеобразные, насекомоядные, грызуны и парнокопытные. Характерными представителями арктической фауны является белый медведь, северный олень, песец, овцебык, различные виды леммингов (копытный, гренландский, норвежский, сибирский и др.), а также многочисленные морские млекопитающие. Особую важность представляют морские млекопитающие Российской Арктики, на которой обитает более 20 видов морских животных из отрядов хищных и китообразных, являющиеся «важнейшими звеньями экосистем озер, морей и океанов»⁴⁷ (Рисунок 2.3. Морские млекопитающие. Белые медведи).

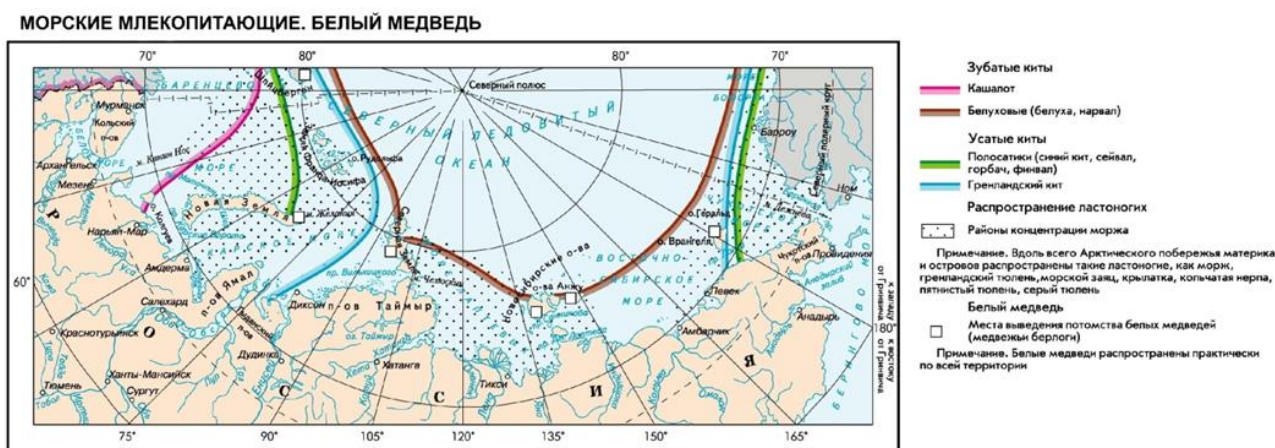


Рисунок 2.3. Морские млекопитающие. Белые медведи.

Российская Арктика является важнейшим драйвером социально-экономического развития страны. В Арктической зоне Российской Федерации находится более 300 месторождений углеводородного сырья (Рисунок 2.4). На территории ЯНАО, являющегося центром газовой добычи России и мира, добывается 80% российского газа. На территории Арктики также добывается 10% российской нефти. Вклад Арктики в ВВП России составляет 10%, что сравнимо с вкладом Арктики в экономику Финляндии, в то время как для

⁴⁷ Верещака Т. В. Карта «Животный мир Российской Арктики (млекопитающие)». Концепция и методика создания / Т. В. Верещака, О. В. Кулагина // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 294–302. – <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-3-294-302>.

Норвегии этот показатель составляет 6%, для Швеции — 5%, для Датского королевства — 2%, а для США и Канады — менее 1%⁴⁸.



Рисунок 2.4. Природные ресурсы

Также следует обратить внимание, что рекреационные ресурсы Рекреационные ресурсы Западной Арктики, несмотря на суровые климатические условия, представляют значительный интерес для развития специализированных видов туризма. Согласно исследованию Грушенко Э.Б. и Лисуновой Е.А. (2021), наибольшим туристическим потенциалом в высоких широтах обладают архипелаг Шпицберген и национальный парк «Русская Арктика» (архипелаги Земля Франца-Иосифа и Новая Земля). Авторы отмечают, что основными проблемами развития арктического туризма являются высокая стоимость туристских и транспортных услуг, неразвитость дорожно-транспортной инфраструктуры, отсутствие судов ледового класса, институциональные и природоохранные ограничения. Также отмечается, что для полноценного развития арктического туризма необходимо сочетание

⁴⁸ Арктика в цифрах: исследование от 02.09.2024. – URL: <https://roscongress.org/materials/arktika-v-tsifrah/>

морских круизов с авиатуризмом, что позволит снизить стоимость поездок и увеличить туристический поток⁴⁹.

Таким образом, природные условия российской Арктики характеризуются значительным разнообразием и специфичностью, что определяет уникальность и ценность природно-ресурсного потенциала региона. Богатство минерально-сырьевых, биологических и рекреационных ресурсов создает основу для устойчивого социально-экономического развития арктических территорий при условии рационального природопользования и сохранения хрупких арктических экосистем.

2.2. Климатические и метеорологические условия

Климатические условия Арктики определяются тремя главными особенностями:

во-первых, значительно меньшим притоком тепла от Солнца по сравнению с неполярными областями, что делает температурный режим зависимым от адвективного тепла, принесённого океаническими течениями и воздушными потоками из низких географических широт;

во-вторых, высокой чувствительностью к изменениям концентрации парниковых газов в атмосфере и количества облачности при преимущественно отрицательном радиационном балансе;

в-третьих, благоприятными условиями для вторжения заряженных солнечных и космических частиц в атмосферу вблизи геомагнитного полюса.

Изменения климата Арктики усиливаются обратными связями, среди которых особое значение имеет деградация морских льдов в Северном Ледовитом океане⁵⁰.

⁴⁹ Грушенко, Э. Б. Актуальные аспекты развития туризма в регионах Европейского Севера России и Западной Арктики / Э. Б. Грушенко, Е. А. Лисунова. – Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2021. – 110 с. – URL: https://rio.ksc.ru/data/documents/24_grushenko_all.pdf

⁵⁰ Шерстюков Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата [Электронный ресурс] // АИС. – 2016. – №24. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-usloviya-arktiki-i-novye-podhody-k-prognozu-izmeneniya-klimata>

Согласно классификации климатов Алисова Б.П., большая часть территории российской Арктики относится к арктическому и субарктическому климатическим поясам⁵¹.

Основной особенностью климата российской Арктики является резко выраженная сезонность инсоляции, связанная с полярной ночью и полярным днем. На Земле севернее 70° географической широты солнце несколько месяцев не появляется (полярная ночь) и несколько месяцев не уходит за горизонт (полярный день). Радиационный баланс в высоких широтах преимущественно отрицательный, а температурный режим определяется там, в основном, способностью атмосферы препятствовать тепловому излучению в космос пришедшего адвективного тепла⁵².

Согласно исследованию Тишкова А.А. и соавторов, общий тренд «потепления» в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) составляет до 0,8-0,9°C/10 лет, однако в отдельных регионах климатические изменения проявляются по-разному. Температурные тренды в АЗРФ имеют существенные меридиональные различия как в начале периода потепления, так и в его интенсивности. Исследователи выделяют шесть регионов с различными климатическими тенденциями: Кольско-Беломорский (тренд 0,4°C/10 лет), Большеземельский (Ненецкий) (0,5°C/10 лет), Ямало-Гыданский (0,6-0,7°C/10 лет), Таймырский (0,8-0,9°C/10 лет), Северо-Якутский (0,7°C/10 лет), Северо- и Южно-Чукотский (0,5°C/10 лет и 0,2°C/10 лет соответственно)⁵³.

Прогнозное моделирование температурных изменений в Арктике, проведенное в рамках Программы арктического мониторинга и оценки

⁵¹ Клейн С. В., Землянова М. А., Кольдибекова Ю. В., Глухих М. В. Климатические и химические факторы риска здоровью населения регионов арктической и субарктической зон: популяционный и субпопуляционный уровни [Электронный ресурс] // Анализ риска здоровью. – 2022. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-i-himicheskie-factory-riska-zdorovyu-naseleniya-regionov-arkticheskoy-i-subarkticheskoy-zon-populyatsionnyu-i>

⁵² Шерстников Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата [Электронный ресурс] // АИС. – 2016. – №24. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-usloviya-arktiki-i-novye-podhody-k-prognozu-izmeneniya-klimata>

⁵³ Tishkov A., Belonovskaya E., Vaisfeld M.A., Glazov P., Lappo E.G., Morozova O., Pokrovskaya I., Tertitski G.M., Titova S., Tsarevskaya N.G. Regional biogeographic effects of “fast” climate changes in the Russian Arctic in the 21st century [Электронный ресурс] // Arctic: Ecology and Economy. – 2020. – P. 31–44. – DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44. – URL: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/38/regionalnye-biogeograficheskie-effekty-bystryh-izmeneniy-klimata-v-rossiyskoy-ar.pdf>

показывает, что даже при полной реализации Парижского соглашения по климату ожидается значительное повышение температуры в арктическом регионе. При сценарии RCP 2.6 (близкого к миру с потеплением на +1,5°C) среднегодовое повышение температуры в Арктике к 2100 году составит около +4°C, в то время как при сценарии RCP 8.5 («бизнес как обычно») прогнозируется повышение на +10°C. Особенно критичным является зимний период (ноябрь-март), когда при наихудшем сценарии потепление может достигнуть +14°C. Эти данные свидетельствуют об «арктическом усилении» климатических изменений, когда потепление в высоких широтах происходит в 2-3 раза интенсивнее, чем в среднем по планете⁵⁴.

Важно подчеркнуть, что холодные поверхностные воды морей, особенно в арктических регионах, действуют как эффективные углеродные стоки благодаря своей повышенной способности к поглощению и растворению CO₂. Исследования показывают, что богатые питательными веществами холодные регионы демонстрируют большие возможности поглощения углерода по сравнению с более теплыми областями. Это делает полярные регионы критически важными углеродными резервуарами, накапливающими значительные объемы углерода⁵⁵. Данный факт особенно актуален в контексте современных климатических изменений и определяет особую экологическую ценность и уязвимость Арктики.

⁵⁴ Reiersen L.-O., Guardans R., Sydnes L.K. The Arctic Monitoring and Assessment Programme // Chemistry International. 2020. Vol. 42, Issue 2. P. 8-14. DOI: 10.1515/ci-2020-0202

⁵⁵ Ye, X., Zhang, B., Dawson, J., Amon, C.D., Ezechukwu, C., Igwegbe, E., Kang, Q., Song, X., Chen, B. Arctic Oceanic Carbon Cycle: A Comprehensive Review of Mechanisms, Regulations, and Models. Water 2024, 16, 1667. <https://doi.org/10.3390/w16121667>

Пункт метеонаблюдений	Выводные характеристики	Месяц												Год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
АЭ, Малые Кармакулы (остров Новая Земля)	T_{cp} , 1980—2023	-13,4	-13,5	-11,6	-8,7	-3,0	2,9	7,7	7,1	4,2	-1,2	-6,5	-10,0	-3,8
	T , °C	-14,0	-14,5	-13,7	-9,7	-3,9	2,0	7,0	6,6	3,4	-2,2	-7,8	-11,2	-4,7
	Δ , °C	0,6	1,0	2,1	1,0	0,9	0,9	0,6	0,5	0,8	1,0	1,3	1,2	0,9
АЭ, Мурманск	T_{cp} , 1980—2023	-10,1	-9,4	-5,3	-0,4	4,5	9,6	13,1	11,5	7,4	1,6	-4,4	-7,8	0,9
	T , °C	-10,1	-10,0	-6,2	-1,2	3,9	9,4	12,9	11,4	7,0	1,1	-4,2	-7,7	0,5
	Δ , °C	0,0	0,6	0,9	0,8	0,6	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	-0,2	-0,1	0,4
М-2, Паданы	T_{cp} , 1980—2023	-10,1	-9,6	-4,9	0,9	7,3	13,2	16,4	14,4	9,4	3,5	-2,6	-7,1	2,6
	T , °C	-10,8	-10,6	-6,3	0,3	6,4	12,5	15,9	13,7	8,8	2,8	-2,8	-7,7	1,9
	Δ , °C	0,7	1,0	1,4	0,6	0,9	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,2	0,6	0,7
ГМО, Турханск	T_{cp} , 1980—2023	-25,6	-22,4	-14,5	-6,7	1,8	12,2	16,6	13,2	5,9	-4,4	-18,5	-23,1	-5,4
	T , °C	-26,8	-23,6	-16,0	-8,0	0,3	10,3	16,1	12,7	5,7	-5,4	-19,4	-25,1	-6,5
	Δ , °C	1,2	1,3	1,5	1,3	1,5	1,9	0,5	0,5	0,2	1,0	0,9	2,0	1,1
АЭ, Ханты-Мансийск	T_{cp} , 1980—2023	-19,1	-16,8	-8,0	-0,4	7,9	15,3	18,3	14,6	8,0	0,6	-10,3	-16,3	-0,5
	T , °C	-19,9	-17,5	-9,9	-0,8	6,9	14,4	17,8	14,5	8,2	-0,5	-10,6	-17,3	-1,2
	Δ , °C	0,8	0,7	2,0	0,4	1,0	0,9	0,5	0,1	-0,2	1,1	0,3	1,0	0,7
ОГМС, Диксон (остров Диксон)	T_{cp} , 1980—2023	-24,2	-24,2	-21,3	-15,8	-7,0	0,8	5,4	5,8	2,2	-6,4	-17,0	-21,8	-10,3
	T , °C	-25,0	-25,1	-23,0	-16,8	-7,8	0,4	4,9	5,2	1,8	-7,1	-17,3	-22,2	-11,0
	Δ , °C	0,8	1,0	1,8	1,0	0,8	0,4	0,5	0,6	0,4	0,7	0,3	0,4	0,7

Таблица 2.4. Среднегодовые температуры воздуха в западной Арктике 1980-2023 гг.⁵⁶

На таблице 2.4. представлены подробные данные о температуре воздуха в западной Арктике за период 1980-2023 гг. В ней отображены среднемесячные и среднегодовые показатели температуры с нескольких метеорологических станций, включая АЭ Малые Кармакулы (Новая Земля), АЭ Мурманск, М-2 Паданы, ГМО Турханск, АЭ Ханты-Мансийск и ОГМС Диксон (остров Диксон).

Для каждой станции в таблице показаны:

⁵⁶ Серых И. В., Толстиков А. В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940—2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 334—349. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-334-349.

- базовые средние температуры (T_0) за период 1980-2023 гг.;
- текущие наблюдаемые температуры (T_1 , °C);
- температурные аномалии ($\Delta.T$, °C), показывающие разницу между текущими и базовыми значениями.

Ключевые наблюдения:

- все станции показывают различную степень потепления в годовом исчислении;
- наиболее значительное потепление наблюдается в зимние месяцы (особенно с января по март и с ноября по декабрь);
- летние месяцы показывают меньшие, но всё же положительные температурные аномалии;
- годовые температурные аномалии варьируются от $+0,4^\circ\text{C}$ до $+1,1^\circ\text{C}$ на разных станциях;
- на самых холодных станциях (остров Диксон и Турханск) наблюдается заметное потепление.

Визуализация данных эффективно иллюстрирует картину климатического потепления в различных местах западной Арктики за последние четыре десятилетия, с особенно выраженным потеплением в зимние месяцы.

Продолжительность навигационного периода в акватории Северного морского пути определяется ледовым режимом арктических морей. В летне-осенний навигационный период (середина июля – середина ноября) судоходство осуществляется по всей акватории СМП. Однако в зимне-весенний период судоходство в Восточном секторе прекращается. Постоянное судоходство осуществляется только в Карском море, а в восточной части только в безледный период, за исключением одиночных морских переходов судов высокого ледового класса Arc7. В проливе Санникова, согласно среднестатистическим данным, лед толщиной более 40 см присутствует в течение 9 месяцев. При этом с февраля по июнь пролив становится практически непроходимым. Данные показывают, что среднемесячная толщина льда в

проливе достигает максимума в мае (195 см) и минимума в сентябре (1 см). В акватории СМП выделяются устойчивые ледяные массивы, которые могут находиться в течение всего года. Наиболее устойчивыми являются массивы, расположенные в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море, что значительно затрудняет круглогодичную навигацию в этих районах⁵⁷.

Согласно исследованиям, приведенным в статье Кибановой О.В. и соавторов, изменения климата в Арктике происходят примерно в два раза быстрее, чем среднемировые. Площадь морского льда в Арктике в 1979–2014 гг. в сентябре сокращалась со скоростью 1,3% в год. Используя ансамбль климатических моделей CMIP5 и байесовский статистический анализ, исследователи оценили прогнозируемую продолжительность навигационного периода (ПНП) на СМП при различных сценариях антропогенного воздействия (RCP 4.5 и RCP 8.5). В исследовании рассматривались случаи, когда 80% или 90% маршрута свободны ото льда. Установлено, что ожидаемая продолжительность навигационного периода на Северном морском пути составит 2-3 месяца к середине XXI века и 3-6 месяцев к его концу. При этом, модели, которые лучше всего воспроизводят современные климатические условия, показывают меньшую чувствительность к антропогенному потеплению, в то время как модели, лучше воспроизводящие линейный тренд за последние десятилетия, демонстрируют максимальную чувствительность⁵⁸.

Более свежие исследования Чжана Ю. и соавторов (2023), основанные на моделях CMIP6, показывают еще более значительные изменения в ближайшие десятилетия. По их прогнозам, Трансполярный морской путь (ТМП) станет судоходным для судов типа Open Water (OW) и Polar Class 6 (PC6) уже до 2025 года, что на 10 лет раньше, чем предполагалось в предыдущих исследованиях.

⁵⁷ Тезиков А. Л., Ольховик Е. О. Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути [Электронный ресурс] // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2020. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-vliayuschih-na-prodolzhitelnost-navigatsii-v-akvatorii-severnogo-morskogo-puti>

⁵⁸ Кибанова О.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Хон В.Ч. Байесовские оценки изменений продолжительности навигационного периода на Северном морском пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Доклады Земных наук. 2018. Т. 481. № 1. С. 907–911. DOI: 10.1007/978-3-030-11533-3_45

Время прохождения маршрута к 2050 году сократится до 16 дней для судов OW и 13 дней для РС6, что на 3 дня меньше, чем в предыдущих оценках. Для судов типа OW навигационный сезон будет ограничен в основном периодом с августа по октябрь, причем основным останется маршрут СМП. Однако для судов РС6 навигационный сезон будет существенно дольше – с июля по январь следующего года, при этом Трансполярный морской путь станет одним из важных вариантов. К 2050 году прогнозируется, что навигационный сезон для судов OW составит 3-6 месяцев, а для судов РС6 – 6-9 месяцев в году⁵⁹.

Основной тенденцией на ближайшие 30 лет станет постепенное смещение маршрутов от низкоширотных к высокоширотным трассам, что существенно сократит время и расстояние перевозок между портами Азии и Европы. Семь из восьми рассмотренных климатических моделей показывают, что традиционный СМП останется основным маршрутом для судов типа OW на протяжении следующих 30 лет, в то время как для судов РС6 маршрут будет постепенно смещаться в сторону Трансполярного морского пути.

Атмосферная циркуляция в Арктике характеризуется сложным взаимодействием циклонов, антициклонов и блокирующих структур, которые влияют на перенос тепла и влаги из более низких широт. Согласно Henderson et al. (2021), существует сезонная изменчивость в этих процессах: зимой пути переноса влаги в основном ограничены морями Баренцева и Карского, а также в меньшей степени Лабрадорским морем/Баффиновым заливом и северной частью Тихого океана. Летом средний перенос влаги направлен к полюсу через северную часть Тихого океана, сибирский сектор и через путь Лабрадор/Баффинов залив. Эта сезонная перестройка циркуляционных процессов существенно влияет на ледовый режим арктических морей и является важным компонентом феномена арктического усиления (Arctic Amplification)⁶⁰.

⁵⁹ Чжан Ю., Сунь С., Чжа Ю., Ван К., Чен Ч. Изменение Северного морского пути в Арктике и Трансполярного морского пути: прогноз изменений маршрута и навигационного потенциала до середины XXI века // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Т. 11. № 2340. С. 1-20. DOI: 10.3390/jmse11122340

⁶⁰ Henderson G., Barrett B., Wachowicz L., Mattingly K., Preece J., Mote T. Local and Remote Atmospheric Circulation

Одним из ключевых факторов формирования климата в Арктике является тепло- и влагообмен между океаном и атмосферой. Как отмечается в исследовании Логинова В.Ф. (2023), максимальные потоки скрытого тепла из Северного Ледовитого океана в атмосферу наблюдаются в октябре и холодное время года (ноябрь-март). Это объясняет, почему скорость роста температуры в высоких широтах (70-90° с.ш.) варьируется от 0,03°C в июне до 0,23°C в октябре. За период современного потепления климата (1990-2022 годы) средний рост температуры в высоких широтах с октября по апрель составил 4,2°C. Существуют значительные различия между западной и восточной частями Арктики. В работе показано, что в долготном секторе влияния Атлантического океана (первый естественный район по Мультановскому) весенний максимум скорости потепления климата не выражен, тогда как в центральной части Восточного полушария, включающей акваторию Гренландского моря и моря Баффина, наблюдается усиление весеннего максимума потепления. Как указывают результаты исследования, наибольшие потоки явного и скрытого тепла в атмосферу наблюдаются в широтном поясе от Гренландского до Восточно-Сибирского моря, что существенно влияет на региональное распределение темпов потепления в Арктике⁶¹.

Осадки в российской Арктике распределяются крайне неравномерно как в пространстве, так и во времени. Геологические структуры Арктического бассейна, выявленные в исследовании Элькина Д.В. и соавторов, могут оказывать косвенное влияние на распределение атмосферных осадков в регионе. Выделенный кольцевой мегапрогиб с системой сверхглубоких впадин, где мощность осадочного чехла превышает 9 км, формирует сложный рельеф морского дна, влияющий на характер циркуляции водных масс. Поднятия в Амеразийском бассейне (хребты Альфа, Менделеева и Чукотское плато с

Drivers of Arctic Change: A Review [Электронный ресурс] // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Vol. 9. – Article 709896. – DOI: 10.3389/feart.2021.709896.

⁶¹ Логинов В. Ф. Роль различных факторов в арктическом усилении потепления климата [Электронный ресурс] // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. – 2023. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-razlichnyh-faktorov-v-arkticheskom-usilenii-potepleniya-klimata>

мощностью осадков менее 1 км) создают препятствия для глубоководных течений, что способствует формированию особых термодинамических условий на поверхности моря. Континентальные склоны, проходящие примерно по изобате 600 м, также участвуют в перераспределении потоков тепла в системе океан-атмосфера⁶². Такая сложная батиметрическая структура Арктического бассейна, эволюционировавшая в течение миллионов лет через различные фазы континентального рифтогенеза, формирует современные особенности взаимодействия океана и атмосферы, что отражается на характере атмосферной циркуляции и режиме осадков в Арктическом регионе.

Согласно исследованию Сурковой Г.В. и Крылова А.А., ветровой режим Арктики характеризуется значительной пространственной неоднородностью. Над морями значения скорости ветра существенно выше, чем над сушей. Наибольшие скорости ветра отмечаются вдоль восточного побережья Гренландии и над Чукотским морем, в то время как наименьшие значения характерны для моря Лаптевых. В статье отмечается, что при продолжающемся глобальном потеплении прогнозируется рост как средних, так и экстремальных значений скорости ветра над большей частью морской территории Арктики, особенно в осенне-зимний период. Зоны наибольших прогнозируемых аномалий приурочены к Баренцеву, Карскому и Чукотскому морям, что может быть связано с сокращением площади морского льда и перестройкой атмосферной циркуляции⁶³.

Современные исследования в области краткосрочного прогнозирования концентрации морского льда (SIC) имеют решающее значение для обеспечения безопасного судоходства в арктических условиях. Используя методы глубокого обучения, исследователи разработали модели, способные предсказывать ежедневную концентрацию морского льда с высокой точностью на период до 9

⁶² Элькина Д. В., Посёлова Л. Г., Павленкин А. Д., Посёлов В. А. Законмерности распределения осадков в арктическом бассейне [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2016. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zakonomernosti-raspredeleniya-osadkov-v-arkticheskom-bassejne>

⁶³ Суркова Г. В., Крылов А. А. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века [Электронный ресурс] // Арктика и Антарктика. – 2018. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeneniya-srednih-i-ekstremalnih-skorostey-vetra-v-arktike-v-kontse-xxi-veka>

дней. Согласно исследованию Liu et al. (2021), наибольшие изменения концентрации морского льда наблюдаются в летний период, когда средняя абсолютная ошибка (MAE) прогноза может достигать 18% для однофакторных моделей. Использование многофакторных моделей, учитывающих такие параметры как температура поверхности моря (SST), среднее давление на уровне моря (MSL), температура на высоте 2 м (T2M) и температура поверхности (SKT), позволяет снизить эту ошибку и повысить структурное сходство (SSIM) прогнозируемых и фактических данных о ледовой обстановке⁶⁴.

Особенно опасными для судоходства являются внезапные штормы, возникающие при прохождении глубоких циклонов, которые сопровождаются резким ухудшением видимости, обледенением судов и формированием крутой волны.

Современные климатические изменения оказывают значительное влияние на природные комплексы, экосистемы и социально-экономическое развитие Арктики. Согласно данным, представленным в статье Данилова А.И., на территории Российской Федерации потепление климата происходит примерно в 2,5 раза интенсивнее, чем в среднем по Земному шару. За период 1976–2016 гг. оно составило 0,45°C за 10 лет. Наибольшая скорость роста среднегодовой температуры отмечается на побережье Северного Ледовитого океана, особенно в Азиатской части России (на Таймыре – более +0,9°C/10 лет). Весной и осенью максимум потепления наблюдается на побережье Восточно-Сибирского моря, а зимой – на северо-западе Европейской части России. Эти изменения проявляются практически во всех компонентах окружающей природной среды Арктики, влияют на характер известных природных угроз, меняют их интенсивность, повторяемость и географию. Особую обеспокоенность вызывает сохраняющаяся тенденция сокращения площади

⁶⁴ Liu Q., Zhang R., Wang Y., Yan H., Hong M. Short-Term Daily Prediction of Sea Ice Concentration Based on Deep Learning of Gradient Loss Function // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. Article 736429. DOI: 10.3389/fmars.2021.736429

морских льдов (Рисунок 2.5. Динамика изменения площади морского льда в Северном Ледовитом океане в сентябре 1979-2024 гг., Рисунок 2.6. Ежедневные оценки сезонного хода объема морского льда СЛЮ) и возможное усиление природной дегазации вследствие оттаивания вечномёрзлых пород⁶⁵.

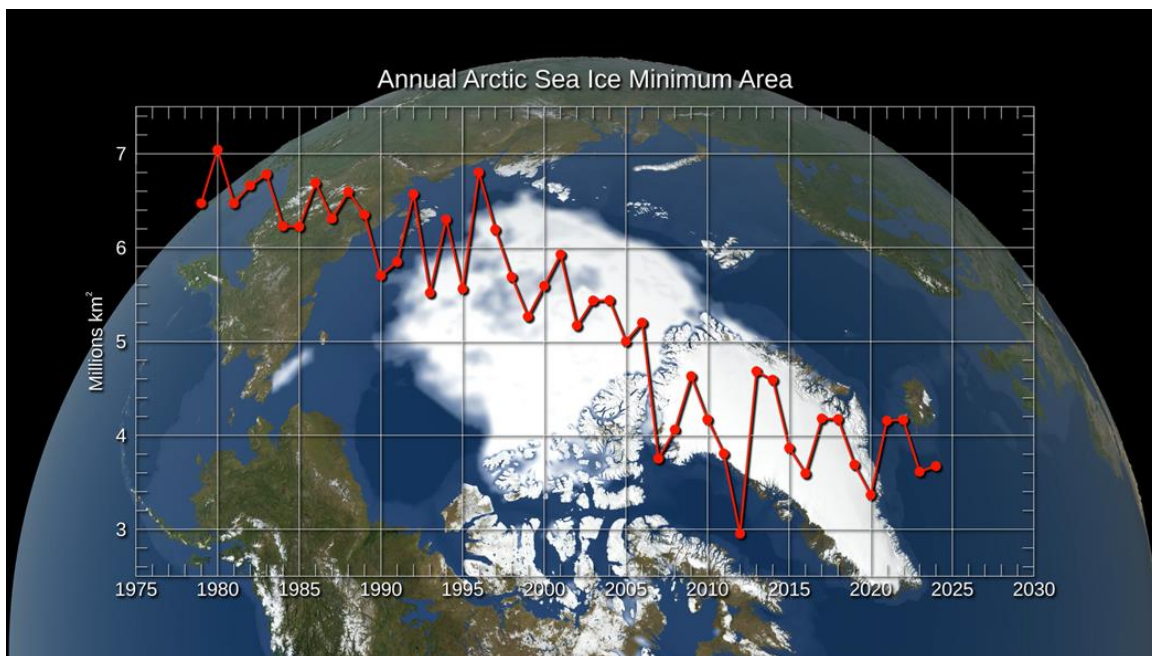


Рисунок 2.5. Динамика изменения площади морского льда в Северном Ледовитом океане в сентябре 1979-2024 гг.

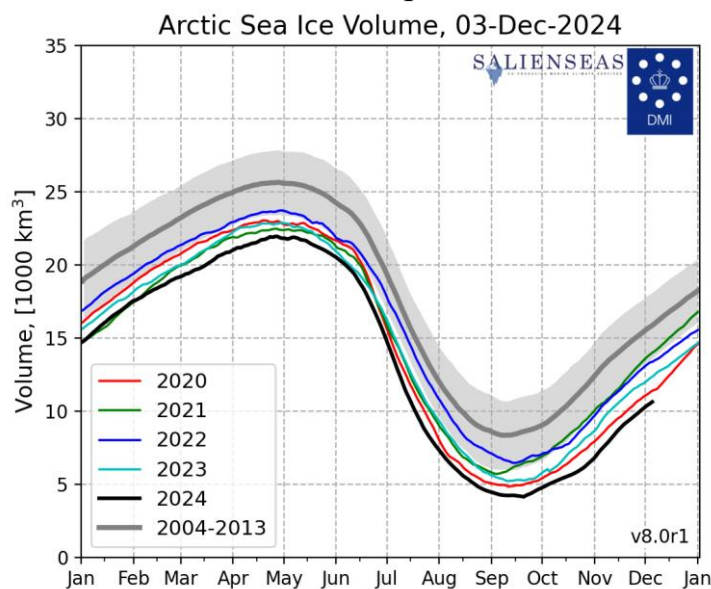


Рисунок 2.6. Ежедневные оценки сезонного хода объема морского льда СЛЮ на основе расчетов средневзвешенной толщины льда совместной модели

⁶⁵ Данилов А. И. Современные климатические изменения в Арктике: проявления и риски [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – №4 (23). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-klimaticheskie-izmeneniya-v-arktike-proyavleniya-i-riski>

морского льда – океана НУСОМ/СІСЕ Датского метеорологического института с 28.02.2004 по 03.12.2024 гг.⁶⁶

Также, исследование динамики площади морских льдов в Северном Ледовитом океане демонстрирует тесную связь с инсоляционной контрастностью – разностью годовой инсоляции между областями 0°-45° и 45°-90° широты. По данным спутниковых наблюдений с 1979 по 2018 гг., от 89,2% до 95,1% многолетних изменений площади морских льдов определяется изменениями инсоляционной контрастности, которая отражает меридиональный градиент инсоляции, регулирующий перенос тепла в системе океан-атмосфера. Морской лед имеет четкую сезонную динамику с максимумом в марте и минимумом в сентябре, причем летняя площадь сокращается примерно вдвое относительно зимней. Согласно прогнозам, к 2050 году ожидается значительное сокращение ледового покрова: среднегодовая площадь составит 8,43 млн км² (сокращение на 18,3% от уровня 2018 г.), максимальная – 12,86 млн км² (сокращение на 10,1%), а минимальная – всего 1,87 млн км² (сокращение на 60,3%). Это сокращение связано с усилением меридионального градиента инсоляции, являющимся следствием уменьшения наклона оси вращения Земли в современную эпоху⁶⁷.

Климатические изменения не только влияют на ледовую обстановку, но и создают условия для значительного роста круизного туризма в Арктическом регионе. Так называемый туризм «последнего шанса» привел к быстрому росту круизных экспедиций в Арктике, что создает новые риски для людей и окружающей среды. Роскошный круизный экспедиционный ледокол *Le Commandant Charcot (Ponant)* стал первым пассажирским судном, достигшим 90° северной широты в 2021 году, и впервые с пассажирами в 2022 году.

⁶⁶ Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана на основе данных ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования SSMR-SSM/I-SSMIS-AMSR2 25.11.2024 – 03.12.2024 № 49(687). Санкт-Петербург 2024 // http://wdc.aari.ru/datasets/d0042/2024/weekly_latest.pdf

⁶⁷ Фёдоров В. М., Гребенников П. Б., Фролов Д. М. Динамика площади морских льдов в связи с инсоляционной контрастностью [Электронный ресурс] // Арктика и Антарктика. – 2020. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-ploschadi-morskih-ldov-v-svyazi-s-insolyatsionnoy-kontrastnostyu>

Значительное увеличение круизного туризма зафиксировано в различных арктических регионах, особенно на Шпицбергене и в Гренландии. Для Шпицбергена этот рост сопровождался удлинением операционного сезона. Пространственное и сезонное увеличение круизного судоходства может пересекаться с ареалами обитания эндемичных арктических морских млекопитающих⁶⁸.

Согласно исследованию Чена и соавторов, опубликованному в *Tourism Recreation Research*, климатические изменения в Арктике происходят в два раза быстрее, чем в остальных частях мира. Это подтверждается опытом местных профессионалов туристической индустрии. Исследование, основанное на 16 глубинных интервью с представителями туристического бизнеса Норвегии, Финляндии, Исландии и Дании (включая Гренландию), выявило серьезные изменения, влияющие на операционную деятельность. Опрошенные специалисты отмечают, что сезон снега теперь начинается в декабре вместо октября, что сокращает период для традиционных зимних активностей, таких как катание на собачьих упряжках, примерно на 1,5 месяца. Один из респондентов указал: «У нас около 7000 снегоходных маршрутов, но в будущем мы, возможно, не сможем иметь средства для их содержания». Это заставляет туроператоров адаптироваться — например, используя искусственный снег для поддержания обещанных туристам «белых Рождественских каникул»⁶⁹.

Исследование также фиксирует изменения в морской экосистеме: киты мигрируют дальше на север, треска смещается в северном направлении, а крабы — в восточном. Данное не только меняет традиционные маршруты наблюдения за морскими животными, но и влияет на местные рыболовные практики, которые часто интегрированы в туристический продукт региона. Для многих арктических сообществ туризм является одним из ключевых экономических

⁶⁸ Mannherz F., Knol-Kauffman M., Rafaly V., Ahonen H., Kruke B.I. Noise pollution from Arctic expedition cruise vessels: understanding causes, consequences and governance options // *npj Ocean Sustainability*. 2024. Vol. 3. № 51. P. 1-11.

⁶⁹ Joseph S. Chen, Wei Wang, Hyangmi Kim & Wan-Yu Liu (2022): Climate resilience model on Arctic tourism: perspectives from tourism professionals, *Tourism Recreation Research*, DOI: 10.1080/02508281.2022.2122341

двигателей, обеспечивающих средства к существованию. Интервью показали, что туристические компании разрабатывают трехстороннюю стратегию устойчивости: создание социально-ответственных туристических продуктов, внедрение экологичных программ управления отходами и сертификация экологических практик через образовательные программы. Такие инициативы не только помогают адаптироваться к меняющимся условиям, но и формируют новые привлекательные предложения для растущего сегмента экологически сознательных путешественников.

По данным исследования Колчака И.Ч. и соавторов, несмотря на то что круизные суда составляют всего 1% от общего времени эксплуатации судов в Арктике, они ответственны за 9,5% общего потребления топлива и 9,9% выбросов черного углерода в регионе. Статистика показывает значительный рост морского трафика в Полярной зоне: количество судов увеличилось с 1298 в 2013 году до 1628 в 2019 году, при этом круизных судов среди них было 73 в 2019 году. Особенно тревожным является рост пройденного расстояния - увеличение на 75% за 6 лет (с 6,1 до 10,7 миллионов морских миль). Круизное судно генерирует значительные объемы отходов: в среднем 27 литров сточных вод, 246 литров серых вод и 2 кг твердых отходов на одного пассажира в день. Круизное судно с 3000 пассажиров за недельное путешествие производит 3700 м³ серых вод, 800 м³ сточных вод, 94 м³ льяльных вод, 16 тонн твердых отходов и 0,5 м³ токсичных жидкостей. Особенно проблематичным является использование тяжелого топлива (HFO), которое до сих пор не запрещено в Арктике, в отличие от Антарктики (запрет в Арктике ожидается после 2024 года)⁷⁰.

Существующая инфраструктура арктических портов часто не справляется с приемом и обработкой судовых отходов, что создает дополнительные экологические риски. Отсутствие достаточных средств для аварийного реагирования и поисково-спасательных операций в сложных

⁷⁰ Колчак, И. Ч., Четин, О., Сака, М. (2022). Environmental Impact of Cruise Shipping in Arctic Region. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9(1), 001-010.

арктических условиях усугубляет потенциальную опасность круизного судоходства в регионе.

Согласно исследованию Монинец С.Ю. и Баженовой А.И., специфической особенностью мореплавания в северных широтах является риск обледенения судов, которое происходит при сочетании отрицательных температур воздуха, сильного ветра и волнения моря. В статье отмечается, что значительное обледенение судов наблюдается в районе Северной Атлантики (Баренцево и Норвежское моря, Северо-Западная Атлантика) и северной части Тихого океана (Берингово, Охотское и Японское моря). Авторы предлагают использовать концепцию зон концентрации рисков (ЗКР) для повышения безопасности судоходства. Эти зоны имеют географическую привязку и характеризуются уровнем риска выше допустимого. Особенностью ЗКР является их зависимость от взаимодействия внешних факторов (навигационных, гидрометеорологических) и, как следствие, изменение уровня риска во времени. Зоны могут «возникать» в одних областях и «исчезать» в других в зависимости от изменяющихся условий. Для прогнозирования риска обледенения авторы используют градации: нулевое, медленное, быстрое, очень быстрое и экстремальное обледенение, основанные на сочетаниях температуры воздуха, скорости ветра и состояния волнения. Наиболее опасным считается сочетание скорости ветра более 15 м/с, температуры воздуха ниже -10°C и волнения моря более 5 баллов⁷¹.

Важной особенностью климатических условий российской Арктики является наличие прибрежных полыней и разводий, которые формируются при отжимных ветрах вдоль кромки припая. Как отмечает Деева М.Г., у азиатских побережий преобладают отжимные ветры, относящие лед от берега, создающие цепочку квазистационарных заприпайных полыней. Регулярность появления последних даже привела к появлению в XIX в. термина «Великая Сибирская

⁷¹ Монинец С. Ю., Баженова А. И. Роль прогнозирования рисков в обеспечении безопасности судоходства в сложных климатических условиях [Электронный ресурс] // Вестник МГТУ. – 2018. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-prognozirovaniya-riskov-v-obespechenii-bezopasnosti-sudohodstva-v-slozhnyh-klimaticheskikh-usloviyah>

полынья». Также, при всяком торошении создаются пространства открытой воды в виде трещин, разводий и полыней, в которых немедленно начинается процесс образования новых порций конжеляционного льда. Также в статье отмечается, чем большая площадь океана освободится летом от морских льдов, тем больше их образуется зимой⁷². Эти полыньи играют важную роль в процессах вентиляции глубинных вод, продуцировании молодого льда и формировании зон повышенной биологической продуктивности. Кроме того, они могут использоваться как судоходные трассы в период сложной ледовой обстановки.

Исследования показывают, что в море Лаптевых припайный лед простирается примерно до изобаты 20 м и занимает площадь до $140 \cdot 10^3$ км² южной части шельфа. Толщина припайного льда достигает максимума в апреле и варьирует от 1,5 м в удаленных от берега районах до примерно 2,0 м у фронта дельты Лены. Средняя толщина льда в полынье составляет около 11 см, причем примерно половина полыньи покрыта льдом толщиной 12-20 см, и лишь менее 2% полыньи занято открытой водой и льдом тоньше 2 см. Во время значительного открытия полыньи в начале мая 1999 года, юго-восточные ветры вызвали расширение полыньи до 130 км от кромки припайного льда и примерно 70-80 км от станции наблюдения «Яна». Особую тревогу вызывает тот факт, что согласно исследованиям, размер полыньи в море Лаптевых значительно увеличился — на 362 км² в год в период с 2002 по 2015 год во время поздней фазы замерзания с января по март. Полыньи также оказывают существенное влияние на экосистему Арктики, в частности на суточную вертикальную миграцию зоопланктона, что имеет значительные последствия для биологического насоса и потоков углерода в арктических морях. Исследования биомассы зоопланктона в районе моря Лаптевых показали максимальные значения около дельты Лены — 104 мг сухого вещества на м³ летом и до 263 мг

⁷² Деев М. Г. Ледяной покров Арктики и его устойчивость [Электронный ресурс] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2011. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ledyanoy-pokrov-arktiki-i-ego-ustoychivost>

сухого вещества на м³ осенью, что подтверждает роль этих районов как зон повышенной биологической продуктивности⁷³.

Анализ исследований прибрежных полыней в российской Арктике, особенно в море Лаптевых, позволяет сделать вывод об их исключительной важности для арктической экосистемы. Полыньи представляют собой уникальные природные феномены, функционирующие как экологические оазисы в ледовой пустыне высоких широт.

Особую тревогу вызывает зафиксированное увеличение размеров полыней на 362 км² в год, что является прямым индикатором климатических изменений в Арктике. Этот процесс, вероятно, будет иметь долгосрочные последствия для всей арктической экосистемы, изменяя установившиеся тысячелетиями пищевые цепи и миграционные маршруты.

Обнаруженная связь между функционированием полыней и суточной вертикальной миграцией зоопланктона указывает на сложную взаимосвязь физических и биологических процессов в этих районах. Полыньи являются не просто участками открытой воды, а сложными экосистемами, влияющими на потоки углерода и продуктивность моря в целом.

Учитывая высокие значения биомассы зоопланктона вблизи дельты Лены (до 263 мг сухого вещества на м³), можно предположить, что полыньи играют ключевую роль в поддержании биоразнообразия и продуктивности арктических морей даже в зимний период.

Комплексный мониторинг динамики полыней, особенно с использованием современных методов дистанционного зондирования и биотелеметрии, должен стать приоритетным направлением арктических исследований, что позволит лучше понять механизмы формирования этих уникальных экосистем и прогнозировать их будущие изменения в условиях меняющегося климата.

⁷³ Dmitrenko IA, Petrusevich VY, Kosobokova K, Komarov AS, Bouchard C, Geoffroy M, Koldunov NV, Babb DG, Kirillov SA and Barber DG (2021) Coastal Polynya Disrupts the Acoustic Backscatter Diurnal Signal Over the Eastern Laptev Sea Shelf. *Front. Mar. Sci.* 8:791096. doi: 10.3389/fmars.2021.791096

По данным ученых ААНИИ, «площадь морского льда на акватории арктических морей быстро сокращалась с 1996 года и за десять лет уменьшилась более чем в восемь раз. В последующие годы площадь льда колебалась вблизи этого уровня. Но в 2021 году площадь льда в сентябре возросла почти на 200 тыс. кв. км и в ближайшие 5 лет сохранится на этом уровне»⁷⁴. С 2022 по 2024 годы в западном секторе Арктики наблюдается сложная ледовая обстановка, в июне-июле аномальная мощность и площадь льда, наблюдается в Карском море, которая составила примерно 30-40 %. Появляются новые условия, которые оказывает непосредственное влияние на судоходство в высоких широтах. «Лето в Арктике длится всего лишь 8-10 недель. В зимний период на всем протяжении трассы Севморпути сплошной лёд мощностью до двух метров»⁷⁵.

Таким образом, климатические и метеорологические условия российской Арктики характеризуются высокой пространственно-временной изменчивостью, наличием экстремальных погодных явлений и специфических факторов, влияющих на судоходство. Современные изменения климата приводят к значительным трансформациям ледового режима арктических морей, увеличению продолжительности навигационного периода, а также и к повышению рисков, связанных с экстремальными погодными явлениями. Данное требует совершенствования систем метеорологического обеспечения, ледовой разведки и прогнозирования для обеспечения безопасности судоходства в арктических морях России.

⁷⁴ Макаров А. Круглогодичная навигация по СМП невозможна без поддержки ледокольного флота – ААНИИ от 21.09.2023 // <https://www.korabel.ru/>

⁷⁵ Из выступления Макарова А.С. директора Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) на II-м Форуме «Арктика – Регионы» 08.08.2024 г. г. Архангельск.

2.3. Основные маршруты морского судоходства в российской Арктике и показатели морского судоходства в арктической зоне

Морское судоходство в российской Арктике имеет длительную историю развития, которая неразрывно связана с освоением северных территорий. Калининко Н. Л. в своей статье «Великий Северный морской путь» отмечает, что начиная с XVI века по отдельным участкам Северного морского пути новгородцы и поморы совершали дальние походы на небольших судах – кочах. В конце XVI века русские мореходы стали совершать регулярные плавания к устью Оби, а в начале XVII века они уже могли достигать устья Енисея⁷⁶.

Относительно исследований арктических маршрутов следует предположить, что наблюдаемое забвение в период XVI – XIX вв. было связано с чередованием потеплений и похолоданий, известных как Средневековый климатический оптимум и Малый ледниковый период⁷⁷. Именно данным обуславливают успешность экспедиции англичан Артура Пета, Чарльза Джекмена в 1580 году, первого плавания европейцев в Карском море, а также неудачи трех экспедиций и гибель в 1597 году голландского мореплавателя и исследователя Виллема Баренца. Плавание англичан примерно соответствует окончанию теплого времени, тогда как поход Баренца пришелся на начало Малого ледникового периода, затянувшегося на несколько столетий⁷⁸.

К концу XIX века снова становится теплее, чем обуславливаются успехи плаваний норвежских зверобоев в Карском море и научных экспедиций. Именно в этот период происходит знаменитая экспедиция Адольфа Эрика Норденшельда в 1878-1880 годах на «Вега», первом судне, «проникшего северным путем из одного великого мирового моря в другое»⁷⁹. «Вега»,

⁷⁶ Калининко Н. Л. Великий Северный морской путь [Электронный ресурс] // Образование и право. – 2024. – №5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/velikiy-severnyy-morskoj-put>

⁷⁷ См. Фейган Б. Малый ледниковый период: как климат вершил историю, 1300 – 1850 / Брайан Фейган ; перевод с англ. А.В. Ефремовой, Т.А. Турсковой. – М.: Эксмо, 2022. – 352 с.; Алиев Р. Что случилось с климатом / Р. Алиев, М.: Паулсен, 2022. – 336 с.

⁷⁸ Алиев Р.А. Изнанка белого. Арктика от викингов до папанинцев. – М.: Паулсен, 2020. – С. 12-14.

⁷⁹ Норденшельд А.Э. Плавание на «Вега». М.: Паулсен, 2019 – с. 556.

обогнув Евразию с юга и пройдя через Суэцкий канал, с триумфом вернулась в Швецию. Впервые Северный морской путь был пройден.

Долгое время плавание по северным морям занимало несколько лет. И только изобретение паровых судов с усиленной конструкцией корпуса позволило преодолеть весь Северный морской путь за одну навигацию. Впервые это произошло в 1932 году за одну навигацию, Северный морской путь был пройден советской экспедицией по руководством Отто Юльевича Шмидта на ледокольном пароходе «А. Сибиряков». В этом же году создается Главное управление Северного морского пути, что позволило организовать регулярные плавания по трассе СМП⁸⁰.

В настоящее время благодаря атомному ледокольному флоту России плавание через акваторию Северного морского пути занимает в среднем 12-14 суток, а переход из Европы в Китай по Северному морскому пути около 25 дней.

Однако систематическое использование арктических морских маршрутов действительно началось только в первой половине XX века, после создания в 1932 году Главного управления Северного морского пути, что позволило организовать регулярные плавания по трассе СМП.

Согласно Федеральному закону «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации»⁸¹, Северный морской путь определяется как «исторически сложившаяся национальная транспортная коммуникация Российской Федерации в Арктике», которая проходит по морям Северного Ледовитого океана (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) и соединяет европейские и дальневосточные порты России, а также устья судоходных рек Сибири. Западной границей акватории СМП являются Карские Ворота, южная оконечность Новой Земли и западная граница пролива Маточкин Шар, а восточной - пролив Беринга. Общая

⁸⁰ Арктическое судоходство: учебное пособие / Я.Е. Бразовская. – М.: МОРКНИГА, 2025. С. 43.

⁸¹ О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации: Федеральный закон от 31.07.1998 № 155-ФЗ (ред. от 19.10.2023) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19643/

протяженность СМП от Карских Ворот до Бухты Провидения составляет около 5600 км.

Северный морской путь имеет стратегическое значение для России как транспортная артерия, обеспечивающая связность арктических территорий, доступ к ресурсам шельфа и возможность транзитных перевозок между Европой и Азией. В «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» развитие СМП определено как один из приоритетов российской арктической политики⁸².

Арктические перевозки можно классифицировать как внутриарктические и трансарктические. Навигация в высоких широтах возможна по различным маршрутам или их комбинациям (Рисунок 2.7. Комбинации маршрутов морского судоходства в Арктике):

- Северо-Восточный проход (The Northeast Passage);
- Северо-Западный проход (The Northwest Passage);
- Арктический мост – обозначен на рисунке желтым цветом;
- Трансполярный морской проход (The Transpolar Sea Route).



Рисунок 2.7. Комбинации маршрутов морского судоходства в Арктике⁸³

⁸² Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года: утв. Указом Президента РФ от 5 марта 2020 г. № 164 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/564371920>

⁸³ Арктическое судоходство: учебное пособие / Я.Е. Бразовская. – М.: МОРКНИГА, 2025. С. 26.

Особое значение для международного судоходства приобретает Северо-Восточный проход в условиях прогрессирующего таяния арктических льдов. По данным исследования Liu et al. (2021), использование Северо-Восточного прохода позволяет сократить географическое расстояние между портами Азии и Европы на 40%, значительно снижая время транспортировки и экономические затраты. Сокращение морского ледяного покрова в арктических водах, наблюдаемое в последние десятилетия, постепенно повышает навигационный потенциал этого маршрута, делая его всё более привлекательным для международной транспортной индустрии (Рисунок 2.8. География перевозок по СМП). При этом авторы подчеркивают, что для обеспечения безопасности судоходства в арктической зоне необходимо надежное прогнозирование ежедневной концентрации морского льда, что требует применения передовых методов, включая технологии глубокого обучения⁸⁴.

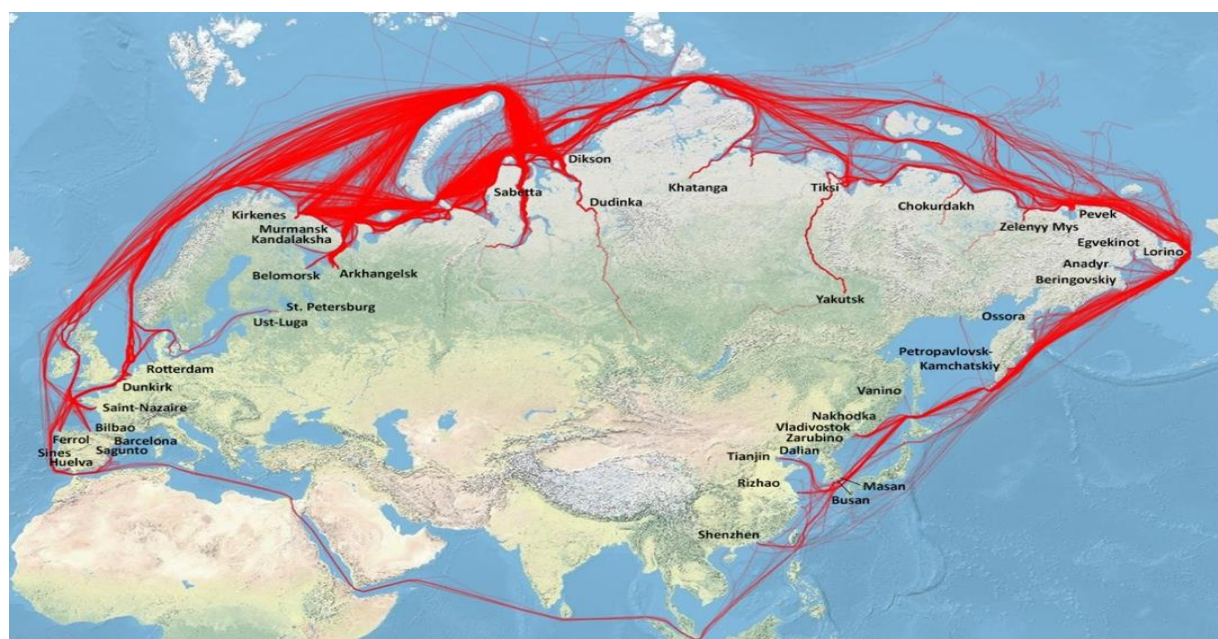


Рисунок 2.8. География перевозок по СМП⁸⁵

⁸⁴ Liu Q., Zhang R., Wang Y., Yan H., Hong M. Short-Term Daily Prediction of Sea Ice Concentration Based on Deep Learning of Gradient Loss Function // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. Article 736429. DOI: 10.3389/fmars.2021.736429

⁸⁵ Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013-2023 гг.) / Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route, Vasily Erokhin URL: https://www.researchgate.net/publication/377818509_Dinamika_gruzoperevozok_po_Severnomu_morskomu_puti_2013-2023_gg_Dynamics_of_cargo_transportation_along_the_Northern_Sea_Route_2013-2023

Северо-Западный проход – это морской маршрут, связывающий северную часть Атлантического океана с Тихим океаном через Северный Ледовитый океан вдоль северного побережья Северной Америки по водным путям, пролегающим через Канадский Арктический архипелаг.

Стоит также отметить существование сезонного морского пути, соединяющего Россию и Канаду – Арктического моста. Этот маршрут пролегает между Кольским и Гудзоновым заливами, тем самым связывая российский порт Мурманск с канадским портом Черчилл. Использование Арктического моста в сочетании с Северным морским путем открывает для России возможность формирования торгового коридора между Европой и Америкой.

Трансполярный морской проход или трансарктический маршрут рассматривается как перспективный арктический судоходный путь, соединяющий Атлантический океан с Тихим через Северный полюс, расположенный в центральной части Северного Ледовитого океана.

В отличие от Северо-Восточного прохода (включая Северный морской путь) и Северо-Западного прохода, трансполярный морской маршрут, проходящий вблизи Северного полюса, преимущественно избегает территориальных вод арктических государств и располагается в международных открытых водах. В 2012 году китайское исследовательское судно-ледокол *Xue Long* стало одним из первых крупных судов, использовавших данный маршрут во время своей экспедиции в Северном Ледовитом океане. Однако необходимо подчеркнуть, что из-за тяжелых и постоянных ледовых условий говорить о регулярном судоходстве по этому пути преждевременно – ни одно коммерческое грузовое судно пока не воспользовалось этим маршрутом, так как он доступен исключительно для мощных ледоколов.

В настоящий момент ни один из упомянутых маршрутов не обеспечивает возможности осуществления коммерческого судоходства на регулярной основе вследствие наличия ледового покрова, препятствующего определению

постоянных судоходных коридоров. На практике изменчивый и дрейфующий морской лед создает необходимость непрерывного мониторинга оптимальных и безопасных траекторий следования судов по тому или иному проходу⁸⁶.

Мореплавание в Арктике всегда было больше, чем судоходство. Хотя в настоящее время нельзя сказать, что арктические пространства активно используются судоходными компаниями в интересах международных грузоперевозок. При этом стоит отметить, что объем перевозок грузов в акватории Северного морского пути, согласно статистическим данным Единой межведомственной информационно–статистической системы, неуклонно растёт (Рисунок 2.9 Объем перевозок по СМП, тыс. тонн)⁸⁷. В 2024 совокупный объем перевозки грузов составил почти 37,9 млн тонн. Данный результат превзошел предшествующий максимальный показатель более чем на 1,6 млн тонн. Как отметил генеральный директор «Росатома» Алексей Лихачев, 2024 год был знаменателен не только установлением нового рекорда в сфере грузовых перевозок, но и знаковыми событиями в развитии атомного ледокольного флота России. В январе был заложен фундамент нового ледокола «Ленинград», а в ноябре состоялся спуск на воду ледокола «Чукотка». Оба мероприятия проходили при непосредственном участии Президента Российской Федерации Владимира Путина. Финальным аккордом года стала церемония поднятия государственного флага на ледоколе «Якутия», состоявшаяся в конце декабря. «Существенным достижением 2024 года также стало утверждение высшим руководством страны концепции Большого Северного морского пути. Данная инициатива определит вектор развития арктической инфраструктуры на предстоящие десятилетия. Ключевой задачей проекта является формирование нового транспортного коридора, протянувшегося от Калининграда до Владивостока, который будет интегрирован с речными портами и сетью железнодорожных магистралей», —

⁸⁶ Арктическое судоходство: учебное пособие / Я.Е. Бразовская. – М.: МОРКНИГА, 2025. С. 28.

⁸⁷ ЕМИСС государственная статистика <https://www.fedstat.ru/indicator/51479>

подчеркнул Лихачев⁸⁸.

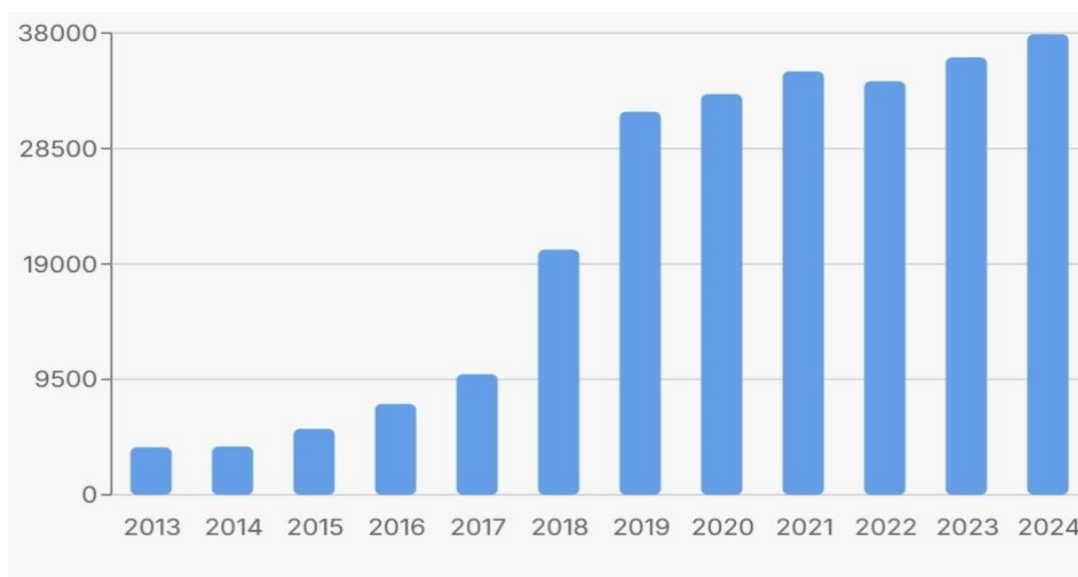


Рисунок 2.9. Объем перевозок по СМП, тыс. тонн

Кроме того, наблюдалось повышение как востребованности, так и безопасности данного маршрута. Количество выданных разрешений за период с 2021 по 2024 годы интенсифицировалось, как это следует из таблицы 2.1 Выданные разрешения на плавание судов в акватории Севморпути⁸⁹ и Рисунка 2.10. Количество разрешений на проход по СМП в 2013-2023.

Года	Кол-во выданных разрешений	Суда под флагом РФ	Суда под иностранным флагом	Отказы в выдаче разрешения
2021	1264	1071	193	35
2022	1196	1108	88	34
2023	1219	1101	118	1
2024	1312	1187	125	0

Таблица 2.1. Выданные разрешения на плавание судов в акватории Севморпути

⁸⁸ Северный морской путь побил рекорд по объему грузоперевозок в 2024 году [Электронный ресурс]. – 10.01.2025. – URL: <https://acentury.ru/news/smp-rekord/>

⁸⁹ Данные с официального сайта ФГБУ «ГлавСевморпуть» // <https://nsr.rosatom.ru/rassmotrenie-zayavleniy/razresheniya/>

Специалисты ФГУП «ГлавСевморпуть» в течение 2024 года обработали 1312 заявок на осуществление плавания в акватории СМП, причем ни одна из них не получила отрицательного решения. Это является рекордным показателем за весь период функционирования разрешительной системы навигации в данной акватории⁹⁰.

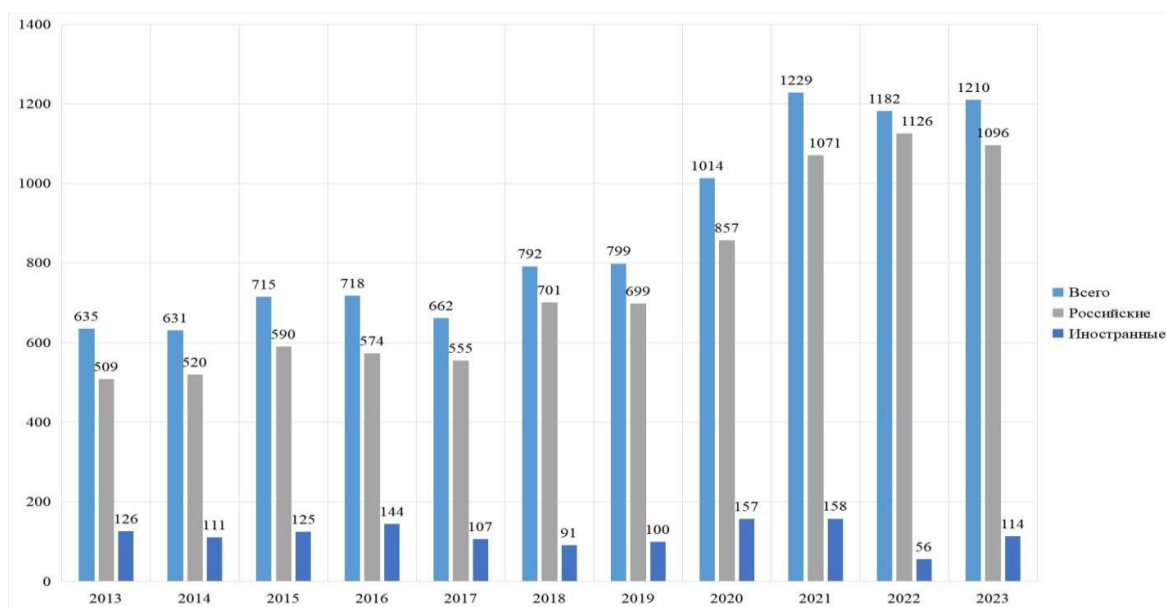


Рисунок 2.10. Количество разрешений на проход по СМП в 2013-2023⁹¹

Для понимания общей динамики роста судоходства в различных регионах Арктики представляет интерес сравнительный анализ показателей трех ключевых арктических поселений: Соловецкого архипелага (Россия), Лонгйирбюена (Норвегия) и Кембридж-Бей (Канада). Согласно исследованиям Ольсен, Картер и Доусон (2019), за период с 2008 по 2016 год количество судозаходов в Соловецкий архипелаг увеличилось со 466 до 596 (рост на 128%), в Лонгйирбюен - с 771 до 1542 (рост на 200%), а количество транзитных проходов судов мимо Кембридж-Бей выросло с 20 до 37 (рост на 185%). При этом число пассажиров, посетивших Соловецкий архипелаг, возросло с 22,9 до

⁹⁰ Там же

⁹¹ Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013-2023 гг.) / Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route, Vasily Erokhin URL: https://www.researchgate.net/publication/377818509_Dinamika_gruzoperevozok_po_Severnomu_morskому_puti_2013-2023_gg_Dynamics_of_cargo_transportation_along_the_Northern_Sea_Route_2013-2023

74,4 тысяч человек (на 324%), а Лонгйирбюен - с 38,6 до 75,2 тысяч человек (на 197%). Эти данные свидетельствуют о значительном росте интенсивности судоходства во всех исследуемых арктических регионах, однако темпы роста варьируются в зависимости от местных географических и социально-экономических условий⁹².

Рост грузопотока подтверждается и другими исследователями, которые, однако, обращают внимание на его качественную структуру. Так, рост грузооборота морских портов Арктического бассейна в 2022 году на 3,3% был обеспечен в первую очередь за счет увеличения перевалки наливных (опасных) грузов на 6,4% до 40,9 млн тонн, в то время как перевалка сухих грузов сократилась. При этом важно подчеркнуть, что увеличение доли опасных грузов, связанное с переориентацией поставок на восток, значительно повышает экологические риски и требует незамедлительной адаптации нормативной правовой базы для предотвращения возможного вреда уникальной экосистеме СМП⁹³.

Ключевым элементом инфраструктуры СМП является ледокольный флот, обеспечивающий проводку судов в сложных ледовых условиях. Исторически сложилось, что российский дизельный ледокольный флот играет важнейшую роль в экономическом освоении северных территорий, дополняя возможности атомных ледоколов. За период с 1954 по 2023 год было построено 24 крупных дизельных морских гражданских ледокола — 18 в советский период и 6 в российский. Пик их количества пришелся на 1983-1990 годы, когда одновременно эксплуатировалось 18 единиц, после чего произошло снижение, а к 2020 году численность снова выросла до 16 судов. Примечательно, что все советские дизельные ледоколы строились на финляндских верфях, в то время как современная Россия постепенно переходит к полному циклу их

⁹² Olsen, J., Carter, N. A., & Dawson, J. (2019). Community perspectives on the environmental impacts of Arctic shipping: Case studies from Russia, Norway and Canada. *Cogent Social Sciences*, 5(1), 1609189. <https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1609189>

⁹³ Бразовская Я.Е. Транспортно-логистическое обеспечение безопасности в Арктике // *Право. Безопасность. Чрезвычайные ситуации*. 2023. № 4 (61). С. 38–42. DOI: 10.61260/2074-1626-2023-4-38-42.

производства на отечественных судостроительных мощностях. Технологическое развитие привело к парадоксальному результату — новые ледоколы демонстрируют более высокую ледопробиваемость при одновременном снижении удельной мощности, что позволяет сократить расход топлива и уменьшить вредные выбросы. Например, если ледоколы проекта «Voima» 1950-х годов при удельной мощности 1,819 кВт/т имели ледопробиваемость 0,8 м, то современный «Виктор Черномырдин» при 1,5634 кВт/т способен преодолевать лед толщиной 2-3 метра⁹⁴.

Спектр применения дизельных ледоколов на Севере чрезвычайно широк: помимо основной функции проводки судов по СМП и обеспечения навигации в замерзающих акваториях, они участвуют в коммерческих проектах по обеспечению морских терминалов, обслуживают дрейфующие полярные станции, выполняют спасательные операции, проводят научные исследования, используются как экспериментальные площадки для технологических новинок, организуют туристические круизы, участвуют в тушении пожаров и ликвидации разливов нефти, а также перевозят грузы. Эта многофункциональность делает дизельные ледоколы незаменимым инструментом для комплексного развития арктических территорий России. Согласно исследованию Алексушина Г. В., для обеспечения планируемого роста грузопотока по СМП до 80 млн тонн необходимо дальнейшее развитие ледокольного флота. Судя по представленным данным, наблюдается тенденция к разделению атомных ледоколов на два подкласса — обычные и тяжёлые, причем тяжёлые ледоколы планируется использовать в случаях и на трассах с толстым льдом, существенно расширяя возможности логистики на СМП⁹⁵.

Важную роль в обеспечении безопасности судоходства в арктических морях играет система навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения. Для повышения безопасности

⁹⁴ Алексушин Г. В. Развитие российского морского дизельного ледокольного флота и его место в экономическом освоении Севера [Электронный ресурс] // АИС. – 2024. – №56. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitiie-rossiyskogo-morskogo-dizelnogo-ledokolnogo-flota-i-ego-mesto-v-ekonomicheskom-osvoenii-severa>

⁹⁵ Там же.

судоходства в арктических морях России разрабатываются и внедряются современные информационные системы, включая автоматизированную систему управления движением судов (СУДС), автоматическую идентификационную систему (АИС), глобальную морскую систему связи при бедствии (ГМССБ), а также специализированные системы мониторинга ледовой обстановки и метеорологических условий.

Одним из перспективных направлений развития арктического судоходства является организация международного транзита по СМП между портами Европы и Азиатско-Тихоокеанского региона⁹⁶. Использование СМП позволяет сократить расстояние между портами Северной Европы и Восточной Азии на 30-40% по сравнению с традиционным маршрутом через Суэцкий канал⁹⁷. Однако, развитие международного транзита по СМП сдерживается рядом факторов, включая сезонность навигации, неразвитость портовой инфраструктуры, высокие ставки ледокольной проводки, недостаточное гидрографическое изучение и навигационное оборудование маршрутов, а также ограничения по типам судов, допускаемых к плаванию в ледовых условиях.

В работе Елисеева Д.О. и Наумовой Ю.В. (2021) представлен анализ экономической эффективности различных маршрутов арктического судоходства в зависимости от типа судна, характера груза, времени года и ледовых условий. При моделировании двух сценариев транзитных перевозок было выявлено, что арктический сценарий (Мурманск-Петропавловск-Камчатский) экономически более выгоден: он требует всего 5 судов против 7 в международном сценарии (Роттердам-Йокогама), обеспечивает большую оборачиваемость флота (25 рейсов против 16 в год) и снижает себестоимость перевозки контейнера до \$198,6 против \$289,8. Одно судно-контейнеровоз класса Arc7 вместимостью TUE-4500 ежегодно способно перевезти в

⁹⁶ Журавель В. П., Назаров В. П. Северный морской путь: настоящее и будущее [Электронный ресурс] // Российский социально-гуманитарный журнал. – 2020. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/severnoy-morskoy-put-nastoyashee-i-budushee>

⁹⁷ Северный морской путь — точка пересечения интересов Москвы и Пекина [Электронный ресурс]. – 18.03.2025. – URL: <https://russiancouncil.ru/blogs/konstantine-dolgov/severnoy-morskoy-put-tochka-peresecheniya-interesov-moskvy-i-pekina/>

арктическом сценарии 2,25 млн тонн грузов. Несмотря на некоторое отставание в себестоимости от маршрута через Суэцкий канал, СМП имеет преимущество по скорости доставки грузов, что особенно важно для «критичных грузов». Для реализации арктического сценария необходимо создание двух многофункциональных портов в крайних точках СМП, способных привлечь международные транспортные компании и обеспечить весь спектр логистических услуг по конкурентоспособным ценам⁹⁸.

Важным аспектом оценки различных маршрутов арктического судоходства является их экологическое воздействие, которое значительно варьируется в зависимости от типа судна и ледовых условий. Согласно исследованию Schröder, Reimer и Jochmann (2017), при сравнении танкера ледового класса PC5 и газовоза СПГ класса PC3 на маршруте № 1 СМП в ноябре 2000 года, для газовоза характерно значительно меньшее время прохождения маршрута (31,79 дней против 52,34 дней) при меньшем расходе топлива (4787,63 тонн против 3698,94 тонн). Особенно показательны данные по выбросам: газовоз, несмотря на 40% большую установленную мощность, производит значительно меньше выбросов угарного газа, окислов азота и практически не выделяет окислов серы из-за использования двухтопливной силовой установки. Эти данные подтверждают необходимость комплексного подхода к выбору типов судов для арктического судоходства, учитывающего не только экономические показатели, но и экологическое воздействие⁹⁹.

Наблюдаемое увеличение арктического судоходства оказывает комплексное воздействие на локальную экосистему и углеродный цикл. Согласно последним исследованиям, за семилетний период судоходство сместилось на 300 км севернее и восточнее, приближаясь к Северному полюсу. Эта тенденция имеет серьезные экологические последствия, поскольку океаны

⁹⁸ Елисеев Д. О., Наумова Ю. В. Моделирование транзитных перевозок по Северному морскому пути в условиях климатических изменений [Электронный ресурс] // Проблемы прогнозирования. – 2021. – №2 (185). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tranzitnyh-perevozok-po-severnomu-morskomu-puti-v-usloviyah-klimaticheskikh-izmeneniy>

⁹⁹ Schröder C., Reimer N., Jochmann P. Environmental impact of exhaust emissions by Arctic shipping // *Ambio*. -- 2017. -- DOI: 10.1007/s13280-017-0956-0. -- URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-017-0956-0>

поглощают CO₂, что играет важную роль для экосистем, однако избыточное CO₂ вызывает acidification и наносит вред морской жизни. Морское судоходство значительно способствует этим проблемам, что особенно критично для хрупких арктических экосистем¹⁰⁰.

Важным фактором интенсификации морского судоходства в Северном Ледовитом океане и прибрежных морях является его воздействие на уязвимые арктические экосистемы. Основными факторами воздействия на арктическую природную среду являются загрязнение морской среды нефтепродуктами и другими опасными веществами, шумовое загрязнение, нарушение ледового покрова, риски аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, а также выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

2.4. Международно-правовое регулирование экологической безопасности Арктики (международное сотрудничество в Арктике)

Международно-правовое регулирование экологической безопасности Арктики представляет собой сложную систему взаимосвязанных норм и принципов, эффективность которых необходимо рассматривать через призму специфических арктических условий, выявленных в ходе исследований природной среды региона. Долгие годы Мировой океан подпадал под действие доктрины «свободного моря», действовавшей с XVII века и предполагающей свободу Мирового океана от чьей-либо юрисдикции. Еще Гуго Гроций провозглашал, что «общие потребности человечества и интересы международной торговли требуют признания открытости морей» (принцип *mare liberum*). Государства, имеющие выход в открытое море, в целях обеспечения безопасности провозглашали границей своих «морских владений» линию горизонта, видимого с берега, позже государства стали применять

¹⁰⁰ Ye, X., Zhang, B., Dawson, J., Amon, C.D., Ezechukwu, C., Igwegbe, E., Kang, Q., Song, X., Chen, B. Arctic Oceanic Carbon Cycle: A Comprehensive Review of Mechanisms, Regulations, and Models. *Water* 2024, 16, 1667. <https://doi.org/10.3390/w16121667>

правило «пушечного выстрела» — в среднем 3 мили (примерно, 4.8 км) от берега. Большая часть Мирового океана была провозглашена свободной и не принадлежащей ни одному государству.

Доктрина «свободного моря» и принцип определения прилегающих акваторий с помощью пушечного выстрела оставались основой международного права в области использования океана вплоть до 1945 года. Со временем приоритет территориальной безопасности стал дополняться притязаниями на морские ресурсы прибрежного государства. Невиданная интенсификация морской деятельности государств в условиях научно-технической революции потребовала кодификации и прогрессивного развития международного морского права.

С этой целью в 1958 г. в Женеве состоялась I Конференция ООН по морскому праву. Конференция разработала и приняла четыре Женевские конвенции по морскому праву 1958 г.: Конвенцию об открытом море, Конвенцию о территориальном море и прилегающей зоне, Конвенцию о континентальном шельфе и Конвенцию о рыболовстве и охране живых ресурсов моря. Однако первая Женевская конференция не смогла достичь единодушия по вопросу о предельной ширине территориального моря.

На существенное изменение регулирования повлияло появление в начале 60-х годов большого числа независимых развивающихся государств, которые потребовали создания нового морского права, отвечающего их интересам. В целях решения этой проблемы по решению Генеральной Ассамблеи ООН в 1973 г. была созвана III Конференция ООН по морскому праву, результатом работы которой стало подписание в декабре 1982 г. на Ямайке Конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву. Конвенция провозгласила регулирование всех основных видов деятельности государств по исследованию и использованию пространств и ресурсов Мирового океана. Из преамбулы Конвенции следует, что ее целью является установление «правового режима для морей и океанов, который способствовал бы международным сообщениям и содействовал бы использованию морей и океанов в мирных

целях, справедливому и эффективному использованию их ресурсов, сохранению их живых ресурсов, изучению, защите и сохранению морской среды¹⁰¹.

Конвенция стала фундаментальной основой международно-правового регулирования защиты морской среды от загрязнения. Часть XII Конвенции устанавливает общие обязательства государств по предотвращению, сокращению и сохранению под контролем загрязнения морской среды. Несмотря на то, что в тексте Конвенции ООН по морскому праву отсутствуют прямые упоминания терминов «закисление» или «климатические изменения», её положения активно интерпретируются как применимые к этим современным вызовам. Статья 192, устанавливающая общую обязанность государств по защите и сохранению морской среды, получила расширенное толкование в недавней практике. В частности, Международный трибунал по морскому праву в своем Консультативном заключении от 2024 года указал на обязательство стран предотвращать трансграничный ущерб от климатических изменений. Эта эволюция правоприменения, подкреплённая статьей 194(5) о защите уязвимых экосистем и статьей 212 о контроле атмосферных выбросов, демонстрирует, что Конвенция является «живым инструментом», способным реагировать на новые глобальные угрозы, такие как потепление и закисление океана¹⁰².

Однако, как показывают результаты исследований, представленные в главе 1, общие механизмы защиты морской среды требуют значительной адаптации к специфическим условиям Арктики, где деградация загрязняющих веществ происходит крайне медленно, что многократно увеличивает экологические риски.

Особое значение для арктического региона приобретает статья 234 Конвенции ООН по морскому праву 1982 года, получившая название «арктической исключительности». В статье прибрежным государствам

¹⁰¹ Бразовская Я.Е. Мировой океан и коммерческое использование морских пространств // Океанский менеджмент. 2022. № 1 (15). С. 24-32.

¹⁰² Бразовская Я.Е., Авдыш Д.М. Закисление и потепление морской среды: международно-правовые механизмы реагирования // Экологическое право. 2025. № 3. С. 37-39.

предоставляются расширенные права по регулированию судоходства в покрытых льдом районах, что имеет критическое значение в контексте выявленных геоэкологических проблем арктического судоходства. Анализ физического воздействия судов на ледовый покров, проведенный Алексеевой Т.А. и соавторами (2024), демонстрирует формирование «устойчивой труднопроходимой полосы льда между 73–76° с. ш. и 71–73° в. д.» вследствие интенсивного судоходства. Такие процессы сопровождаются регулярным разрушением первоначального ледового покрова, что стимулирует формирование новых ледовых слоев с изменёнными физико-химическими характеристиками, включая повышение солености воды до 20%. Статья 234 не только легитимизирует российское законодательство по защите морской среды в акватории СМП, но и создает правовую основу для разработки режима судоходства, учитывающего подобные трансформации ледового покрова. Однако реализация положений статьи 234 является одним из наиболее сложных и спорных вопросов в регионе. Россия и Канада, ссылаясь на эту статью, приняли национальное законодательство, позволяющее им устанавливать особые правила плавания и отказывать в проходе судам, нарушающим экологические нормы, рассматривая части Северного морского пути и Северо-Западного прохода как свои внутренние воды. В свою очередь, Соединенные Штаты Америки, соглашаясь с правами прибрежных государств, утверждают, что такие права не должны нарушать свободы открытого моря, включая свободу транзитного прохода. США заявляют, что Северный морской путь и Северо-Западный проход являются международными проливами, и, следовательно, прибрежное государство не имеет права ограничивать по ним транзитный проход. Более того, в связи с изменением климата и сокращением ледового покрова в академических и политических кругах некоторых стран звучат призывы пересмотреть применение статьи 234 с целью уменьшения прав приарктических государств¹⁰³.

¹⁰³ Mikheev V.L., Brazovskaya Ya.E. Problems of Legal Regulation of the North Polar Region of the Earth // В сборнике: Current Developments in Arctic Law. Univer-sity of Lapland. Rovaniemi, 2019. С. 23-29.

В контексте стремительных климатических изменений в Арктике значение статьи 234 приобретает новое измерение. Согласно данным исследований, тренд «потепления» в АЗРФ составляет до 0,8-0,9°C/10 лет, что существенно превышает общемировые показатели. Климатические модели прогнозируют, что Северный Ледовитый океан может стать практически свободным от морского льда к 2081-2100 годам, что поставит под сомнение применимость самого понятия «покрытых льдом районов». Площадь льда в Северном Ледовитом океане, по данным Арктического и антарктического научно-исследовательского института, уже сократилась в 2023 году до 4,3 млн кв. км при норме 5,9 млн кв. км, что на 27 % меньше нормы. Указанное обстоятельство требует разработки новых правовых механизмов, способных адаптироваться к меняющимся природным условиям при сохранении эффективного контроля за безопасностью мореплавания.

Специализированный режим предотвращения загрязнения с судов установлен Международной конвенцией по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной Протоколом 1978 года (МАРПОЛ 73/78). Однако, как показывает анализ химического загрязнения морской среды в главе 1, генерализованный подход МАРПОЛ 73/78 имеет ограниченную эффективность в арктических условиях из-за значительных региональных различий в свойствах нефти. Исследования Ященко И.Г. выявили, что нефть европейской части арктической зоны России имеют более высокую вязкость (до 2548.38 мм²/с для вязкой нефти) и положительную температуру застывания (до +10.56°C), тогда как нефть сибирской части характеризуются отрицательной температурой застывания (-29.41°C) и более низкой вязкостью (268.11 мм²/с), но содержат на 20-28 % больше смол, асфальтенов и серы. Различия определяют специфику поведения нефти при разливах и требуют дифференцированного подхода к предотвращению загрязнения.

В 2017 году вступил в силу Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс), представляющий собой важный шаг в направлении учета специфики арктического региона.

Кодексом полностью запрещая сброс вредных жидких веществ в арктических водах (пункт 2.1.1), устанавливаются более строгие требования по сравнению с МАРПОЛ 73/78. Особую ценность представляют повышенные требования к конструкции судов, эксплуатируемых в полярных водах, включая расположение топливных цистерн на расстоянии не менее 0,76 м от наружной обшивки корпуса для судов категорий «А» и «В». Такой подход соответствует выявленной в исследованиях необходимости комплексной оценки судов для арктического плавания, учитывающей не только ледовый класс, но и особенности конструкции, автономность плавания по условиям экологической безопасности, эффективность систем очистки и тип используемого топлива.

Однако, Полярный кодекс не в полной мере учитывает проблему шумового загрязнения, которое, согласно исследованиям, представленным в главе 1, создает серьезную угрозу для морских млекопитающих. Установлено, что уровень подводного шума в Арктике удвоился всего за шесть лет, а ледоколы генерируют особенно интенсивный шум при маневрах отступления и таранения, что нарушает акустическую коммуникацию морских млекопитающих, использующих для ориентации и общения частоты от 20 до 250 кГц. Отсутствие в международном праве норм, регулирующих шумовое загрязнение в Арктике, представляет собой существенный пробел, требующий заполнения.

Важнейшим инструментом обеспечения соблюдения международных норм, включая Полярный кодекс, является механизм контроля судов государством порта (Port State Control). Механизм реализуется через региональные соглашения - меморандумы о взаимопонимании, которые создают единые процедуры инспекций иностранных судов. В настоящее время действует девять таких меморандумов, из которых к арктическому региону могут применяться Парижский и Токийский. Россия, в силу своего географического положения, является участницей обоих этих соглашений. В рамках меморандумов суда классифицируются по профилю риска и включаются в «белый, серый или черный» списки, что определяет

периодичность и глубину проверок. Однако, поскольку существующие меморандумы лишь частично охватывают арктические государства и не имеют специальной арктической направленности, их эффективность для уникальных условий региона ограничена. Данное поднимает вопрос о необходимости создания обособленной, сфокусированной на Арктике системы контроля¹⁰⁴. Ранее уже обосновывалась необходимость и важность принятия Арктического меморандума о взаимопонимании по контролю судов государством порта, который создал бы единую процедуру инспекций иностранных судов в арктическом регионе¹⁰⁵. Различные требования, предъявляемые к морским судам, создают не только значительные трудности для судовладельцев и капитанов, но и оказывают влияние на безопасность мореплавания в целом.

Важную роль в международно-правовом регулировании арктического судоходства играют двусторонние и многосторонние соглашения арктических государств. Соглашение о сотрудничестве в сфере готовности и реагирования на загрязнение нефтью в Арктике предусматривает меры по предотвращению и ликвидации разливов нефти, однако разработанные механизмы не в полной мере учитывают результаты современных исследований распространения загрязняющих веществ в арктических условиях. Как показывают результаты моделирования в программных комплексах OSCAR, ALOHA и CAFÉ, представленные в главе 1, при разливе 1 тонны опасных веществ (например, акрилонитрила) концентрация 1 мг/л может распространиться на расстояние до 500 м от источника, а концентрация 0,1 мг/л – до 5000 м. При катастрофическом разливе 1000 тонн эти расстояния увеличиваются до 4000 м и 40000 м соответственно. Такие масштабы требуют разработки более эффективных международных механизмов реагирования.

Международный опыт правового регулирования арктических морских

¹⁰⁴ Бразовская Я.Е. Синергия приарктических государств в соблюдении правил судоходства в полярных водах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: История и право. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 46-54.

¹⁰⁵ Brazovskaya Y.E. Legal aspects of cooperation in shipping and logistics in the Arctic // Polar Science. 2022. Т. 31. 100783.

перевозок и обеспечения экологической безопасности представляет значительный интерес в контексте совершенствования российской нормативной базы. Канадский подход, основанный на Законе «О предотвращении загрязнения арктических вод» 1985 года, предусматривает зоны контроля безопасности судоходства и систему классификации судов, учитывающую как ледовый класс судна, так и фактические ледовые условия. Особый интерес представляет система расчета индекса ледового режима (Ice Regime) для каждого судна на основе его ледового класса и характеристик льда.

Опыт Норвегии в правовом регулировании экологической безопасности морских перевозок также заслуживает внимания, особенно в части экологического зонирования. Комплексный план управления морской средой Баренцева моря и акваторией вокруг Лофотенских островов устанавливает маршруты для танкеров на расстоянии не менее 30 морских миль от побережья. Такой подход соответствует выявленной в исследованиях необходимости учета степени уязвимости прибрежных экосистем при выборе маршрутов судоходства. Однако, в отличие от результатов проекта ArcNet, представленных в главе 1, который предусматривает создание сети приоритетных участков для сохранения, охватывающей около 31% площади Северного Ледовитого океана, норвежский подход имеет ограниченное пространственное покрытие.

Анализ международно-правовых механизмов регулирования арктического судоходства показывает, что, несмотря на наличие специализированных инструментов, существует значительный разрыв между правовыми нормами и результатами современных исследований арктических экосистем. Кроме того, международно-правовые нормы не учитывают необходимость интеграции систем охраны морских экосистем и планирования судоходных маршрутов, что является ключевым выводом исследований.

2.5. Особенности правового режима судоходства в российской Арктике

Правовой режим судоходства в российской Арктике, в частности, в акватории Северного морского пути (СМП), характеризуется комплексной системой правовых норм, направленных на обеспечение безопасности мореплавания, защиту морской среды, эффективное управление морскими перевозками и защиту национальных интересов России в Арктике. Оценка эффективности этой системы требует сопоставления правовых механизмов с фактическими экологическими проблемами, выявленными в исследовании природной среды Арктики.

Историко-правовая эволюция режима Северного морского пути демонстрирует последовательное укрепление суверенных прав России в Арктике через постепенную кристаллизацию правовых механизмов. От первых указов XVI-XIX вв. до современного комплексного регулирования, юридический статус СМП формировался в ответ на меняющиеся геополитические и экологические условия. При этом многие современные экологические угрозы, выявленные в ходе исследований, не были и не могли быть учтены в ранних правовых актах. Например, проблема шумового загрязнения, которое, как показали исследования Степановой Д.В., оказывает существенное воздействие на морских млекопитающих, использующих акустическую коммуникацию и эхолокацию, не нашла отражения в исторически сложившейся системе регулирования.

Согласно статье 5.1 Кодекса торгового мореплавания РФ, под акваторией Северного морского пути понимается «водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону Российской Федерации». Данное определение имеет принципиальное значение для понимания правового статуса СМП, однако оно

не учитывает экологическую дифференциацию арктических вод, выявленную в ходе геоэкологических исследований. Как показывают результаты исследования Liu et al. (2022), существуют значительные региональные различия в толщине припайного льда в различных морях Арктики: около 1 м в Карском море, 1,5 м в море Лаптевых и до 2 м в Восточно-Сибирском море. Представленные различия свидетельствуют о необходимости дифференцированного подхода к регулированию судоходства, который не в полной мере отражен в существующем правовом режиме.

Организация плавания судов в акватории СМП, согласно пункту 3 статьи 5.1 КТМ РФ, осуществляется Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» и включает организацию разработки маршрутов, использование ледокольного флота, предоставление информационных услуг и мониторинг движения судов. Данная система управления обладает значительным потенциалом для интеграции результатов современных исследований. Однако, как показывают данные о росте выбросов черного углерода, приведенные Норкиной Е., и прогнозы об увеличении объема выбросов черного углерода морскими судами в пять раз к 2050 году, существующие механизмы регулирования нуждаются в усилении экологической составляющей. Только за 2019 год было зафиксировано 34 нарушения требований по выбросам SOx и 193 нарушения процедуры замены топлива, что свидетельствует о недостаточной эффективности контроля за выбросами.

Статья 14 Федерального закона «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации» от 31 июля 1998 года № 155-ФЗ устанавливает, что плавание в акватории СМП осуществляется в соответствии с правилами плавания, утвержденными Правительством Российской Федерации. Определение СМП как «исторически сложившейся национальной транспортной коммуникации Российской Федерации» подчеркивает его особый статус, но не отражает динамику изменений природной среды. Согласно исследованию Федорова В.М. и

соавторов, прогнозируется значительное сокращение ледового покрова к 2050 году: среднегодовая площадь составит 8,43 млн км² (сокращение на 18,3% от уровня 2018 г.), а минимальная – всего 1,87 млн км² (сокращение на 60,3%). Такие изменения требуют адаптивных механизмов регулирования, которые могли бы учитывать меняющиеся природные условия.

Статья 32 Федерального закона «Об исключительной экономической зоне Российской Федерации» от 17 декабря 1998 года № 191-ФЗ предоставляет России право устанавливать особые правила плавания судов в ледовых районах. Данное положение создает правовую основу для дифференцированного регулирования судоходства в различных частях акватории СМП, однако его реализация требует более точного учета экологической уязвимости различных районов. Согласно результатам проекта ArcNet, представленным в главе 1, сеть приоритетных участков для сохранения (PACs) охватывает около 24,4% территории исключительной экономической зоны России, но эти данные не находят прямого отражения в системе зонирования акватории СМП для целей регулирования судоходства.

Ключевым подзаконным актом, регулирующим судоходство в акватории СМП, являются Правила плавания в акватории Северного морского пути, утвержденные Постановлением Правительства РФ от 18 сентября 2020 года № 1487. Правила направлены на обеспечение и организацию плавания судов в акватории Северного морского пути и включают: 1) порядок организации плавания и проводки судов в акватории Северного морского пути; 2) порядок выдачи удостоверений о праве ледовой лоцманской проводки судов и 3) положения о навигационно-географическом обеспечении плавания судов и иные положения.

Несмотря на наличие установленных правил, правоприменительная практика и анализ структуры грузопотока выявляют существенные проблемы и пробелы в правовом регулировании. Во-первых, основу перевозок по СМП составляют опасные грузы, прежде всего сжиженный природный газ и нефть, что многократно повышает экологические риски при любой нештатной

ситуации. Во-вторых, эксперты указывают на ряд «белых пятен» в законодательстве, включая отсутствие четкого и единообразного понятийного аппарата для таких терминов, как «опасный груз» и «особо опасный груз», декларативность выдачи разрешений на плавание, а также отсутствие унифицированных проформ договоров ледокольной и ледовой лоцманской проводки. Перечисленные правовые неопределенности создают практические трудности и могут приводить к спорам, что особенно критично в условиях прогнозируемого роста плотности судоходства в узких водно-ледовых коридорах Арктики¹⁰⁶.

В данном контексте следует отметить, что анализ данных об автономности плавания судов по экологической безопасности, представленный в главе 1, показывает, что существующие критерии допуска не в полной мере учитывают экологические риски. В частности, интенсивность образования загрязнений в различных эксплуатационных режимах, зависящая от мощности главных двигателей, численности экипажа и условий эксплуатации, требует более детального регулирования в рамках разрешительной системы.

Правилам устанавливает критерии допуска судов в акваторию СМП руководствуясь которыми ФГБУ «ГлавСевморпуть» выдает разрешение на плавание в акватории СМП. Управление оценивает эксплуатационные характеристики судна, в том числе ледовый класс, указанный в классификационных документах, ледовую обстановку, ее прогноз. В целом выдача разрешения с формальной точки зрения построена на критериях допуска, которые указаны в Правилах плавания по СМП. Соответственно если все документы в порядке, подтверждают годность судна к плаванию, отсутствуют существенные эксплуатационные ограничения, то разрешение будет выдано.

Из данного следует, что при выдаче разрешения не учитывается анализ таких важных факторов, как удаленность от особо охраняемых природных

¹⁰⁶ Бразовская Я.Е. Актуальные проблемы правового регулирования перевозки опасных грузов по северному морскому пути // Океанский менеджмент. 2024. № 4 (28). С. 2-6.

территорий и степень уязвимости прибрежных экосистем. Кроме того, существующие критерии не учитывают региональные различия в свойствах арктической нефти, выявленные в исследованиях Яценко И.Г., что имеет критическое значение для оценки рисков разливов нефтепродуктов.

Система тарифного регулирования на услуги субъектов естественных монополий по ледокольной проводке судов, ледовой лоцманской проводке судов в акватории Северного морского пути определяются в соответствии с Положением о государственном регулировании тарифов на ледокольную проводку судов, ледовую лоцманскую проводку судов в акватории Северного морского пути¹⁰⁷, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.04.2015 № 388. При определении тарифа учитывается вместимость судна, ледовый класс, сезон навигации и протяженность маршрута. Такая дифференциация создает экономические стимулы для использования судов с повышенным ледовым классом и крупнотоннажных судов. Однако, как показывает сравнительное исследование экологического воздействия различных типов судов, представленное в главе 1, существует обратная зависимость между экономической эффективностью и экологической безопасностью определенных категорий судов. Например, нефтяные танкеры, имеющие экономические преимущества, характеризуются наивысшим риском разливов нефтепродуктов и значительным биологическим загрязнением.

Россия движется к созданию более совершенной системы мониторинга и управления судоходством в арктических морях с использованием информационных систем, включая автоматизированную систему управления движением судов (СУДС) и автоматическую идентификационную систему (АИС). Эти разработки соответствуют методикам использования ГИС-технологий для обоснования выбора оптимальных судоходных маршрутов, представленным в исследовании Ольховика Е.О. и соавторов. Однако, как показывают результаты исследования Liu et al. (2021), современные методы

¹⁰⁷ В редакции от 04.09.2015 // Собрание законодательства РФ, 04.05.2015, № 18, ст. 2708.

искусственного интеллекта и глубокого обучения, позволяющие прогнозировать концентрацию морского льда с высокой точностью на период до 9 дней, пока не нашли широкого применения в российской системе управления арктическим судоходством.

Анализ правового режима судоходства в российской Арктике позволяет выявить специфические особенности, отличающие его от правовых режимов судоходства в других морских регионах. Разрешительный порядок плавания, система ледокольной проводки, дифференцированный подход к установлению требований и особая система управления в акватории СМП соответствуют многим аспектам экологических проблем, выявленных в исследованиях. Однако существуют значительные пробелы в регулировании таких аспектов, как шумовое загрязнение, биологическое загрязнение через балластные воды, учет климатических изменений и интеграция современных методов прогнозирования и моделирования.

Совершенствование правового режима судоходства в российской Арктике должно быть направлено на создание адаптивной системы регулирования, способной учитывать не только национальные экономические интересы, но и динамично меняющиеся экологические условия, выявляемые в ходе научных исследований. Такой подход позволит обеспечить устойчивое развитие арктического судоходства при минимизации негативного воздействия на уникальные и уязвимые экосистемы Арктики.

Вывод к главе

Проведенное исследование экономико-географический и геоэкологических особенностей российской Арктики обнаружило фундаментальное противоречие, которое во многом определяет текущие проблемы региона и перспективы его развития. Сформулируем следующие выводы по главе:

1. Российский арктический регион представляет собой территорию огромного экономического значения с богатейшими природными ресурсами,

освоение которых набирает обороты. Здесь размещается свыше 300 нефтегазовых месторождений, обеспечивающих четыре пятых общероссийской газодобычи и формирующих примерно десятую часть валового внутреннего продукта. Развитие этого потенциала тесно связано с активным использованием Северного морского пути, транспортные потоки которого в прошлом году превысили 37,9 миллионов тонн грузов. Государственная стратегия, включающая концепцию расширения СМП и создание собственного ледокольного флота, свидетельствует о планомерном подходе к долгосрочному освоению региона.

2. Хозяйственное освоение арктических территорий происходит в условиях резких климатических сдвигов, которые одновременно открывают новые возможности для морских перевозок и создают серьёзные экологические вызовы. Скорость климатических изменений в российской Арктике (0,8-0,9 градуса за десять лет) значительно опережает общепланетарные показатели. Результатом становится стремительное уменьшение ледового покрова – в 2023 году площадь морских льдов была почти на треть меньше многолетних значений. Подобные изменения кардинально преобразуют водный режим и ставят под угрозу устойчивость арктических природных комплексов.

3. Анализ продемонстрировал существенное несоответствие между интенсивностью экономической активности и действенностью контрольно-надзорных функций. При наличии развитого законодательства его практическая реализация остаётся проблематичной: система мониторинга промышленных выбросов оставляет желать лучшего, что подтверждается многочисленными фактами нарушений природоохранных требований. Требования к допуску судов к плаванию не полностью учитывают специфику экологических рисков, включая различия в характеристиках нефтепродуктов в разных районах. Международные правовые механизмы также не успевают за темпами научных открытий и динамикой региональных изменений.

4. Проведенный анализ свидетельствует о том, что российская Арктика представляет собой регион с огромным природно-ресурсным и

транспортным потенциалом, имеющий стратегическое значение для экономического развития страны. Устойчивое развитие морского судоходства в Арктике требует сбалансированного подхода, учитывающего как экономические интересы, так и необходимость сохранения уникальных и крайне уязвимых арктических экосистем.

5. Сложившаяся ситуация – мощное экономическое воздействие на быстро трансформирующуюся природную среду при недостаточной эффективности управленческих инструментов – требует кардинального изменения подходов. Вместо реагирования на уже возникшие проблемы необходимо перейти к их предвидению и предупреждению. Для создания научно-обоснованной системы превентивных мер нужна детализированная количественная оценка предстоящих изменений основных элементов арктической природной системы – состояния атмосферы, морских биологических ресурсов и водной среды – под непосредственным воздействием растущих объёмов судоходства. Именно эта задача определяет направление и содержание дальнейших исследований, которые будут представлены в следующем разделе работы.

Глава 3. Прогнозирование и оценка изменений арктической природной среды и морское судоходство

3.1. Оценка возможного влияния на качественный состав атмосферы

Атмосфера (греч. *atmos* - пар, сфера) — это воздушная масса (смесь газов), сосредоточенная в тропосфере и стратосфере, окружающая Землю. Данная смесь газов является уникальным природным ресурсом нашей планеты, без которого жизнь на ней невозможна. Основными компонентами атмосферы являются азот (78,08%), кислород (20,95%), аргон (0,93%), а также диоксида углерода (0,01%). При этом в тропосфере находится около 80% всего сосредоточения газов, остальные 20% приходятся на стратосферу¹⁰⁸.

Существенное значение на загрязнение атмосферы оказывает антропогенная деятельность и это в том числе транспорт. Согласно данным Росстата, количество выбросов в атмосферу загрязняющих веществ на территории Российской Федерации год от года остается примерно одинаковым, ниже приведем некоторые официальные статистические данные по объему выбросов загрязняющих веществ и их динамику (Таблица 3.1 и Диаграмма 3.1)¹⁰⁹.

Выбросы загрязняющих атмосферу веществ – всего, тыс. т., в том числе:	2021	2022	2023
от стационарных источников	17 208	17 174	16 952
от передвижных источников	5 092	5 031	5 024

Таблица 3.1. Выбросы загрязняющих атмосферу веществ, 2021-2023 гг.

¹⁰⁸ Бразовская Я.Е. Демпфирование негативных последствий загрязнения атмосферного воздуха с морских судов // Океанский менеджмент. 2023. № 2 (20). С. 13-17.

¹⁰⁹ Охрана окружающей среды в России. 2024: Стат. сб./Росстат. – М., 2024. – 118 с.



Диаграмма 3.1. Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников (тыс. тонн), 2019-2023 гг. по данным Росприроднадзора.

При всей важности морского комплекса, как неотъемлемого элемента экономики, необходимо учитывать и его негативное воздействие на природные экологические системы. Вострикова М. А. отмечает, что основным источником загрязнения атмосферы являются отработанные газы дизельного топлива, а содержание загрязняющих веществ зависит от количества серы, азота, углерода в дизельном топливе, от способа его сжигания, а также способа наддува и нагрузки двигателя¹¹⁰.

Согласно исследованию Фигеншау Н. и соавторов, судоходный сектор является значительным источником выбросов атмосферных загрязнителей, таких как оксиды азота (NO_x) и диоксид серы (SO_2). Исследование показало увеличение выбросов NO_x на 115% и SO_2 на 68% в период с 2013 по 2023 годы. Прогнозы указывают, что к 2030 году выбросы NO_x могут увеличиться на 121%, достигнув в среднем 12 400 тонн в год, а выбросы SO_2 могут вырасти на 127%, стабилизировавшись на уровне около 1000 тонн в год с 2028 года.

¹¹⁰ Вострикова М. А. О загрязнении воздушного бассейна токсичными компонентами отработавших газов морских судов / М. А. Вострикова, Я. М. Кашин, В. В. Шкода // Булатовские чтения: сб. ст. материалов I Международной науч.-практ. конф.: в 5 т.; под общ. ред. О. В. Савенков. - Краснодар: ООО «Издательский Дом - Юг», 2017. С. 102.

Фактором, способствующим росту выбросов, в том числе является увеличение судоходной активности, связанной с освоением ресурсов, особенно в нефтяном секторе. Холодные климатические условия Арктики могут замедлять рассеивание загрязнителей, однако исследование фокусируется на влиянии увеличения судоходства, вызванного таянием льдов и добычей ресурсов, на объемы выбросов. В приведенном исследовании авторы подчеркивают необходимость принятия дополнительных мер по сокращению выбросов для снижения негативного воздействия на окружающую среду в связи с ростом судоходства по Северному морскому пути¹¹¹.

Особую обеспокоенность вызывает эмиссия черного углерода от судоходства в Арктике и его прямое воздействие на таяние льда. Согласно исследованию Цюн Чен и соавторов, выбросы черного углерода от судов способствуют таянию арктического льда и снега. В период с 2012 по 2017 годы пассажирские суда ежегодно выбрасывали в среднем 39.17 тонн черного углерода в Арктике. По информации газеты *The Guardian*¹¹² в 2023 году, самая крупная круизная компания в мире *Carnival* произвела в Европе больше углекислого газа, чем целый шотландский город Глазго. Объем выбросов европейских судов *Carnival* составил 2,55 миллиона тонн, *MSC* — 1,4 миллиона тонн, а *Norwegian Cruise Line* — 840 тысяч тонн.

Анализ источников выбросов показал, что круизные суда вносят наибольший вклад в эмиссию черного углерода среди всех типов пассажирских судов. Например, ежегодные выбросы черного углерода от круизных судов варьировались от 15.04 тонн в 2012 году до 30.90 тонн в 2016 году. Выбросы от судов типа *Ferry-go* рах составляли от 10.85 тонн до 17.93 тонн в год, а от *Ferry-only* были незначительными. По видам деятельности судов, наибольшие выбросы черного углерода происходят во время круиза, с ежегодными

¹¹¹ Linking ship-associated emissions and resource development in the Arctic: Trends and predictions along the Northern Sea Route

¹¹² Всего одна круизная компания создает больше углеродных выбросов, чем целый город. 15.08.2025. <https://www.gismeteo.ru/news/nature/vsego-odna-kruiznaya-kompaniya-sozdaet-bolshe-uglerodnyh-vybrosov-chem-celyj-gorod/>

показателями от 11.73 тонн до 19.95 тонн. На выбросы во время стоянки у причала приходилось от 7.83 тонн до 15.84 тонн черного углерода в год, во время стоянки на якоре - от 3.30 тонн до 8.29 тонн, а во время маневрирования - от 2.60 тонн до 4.65 тонн. Среди типов двигателей, основной объем выбросов черного углерода приходился на главные и вспомогательные двигатели. Ежегодные выбросы черного углерода от главных двигателей составляли от 9.14 тонн до 15.77 тонн, а от вспомогательных двигателей - от 15.77 тонн до 29.85 тонн. Выбросы от котлов были значительно ниже, составляя от 0.99 тонн до 1.99 тонн в год. Высокая интенсивность выбросов черного углерода наблюдалась в основных туристических районах, таких как архипелаг Шпицберген и Гренландия. Оседание черного углерода на лед и снег снижает их отражательную способность (альбедо), увеличивая поглощение тепла и ускоряя таяние¹¹³. Это подчеркивает значительное воздействие судоходства на хрупкую арктическую экосистему. Важно учитывать совокупное влияние различных атмосферных частиц, включая не только выбросы от судоходства, но и арктическую пыль естественного происхождения, количество которой, согласно исследованию Хитоши Мацуи и соавторов (2024), возрастает и влияет на процессы льдообразования в арктических облаках¹¹⁴.

С точки зрения потенциала глобального потепления за 100-летний горизонт, использование СПГ является наиболее экологически чистым вариантом топлива для судов в Арктическом регионе, за которым следуют VLSFO, MGO и HFO со скруббером. Например, эквивалент SO₂ при использовании HFO со скруббером составляет примерно 1 142 259 тонн, MGO - примерно 811 880.45 тонн, VLSFO - примерно 836 347.51 тонн, а СПГ - примерно 1 001 183.36 тонн за 100 лет.

Исследование Луиса Марелля и соавторов (2018) с использованием

¹¹³ Chen, Qiong & Lau, Yui-Yip & Ge, Ying-en & Dulebenets, Maxim & Kawasaki, Tomoya & Ng, Adolf. (2021). Interactions between Arctic passenger ship activities and emissions. *Transportation Research Part D Transport and Environment*. 97. 102925. 10.1016/j.trd.2021.102925.

¹¹⁴ Matsui, H., Kawai, K., Tobo, Y. et al. Increasing Arctic dust suppresses the reduction of ice nucleation in the Arctic lower troposphere by warming. *npj Clim Atmos Sci* 7, 266 (2024).

региональной модели WRF-Chem также выявило, что арктическое судоходство является значимым источником приповерхностных аэрозолей и озона в летний период, особенно в Норвежском и Баренцевом морях. В летний период 2012 года арктическое судоходство вносило значительный вклад в концентрацию приповерхностного озона (15-25% от общего объема) в регионах Норвежского и Баренцева морей, а также в концентрацию приповерхностных аэрозолей (10-30% для ВС, 10-30% для нитратов, сульфатов и аммония). Авторы отмечают, что в их моделировании прямое радиационное воздействие аэрозолей от летнего арктического судоходства в 2012 году составляло приблизительно 6 mW/m^2 , в то время как для озона этот показатель был отрицательным, около -15 mW/m^2 из-за частых температурных инверсий в Арктике. Более того, в сценарии на 2050 год с увеличением транзитного судоходства через Северный Ледовитый океан в летний период, выбросы от арктического судоходства могут стать основным источником приповерхностного аэрозольного и озонового загрязнения вдоль маршрутов, с увеличением приповерхностного озона до 10 ppbv и приповерхностных аэрозолей (ВС до 250 ng/m^3). При этом прогнозируется большое отрицательное не прямое радиационное воздействие аэрозолей от арктического судоходства, достигающее -0.8 W/m^2 в летний период 2050 года¹¹⁵.

Дополнительно, исследование Фигеншау Н. и Цзиньмэй Лу, фокусируется на временной и пространственной изменчивости выбросов от судоходства вдоль Северного морского пути в период с 2014 по 2019 год и прогнозах на будущее (некоторые данные по выбросам сведены в таблицу 3.2). Временная изменчивость выбросов показала четкую сезонность: большая часть выбросов приходилась на летние и осенние месяцы. Например, в 2019 году более 90% годовых выбросов диоксида серы и оксид азота произошло в период с июля по ноябрь.

¹¹⁵ Marelle, L., Raut, J.-C., Law, K., Duclaux, O. (2018). Current and future arctic aerosols and ozone from remote emissions and emerging local sources — Modeled source contributions and radiative effects. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 12,942–12,963.

	2014-2019	2030
углекислый газ	518.5	2250
оксидов азота	8.0	33.7
оксидов серы	1.4	5.2
оксида углерода	1.2	5.5
углеводород	0.3	1.2
твёрдые частицы	0.2	0.9
черный углерод	0.04	0.2

Таблица 3.2. Выбросов от судоходства по данным исследования Фигеншау Н. и Цзиньмэй Лу

Пространственное распределение выбросов в течение полярного лета (июль-сентябрь) было сосредоточено вдоль основных морских путей в западной и центральной частях Северного морского пути. Согласно прогнозам этого исследования, к 2030 году в высоком сценарии ожидается значительное увеличение выбросов, что подчеркивает потенциальное воздействие роста судоходства на арктическую атмосферу¹¹⁶.

В свете сложностей прогнозирования изменений арктического морского льда с помощью традиционных моделей, исследование Сабольча Блажека, Альваро Эскрибано и Эржебет Кристоф, предлагает альтернативный подход. Используя новые классы моделей, основанных на оценках и пороговых значениях, авторы продемонстрировали, что их модели превосходят современные общие циркуляционные модели (GCMs) в прогнозной способности для объема арктического морского льда за пределами выборки. В частности, их модель на основе скоринга показала лучшие результаты в прогнозировании объема арктического льда по сравнению со стандартными климатическими моделями. Авторы также выявили переломный момент в арктической ледовой системе, подчеркивая нелинейный характер изменений и

¹¹⁶ Figenschau N, Lu J. Seasonal and Spatial Variability of Atmospheric Emissions from Shipping along the Northern Sea Route. Sustainability. 2022; 14(3):1359.

потенциальные трудности для моделей, которые не учитывают такие пороговые эффекты. Эти результаты указывают на важность разработки и применения новых статистических моделей для более точного прогнозирования критических изменений в Арктике, таких как потеря морского льда¹¹⁷.

В контексте таяния арктических льдов, открывающего новые возможности для судоходства, и возрастающего внимания к антропогенным и природным источникам выбросов, исследование Хуэмин Лю, Цзе Мао и Чжицзюнь Чжан, рассматривает проблемы сокращения выбросов в арктическом судоходстве. В работе подчеркивается, что потепление в Арктике приводит к сокращению ледяного покрова, что потенциально увеличивает судоходную активность и, как следствие, выбросы загрязняющих веществ. Авторы исследуют проблемы достижения целей по сокращению выбросов в этом чувствительном регионе и анализируют потенциальные решения, включая внедрение экологически чистых технологий и политические меры, направленные на снижение воздействия судоходства на арктическую окружающую среду и климат¹¹⁸.

В заключении параграфа отметим, как справедливо следует из Доклада о реализации Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года, важнейшими направлениями в сфере предотвращения техногенного воздействия на окружающую среду в сфере транспорта являются:

- внедрение инновационных технологий, обеспечивающих охрану атмосферного воздуха, водных ресурсов, сокращение доли захораниваемых отходов производства и потребления, снижение выбросов парниковых газов, шумового воздействия;
- совершенствование системы управления природоохранной деятельностью;
- обеспечение экомониторинга за воздействием на окружающую

¹¹⁷ Blazsek S. et al. Global, Arctic, and Antarctic Sea ice volume predictions using score-driven threshold climate models // *Energy Economics*. 2024. Vol. 134. p. 107591.

¹¹⁸ Liu H, Mao Z and Zhang Z (2024) From melting ice to green shipping: navigating emission reduction challenges in Arctic shipping in the context of climate change. *Front. Environ. Sci.* 12:1462623.

среду.

3.2. Прогнозируемые нарушения морского биоразнообразия

Интенсификация морского судоходства в Арктике представляет серьезную угрозу для биоразнообразия морских экосистем региона. Антропогенный шум, вибрация, риск столкновения с морскими животными и пересечение путей миграции являются основными факторами воздействия, потенциально способными привести к значительным нарушениям в структуре и функционировании арктических биоценозов. В дополнение к этим прямым воздействиям, изменение климата в Арктике, происходящее в два раза быстрее, чем в среднем по планете, усугубляет эти угрозы, действуя синергетически с такими факторами, как увеличение судоходства. Уменьшение площади и толщины морского льда, делает арктические воды более доступными для судов. Данное в свою очередь, повышает риск интродукции неаборигенных видов (НАВ) через обрастание судов и балластные воды. Согласно прогнозам, значительное количество потенциально опасных НАВ, вероятно, обретут подходящую среду обитания в районе Северного Ледовитого океана в условиях будущего климата, что в дальнейшем поставит под угрозу местные виды и экосистемы. Повышение температуры воздуха в Арктике на 7-9°C и изменение характера осадков к 2100 году также будут способствовать этим изменениям, создавая дополнительный стресс для нативных арктических видов и повышая вероятность локального или регионального вымирания уже находящихся под угрозой исчезновения видов¹¹⁹.

Помимо прямого физического воздействия и угрозы инвазивных видов, связанных с интенсификацией судоходства, арктические морские экосистемы сталкиваются с серьезной угрозой в виде закисления океана. Этот процесс вызван поглощением океаном антропогенного углерода из атмосферы, приводит к снижению водорода и уменьшению состояния насыщенности

¹¹⁹ Jiban Chandra Deb and Sarah A. Bailey. 2023. Arctic marine ecosystems face increasing climate stress. *Environmental Reviews*. 31(3): 403-451.

биогенных карбонатных минералов, таких как арагонит и кальцит. Северный Ледовитый океан считается наиболее уязвимым регионом к будущему закислению из-за изначально низких показателей насыщенности. Согласно прогнозам моделей земной системы в рамках сценария с высокими выбросами (RCP 8.5), ожидается, что к концу двадцать первого века весь Северный Ледовитый океан станет недонасыщенным по отношению к арагониту. Более того, уточненные оценки указывают на повышенную вероятность того, что значительные участки мезопелагической зоны океана (на глубине 400-800 м) будут недонасыщенными по отношению к кальциту к концу века. Такое усиленное закисление в сочетании с быстрыми физическими и биогеохимическими изменениями в Арктике, включая потепление и потерю морского льда, вероятно, усугубит воздействие изменения климата на уязвимые морские экосистемы, что будет иметь негативные последствия для организмов. Например, в исследовании Йенса Терхаара и соавторов отмечается, что подходящая среда обитания для такого ключевого вида, как арагонитовый крылоногий моллюск *Limacina helicina*, значительно сократится и повлечет за собой негативные последствия для зависимых от него пелагических пищевых сетей. Недонасыщенность кальцитом, в свою очередь, серьезно повлияет на кальцит-образующие организмы, такие как кокколитофориды и фораминиферы. Кроме того, повышение парциального давления углекислого газа к концу века негативно скажется на росте, выживаемости и поведении экологически важных видов рыб, таких как сайка¹²⁰.

Продолжая анализ воздействия климатических изменений и антропогенной активности на морское биоразнообразие Арктики, следует отметить значительное влияние потепления и сокращения морского льда на ключевые среды обитания, в частности на арктические морские леса, образованные крупными водорослями. Морские леса служат важным структурным местообитанием и обеспечивают жизненно важные функции в

¹²⁰ Terhaar, J., Kwiatkowski, L. & Bopp, L. Emergent constraint on Arctic Ocean acidification in the twenty-first century. *Nature* 582, 379–383 (2020).

экосистемах. В исследовании Тревора Т. Бринглоу и соавторов представлено моделирование распределения видов (Species distribution modelling, SDMs), которое демонстрирует, что изменение климата, особенно повышение температуры воды и уменьшение ледового покрова, приведет к потенциально серьезным потерям среды обитания для криофильных (холодолюбивых) видов морских водорослей в Арктике. Прогнозы указывают на смещение ареалов обитания этих видов на север и общее сокращение пригодных для них территорий к концу столетия в условиях продолжающегося изменения климата. Точные количественные показатели этих потерь варьируются в зависимости от конкретного вида и климатического сценария, однако модели в целом прогнозируют существенное сокращение и значительное снижение пригодности среды обитания. Авторы констатируют, что утрата этих местообитаний будет иметь каскадные последствия для ассоциированного биоразнообразия и общего функционирования арктических морских экосистем¹²¹.

Продолжая рассматривать многогранные угрозы арктическому морскому биоразнообразию, следует отметить значительные изменения, которые, как прогнозируется, произойдут в морских сообществах Тихоокеанской Арктики под воздействием будущего климата. Потепление и потеря морского льда приведут к глубоким изменениям, включая интенсивную «бореализацию» арктических сообществ. Этот процесс заключается в притоке бореальных таксонов (видов из более южных, бореальных вод) в более теплые и свободные ото льда районы Арктики, что будет способствовать сдвигу в составе сообществ. Бореализация потенциально может изменить свойства арктической экосистемы, увеличивая ее уязвимость¹²². Эти изменения в распределении видов и структуре сообществ являются частью широкого спектра последствий,

¹²¹ Bringlee TT, Wilkinson DP, Goldsmit J, Savoie AM, Filbee-Dexter K, Macgregor KA, Howland KL, McKindsey CW, Verbruggen H. Arctic marine forest distribution models showcase potentially severe habitat losses for cryophilic species under climate change. *Glob Chang Biol.* 2022 Jun;28(11):3711-3727.

¹²² Alabia, I. D., Molinos, J. G., Saitoh, S. I., Hirata, T., Hirawake, T., & Mueter, F. J. (2020). Multiple facets of marine biodiversity in the Pacific Arctic under future climate. *The Science of the total environment*, 744, 140913.

вытекающих из продолжающегося изменения климата и усиления антропогенного воздействия в регионе, при этом моделирование прогнозирует эти сдвиги в течение XXI века.

Наряду с этими изменениями в видовом составе и структуре морских сообществ, связанными с бореализацией, наблюдается также продвижение умеренных видов фитопланктона в сторону Северного полюса в Северном Ледовитом океане. Расширение ареала умеренных видов обусловлено ускорением течений Атлантики, которые приносят более теплые и соленые атлантические воды в Арктику. Приток этих атлантических вод приводит к изменениям в составе и продуктивности фитопланктона, где виды умеренных широт становятся более распространенными в Арктике¹²³. Сдвиги на уровне первичных продуцентов являются еще одним проявлением масштабных трансформаций, происходящих в арктических морских экосистемах под воздействием продолжающегося изменения климата и усиливающегося антропогенного давления.

На фоне отмеченных специфических изменений, проявляющихся в закислении вод, утрате ключевых местообитаний и сдвигах в ареалах видов, результаты исследований, проведенных в рамках проекта ArCS¹²⁴, указывают на то, что арктические экосистемы и их биоразнообразие в целом подвергаются глубоким трансформациям под воздействием изменения климата¹²⁵.

Изменения затрагивают не только морское биоразнообразие; арктические пресноводные экосистемы также крайне чувствительны к климатическим изменениям и другим факторам окружающей среды. Исследования подчеркивают важность создания базовых показателей для отслеживания

¹²³ Oziel, L., Baudena, A., Ardyna, M. et al. Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean. *Nat Commun* 11, 1705 (2020).

¹²⁴ ArCS (Arctic Challenge for Sustainability) - международный исследовательский проект, который с сентября 2015 года по март 2020 года осуществлялся при поддержке Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологий Японии. Цель проекта - изучение природно-климатических изменений в Арктике и выяснение их влияния на окружающую среду и общество.

¹²⁵ Hirawake, T., Uchida, M., Uchida, M., Abe, H., Alabia, I. D., Hoshino, T., Masumoto, S., Mori, A., Nishioka, J., Nishizawa, B., Ooki, A., Takahashi, A., Takahashi, A., Tanabe, Y., Tanabe, Y., Tojo, M., Tsuji, M., Ueno, H., Waga, H., ... Yamashita, Y. (2021). Response of Arctic biodiversity and ecosystem to environmental changes: Findings from the ArCS project. *Polar Science*, 27, 100533.

будущих изменений биоразнообразия в пресных водах Арктики¹²⁶. Основными факторами, вызывающими экологические изменения в этих системах, являются повышение температуры, изменение гидрологического режима и динамики льда.

Согласно данным Krause-Jensen et al. (2020), за период с 1940–1950 годов до 2000–2017 годов потенциальная площадь распространения сублиторальных макроводорослей увеличилась примерно на 30%, а интертидальных — на 6%, при этом средняя скорость полярной миграции составляла от 18 до 23 км за десятилетие. Эти количественные показатели свидетельствуют о существенном влиянии климатических изменений на растительные сообщества в прибрежных зонах Арктики и подчеркивают необходимость аналогичных исследований в пресноводных экосистемах для своевременного выявления и отслеживания трансформаций биоразнообразия¹²⁷.

Подобные процессы уже активно наблюдаются в морской среде. Так, по данным Chan et al. (2019), за период с 1960 по 2015 год в Арктике зафиксировано 54 события первичных интродукций, охватывающих 34 уникальных чужеродных вида. Наиболее пострадавшими регионами стали Исландский шельф (26% от всех случаев), Баренцево море (20%) и Норвежское море (20%), что говорит об их уязвимости к биологическим инвазиям. Основными путями проникновения новых видов являются морские суда (в 48% случаев — единственный путь, и в 39% — при множественных путях), а также естественное распространение (30%) и деятельность аквакультуры (25%). Климатические изменения и снижение ледового покрова также способствуют расширению ареалов южных видов на север, создавая условия для их выживания и размножения. Примером может служить быстрое распространение европейской креветки *Crangon crangon*, обнаруженной у

¹²⁶ Culp, J. M., Goedkoop, W., Christensen, T., Christoffersen, K. S., Fefilova, E., Liljaniemi, P., Novichkova, A. A., Ólafsson, J. S., Sandøy, S., Zimmerman, C. E., & Lento, J. (2021). Arctic freshwater biodiversity: Establishing baselines, trends, and drivers of ecological change. *Freshw Biol*, 00, 1–13.

¹²⁷ Krause-Jensen D, Archambault P, Assis J, Bartsch I, Bischof K, Filbee-Dexter K, Dunton KH, Maximova O, Ragnarsdóttir SB, Sejr MK, Simakova U, Spiridonov V, Wegeberg S, Winding MHS and Duarte CM (2020) Imprint of Climate Change on Pan-Arctic Marine Vegetation. *Front. Mar. Sci.* 7:617324.

побережья Исландии в 2003 году, которая, по прогнозам, может расширять ареал вследствие потепления вод Арктики¹²⁸.

На этом фоне важно отметить, что арктические регионы, ранее считавшиеся относительно изолированными, уже испытывают растущее давление со стороны инвазивных видов. Согласно Cottier-Cook et al. (2023), архипелаг Шпицберген становится всё более уязвимым к внедрению морских чужеродных видов из-за потери морского льда, потепления океана, изменения солёности и усиления судоходства. В рамках хронологического анализа рисков, проведенного экспертами, было определено 114 видов, потенциально угрожающих биоразнообразию региона, из которых 7 признаны особенно опасными по вероятности внедрения и экологическому воздействию. Среди них — два крупных десятиногих краба (*Paralithodes camtschaticus* и *Chionoecetes opilio*) и *Oncorhynchus gorbuscha* (горбуша), способные значительно повлиять на структуру донных сообществ и вытеснить аборигенные виды. Примечательно, что 71% этих видов, вероятно, распространяются посредством обрастания корпусов судов, а 57% — с балластными водами. При этом увеличивающаяся активность круизных и рыболовецких судов вокруг Шпицбергена — на 25% с 2013 по 2019 год, а количество пассажиров выросло на 73% — способствует созданию новых путей вторжений. Такие изменения, усиленные климатическими трендами (например, за последние 20 лет температура океана выросла в среднем на 1,45 °C относительно доиндустриальных значений¹²⁹), увеличивают вероятность успешной адаптации и распространения чужеродных видов в Арктике¹³⁰. Представленные данные дополняют выводы исследования Пекка Нииттинен и соавторов, в котором на основе анализа 273 видов растений, мхов и лишайников на 1200

¹²⁸ Chan FT, Stanislawczyk K, Sneekes AC, et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Glob Change Biol.* 2019;25:25–38.

¹²⁹ По данным доклада ЮНЕСКО «Состояние Мирового океана в 2024 году» <https://www.unesco.org/ru/articles/novyuy-doklad-yunesko-tempy-potepleniya-okeana-uskorilis-v-dva-raza-za-20-let-tempy-podema-urovnya>

¹³⁰ Cottier-Cook, E. J., Bentley-Abbot, J., Cottier, F. R., Minchin, D., Olenin, S., & Renaud, P. E. (2023). Horizon scanning of potential threats to high-Arctic biodiversity, human health, and the economy from marine invasive alien species: A Svalbard case study. *Global Change Biology*, Article e17009.

участках показало, что сокращение продолжительности снежного покрова может ускорять локальные вымирания видов в Арктике, особенно арктическо-альпийских видов (32% против 12% у бореальных), и при экстремальном сценарии может привести к потере около 15% изученных видов к 2050 году¹³¹.

Также следует представить данные исследование Жан-Батиста Тибо и соавторов (2022), в котором проводится анализ влияния возросшего судоходства в северной части Берингова моря на морских птиц в районе острова Святого Лаврентия. Отмечается, что интенсификация судоходства приводит в том числе к столкновениям с животными и шумовому воздействию. В исследовании отмечается, что ареал кормления птиц расширился, птицы регулярно кормятся за пределами существующего района, которого следует избегать (Area to be avoided - АТВА) вокруг острова Святого Лаврентия. Моделирование пригодности среды обитания выявило, что наиболее подходящие места кормления расположены в основном за пределами текущих границ АТВА к северу от острова. Например, зона высокой пригодности (>90%) простирается примерно на 50 км от острова, что более чем в два раза превышает ширину АТВА в этом районе. Авторы предполагают, что расширение северной границы АТВА всего на 35 км включило бы области максимальной пригодности среды обитания, что способствовало бы лучшей защите морских птиц и поддержанию культурной непрерывности коренного населения острова Святого Лаврентия, зависящего от этих морских ресурсов¹³².

Арктика является «горячей точкой» изменения климата, нагреваясь в 2,5 раза быстрее, чем в среднем по планете¹³³, что известно как арктическое усиление (АА). При этом стоит упомянуть, что темпы сокращения ледяного покрова в период 2005-2024 гг. замедлились на 55-63% по сравнению с

¹³¹ Niittynen, P., Heikkinen, R.K. & Luoto, M. Snow cover is a neglected driver of Arctic biodiversity loss. *Nature Clim Change* 8, 997–1001 (2018).

¹³² Thiebot J-B, Will AP, Tsukamoto S, Kitaysky AS and Takahashi A (2022) The Designated Shipping Avoidance Area Around St. Lawrence Island, Northern Bering Sea, Is not Sufficient to Protect Foraging Habitat of the Island's Breeding Seabird Community. *Front. Mar. Sci.* 9:875541.

¹³³ Горячая Арктика Т. Тюменева ЛСП «Северный полюс» // <https://rg.ru/2024/10/07/reg-szfo/poliarnik-vladimir-ivanov-rasskazal-kakaia-ekstremalnaia-pogoda-nas-zhdet.html>.

долгосрочным трендом 1979-2024 гг, однако это лишь «временная передышка»¹³⁴. В более широком контексте, исследование Алка Рани и соавторов подчеркивает, что температурные изменения приводят к сокращению морского льда, таянию вечной мерзлоты и увеличению выбросов парниковых газов, наземный снежный покров также уменьшается. Перечисленные факторы способствуют арктическому позеленению — увеличению растительного покрова (около 37.3% на участках отбора проб с 1985 по 2016 год) и распространению бореальных видов на север. Происходит замещение долгоживущих арктических организмов более мелкими и короткоживущими бореальными аналогами¹³⁵. Увеличение зимних оттепелей и такое явление, как «дождь на снегу», на Шпицбергене также сказываются на наземных экосистемах и могут приводить к гибели животных, например, северных оленей. По сравнению с Антарктикой, которая является одним из самых суровых мест на Земле с ограниченным биоразнообразием, и где человеческая активность регулируется четырьмя основными международными соглашениями¹³⁶, которые признаются и исполняются большинством государствами, Арктика более уязвима к последствиям изменения климата и антропогенного воздействия из-за своего географического положения и растущей экономической активности. Изменения климата и деятельность человека усиливают темпы и масштабы биологических инвазий, угрожая местным сообществам и изменяя структуру пищевых сетей. Потеря морского льда создает благоприятные условия для распространения более южных видов, в то время как местные виды страдают¹³⁷. По оценкам, в Арктике обитает около

¹³⁴ Арктический морской лёд. 20.08.2025. NASA/Кэтрин Хансен Rutab.net

¹³⁵ A.Rani, K. Chand Saini, K. Gupta, Arctic biodiversity amidst looming climate apocalypse: Current status and way forward August 2021. In book: Understanding Present and Past Arctic Environments: An integrated approach from climate change perspective. Chapter: 11 Publisher: Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-822869-2.00003-7.

¹³⁶ Договор «Об Антарктике» 1959 г.; Протокол к Договору об Антарктике по защите окружающей среды 1991 г.; Конвенция по консервации Антарктических тюленей 1972 г.; Конвенция по консервации Антарктических морских живых ресурсов 1980 г. Brazovskaya YE, Ruchkina GF (2020) Current Human Impact on Antarctic Seabed Environment and International Law. The Law of the Seabed, Access, Uses, and Protection of Seabed Resources Series: Publications on Ocean Development 90:125–135. DOI: 10.1163/9789004391567_008

¹³⁷ Alka Rani, Khem Chand Saini, Kriti Gupta. Arctic biodiversity amidst looming climate apocalypse: Current status and way forward. In book: Understanding Present and Past Arctic Environments: An integrated approach from climate change perspective. Chapter: 11 Publisher: Elsevier. August 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-822869-2.00003-7.

21 000 видов растений, животных и грибов, значительная часть которых эндемична. Существуют прогнозы, которые приводят к неутешительным выводам о возможном исчезновении до 30-40 % видов растений и животных¹³⁸.

Все приведенные данные подчеркивают комплексный характер угроз для арктического биоразнообразия, вызванных изменением климата и увеличением хозяйственной деятельности, что требует принятия срочных мер для сохранения этой уникальной и хрупкой экосистемы.

3.3. Изменение гидрохимических и гидрофизических характеристик арктического бассейна Северного Ледовитого океана

В рамках изучения изменений в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана особое внимание уделяется трансформации его гидрохимических и гидрофизических характеристик, включая динамику морского льда. Наблюдаемые сдвиги в этих параметрах являются ключевыми индикаторами продолжающегося изменения климата и имеют долгосрочные последствия для всей арктической системы.

В области геологического развития Арктического бассейна, исследование Никишина А. М., Малышева Н. А. и Петрова А. Л. освещает основные проблемы структуры и истории его формирования, представляя обзор ключевых этапов и тектонических элементов. Северный Ледовитый океан структурно разделяется на два основных бассейна: Евразийский, образованный в результате спрединга океанического дна в кайнозое, и Амеразийский, имеющий более древнюю и сложно устроенную структуру с чередованием континентальных и, предположительно, океанических сегментов. Среди важнейших батиметрических объектов выделяются хребет Ломоносова, который считается континентальным по своей природе и был отделен от Евразийской окраины в результате раскрытия Евразийского бассейна, а также

¹³⁸ Problems of Legal Regulation of the North Polar Region of the Earth. V. L. Miheev, Y. E. Brazovskaya // Current Developments in Arctic Law. Vol. 7 (2019), at 23-29.

хребет Альфа-Менделеева в Амеразийском бассейне, происхождение которого до сих пор является предметом дискуссий (континентальное или океаническое).

Согласно исследованию Х. Сумата, Л. де Стёр, Д.В. Дивайна, М.А. Гранскога и С. Герланда, в 2007 году в Северном Ледовитом океане произошел сдвиг режима толщины морского льда, переход от более толстого и деформированного льда к более тонкому и однородному ледяному покрову. Этот сдвиг был выявлен в результате непрерывного мониторинга морского льда в проливе Фрама за последние три десятилетия. После сдвига доля толстого и деформированного льда сократилась вдвое, или на 52% для льда толщиной более 4 м, и с тех пор не восстановилась. Высота модального пика, характеризующего однородность распределения толщины льда, увеличилась на 67%, а толщина модального пика уменьшилась примерно на 1 м (с 2,7 м до 1,7 м). Отмечается ускорение дрейфа льда, которая также способствует сокращению времени пребывания: скорость дрейфа на запад в Аляскинском секторе увеличилась на 71%, скорость дрейфа на север в Сибирском секторе увеличилась на 42%, а скорость Трансполярного дрейфа увеличилась на 37%¹³⁹.

Продолжая данную тему, исследование Полякова И.В. и соавторов выявило возрастающую роль атлантических вод в потере морского льда в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана. Отмечается, что недавнее сокращение ледяного покрова привели к усилению зимней вентиляции внутренних вод океана. Связанное с этим увеличенное выделение океанического тепла сократило образование зимнего морского льда со скоростью, сопоставимой с потерями от атмосферного термодинамического воздействия, что объясняет недавнее сокращение ледяного покрова в восточной части Евразийского бассейна. Данное распространяющееся явление, названное «атлантификацией», представляет собой важный шаг к новому арктическому климатическому состоянию с существенно большей ролью атлантических притоков. С 2011 года восточная часть Евразийского бассейна практически

¹³⁹ Sumata, H., de Steur, L., Divine, D.V. et al. Regime shift in Arctic Ocean sea ice thickness. *Nature* 615, 443–449 (2023).

свободна ото льда (менее 10% ледяного покрова) в конце лета. Ежегодная площадь открытой воды за последние годы увеличилась с менее чем одного месяца до более чем трех месяцев. Средняя толщина льда в марте уменьшилась примерно на 0,5 м в период с 2003 по 2015 год. Наблюдения за период 2013-2015 годов показали усиление сезонных сигналов в подповерхностных слоях. Диапазон сезонных температур слоя атлантических вод на якорной станции МЛ4¹⁴⁰ увеличился с 0,2-0,3°C в 2004/07 годах до более 1°C в 2013/15 годах. Верхняя граница теплого слоя атлантических вод поднялась ближе к поверхности океана, что согласно исследованию эквивалентно сокращению прироста льда на 54 и 40 см в зимние сезоны 2013/14 и 2014/15 годов соответственно. Увеличение потока тепла объясняет потери морского льда исключительно за счет усиления восходящего переноса тепла атлантическими водами¹⁴¹.

В исследовании Тархановой М.А. и Голубевой Е.Н. рассматривается влияние увеличенного речного стока на гидрологические характеристики Северного Ледовитого океана. Результаты их численного моделирования показали, что увеличение расхода арктических рек способствует повышению устойчивости разделения водной толщи на слои разной плотности, температуры, солёности и т. п. за пределами шельфовых районов, что сокращает глубину осенне-зимнего перемешивания и позволяет атлантическим водам, распространяющимся вдоль материкового склона, сохранять свое тепло. Об этом свидетельствует повышение теплосодержания вод верхнего 200-метрового слоя восточной части Евразийского бассейна и подъем верхней границы слоя атлантических вод в этом регионе. Постепенное увеличение объема поступления пресных вод в Северный Ледовитый океан хорошо задокументировано и наблюдается с самого начала мониторинга арктических рек (с 1936 года на евразийских реках и с 1970-х годов на реках Северной

¹⁴⁰ Якорная океанографическая станция М14, расположенная в восточной части Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана, на континентальном склоне моря Лаптевых. Координаты станции: 78° 27.5' с.ш., 125° 53.7' в.д.

¹⁴¹ Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean

Америки). Увеличение притока тепла с речными водами в последнее десятилетие привело к потеплению обширных участков арктического шельфа, что впоследствии способствовало усилению теплообмена между океаном и атмосферой и уменьшению толщины морского льда зимой по сравнению с 1980-ми годами¹⁴².

В дополнение к изменениям в состоянии морского льда, атлантификации и влиянию речного стока, прогнозируются значительные изменения характеристик морских волн в Северном Ледовитом океане в течение XXI века. Согласно модельным ансамблевым расчетам, представленным Моховым И.И. и Погарским Ф.А., ожидается увеличение значительной высоты волны (H_s), периода волны (T) и энергии волны (P) в различных районах Северного Ледовитого океана. Наиболее существенные изменения прогнозируются в тех областях, которые в настоящее время большую часть года покрыты льдом. В частности, моделирование предсказывает значительное увеличение максимальной высоты волны в центральной части океана, морях Бофорта, Чукотском и Восточно-Сибирском морях. Данное связано с увеличением разгона волны (расстояния, на котором ветер воздействует на открытую водную поверхность) и удлинением сезона открытой воды вследствие отступления морского льда. По модельным прогнозам, (на основе сценария RCP8.5, сравнение периодов 2081-2100 и 1981-2000 гг.), средняя за год значительная высота волны по всему Северному Ледовитому океану может увеличиться примерно на 0,5 м, что составляет около 50-100%. В отдельных регионах, например, в центральной части Арктики, увеличение может превысить 1,5 м, достигая нескольких сотен процентов. Период волны и энергия волны также демонстрируют значительный рост, особенно в центральной Арктике. Изменения в характеристиках волн будут иметь серьезные последствия для эрозии побережья, морской инфраструктуры и арктических морских

¹⁴² Gradova, Marina & Golubeva, Elena. (2021). Changes in the hydrological characteristics of the arctic ocean under the influence of increasing river runoff. Inter expo GEO-Siberia. 4. 210-216.

экосистем¹⁴³.

Еще одним значительным изменением, затрагивающим гидрохимические характеристики Арктического бассейна, является закисление океана. В исследовании Харриса П.Т. и соавторов рассматривается влияние закисления на особенности рельефа дна морей и океанов, связанные с динамикой вод, осадкообразованием и влиянием живых организмов. Увеличение поглощения атмосферного CO₂ океаном приводит к снижению водородного показателя и концентрации карбонат-ионов, что делает арктические воды, более уязвимые из-за низких температур и солености, особенно подверженными этому процессу. Усиление растворения карбонатных составляющих осадков и биологических структур, таких как раковины и скелеты морских организмов (например, холодноводных кораллов, моллюсков, фораминифер) имеет серьезные последствия для экосистем. Подчеркивается, что Арктика подвергается закислению быстрее, чем многие другие регионы океана, из-за ее специфических гидрографических условий¹⁴⁴.

Еще одним аспектом гидрофизических изменений в Арктическом бассейне является изменчивость уровня моря. Исследование Кай Сяо и соавторов основанное на численном моделировании океана и морского льда высокого разрешения за период с 1979 по 2015 год, анализирует низкочастотную изменчивость уровня моря и влияние недавнего сокращения морского льда на тенденцию уровня моря в Северном Ледовитом океане. Моделирование успешно воспроизводит наблюдаемую картину тенденции уровня моря с его повышением в западной части Арктики и понижением в восточной. Общонаблюдаемое повышение уровня моря в масштабах всего бассейна в основном объясняется тепловым расширением воды. Декадная изменчивость уровня моря тесно связана с областями высокого и низкого

¹⁴³ Mokhov, I. & Pogarskiy, F.. (2020). Changes of sea waves characteristics in the Arctic basin from model ensemble simulations for the 21st century. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 606. 012038.

¹⁴⁴ Harris, Peter & Westerveld, Levi & Zhao, Qianshuo & Costello, Mark. (2023). Rising snow line: Ocean acidification and the submergence of seafloor geomorphic features beneath a rising carbonate compensation depth. Marine Geology. 463.

атмосферного давления «Арктическая дипольная аномалия»¹⁴⁵, который влияет на циркуляцию океана и распределение пресных вод. Исследование подчеркивает влияние сокращения морского льда на региональные тенденции уровня моря, главным образом через изменение пресноводного бюджета¹⁴⁶ и схем циркуляции. Уменьшение ледяного покрова приводит к усилению обмена теплом и пресной водой с атмосферой, а также к увеличению передачи ветрового напряжения поверхности океана, что влияет на течения и распределение водных масс, тем самым воздействуя на уровень моря. В частности, отступление морского льда в море Бофорта способствует усилению циклонического круговорота моря Бофорта, что приводит к накоплению пресной воды и повышению уровня моря в этом регионе. Результаты моделирования показывают, что недавнее сокращение морского льда играет значительную роль в формировании современных и будущих изменений уровня моря в Арктическом океане. Корреляция между кумулятивной суммой индекса Арктической дипольной аномалии и второй главной компонентой уровня моря в глубоководном бассейне Арктики составила 0.54 при уровне значимости 0.01¹⁴⁷.

Таким образом, представленные исследования освещают многогранные изменения, происходящие в Северном Ледовитом океане, включая трансформацию ледяного покрова, усиление влияния атлантических вод, изменение гидрологического режима под воздействием речного стока, геологические аспекты переноса наносов и динамику уровня моря, подчеркивая сложность и взаимосвязанность процессов в этой быстро меняющейся среде.

¹⁴⁵ Модель давления, характеризующаяся высоким давлением в арктических регионах Северной Америки и низким давлением в регионах Евразии. Арктический диполь способствует проникновению южных тёплых ветров в северные регионы, что усиливает таяние льда.

¹⁴⁶ Включает такие компоненты, как речной сток и разность между осадками и испарением.

¹⁴⁷ Xiao, K., Chen, M., Wang, Q. et al. Low-frequency sea level variability and impact of recent sea ice decline on the sea level trend in the Arctic Ocean from a high-resolution simulation. *Ocean Dynamics* 70, 787–802 (2020).

3.4. Комплексная геоэкологическая оценка состояния арктического бассейна Северного Ледовитого океана

Обобщая данные из разделов выше, ускоренное потепление Арктики, происходящее в два раза быстрее среднемирового показателя, приводит к значительному сокращению площади и толщины морского льда, что открывает новые морские пути и продлевает навигационные сезоны¹⁴⁸. Статистические данные подтверждают эту тенденцию: с 2013 по 2023 год количество судов, входящих в зону действия Полярного кодекса, увеличилось на 37%, а пройденное ими расстояние возросло на 111%¹⁴⁹. Основными драйверами этого роста являются добыча природных ресурсов, например, проекты «Мэри-Ривер» (по добычи железной руды в Баффинленде) и «Ямал СПГ» (по добыче, сжижению природного газа и поставкам полученного сжиженного природного газа на полуострове Ямал), и общие грузоперевозки, что приводит к значительному увеличению трафика балкеров и газозовов.

Увеличение судоходства в Арктике порождает серьезные и многогранные экологические угрозы, которые включают выбросы парниковых газов, ускорение таяния льда, риск разливов тяжелого мазута, шумовое загрязнение, распространение инвазивных видов и физическое воздействие на морских млекопитающих и ледовый покров. Уязвимость Арктической экосистемы, характеризующаяся низкой скоростью размножения видов и медленным разложением загрязняющих веществ в холодных условиях, значительно усугубляет последствия этих рисков.

Судоходство является значительным источником выбросов парниковых газов, включая черный углерод, который, оседая на снегу и льду, уменьшает их отражательную способность, что приводит к большему поглощению тепла и

¹⁴⁸ Taylor PC, Boeke RC, Boisvert LN, Feldl N, Henry M, Huang Y, Langen PL, Liu W, Pithan F, Sejas SA and Tan I (2022) Process Drivers, Inter-Model Spread, and the Path Forward: A Review of Amplified Arctic Warming. *Front. Earth Sci.* 9:758361.

¹⁴⁹ Shipping // WWF Arctic (Threats section). — Режим доступа: <https://www.arcticwwf.org/threats/shipping/> (дата обращения: 24.08.2025).

ускоренному таянию льда. Таким образом, увеличение судоходства, ставшее возможным благодаря таянию льда, напрямую способствует дальнейшему таянию через выбросы черного углерода, что, в свою очередь, открывает еще больше возможностей для судоходства. Данная опасная положительная обратная связь делает управление экологической безопасностью особенно сложным, поскольку сама «базовая линия» постоянно меняется под воздействием регулируемой деятельности.

Учитывая эту сложность и взаимосвязанность угроз, традиционные однофакторные подходы к управлению рисками оказываются недостаточными. Оценка рисков в Арктике затруднена из-за высокой неопределенности и недостатка данных о поведении нефти, распределении видов и их уязвимости. Существующие международные и региональные рамки управления, такие как Полярный кодекс и стратегии Международной морской организации (ИМО), безусловно, являются важными шагами в направлении повышения безопасности и защиты окружающей среды в Арктике, однако их эффективность снижается из-за фрагментации и отсутствия комплексной координации.

Автор диссертационного исследования полагает, что комплексная оценка экологической безопасности морского судоходства в Арктике может быть произведена по средствам многокритериального анализа решений, такого как метод PROMETHEE. Наименование метода – это аббревиатура от Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations, которая переводится на русский язык как «Метод формирования рангов предпочтения для обогащения оценок». Метод разработан Жан-Пьером Брансом в начале 1980-х годов и с тех пор стал популярным для решения сложных задач принятия решений. Данный метод имеет широкое применение в различных практических областях, таких как: управление окружающей средой, гидрология и управление водными ресурсами, бизнес и финансовый менеджмент, логистика и транспорт,

промышленное производство, управление энергопотреблением, и других¹⁵⁰. Метод позволяет принимать взвешенные решения, учитывая, как экологические, так и социально-экономические факторы. PROMETHEE является одним из наиболее часто используемых методов многокритериального анализа решений, относящимся к семейству методов превосходства. Его основное преимущество заключается в способности обеспечить полное ранжирование альтернатив на основе попарных сравнений, что делает его особенно подходящим для задач с ограниченным числом альтернатив и множеством конфликтующих критериев.

Аппарат метода PROMETHEE включает расчет двух основных потоков превосходства для каждой альтернативы: положительного потока (Φ^+) и отрицательного потока (Φ^-). Положительный поток (Φ^+) количественно определяет, насколько альтернатива превосходит все другие альтернативы, в то время как отрицательный поток (Φ^-) указывает, в какой степени другие альтернативы превосходят данную альтернативу. Эти потоки обеспечивают частичное ранжирование альтернатив (PROMETHEE I), которое может включать несравнимые варианты, когда альтернативы не могут быть однозначно ранжированы из-за противоречивых предпочтений. Для достижения полного ранжирования PROMETHEE II рассчитывает чистый поток превосходства (Φ), который является разницей между положительным и отрицательным потоками ($\Phi = \Phi^+ - \Phi^-$). Более высокий чистый поток означает лучшую альтернативу.

Методология PROMETHEE может эффективно применяться в условиях высокой неопределенности и недостатка данных, что характерно для арктических исследований. Веса критериев часто являются субъективными положительными значениями, а для компенсации ограниченности количественных данных в Арктике используется экспертное

¹⁵⁰ Behzadian M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications / M. Behzadian, R.B. Kazemzadeh, A. Albadvi, M. Aghdasi // European Journal of Operational Research. – 2010. – Vol. 200, No. 1. – P. 198–215

элиминирование ¹⁵¹ . Подход метода PROMETHEE позволяет включать субъективные предпочтения и экспертные суждения через веса и функции предпочтения, что делает его подходящим инструментом для условий Арктики с ограниченными данными. Данное означает, что модель опирается не только на жесткие количественные данные, которые ограничены, но и может использовать качественные и эмпирические знания арктических экспертов и коренных общин, формализуя их в рамках строгой аналитической структуры.

Применение метода PROMETHEE может способствовать разработке более скоординированных и адаптивных стратегий управления. Путем одновременной оценки различных альтернатив (например, маршрутов, типов судов, технологий снижения выбросов) по широкому спектру экологических, экономических и социальных критериев, можно выявить наиболее устойчивые решения, которые минимизируют риски и максимизируют выгоды. Данное позволит лицам, принимающим решения, не только ранжировать альтернативы, но и понимать компромиссы между конфликтующими целями, например, между экономической эффективностью и экологической защитой.

Процедура метода PROMETHEE I и II в контексте арктических пространств должна включать следующие систематические шаги (визуализация представлена в Приложении № 1):

Шаг 1: Определение отклонений на основе попарных сравнений, для каждой пары альтернатив (например, различных маршрутов или стратегий судоходства) и каждого критерия (например, уровня выбросов, риска разлива нефти) рассчитывается отклонение. Для этого многоатрибутной задаче принятия решения определяется набор альтернатив. Функция предпочтения $P_j(a,b)$ преобразует отклонение d между оценками двух альтернатив $g_j(a)$ и $g_j(b)$ по критерию j в степень предпочтения от 0 до 1;

Шаг 2: Применение функции предпочтения, соответствующей индексу. Разработано шесть типов функций предпочтения, которые обычно

¹⁵¹ Элиминирование – это логический прием, при котором последовательно выделяют влияние на результативный показатель одного фактора, при этом исключая действия всех других.

используются лицами, принимающими решения: обычный критерий, U-образный (квази-критерий), V-образный (критерий с линейным предпочтением), уровневый критерий, линейный (критерий с линейным предпочтением и зоной безразличия) и гауссовский критерий. Для количественных оценок обычно рекомендуется линейная функция (V-образная), а для качественных – обычный или уровневый критерий. В случаях с большим количеством уровней качественного индекса может использоваться многоуровневая функция предпочтения, разделяющая степени предпочтения на пять значений: 0, 0.25, 0.5, 0.75 и 1;

Шаг 3: Расчет общего индекса предпочтения. Общий индекс предпочтения $\pi(a,b)$ рассчитывается с учетом всех критериев, путем суммирования произведения веса каждого критерия w_j и функции предпочтения $P_j(a,b)$. Веса критериев, отражающие их относительную важность, могут быть определены с использованием различных методов, включая экспертную оценку или методы, такие как аналитический иерархический процесс (АИР) или вероятностный подход к оценке количества информации (энтропийный метод Шеннона);

Шаг 4: Расчет исходящего потока (Φ^+) и входящего потока (Φ^-). Исходящий поток показывает, насколько альтернатива (a) предпочтительнее всех других альтернатив, а входящий поток – насколько все другие альтернативы предпочтительнее (a);

Шаг 5: Расчет чистого потока превосходства (Φ). Чистый поток для каждой альтернативы рассчитывается как разница между исходящим и входящим потоками. Более высокий чистый поток указывает на лучшую альтернативу, что позволяет получить полное ранжирование.

Для применения метода PROMETHEE к экологической безопасности морского судоходства в Арктике, необходимо тщательно определить набор критериев, охватывающих основные экологические риски и меры безопасности. Критерии будут извлечены из анализа научной литературы и актуальных статистических данных.

Вывод к главе

Проведенный в рамках третьей главы анализ прогнозируемых изменений в арктической природной среде позволил выявить комплексный и синергетический характер угроз, исходящих от морского судоходства и ускоряющихся климатических процессов, а также обосновать необходимость перехода к новым методам их количественной оценки.

1. Установлено, что судоходство является нарастающим источником загрязнения атмосферы, приводя к значительному увеличению выбросов оксидов азота (на 115% с 2013 по 2023 г.) и черного углерода. Последний, оседая на лед и снег, напрямую способствует их таянию и ускорению регионального потепления. Прогностические модели указывают, что к 2050 году в летний период судоходство может стать доминирующим источником приповерхностного озонового и аэрозольного загрязнения вдоль арктических маршрутов, что значительно усугубит антропогенную нагрузку на атмосферный компонент.

2. Выявленные нарушения морского биоразнообразия, обусловленные как прямыми факторами (антропогенный шум, риск столкновений с морскими млекопитающими), так и системными трансформациями среды. Особую тревогу вызывает прогрессирующее закисление океана, которое, согласно прогнозам, приведет к недонасыщению всего Северного Ледовитого океана арагонитом к концу столетия, создавая прямую угрозу для существования кальцифицирующих организмов. Одновременно наблюдаются процессы «бореализации» экосистем, утрата ключевых местообитаний (например, арктических морских лесов) и интродукция неаборигенных видов, для которых судоходство является ключевым вектором распространения.

3. Подтверждена фундаментальная трансформация гидрофизических и гидрохимических характеристик бассейна. Ключевым событием стал режимный сдвиг 2007 года к более тонкому и молодому ледяному покрову, что сократило долю многолетнего льда более чем вдвое. Процесс усиливается

феноменом «атлантификации» – возрастающим тепловым влиянием атлантических вод, которое, в свою очередь, усугубляется увеличением речного стока, изменяющим состав водных масс. Прогнозируется также значительное (до 50-100%) увеличение энергии волн, что повлечет за собой усиление эрозии побережий и создаст дополнительные риски для морской инфраструктуры.

4. Сложность и взаимосвязанность выявленных изменений диктуют необходимость разработки и внедрения комплексных инструментов оценки. Такие инструменты должны учитывать множественные и часто противоречивые критерии в условиях высокой неопределенности и ограниченности данных, характерных для арктических исследований. В качестве перспективной методологической основы для комплексной геоэкологической оценки автор диссертационного исследования считает перспективным применение метода PROMETHEE.

ГЛАВА 4. Разработка предложений по снижению антропогенной нагрузки на арктическую природную среду от морского судоходства

4.1. Разработка методики по оценке геоэкологического состояния арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства

Арктический регион переживает беспрецедентные изменения под воздействием климатических факторов и антропогенной деятельности. Как было установлено в предыдущих главах, судоходство является значительным источником многофакторного давления на уязвимые экосистемы. Оценка экологического состояния в условиях таких множественных стрессоров требует применения специализированных методологических подходов, способных учитывать сложные синергетические эффекты. Традиционные однокритериальные методы оценки оказываются недостаточными для анализа совокупного воздействия климатических изменений, антропогенного загрязнения и биологических инвазий. В настоящем параграфе на основе методологии PROMETHEE II проведем геоэкологическую оценку состояния арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства.

В качестве альтернатив для сравнительной оценки рассмотрим три временных периода, отражающих динамику антропогенной нагрузки:

- a₁ - Базовый период (2012–2017 гг.);
- a₂ - Переходный период (2018–2023 гг.);
- a₃ - Прогнозный период (2030 г.).

На основе комплексного анализа научной литературы, проведённого в предыдущих главах, был определён набор из семи ключевых критериев геоэкологической оценки:

- критерий C₁ характеризует атмосферные выбросы оксидов азота от судоходства;
- критерий C₂ отражает эмиссию черного углерода от круизно-экспедиционных судов;

- критерий C_3 показывает концентрацию приповерхностного озона;
- критерий C_4 определяет степень закисления океана через недонасыщенность арагонитом;
- критерий C_5 количественно описывает интенсивность биологических инвазий;
- критерий C_6 характеризует потерю ключевых местообитаний арктических видов;
- критерий C_7 отражает скорость климатических изменений через темп арктического потепления.

Весовые коэффициенты (w_j) определены методом прямой расстановки с учетом следующих принципов:

1. Критерии ранжированы по степени экологической значимости воздействия на арктические экосистемы на основе анализа научной литературы, рассмотренной выше;
2. Наибольший вес (0.18) присвоен выбросам NO_x как предшественнику множественных воздействий;
3. Критерии с необратимыми последствиями (черный углерод, закисление) получили веса 0.15-0.16;
4. Индикаторные критерии (озон, скорость потепления) получили умеренные веса 0.12.

Валидация весовых коэффициентов проведена через анализ чувствительности: изменение весов в пределах $\pm 20\%$ не изменяет итогового ранжирования альтернатив.

Определим следующие весовые критерии и пороги предпочтения исходя из экологической значимости:

Выбросы NO_x , весовой коэффициент как $w_1 = 0.18$ - оксиды азота являются предшественниками формирования приповерхностного озона и вторичных аэрозолей, оказывающих множественное воздействие на арктические экосистемы. Высокий вес обусловлен прямым токсическим действием на морской фитопланктон, влиянием на радиационный баланс через

формирование аэрозолей и долгосрочными последствиями для биогеохимических циклов азота в Арктике. Порог предпочтения¹⁵² как $p_1 = 2000$ тонн/год, что соответствует 10% от базового уровня выбросов 2012-2017 гг. и отражает предполагаемую «минимальную экологически значимую разность» для арктических экосистем - величину изменения, ниже которой биологические эффекты не детектируются или маскируются естественной изменчивостью.

Второй по значимости вес - **черный углерод** отражает критическую роль в положительной обратной связи климатической системы через снижение альbedo льда, определим его весовой критерий как $w_2 = 0.16$, порог предпочтения как $p_2 = 10$ тонн/год, установлен на основе данных о критической концентрации ВС (≥ 50 нг/г снега), необходимой для значимого снижения альbedo поверхности.

В связи с тем, что **приповерхностный озон** оказывает прямое токсическое воздействие на морской фитопланктон и влияет на продуктивность арктических экосистем. Относительно низкий вес обусловлен тем, что озон является следствием первичных выбросов, уже учтенных в критерии C_1 . Пороговое значение $p_3 = 5\%$ выбрано как нижняя граница биологически значимого отклика арктических организмов на изменение концентрации озона. Выбор данного значения согласуется с общепринятой практикой определения порогов воздействия атмосферного озона на биоту, основанной на метриках экспозиции (AOT40, PODy) и концепции минимального значимого эффекта¹⁵³
¹⁵⁴. Изменения менее 5% соответствуют фоновым флуктуациям и не приводят к детектируемым физиологическим эффектам: не нарушается

¹⁵² Порог предпочтения — это параметр в методе PROMETHEE, который определяет величину отклонения между альтернативами, при превышении которой одна альтернатива полностью превосходит другую по данному критерию.

¹⁵³ Deb J.C., Bailey S.J. Arctic marine ecosystems face increasing climate stress. *Environmental Reviews*. 2023;31(3):403–451. <https://doi.org/10.1139/er-2022-0101>

¹⁵⁴ Agathokleous E, Feng Z, Oksanen E, Sicard P, Wang Q, Saitanis CJ, Araminiene V, Blande JD, Hayes F, Calatayud V, Domingos M, Veresoglou SD, Peñuelas J, Wardle DA, De Marco A, Li Z, Harmens H, Yuan X, Vitale M, Paoletti E. Ozone affects plant, insect, and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity. *Sci Adv*. 2020 Aug 12;6(33):eabc1176. doi: 10.1126/sciadv.abc1176. PMID: 32851188; PMCID: PMC7423369.

фотосинтетическая активность фитопланктона и репродуктивные функции ключевых видов арктической фауны остаются в норме.

Закисление океана, как $w_4 = 0.15$, высокий вес обусловлен необратимостью процессов закисления и их фундаментальным влиянием на кальцифицирующие организмы, составляющие основу арктических пищевых сетей. Критерий порогового значения обозначим как «недонасыщенность арагонитом» и определим как $p_4 = 0.2$, что соответствует критическому порогу, при котором начинается растворение раковин планктонных организмов.

Биологические инвазии, как $w_5 = 0.14$, вес отражает долгосрочный и потенциально необратимый характер биологических инвазий. Инвазивные виды способны кардинально изменить структуру арктических сообществ, при этом их воздействие накапливается во времени и может проявиться с задержкой. Пороговое значение как $p_5 = 15$ случаев (для биологических инвазий) установлено на основе анализа данных о скорости распространения инвазивных видов в арктических условиях. Менее 15 дополнительных случаев интродукции за период не приводят к значимым изменениям в структуре биоценозов из-за высокой смертности неадаптированных видов в экстремальных арктических условиях.

Потеря местообитаний, как $w_6 = 0.13$, умеренно высокий вес обусловлен прямым влиянием на популяции ключевых видов арктической фауны. Потеря критических местообитаний приводит к фрагментации популяций и снижению репродуктивного успеха эндемичных арктических видов. Пороговое значение определим как $p_6 = 5 \%$, что соответствует минимальной потере площади местообитаний, которая приводит к измеримым изменениям в популяционной динамике ключевых арктических видов.

Следующим компонентом определим **скорость климатических изменений**, весовой критерий представим как $w_7 = 0.12$. Равные умеренные веса отражают их роль как индикаторов общего антропогенного воздействия. Озон характеризует качество воздуха и влияет на продуктивность экосистем, а скорость потепления определяет адаптационные возможности биоты к

изменяющимся условиям. Пороговое значение как $p_7 = 0.01^\circ\text{C}/\text{год}$, установленное на основе анализа адаптационных возможностей арктических экосистем. Предполагается, что при таких медленных темпах потепления фенологические сдвиги будут незначительными, а экосистемы смогут адаптироваться без критического рассогласования трофических связей.

Количественные оценки альтернатив по каждому критерию ($g_j(a_i)$) основаны на фактических данных научных исследований и статистических наблюдений, проанализированных ранее. Сводные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Исходные данных для многокритериального анализа

Критерий	Вес (w)	a_1	a_2	a_3	Порог (p)
C_1 (NO_x , тонн/год)	0.18	8000	17200	33700	2000
C_2 (BC, тонн/год)	0.16	39.17	65.41	200	10
C_3 (O_3 , %)	0.12	15	20	40	5
C_4 (недонас. арагонит)	0.15	0.2	0.5	1.0	0.2
C_5 (биоинвазии, случаи)	0.14	54	78	125	15
C_6 (потеря местообит., %)	0.13	6	15	30	5
C_7 (потепление, $^\circ\text{C}/\text{год}$)	0.12	0.0587	0.0669	0.0828	0.01

Аппарат метода PROMETHEE позволяет обобщить оценки по всем критериям в единый показатель - чистый поток превосходства (Φ), который и является основой итоговой формулы (Приложение № 2 Формула для оценки экологического состояния арктической морской среды на основе множественных критериев (PROMETHEE II)).

Специфика применения формулы для оценки арктической морской среды заключается в:

- критериально-ориентированном подходе: семь критериев охватывают ключевые аспекты воздействия судоходства на экосистему;
- временной динамике: альтернативы представляют различные временные периоды, позволяя отследить эволюцию экологического состояния;

- экологической интерпретации весов: весовые коэффициенты отражают относительную значимость различных типов воздействия на арктические экосистемы;

- пороговых значениях: пороги предпочтения установлены исходя из экологической значимости изменений параметров среды.

Таким образом, данная формула объединяет все компоненты многокритериального анализа: систему экологически обоснованных критериев и их весов, функции предпочтения с пороговыми значениями, и процедуру обобщения данных для упрощения их анализа и интерпретации, обеспечивающую получение сводного показателя геоэкологического состояния для мониторинга, сравнительного анализа и поддержки принятия управленческих решений.

Таблица 4.2 – Сводная таблица результатов расчетов

Временные периоды	Исходящий поток (Ф+)	Входящий поток (Ф–)	Чистый поток (Ф)
Базовый (2012-2017),	0.9892	0.0000	0,9892
Переходный (2018-2023)	0.5000	0.4892	0,0108
Прогнозный (2030)	0.0000	1.0000	- 1,0000

Таблица 4.3 – Шкала интерпретации интегрального показателя ФAGES

Диапазон ФAGES	Категория состояния	Характеристика
$0.75 < \Phi \leq 1.00$	Относительно стабильное	Экосистема сохраняет адаптационный потенциал, воздействия не превышают компенсаторных возможностей
$0.25 < \Phi \leq 0.75$	Умеренно трансформированное	Заметные изменения в структуре экосистемы, отдельные функции нарушены
$-0.25 < \Phi \leq 0.25$	Пороговое	Баланс деградиационных и адаптационных процессов, высокий риск перехода в критическое состояние

Диапазон ФАGES	Категория состояния	Характеристика
$-0.75 < \Phi \leq -0.25$	Деградированное	Системные нарушения экосистемных функций, частичная необратимость изменений
$-1.00 \leq \Phi \leq -0.75$	Критически деградированное	Утрата ключевых экосистемных функций, доминирование необратимых процессов

Полученные результаты в определенной части демонстрируют критическую взаимосвязь между интенсификацией судоходства и ускорением деградации арктических экосистем. Максимальный чистый поток превосходства базового периода (0.9892) отражает относительно стабильное состояние экосистемы при умеренном антропогенном воздействии. Переходный период характеризуется пороговым состоянием (0.0108), что свидетельствует о достижении критической точки экологического баланса, после которой негативные изменения начинают доминировать над адаптационными возможностями экосистемы.

Особую тревогу вызывает прогнозируемое состояние к 2030 году с максимальным отрицательным чистым потоком (-1.0000), что указывает на системную деградацию арктической морской среды. Синергетический эффект множественных стрессоров - атмосферных выбросов, закисления океана, биологических инвазий и климатических изменений - создает каскадные воздействия на всю экосистему. Эмиссия черного углерода особенно критична, поскольку создает положительную обратную связь через снижение альбедо льда, что ускоряет потепление и дальнейшее увеличение судоходной активности.

Формула ФАGES обеспечивает:

1. Количественную оценку: численное значение степени экологической деградации или улучшения;
2. Сравнительный анализ: возможность ранжирования различных временных периодов или сценариев;

3. Мониторинг изменений: отслеживание динамики экологического состояния во времени;

4. Принятие решений: результаты интегральной оценки обеспечивают научную основу для разработки природоохранных стратегий путём: (1) ранжирования критических факторов воздействия для приоритизации регуляторных мер; (2) сравнительного анализа альтернативных сценариев развития судоходства; (3) обоснования экологических стандартов для судов и ограничений на интенсивность судоходства в уязвимых акваториях Арктики.

Корректность формулы подтверждается математической консистентностью: $\sum w_j = 1$, обеспечивающей приведение разнородных критериев к сопоставимой шкале и корректность агрегирования результатов.

Формула объединяет в себе все компоненты многокритериального анализа, потенциально может позволить количественно оценить степень экологической деградации арктической морской среды и может быть использована для мониторинга изменений экосистемы, планирования природоохранных мероприятий и разработки стратегий устойчивого развития арктического судоходства.

4.2. Сертификация морских судов, эксплуатируемых в арктическом бассейне

Сертификация морских судов, эксплуатируемых в полярных водах, основывается на положениях Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс) ИМО. В России эту систему дополняют национальные требования, регулирующие ледовые классы судов и правила плавания по акватории Северного морского пути. При этом, несмотря на их наличие, принимаемые меры значительно отстают от стремительных изменений, выявленных в настоящем исследовании.

Существующая сертификация не позволяет достаточно гибко адаптироваться к динамике климатических изменений и региональным особенностям, применяя универсальные стандарты к зонам с различной чувствительностью.

Кроме того, отмечаются пробелы в учете специфических видов воздействия, хотя «Подкомитет ИМО согласовал запрет на использование тяжелого мазута в арктических водах с 2024 г.», это лишь один аспект проблемы. В Главе 3 отмечается, что «угрозы морскому биоразнообразию» включают «антропогенный шум, риск столкновения с морскими животными, интродукцию неаборигенных видов». Перечисленные факторы в существующей сертификации либо учтены недостаточно строго, либо вовсе отсутствуют детальные требования к их минимизации. Наконец, отсутствует комплексная оценка экологической эффективности морских судов. Текущая сертификация преимущественно фокусируется на эксплуатационных характеристиках, не стимулирует проектирование, строительство и утилизацию судов с минимальным экологическим следом и не поощряет внедрение инновационных, опережающих технологий. Однако данное особенно актуально, учитывая планы по «дальнейшему развитию ледокольного флота», строительству новых портов, что увеличит общий антропогенный след.

В диссертационном исследовании разработана новая концепция сертификации морских судов «Арктический эко-стандарт», предназначенная для оценки и сертификации судов, работающих в Арктике. Концепция использует метод PROMETHEE для оценки судов по их экологической безопасности и технологической пригодности. Метод был выбран за его способность обеспечивать прозрачность в процессе принятия решений, позволяя объективно сравнивать суда по множеству противоречивых критериев, таких как выбросы, риск разливов, шумовое загрязнение и биологические инвазии. Метод позволяет избежать субъективности и сфокусироваться на наиболее значимых угрозах, что особенно важно для такой чувствительной среды, как Арктика.

На основе комплексного анализа научной литературы, проведённого в предыдущих главах, технической особенности морских судов, эксплуатируемых в северных широтах, были определены пять ключевых критериев, отражающих наиболее значимые антропогенные воздействия на арктическую экосистему от морских судов. Весовые коэффициенты (w_j) определены исходя из относительного влияния каждого фактора на окружающую среду.

C_1 - Критерий силовой установки и типа топлива (Вес = 0.30), критерию присвоен наибольший вес из-за прямого влияния выбросов на климат Арктики, в особенности черного углерода (сажи), который ускоряет таяние снега и льда.

C_2 - Критерий конструктивной безопасности и ледового класса (Вес = 0.25), определен как второй по значимости вес, так как предотвращение катастрофических разливов топлива в холодных водах, где углеводороды разлагаются крайне медленно, является высшим приоритетом.

C_3 - Критерий подводного шумового воздействия (Вес = 0.20), вес определен с учетом того, что шум от судов критически угрожает морским млекопитающим, которые используют акустическую коммуникацию для навигации и выживания.

C_4 - Критерий управления балластными водами и биообрастанием (Вес = 0.15), определен в связи с тем, что судоходство является основным вектором распространения инвазивных видов, которые представляют серьезную долгосрочную угрозу для уникальных арктических экосистем.

C_5 - Критерий экологической автономности (Вес = 0.10), оценивает способность судна минимизировать загрязнение (сточные воды, мусор) в районах с неразвитой портовой инфраструктурой.

Таблица 4.3 - Критерии и весовые критерии «Арктического эко-стандарта»

Критерий (С)	Описание	Вес (Wj)
С1	Топливо/Выбросы	0.30
С2	Конструкция/Ледовый класс	0.25
С3	Подводный шум	0.20
С4	Балластные воды/Инвазии	0.15
С5	Экологическая автономность	0.10

В целях апробации методики были выбраны два действующих и осуществляющих плавание в акватории Северного морского пути судна с принципиально разными характеристиками:

Судно «А» - сухогруз-площадка проекта 2.559М, построенный в начале 1980-х годов, назначение - работа на озерах и реках, ледовый класс у него отсутствует. Судно представляет собой пример устаревшего речного флота, который продолжает эксплуатации, в том числе и суровых условиях Арктики.

Судно «Б» - универсальный сухогруз, построенный в 1995 году, ледовый класс ICE CLASS IA, эквивалент класса Arc 4 по Полярному кодексу. Судно адаптировано для навигации в умеренных ледовых условиях, эксплуатируется в Карском море и порту Сабетта.

При этом стандартная практика многокритериального анализа, в частности, метода PROMETHEE, заключается в вычислении итогового чистого потока как разности. Такой подход позволяет получить сбалансированную оценку, которая одновременно учитывает преимущества судна по одним критериям и его недостатки по другим. Использование формулы произведения, как предложено в документе, приведет к искаженным результатам. Например, судно с отличными показателями по одному критерию, но с крайне низкими по другому, получит очень низкую итоговую оценку, так как произведение будет близко к нулю. Такой результат не отражает реальное положение дел и не позволяет провести адекватное ранжирование.

В целях обеспечения логической согласованности и корректности

оценки, в настоящем исследовании используется стандартная формула чистого потока, которая является разницей между исходящим и входящим потоками. Такое допущение является ключевым для сохранения целостности и практической ценности оценки.

Для проведения расчетов по методике $\Phi_{AGES-TECH}$ необходима оценка каждого судна по пяти критериям ($g_j(ai)$). Ввиду ограниченности данных, оценки судам по критериям были присвоены по шкале от 1 (наихудший показатель) до 5 (наилучший) на основе обоснованных допущений, основанных на типе, ледовом классе, возрасте и назначении судов.

Профиль судна «А» построено в 1980-х годах для озерно-речной эксплуатации, что определяет его конструктивные особенности и экологические характеристики.

g_1 (Топливо/Выбросы): судно, построенное в 1980-х годах, с большой долей вероятности использует традиционное дизельное топливо, имеющее высокий уровень выбросов, в том числе черного углерода. В отсутствие информации о модернизации силовых установок, его оценка по этому критерию является крайне низкой (1).

g_2 (Конструкция/Ледовый класс): судно имеет класс М-ПРЗ,0, относится к внутреннему водному транспорту и не имеет ледового класса по стандартам, применимым в Арктике. Более того, для речных судов, как правило, не характерно наличие двойного борта, требуемого для судов арктических категорий. Оценка по критерию является крайне низкой (1).

g_3 (Подводный шум): отсутствие данных о системах шумоподавления на судах такого возраста и назначения позволяет предположить, что уровень шума, генерируемого винтами и двигателями, высокий (2).

g_4 (Балластные воды/Инвазии): конвенция по управлению балластными водами (BWM Convention), требующая установки систем очистки (BWMS), вступила в силу значительно позже, в 2017 году. Судно «А», построенное в 1980-х, не было оснащено такими системами при постройке и, вероятно, не проходило модернизацию. Таким образом, оно не соответствует современным

стандартам D-2, а лишь минимальным D-1 (обмен балласта). Оценка является низкой (1).

g5 (Экологическая автономность): для судна, предназначенного для работы на речных маршрутах с развитой береговой инфраструктурой, характерны базовые, а не продвинутые системы очистки сточных, нефтесодержащих вод и утилизации мусора. Системы, скорее всего, не рассчитаны на длительную автономную работу в районах с отсутствием портов. Оценка является низкой (1).

Суммируя, судно «А» по своим конструктивным характеристикам, возрасту и назначению принципиально не приспособлено для работы в арктических условиях. Оценка судно в рамках данного стандарта будет демонстрировать фундаментальное различие между речным и морским флотом, эксплуатируемых в Арктики.

Профиль судна «Б» построено в 1995 году, имеет ледовый класс ICE CLASS IA, что свидетельствует о его изначальной адаптации к работе в умеренных ледовых условиях.

g1 (Топливо/Выбросы): главный двигатель судна - Wärtsilä 6R46 мощностью 5430 кВт., учитывая год постройки (1995), двигатель, вероятно, использует тяжелое топливо (HFO), которое было стандартом для морского флота того времени. Выбросы от HFO значительно выше, чем от современных двигателей, работающих на сжиженном природном газе (СПГ). Оценка является средней, поскольку судно все же является морским, но использует устаревший тип топлива (3).

g2 (Конструкция/Ледовый класс): наличие ледового класса ICE CLASS IA является ключевым преимуществом, указывает на усиленную конструкцию корпуса, что снижает риск пробоин и разливов при навигации в ледовых условиях. В отличие от судов высших категорий Полярного кодекса, прямое наличие двойного борта для топливных цистерн не подтверждается, поэтому оценка, хотя и является высокой, не может быть максимальной (4).

g3 (Подводный шум): отсутствие данных о специализированных

системах шумоподавления на судне, построенном в 1995 году, не позволяет присвоить высокую оценку, тем не менее, как сухогруз, оно генерирует меньше шума, чем специализированные ледоколы. Оценка является средней (3).

g4 (Балластные воды/Инвазии): судно было построено в 1995 году, задолго до вступления в силу BWM Convention. Информации о модернизации и установке современной системы очистки балластных вод (BWMS) (стандарт D-2) не имеется. Вероятно, судно соответствует только стандарту D-1 (обмен балласта), который считается недостаточным для предотвращения инвазий. Оценка является низкой (2).

g5 (Экологическая автономность): объем топливных и балластных цистерн известен, однако, как и в случае с другими судами того периода, маловероятно, что оно оснащено передовыми системами очистки сточных и нефтесодержащих вод, превышающими минимальные требования конвенции MARPOL. Оценка является средней (3).

Таким образом, судно «Б» является типичным представителем флота своего поколения, который имеет базовые конструктивные решения для работы в умеренных ледовых условиях (ICE CLASS IA), но уступает по всем экологическим параметрам современным судам. Оценка будет отражать этот «переходный» статус.

Таблица 4.4 - Сводная таблица оценок судов по критериям (gj)

Критерий	Вес (Wj)	Оценка «А»	Оценка «Б»
C ₁ (Топливо/Выбросы)	0.30	1	3
C ₂ (Конструкция)	0.25	1	4
C ₃ (Шум)	0.20	2	3
C ₄ (Инвазии)	0.15	1	2
C ₅ (Автономность)	0.10	1	3

Для проведения расчетов используется метод PROMETHEE, который включает оценку судов по критериям, вычисление исходящего и входящего потоков и, наконец, расчет итогового чистого потока. Расчет представлен в

Приложение № 3, сводные результаты расчетов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Сводная таблица результатов расчетов

Судно	Исходящий поток (Ф+)	Входящий поток (Ф-)	Чистый поток (Ф)
А	0.00	1.90	-1.90
Б	1.90	0.00	+1.90

Полученные результаты демонстрируют, что судно «Б» ($\Phi = +1.90$) значительно превосходит судно «А» ($\Phi = -1.90$) с точки зрения экологической безопасности и пригодности для работы в Арктике.

Отрицательный балл судно «А» является индикатором критического риска и демонстрирует его фундаментальное несоответствие арктическим требованиям, в первую очередь из-за отсутствия ледового класса и базовых конструктивных решений для безопасной навигации. Положительная оценка судно «Б» обусловлена наличием ледового класса ICE CLASS IA, что как считается является ключевым фактором безопасности. Тем не менее, его оценка отражает «переходный» статус: судно пригодно для работы в умеренных ледовых условиях, но уступает современным аналогам по таким параметрам, как тип топлива и наличие систем очистки балластных вод.

Анализ подтверждает, что методология $\Phi_{\text{AGES-TECH}}$ является эффективным инструментом, способным давать четкие и практически применимые результаты даже в условиях неполноты данных.

Ключевая ценность проведенного анализа заключается в том, что методология $\Phi_{\text{AGES-TECH}}$ демонстрирует свою работоспособность и дает однозначный, логически обоснованный результат даже при использовании допущений вместо точных количественных данных. Сделанные предположения основаны на объективных характеристиках анализируемых судов (возраст, класс, назначение), разница между ними носит не незначительный, а фундаментальный характер. Методология успешно преобразует эти качественные различия в убедительную итоговую оценку,

подтверждая свою работоспособность.

Полученные итоговые значения чистого потока Φ показывают, что судно «Б» с результатом +1.90 значительно превосходит судно «А», которое получило оценку –1.90. Более высокое значение чистого потока свидетельствует о том, что судно «Б» является более предпочтительной альтернативой с точки зрения экологической безопасности и технологической пригодности для работы в Арктике.

Различие в итоговых оценках обусловлено не только разницей в конкретных технологиях, но и фундаментальным отличием. Низкая оценка (-1.90) судна «А» является прямым следствием отсутствия даже базовых конструктивных решений (ледового класса), необходимых для безопасной работы в Арктике, что делает данное судно крайне уязвимым к катастрофическим инцидентам, таким как разлив топлива, предотвращение которого является приоритетом для методологии.

В то же время, судно «Б» демонстрирует, что даже суда, построенные в 1990-х годах, могут получить относительно приемлемую оценку, если они имеют определенные конструктивные особенности, такие как ледовый класс ICE CLASS IA. Такая характеристика является ключевым фактором, который позволил судну «Б» получить высокую оценку по критерию C2 и, в конечном итоге, занять более привлекательную позицию в данном сравнении. Оценка отражает переходный статус: судно подходит для работы в Арктике в умеренных условиях, однако значительно уступает современным судам по таким параметрам, как топливная эффективность, уровень шума и наличие систем очистки балластных вод.

Настоящий анализ наглядно продемонстрировал, что метод $\Phi_{AGES-TECH}$ является достаточно применимым и гибким инструментом, способным оценить суда с учетом их экологического соответствия для работы в Арктике, даже в условиях неполноты данных, что делает ее ценным инструментом для создания объективной системы экологической сертификации в Арктике.

Получается, что судно с более высоким значением чистого потока Φ

является более предпочтительным с точки зрения экологической безопасности и технологической пригодности для работы в Арктике. Количественный показатель позволяет создать объективную и прозрачную оценку судов и является основанием для присвоения судну одной из категорий сертификации, например «Арктик Базовый», «Арктик Эко-Стандарт», «Арктик Инноватор».

Уровень 1: «Арктик Базовый» (Arctic Baseline), судно соответствует минимальным требованиям, регламентированным Полярным кодексом ИМО и национальным законодательством, включая запрет на использование тяжелого мазута с 2024 года, и является обязательным уровнем допуска.

Уровень 2: «Арктик Эко-Стандарт» (Arctic Eco-Standard) для судов, значительно превышающих минимальные требования по одному или нескольким параметрам (например, судно использует СПГ, имеет подтвержденно сниженный уровень шума, или усовершенствованные системы очистки сточных вод с уровнем очистки, превышающим нормы МАРПОЛ 73/78). Суда этого уровня будут получать существенные экономические преференции (сниженные портовые сборы, приоритет при ледокольной проводке).

Уровень 3: «Арктик Инноватор» (Arctic Innovator), присуждаемый судам, использующим передовые, по сути, безэмиссионные или минимально воздействующие технологии (например, водородные, аммиачные или полностью электрические силовые установки, полностью замкнутый цикл обращения с отходами). Для таких судов могут быть предусмотрены максимальные преференции и признание в качестве лидеров устойчивого судоходства в Арктике.

Подобная сертификация может создать экономические и репутационные стимулы для судоходных компаний инвестировать в более безопасные и экологически чистые технологии. Внедрение Арктического эко-стандарта позволит также контролирующим органам принимать решение о выдаче разрешения на плавание в акватории Северного морского пути не в ручном режиме, а используя современные компьютерные технологии в том числе для

выявления аномалий и прогнозирования рисков.

4.3. Разработка методики по оценке антропогенной нагрузки и возмещению вреда в Арктической зоне

Существующие подходы к оценке и возмещению вреда от разливов нефти на международном уровне базируются на двух ключевых международных документах. Международная конвенция о гражданской ответственности за ущерб от загрязнения нефтью (CLC) устанавливает режим строгой ответственности судовладельца за ущерб, при этом предоставляя ему право ограничить свою ответственность установленными пределами, которые зависят от вместимости судна. Для покрытия этой ответственности судовладелец обязан иметь страхование или иное финансовое обеспечение. В дополнение к этому, Международная конвенция о создании Международного фонда для компенсации ущерба от загрязнения нефтью (FUND) создала международный фонд, который обеспечивает дополнительную компенсацию в тех случаях, когда защита по конвенции CLC оказывается недостаточной. Это происходит, если судовладелец освобожден от ответственности, финансово несостоятелен или ущерб превышает предел его ответственности¹⁵⁵.

В диссертационном исследовании отмечено, что климатические изменения оказывают существенное влияние на Северный Ледовитый океан, ускоряя скорость его потепления по сравнению с глобальным показателем. Данное делает Арктику исключительно уязвимой к любым антропогенным воздействиям. Традиционные методики недооценивают долгосрочный и кумулятивный ущерб в экосистемах с низкой скоростью самовосстановления, где загрязнители могут сохраняться десятилетиями. Разлив нефти в ледовых

¹⁵⁵ Бразовская Я. Е. Международно-правовое сотрудничество в борьбе с загрязнением моря нефтью // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2014. №4 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mezhdunarodno-pravovoe-sotrudnichestvo-v-borbe-s-zagryazneniem-morya-neftyu> (дата обращения: 07.08.2025).

условиях, как следует из Главы 1, может сохраняться десятилетиями, а последствия «трансформации гидросферы» (Глава 3) накапливаются со временем. Традиционные методики не учитывают кумулятивное воздействие от различных источников антропогенной нагрузки и синергетический эффект между ними. Наконец, существуют значительные трудности с получением полных данных и мониторингом. Обширность, удаленность и суровые климатические условия Арктики, а также неразвитость портовой инфраструктуры (Глава 2) затрудняют оперативный доступ к местам происшествий, проведение комплексных исследований и долгосрочного мониторинга, что ведет к недооценке реального ущерба.

В целях преодоления ограничений существующих подходов предлагается комплексная методика оценки и возмещения вреда - FAGES-MONITOR, основанная на методе многокритериального анализа PROMETHEE. Методика позволяет структурировать сложную проблему, объединяя количественные и качественные критерии, и обеспечивает справедливую в данном конкретном случае, оценку тяжести различных инцидентов. Данное потенциально позволит количественно оценивать совокупный ущерб и сформировать систему компенсации, переводя разнородные антропогенные воздействия в единый «Индекс экологического вреда».

Критерии методики выбраны на основе анализа наиболее значимых угроз, выявленных в Главах 1, 2 и 3 и отражают специфику арктической среды. Весовые коэффициенты (w_j) отражают относительную тяжесть последствий от различных видов вреда.

C_1 - Масштаб и тяжесть химического загрязнения: оценивает объем и токсичность разлитых веществ, учитывая их поведение в ледовых условиях, Присвоен наивысший вес ($Вес = 0.35$) из-за катастрофических и долгосрочных последствий разливов в ледовых условиях, где биodeградация углеводородов крайне замедлена. Разливы нефтепродуктов являются одной из главных угроз. В условиях Арктики биodeградация загрязнителей крайне замедлена (снижение содержания углеводородов за 3 месяца составляет лишь 10-45%), а физико-

химические свойства нефти (высокая вязкость, положительная температура застывания у нефти европейской части) усугубляют последствия.

S_2 - Интенсивность и продолжительность шумового воздействия (Вес = 0.10), отражает серьезную, но часто локализованную угрозу для морских млекопитающих. Уровень подводного шума в Арктике удвоился за шесть лет, что оказывает влияние на морских млекопитающих, нарушая их коммуникацию и навигацию.

S_3 - Выбросы черного углерода и их воздействие на альbedo (Вес = 0.25), высокий вес обусловлен прямым влиянием сажи на ускорение таяния льда, что создает разрушительную петлю обратной климатической связи. Прогнозируется пятикратный рост этих выбросов к 2050 году.

S_4 - Риск и масштаб биологической инвазии (Вес = 0.10), относительно низкий вес, так как последствия инвазий проявляются в долгосрочной перспективе и сложнее поддаются оценке в момент инцидента. Судоходство является ключевым вектором биологического загрязнения. Интродукция видов, как в случае с камчатским крабом, может привести к необратимым изменениям в структуре донных сообществ и вытеснению местных видов.

S_5 - Уязвимость и значимость затронутой экосистемы (Вес = 0.20), данный критерий выступает мультипликатором тяжести любого воздействия, так как ущерб в районах размножения или миграции видов несоизмеримо выше.

В целях апробации методики смоделируем два гипотетических инцидента с различным характером воздействия: инцидент «А» (a_1): аварийный разлив мазута. Разлив 500 тонн тяжелого топлива танкером в районе, миграции гренландских китов и инцидент «В» (a_2): систематическая работа круизного лайнера. Крупное судно на дизельном топливе курсирует в течение навигационного сезона (90 дней) вблизи особо охраняемой природной территории.

Для проведения расчетов каждому инциденту присваивается оценка по шкале от 1 (минимальный вред) до 10 (максимальный вред) на основе их описания.

Таблица 4.6. – Сводная таблица оценок по критериям (gj)

Критерий (Cj)	Вес (wj)	Оценка Инцидента «А» (gj(a1)) – Разлив мазута	Оценка Инцидента «В» (gj(a2)) - Круизный лайнер
C ₁ Хим. загрязнение	0.35	9	2
C ₂ Шум	0.10	2	8
C ₃ Черный углерод	0.25	1	7
C ₄ Инвазии	0.10	1	5
C ₅ Уязвимость	0.20	10	8

Для проведения расчетов используется метод PROMETHEE, который позволил рассчитать итоговый «Индекс экологического вреда», или чистый поток превосходства (Ф), рассчитывается как разность исходящего (Ф+) и входящего (Ф-) потоков, ход вычислений представлен в Приложение № 4, сводные результаты расчетов приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.7. - Сводная таблица результатов расчетов

Инцидент	Исходящий поток (Ф+)	Входящий поток (Ф-)	Индекс вреда (Ф)
А (Разлив мазута)	2.85	2.50	+ 0.35
В (Круизный лайнер)	2.50	2.85	- 0.35

Положительное значение индекса по $\Phi_{\text{AGES-MONITOR}}$ для Инцидента «А» (+0.35) указывает, что разлив мазута является более тяжелым и разрушительным событием по сравнению с сезонной работой круизного лайнера. Несмотря на то, что лайнер наносит значительный хронический вред по нескольким критериям (шум, черный углерод), катастрофический характер химического загрязнения (вес 0.35) в сочетании с максимальной уязвимостью экосистемы (вес 0.20) делает разлив мазута более опасным инцидентом.

Рассчитанный индекс может служить научной основой для определения размера компенсации, которая в случае Инцидента «А» должна быть существенно выше. Средства должны направляться в целевой «Арктический

экологический фонд компенсации», который будет формироваться за счет средств, рассчитанных на основе разработанной методике и распределяться не только на ликвидацию последствий, но и на долгосрочные программы восстановления экосистем и научные исследования. Приведенный пример демонстрирует, как метод Φ AGES-MONITOR позволяет структурированно и объективно сравнивать разнородные по своей природе антропогенные воздействия, переводя их в единый, сопоставимый «Индекс экологического вреда».

Вывод к главе

В данной главе предпринята попытка решить задачу по разработке предложений, направленных на снижение антропогенной нагрузки от морского судоходства и сформировать комплексную, многоуровневую и научно обоснованную систему мер. Автором диссертационного исследования в качестве решения предложен и адаптирован метод многокритериального анализа PROMETHEE II, на основе которого разработаны три взаимосвязанных инструмента.

1. **Методика Φ AGES:** разработан интегральный показатель для оценки общего геоэкологического состояния арктической морской среды. Подобный инструмент позволит количественно оценить степень экологической деградации арктической морской среды и может быть использована для мониторинга изменений экосистемы, планирования природоохранных мероприятий и разработки стратегий устойчивого развития арктического судоходства. Разработанный инструмент создает научную основу для принятия управленческих решений в области охраны арктических экосистем и устойчивого развития региона.

2. **Методика Φ AGES-TECH («Арктический эко-стандарт»):** создан практический инструмент для сертификации и ранжирования морских судов по уровню их экологической безопасности и технологической пригодности для работы в Арктике. На примере двух действующих судов «СТ-1418» и «Михаил

Бритнев» была продемонстрирована эффективность методики в различении судов, представляющих критический риск, и судов, имеющих базовую адаптацию. Преимуществом инструмента является его гибкость, так как метод позволяет прийти к логически обоснованным результатам даже при использовании аргументированных допущений в условиях неполноты данных. Предложена система сертификации судов, которая в перспективе должна стимулировать проведение модернизации флота.

3. **Методика Φ_{AGES} -MONITOR:** разработана инновационная концепция для оценки и возмещения экологического вреда, преодолевающая ограничения существующих международных конвенций. Методика позволяет рассчитывать Индекс экологического вреда на основе пяти критериев, учитывающих специфику Арктики, таких как масштаб загрязнения, воздействие черного углерода и уязвимость затронутой экосистемы. Результат может служить научной основой для расчета справедливой компенсации, направляемой в целевой «Арктический экологический фонд».

В совокупности разработанные методики (Φ_{AGES} , Φ_{AGES} -TECH и Φ_{AGES} -MONITOR) формируют единую, многоуровневую систему управления антропогенным воздействием, направленную на существенное снижение экологического следа морской деятельности в Арктике. Система позволит обеспечить переход от общего мониторинга состояния окружающей среды к индивидуальной оценке и сертификации судов и, наконец, к созданию механизма полной ответственности за нанесенный ущерб, что закладывает основу для устойчивого и экологически безопасного судоходства в Арктической зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование представляет собой комплексный анализ одной из наиболее актуальных и сложных проблем современности - геоэкологической оценки и минимизации воздействия морского судоходства на уязвимую природную среду Арктики. В условиях изменения климата, которое в Арктике происходит в 2-3 раза быстрее среднемировых показателей, и возрастающего экономического интереса к региону, данная работа восполняет существующие пробелы в знаниях, предлагая научно-обоснованную систему мер для обеспечения устойчивого и экологически безопасного развития морского судоходства в Арктике.

В ходе работы была решена серия ключевых задач, позволивших достигнуть поставленной цели.

Во-первых, проведен всесторонний теоретико-методологический анализ влияния морского судоходства на арктическую природную среду, который выявил основные категории антропогенного влияния судоходства на арктическую среду: химическое (разливы нефтепродуктов, выбросы в атмосферу), физическое (шумовое загрязнение, разрушение ледового покрова), биологическое (интродукция чужеродных видов). Определено, что комплексный подход к геоэкологической оценке, учитывающий совокупность природных и антропогенных факторов, а также региональные особенности, является необходимым условием для устойчивого развития морского судоходства в Арктике.

Во-вторых, экономико-географический и геоэкологический анализ подтвердил стратегическую важность и одновременно крайнюю уязвимость российской Арктики. В регионе сосредоточены колоссальные природные ресурсы: более 300 месторождений углеводородов и свыше 95% российских запасов никеля, кобальта и металлов платиновой группы, обеспечивая 10% ВВП страны. Одновременно с этим, климатические изменения приводят к стремительному сокращению площади морского льда — до 27% ниже нормы в

2023 году, что в том числе стимулирует рост грузоперевозок по Северному морскому пути (СМП), которые в 2024 году достигли рекордных 37,9 млн тонн, с прогнозом дальнейшего увеличения. Анализ существующей нормативно-правовой базы, включая Полярный кодекс, выявил, что существующие регулятивные механизмы и контрольно-надзорные функции значительно отстают от темпов экономической активности в регионе. Несмотря на развитое законодательство, его практическая реализация сталкивается с проблемами: неэффективности системы мониторинга промышленных выбросов, требования к допуску судов в акваторию Северного морского пути не в полной мере учитывают специфику экологических рисков, международные правовые механизмы не успевают за динамикой изменений в регионе. Для эффективного управления и минимизации рисков необходим переход от реактивного к прогностическому подходу, а именно вместо реагирования на уже возникшие проблемы необходимо их предвидеть и предупреждать.

В-третьих, на основе прогностического моделирования была дана оценка будущих изменений арктической природной среды. Обоснована недостаточность традиционных методов оценки и необходимость перехода к комплексным, многокритериальным подходам.

Научная новизна исследования заключается в разработке целостной, многоуровневой системы мер по снижению антропогенной нагрузки, основанной на количественных методах оценки и передовых концепциях. В качестве перспективной методологической основы предложено адаптировать метод многокритериального анализа PROMETHEE II, позволяющий интегрировать разнородные критерии в единую систему оценки и обеспечивать полное ранжирование альтернатив.

Впервые предложены и научно обоснованы:

– новая методика оценки геоэкологического состояния арктической морской среды по семи ключевым критериям, формирующая основу для долгосрочного мониторинга;

– новая методика «Арктический эко-стандарт» (FAGES-TECH) для практической сертификации и ранжирования морских судов по уровню экологической безопасности и технологической пригодности для работы в Арктике;

– новая методика FAGES-MONITOR для оценки и расчета справедливой компенсации экологического ущерба на основе «Индекса экологического вреда», учитывающего специфику Арктики и позволяющий учесть долгосрочный и кумулятивный ущерб. Для аккумуляции средств предложено создание «Арктического экологического фонда компенсации» (АЭФК).

Внедрение разработанных методик создает основу для эффективного экологического нормирования и устойчивого развития судоходства в Арктике.

Практическая значимость работы заключается в создании конкретного научно-методического аппарата, который может быть использован государственными органами (Минтранс России, Росморречфлот, Минприроды России, Росатом) при стратегическом планировании развития СМП, судоходными компаниями для перехода к экологически ответственному судоходству, а также научными и природоохранными организациями для дальнейших исследований и совершенствования международно-правового регулирования.

Проведенное исследование доказывает, что устойчивое развитие морского судоходства в Арктике возможно только при условии перехода от фрагментарного, реактивного регулирования к единой, проактивной и научно обоснованной системе управления. Предложенный комплекс мер формирует новую парадигму экологически ответственного освоения Арктики. Реализация этих предложений позволит обеспечить необходимый баланс между растущей экономической активностью и сохранением уникального природного наследия этого жизненно важного для всей планеты региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Русскоязычные источники

1. Алексушин Г. В. Развитие российского морского дизельного ледокольного флота и его место в экономическом освоении Севера // АИС. – 2024. – №56. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-rossiyskogo-morskogo-dizelnogo-ledokolnogo-flota-i-ego-mesto-v-ekonomicheskom-osvoenii-severa> (дата обращения: 10.09.2025).
2. Алиев Р. Что случилось с климатом. – М.: Паулсен, 2022. – 336 с.
3. Алиев Р.А. Изнанка белого. Арктика от викингов до папанинцев. – М.: Паулсен, 2020. – С. 12-14.
4. Андреева Е.В., Исаулова К.Я., Тезиков А.Л. Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути // Cyberleninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-vliyaniya-gidrograficheskoy-izuchennosti-na-bezopasnost-plavaniya-krupnotonnazhnyh-sudov-v-akvatorii-severnogo-morskogo-puti> (дата обращения: 10.09.2025).
5. Арктика в цифрах: исследование от 02.09.2024. – URL: <https://roscongress.org/materials/arktika-v-tsifrakh/> (дата обращения: 10.09.2025).
6. Арктический морской лёд. 20.08.2025. NASA/Кэтрин Хансен. – URL: Rutab.net (дата обращения: 10.09.2025).
7. Арктический Совет провел исследование проблемы разливов нефти в Арктике. – URL: <https://arctic-universe.com/ru/news/20200826/30486.html> (дата обращения: 10.09.2025).
8. Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. – Москва: WWF России, 2011. – 64 с. – URL: https://wsbs-msu.ru/res/DOCFOLDER120/atlas_biol_ros_arkt_web.pdf (дата обращения: 10.09.2025).
9. Бразовская Я. Е. Арктическое судоходство: учебное пособие. – Москва: Моркнига, 2025. – 327 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01013330239> (дата обращения: 10.09.2025).

10. Бразовская Я.Е. Актуальные проблемы правового регулирования перевозки опасных грузов по северному морскому пути // Океанский менеджмент. – 2024. – № 4 (28). – С. 2-6.
11. Бразовская Я.Е. Демпфирование негативных последствий загрязнения атмосферного воздуха с морских судов // Океанский менеджмент. – 2023. – № 2 (20). – С. 13-17.
12. Бразовская Я.Е. Мировой океан и коммерческое использование морских пространств // Океанский менеджмент. – 2022. – № 1 (15). – С. 24-32.
13. Бразовская Я.Е. Синергия приарктических государств в соблюдении правил судоходства в полярных водах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: История и право. – 2018. – Т. 8, № 4 (29). – С. 46-54.
14. Бразовская Я.Е. Транспортно-логистическое обеспечение безопасности в Арктике // Право. Безопасность. Чрезвычайные ситуации. – 2023. – № 4 (61). – С. 38–42. DOI: 10.61260/2074-1626-2023-4-38-42.
15. Бразовская Я.Е., Авдыш Д.М. Закисление и потепление морской среды: международно-правовые механизмы реагирования // Экологическое право. – 2025. – № 3. – С. 37-39.
16. Верещака Т. В., Кулагина О. В. Карта «Животный мир Российской Арктики (млекопитающие)». Концепция и методика создания // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 294–302. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-3-294-302.
17. Владимир Путин выступил на пленарном заседании VI Международного арктического форума «Арктика – территория диалога». – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/76554> (дата обращения: 10.09.2025).
18. Вострикова М. А., Кашин Я. М., Шкода В. В. О загрязнении воздушного бассейна токсичными компонентами отработавших газов морских судов // Булатовские чтения: сб. ст. материалов I Международной науч.-практ.

конф.: в 5 т.; под общ. ред. О. В. Савенок. - Краснодар: ООО «Издательский Дом -Юг», 2017. – С. 102.

19. Всего одна круизная компания создает больше углеродных выбросов, чем целый город. – 15.08.2025. – URL: <https://www.gismeteo.ru/news/nature/vsego-odna-kruiznaya-kompaniya-sozdaet-bolshe-uglerodnyh-vybrosov-chem-celyj-gorod/> (дата обращения: 10.09.2025).

20. Грушенко, Э. Б., Лисунова, Е. А. Актуальные аспекты развития туризма в регионах Европейского Севера России и Западной Арктики. – Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2021. – 110 с. – URL: https://rio.ksc.ru/data/documents/24_grushenko_all.pdf (дата обращения: 10.09.2025).

21. Губайдуллин М. Моделирование возможных аварийных разливов и оценка применения механического сбора нефти в арктических ледовых условиях. – URL: <https://territoryengineering.ru/razumnoe-prirodopolzovanie/modelirovanie-vozmozhnyh-avarijnyh-razlivov-i-otsenka-primeneniya-mehanicheskogo-sbora-nefti-v-arkticheskikh-ledovyh-usloviyah/> (дата обращения: 10.09.2025).

22. Данилов А. И. Современные климатические изменения в Арктике: проявления и риски // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – №4 (23). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-klimaticheskie-izmeneniya-v-arktike-proyavleniya-i-riski> (дата обращения: 10.09.2025).

23. Данные с официального сайта ФГБУ «ГлавСевморпуть». – URL:<https://nsr.rosatom.ru/rassmotrenie-zayavleniy/razresheniya/> (дата обращения: 10.09.2025).

24. Деев М. Г. Ледяной покров Арктики и его устойчивость // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2011. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ledyanoy-pokrov-arktiki-i-ego-ustoychivost> (дата обращения: 10.09.2025).

25. Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013-2023 гг.) / Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route, Vasily Erokhin.

– URL:
https://www.researchgate.net/publication/377818509_Dinamika_gruzoperevozok_po_Severnomu_morskому_puti_2013-2023_gg_Dynamics_of_cargo_transportation_along_the_Northern_Sea_Route_2013-2023 (дата обращения: 10.09.2025).

26. Договор «Об Антарктике» 1959 г.; Протокол к Договору об Антарктике по защите окружающей среды 1991 г. (Мадридский протокол); Конвенция по консервации Антарктических тюленей 1972 г.; Конвенция по консервации Антарктических морских живых ресурсов 1980 г. // Brazovskaya YE, Ruchkina GF. Current Human Impact on Antarctic Seabed Environment and International Law // The Law of the Seabed, Access, Uses, and Protection of Seabed Resources Series: Publications on Ocean Development. – 2020. – Vol. 90. – P. 125–135. DOI: 10.1163/9789004391567_008.

27. Елисеев Д. О., Наумова Ю. В. Моделирование транзитных перевозок по Северному морскому пути в условиях климатических изменений // Проблемы прогнозирования. – 2021. – №2 (185). – URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tranzitnyh-perevozok-po-severnomu-morskому-puti-v-usloviyah-klimaticheskikh-izmeneniy> (дата обращения: 10.09.2025).

28. ЕМИСС государственная статистика. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/51479> (дата обращения: 10.09.2025).

29. Журавель В. П., Назаров В. П. Северный морской путь: настоящее и будущее // Российский социально-гуманитарный журнал. – 2020. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/severnyu-morskoj-put-nastoyashee-i-budushee> (дата обращения: 10.09.2025).

30. Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана на основе данных ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования SSMR-SSM/I-SSMIS-AMSR2 25.11.2024 – 03.12.2024 № 49(687). Санкт-Петербург 2024. – URL:

http://wdc.aari.ru/datasets/d0042/2024/weekly_latest.pdf (дата обращения: 10.09.2025).

31. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001573830> (дата обращения: 10.09.2025).

32. Как камчатский краб покори́л Баренцево море и стал угрозой экосистеме. – 04.04.2025. – URL: https://www.ixbt.com/live/flora_and_fauna/kak-kamchatskiy-krab-pokoril-barencevo-more-i-stal-ugrozoy-ekosisteme.html (дата обращения: 10.09.2025).

33. Калинин Н. Л. Великий Северный морской путь // Образование и право. – 2024. – №5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/velikiy-severnyu-morskoj-put> (дата обращения: 10.09.2025).

34. Кибанова О.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Хон В.Ч. Байесовские оценки изменений продолжительности навигационного периода на Северном морском пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Доклады Земных наук. – 2018. – Т. 481, № 1. – С. 907–911. DOI: 10.1007/978-3-030-11533-3_45.

35. Клейн С. В., Землянова М. А., Кольдибекова Ю. В., Глухих М. В. Климатические и химические факторы риска здоровью населения регионов арктической и субарктической зон: популяционный и субпопуляционный уровни // Анализ риска здоровью. – 2022. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-i-himicheskie-factory-riska-zdorovyu-naseleniya-regionov-arkticheskoy-i-subarkticheskoy-zon-populyatsionnu-i> (дата обращения: 10.09.2025).

36. Куделькин Н.С. Правовая охрана морской среды Арктики от загрязнения чужеродными видами // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). – 2019. – № 1. – С. 110-119. DOI: 10.17803/2311-5998.2019.53.1.110-119.

37. Логинов В. Ф. Роль различных факторов в арктическом усилении потепления климата // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2023. – №1.

– URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-razlichnyh-faktorov-v-arkticheskom-usilenii-potepleniya-klimata> (дата обращения: 10.09.2025).

38. Макаров А. Круглогодичная навигация по СМП невозможна без поддержки ледокольного флота – ААНИИ от 21.09.2023. – URL: <https://www.korabel.ru/> (дата обращения: 10.09.2025).

39. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420376046> (дата обращения: 10.09.2025).

40. Монинец С. Ю., Баженова А. И. Роль прогнозирования рисков в обеспечении безопасности судоходства в сложных климатических условиях // Вестник МГТУ. – 2018. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-prognozirovaniya-riskov-v-obespechenii-bezopasnosti-sudohodstva-v-slozhnyh-klimaticheskikh-usloviyah> (дата обращения: 10.09.2025).

41. Мязин В. Исследование способности прибрежных арктических экосистем к самовосстановлению после нефтяного загрязнения. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/> (дата обращения: 10.09.2025).

42. Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г., Панкина Е.Н. Некоторые аспекты обеспечения безопасности судоходства в полярных водах // Cyberleninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-obespecheniya-bezopasnosti-sudohodstva-v-polyarnyh-vodah> (дата обращения: 10.09.2025).

43. Норденшельд А.Э. Плавание на «Вега». – М.: Паулсен, 2019. – 556 с.

44. Норкина Е. Опасное загрязнение. Правовые режимы и изменение климата в Арктике. – URL: https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/opasnoe-zagryaznenie-pravovye-rezhimy-i-izmenenie-klimata-v-arktike/?sphrase_id=130264781 (дата обращения: 10.09.2025).

45. О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации: Федеральный закон от 31.07.1998 № 155-ФЗ (ред. от 19.10.2023). – URL:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19643/ (дата обращения: 10.09.2025).

46. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 (с изменениями и дополнениями от 5 марта 2020 г. № 164). – URL: <https://base.garant.ru/70647984/> (дата обращения: 10.09.2025).

47. Ольховик Е.О., Афонин А.Б., Тезиков А.Л. Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути // Cyberleninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-model-morskih-transportnyh-potokov-severnogo-morskogo-puti> (дата обращения: 10.09.2025).

48. Определение автономности плавания судов по условиям экологической безопасности. – URL: <http://www.ecolognatural.ru/enats-58-1.html> (дата обращения: 10.09.2025).

49. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года: утв. Указом Президента РФ от 5 марта 2020 г. № 164. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/564371920> (дата обращения: 10.09.2025).

50. Охрана окружающей среды в России. 2024: Стат. сб./Росстат. – М., 2024. – 118 с.

51. По данным доклада ЮНЕСКО «Состояние Мирового океана в 2024 году». – URL: <https://www.unesco.org/ru/articles/novyuy-doklad-yunesko-tempy-potepleniya-okeana-uskorilis-v-dva-raza-za-20-let-tempy-podema-urovnya> (дата обращения: 10.09.2025).

52. Подкомитет ИМО согласовал запрет на использование тяжелого мазута в арктических водах с 2024 г. – URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/2234> (дата обращения: 10.09.2025).

53. Северный морской путь — точка пересечения интересов Москвы и Пекина. – 18.03.2025. – URL: <https://russiancouncil.ru/blogs/konstantine->

dolgov/severnyu-morskoy-put-tochka-peresecheniya-interesov-moskvy-i-pekina/
(дата обращения: 10.09.2025).

54. Северный морской путь побил рекорд по объему грузоперевозок в 2024 году. – 10.01.2025. – URL: <https://acentury.ru/news/smp-rekord/> (дата обращения: 10.09.2025).

55. Серых И. В., Толстиков А. В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940—2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 334—349. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-334-349.

56. «Совкомфлот» намерен перевезти 63 млн тонн нефти и нефтепродуктов в 2025 году. – URL: <https://www.finam.ru/publications/item/sovkomflot-nameren-perevezti-63-mln-tonn-nefti-i-nefteproduktov-v-2025-godu-20250328-1456/> (дата обращения: 10.09.2025).

57. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007798947> (дата обращения: 10.09.2025).

58. Статуто А.И. Обзор роли арктического судоходства и обеспечение его экологической безопасности // Cyberleninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-rol-i-arkticheskogo-sudohodstva-i-obespechenie-ego-ekologicheskoy-bezopasnosti> (дата обращения: 10.09.2025).

59. Степанова Д.В. Шумовое загрязнение и его влияние на морских обитателей Арктического региона // Cyberleninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shumovoe-zagryaznenie-i-ego-vliyanie-na-morskih-obitateley-arkticheskogo-regiona> (дата обращения: 10.09.2025).

60. Суркова Г. В., Крылов А. А. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века // Арктика и Антарктика. – 2018. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeneniya-srednih-i-ekstremalnyh-skorostey-vetra-v-arktike-v-kontse-xxi-veka> (дата обращения: 10.09.2025).

61. Тезиков А. Л., Ольховик Е. О. Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути //

Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2020. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-vliyayuschih-na-prodolzhitelnost-navigatsii-v-akvatorii-severnogo-morskogo-puti> (дата обращения: 10.09.2025).

62. Тезиков А.Л. Исследование закономерностей формирования судоходных маршрутов на современном этапе развития Северного морского пути. – URL: <https://rosacademtrans.ru/sevmorput/> (дата обращения: 10.09.2025).

63. Фейган Б. Малый ледниковый период: как климат вершил историю, 1300 – 1850 / пер. с англ. А.В. Ефремовой, Т.А. Турсковой. – М.: Эксмо, 2022. – 352 с.

64. Фёдоров В. М., Гребенников П. Б., Фролов Д. М. Динамика площади морских льдов в связи с инсоляционной контрастностью // Арктика и Антарктика. – 2020. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-ploschadi-morskih-ldov-v-svyazi-s-insolyatsionnoy-kontrastnostyu> (дата обращения: 10.09.2025).

65. Чжан Ю., Сунь С., Чжа Ю., Ван К., Чен Ч. Изменение Северного морского пути в Арктике и Трансполярного морского пути: прогноз изменений маршрута и навигационного потенциала до середины XXI века // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Т. 11, № 2340. – С. 1-20. DOI: 10.3390/jmse11122340.

66. Шерстюков Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // АиС. – 2016. – №24. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-usloviya-arktiki-i-novye-podhody-k-prognozu-izmeneniya-klimata> (дата обращения: 10.09.2025).

67. Элькина Д. В., Посёлова Л. Г., Павленкин А. Д., Посёлов В. А. Законмерности распределения осадков в арктическом бассейне // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2016. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zakonomernosti-raspredeleniya-osadkov-v-arkticheskom-bassejne> (дата обращения: 10.09.2025).

68. Ященко И.Г. Физико-химические свойства трудноизвлекаемой нефти в Арктике // Cyberleninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-svoystva-trudnoizvlekaemoy-nefti-v-arktike> (дата обращения: 10.09.2025).

Англоязычные источники

69. Alabia, I. D., Molinos, J. G., Saitoh, S. I., Hirata, T., Hirawake, T., & Mueter, F. J. Multiple facets of marine biodiversity in the Pacific Arctic under future climate // *The Science of the total environment*. – 2020. – Vol. 744. – P. 140913.

70. Agathokleous E., Feng Z., Oksanen E., Sicard P., Wang Q., Saitanis C.J., Araminiene V., Blande J.D., Hayes F., Calatayud V., Domingos M., Veresoglou S.D., Peñuelas J., Wardle D.A., De Marco A., Li Z., Harmens H., Yuan X., Vitale M., Paoletti E. Ozone affects plant, insect, and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity. *Science Advances*. 2020;6(33): eabc1176. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1176>

71. Blazsek S. et al. Global, Arctic, and Antarctic Sea ice volume predictions using score-driven threshold climate models // *Energy Economics*. – 2024. – Vol. 134. – p. 107591.

72. Brazovskaya Y.E. Legal aspects of cooperation in shipping and logistics in the Arctic // *Polar Science*. – 2022. – T. 31. – С. 100783.

73. Bringloe TT, Wilkinson DP, Goldsmit J, Savoie AM, Filbee-Dexter K, Macgregor KA, Howland KL, McKindsey CW, Verbruggen H. Arctic marine forest distribution models showcase potentially severe habitat losses for cryophilic species under climate change // *Global Change Biology*. – 2022. – Vol. 28(11). – P. 3711-3727.

74. Cao Y., Bian L., Zhao J. Impacts of Changes in Sea Ice and Heat Flux on Arctic Warming. – DOI: 10.4236/acs.2019.91006.

75. Chan FT, Stanislawczyk K, Sneekes AC, et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks // *Global Change Biology*. – 2019. – Vol. 25. – P. 25–38.

76. Chen, Qiong & Lau, Yui-Yip & Ge, Ying-en & Dulebenets, Maxim & Kawasaki, Tomoya & Ng, Adolf. Interactions between Arctic passenger ship activities and emissions // *Transportation Research Part D Transport and Environment*. – 2021. – Vol. 97. – P. 102925. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102925.

77. Cottier-Cook, E. J., Bentley-Abbot, J., Cottier, F. R., Minchin, D., Olenin, S., & Renaud, P. E. Horizon scanning of potential threats to high-Arctic biodiversity, human health, and the economy from marine invasive alien species: A Svalbard case study // *Global Change Biology*. – 2023. – Article e17009.

78. Culp, J. M., Goedkoop, W., Christensen, T., Christoffersen, K. S., Fefilova, E., Liljaniemi, P., Novichkova, A. A., Ólafsson, J. S., Sandøy, S., Zimmerman, C. E., & Lento, J. Arctic freshwater biodiversity: Establishing baselines, trends, and drivers of ecological change // *Freshwater Biology*. – 2021. – Vol. 00. – P. 1– 13.

79. Dmitrenko IA, Petrusevich VY, Kosobokova K, Komarov AS, Bouchard C, Geoffroy M, Koldunov NV, Babb DG, Kirillov SA and Barber DG. Coastal Polynya Disrupts the Acoustic Backscatter Diurnal Signal Over the Eastern Laptev Sea Shelf // *Frontiers in Marine Science*. – 2021. – Vol. 8. – P. 791096. DOI: 10.3389/fmars.2021.791096.

80. Figenschau N, Lu J. Seasonal and Spatial Variability of Atmospheric Emissions from Shipping along the Northern Sea Route // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14(3). – P. 1359.

81. Glavinović R., Vukic L. The Promethee method and its applications in the maritime industry: a review of studies from the Hrčak database. *Transportation Research Procedia*. 2023;73:94–101. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.896>

82. Gradova, Marina & Golubeva, Elena. CHANGES IN THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ARCTIC OCEAN UNDER THE INFLUENCE OF INCREASING RIVER RUNOFF // *Interexpo GEO-Siberia*. – 2021. – Vol. 4. – P. 210-216.

83. Harris, Peter & Westerveld, Levi & Zhao, Qianshuo & Costello, Mark. Rising snow line: Ocean acidification and the submergence of seafloor geomorphic

features beneath a rising carbonate compensation depth // *Marine Geology*. – 2023. – Vol. 463.

84. Henderson G., Barrett B., Wachowicz L., Mattingly K., Preece J., Mote T. Local and Remote Atmospheric Circulation Drivers of Arctic Change: A Review // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Vol. 9. – Article 709896. – DOI: 10.3389/feart.2021.709896.

85. Hirawake, T., Uchida, M., Uchida, M., Abe, H., Alabia, I. D., Hoshino, T., Masumoto, S., Mori, A., Nishioka, J., Nishizawa, B., Ooki, A., Takahashi, A., Takahashi, A., Tanabe, Y., Tanabe, Y., Tojo, M., Tsuji, M., Ueno, H., Waga, H., ... Yamashita, Y. Response of Arctic biodiversity and ecosystem to environmental changes: Findings from the ArCS project // *Polar Science*. – 2021. – Vol. 27. – P. 100533.

86. James T.D., Sommerkorn M., Solovyev B., et al. Whole-ocean network design and implementation pathway for Arctic marine conservation // *npj Ocean Sustainability*. – 2024. – Vol. 3, № 25. – P. 1-13. DOI: 10.1038/s44183-024-00047-9.

87. Jiban Chandra Deb and Sarah A. Bailey. Arctic marine ecosystems face increasing climate stress // *Environmental Reviews*. – 2023. – Vol. 31(3). – P. 403-451.

88. Joseph S. Chen, Wei Wang, Hyangmi Kim & Wan-Yu Liu. Climate resilience model on Arctic tourism: perspectives from tourism professionals // *Tourism Recreation Research*. – 2022. – DOI: 10.1080/02508281.2022.2122341.

89. Kolçak, İ. Ç., Çetin, O., Saka, M. Environmental Impact of Cruise Shipping in Arctic Region // *International Journal of Environment and Geoinformatics*. – 2022. – Vol. 9(1). – P. 001-010.

90. Krause-Jensen D, Archambault P, Assis J, Bartsch I, Bischof K, Filbee-Dexter K, Dunton KH, Maximova O, Ragnarsdóttir SB, Sejr MK, Simakova U, Spiridonov V, Wegeberg S, Winding MHS and Duarte CM. Imprint of Climate Change on Pan-Arctic Marine Vegetation // *Frontiers in Marine Science*. – 2020. – Vol. 7. – P. 617324.

91. Larsen L.H., Kvamstad-Lervold B., Sagerup K., Gribkovskaia V., Bambulyak A., Rautio R., Berg T.E. Technological and environmental challenges of Arctic shipping—a case study of a fictional voyage in the Arctic. – DOI: 10.3402/polar.v35.27977.
92. Liu H, Mao Z and Zhang Z. From melting ice to green shipping: navigating emission reduction challenges in Arctic shipping in the context of climate change // *Frontiers in Environmental Science*. – 2024. – Vol. 12. – P. 1462623.
93. Liu Q., Zhang R., Wang Y., Yan H., Hong M. Short-Term Daily Prediction of Sea Ice Concentration Based on Deep Learning of Gradient Loss Function // *Frontiers in Marine Science*. – 2021. – Vol. 8. – Article 736429. DOI: 10.3389/fmars.2021.736429.
94. Liu, Y., Losch, M., Hutter, N., & Mu, L. A new parameterization of coastal drag to simulate landfast ice in deep marginal seas in the Arctic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2022. – Vol. 127. – e2022JC018413. DOI: 10.1029/2022JC018413.
95. Makarova I., Makarov D., Buyvol P., Barinov A., Gubacheva L., Mukhametdinov E., Mavrin V. Arctic Development in Connection with the Northern Sea Route: A Review of Ecological Risks and Ways to Avoid Them. – DOI: 10.3390/jmse10101415.
96. Mannherz F., Knol-Kauffman M., Rafaly V., Ahonen H., Kruke B.I. Noise pollution from Arctic expedition cruise vessels: understanding causes, consequences and governance options // *npj Ocean Sustainability*. – 2024. – Vol. 3, № 51. – P. 1-11.
97. Marelle, L., Raut, J.-C., Law, K., & Duclaux, O. Current and future arctic aerosols and ozone from remote emissions and emerging local sources—Modeled source contributions and radiative effects // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2018. – Vol. 123. – P. 12,942–12,963.
98. Matsui, H., Kawai, K., Tobo, Y. et al. Increasing Arctic dust suppresses the reduction of ice nucleation in the Arctic lower troposphere by warming // *npj Clim Atmos Sci*. – 2024. – Vol. 7. – P. 266.

99. Miheev V. L., Brazovskaya Y. E. Problems of Legal Regulation of the North Polar Region of the Earth // *Current Developments in Arctic Law*. – 2019. – Vol. 7. – P. 23-29.
100. Mikheev V.L., Brazovskaya Ya.E. Problems of Legal Regulation of the North Polar Region of the Earth // *Current Developments in Arctic Law*. – University of Lapland. Rovaniemi, 2019. – C. 23-29.
101. Mokhov, I. & Pogarskiy, F. Changes of sea waves characteristics in the Arctic basin from model ensemble simulations for the 21st century // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 606. – P. 012038.
102. Müller M., Knol-Kauffman M., Jeuring J. et al. Arctic shipping trends during hazardous weather and sea-ice conditions and the Polar Code's effectiveness. – DOI: 10.1038/s44183-023-00021-x.
103. Niittynen, P., Heikkinen, R.K. & Luoto, M. Snow cover is a neglected driver of Arctic biodiversity loss // *Nature Climate Change*. – 2018. – Vol. 8. – P. 997–1001.
104. Olsen, J., Carter, N. A., & Dawson, J. Community perspectives on the environmental impacts of Arctic shipping: Case studies from Russia, Norway and Canada // *Cogent Social Sciences*. – 2019. – Vol. 5(1). – P. 1609189. DOI: 10.1080/23311886.2019.1609189.
105. Oziel, L., Baudena, A., Ardyna, M. et al. Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean // *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11. – P. 1705.
106. Polyakov, I. V., Pnyushkov, A. V., Alkire, M. B., Ashik, I. M., Baumann, T. M., Carmack, E. C., Goszczko, I., Guthrie, J., Ivanov, V. V., Kanzow, T., Krishfield, R., Kwok, R., Sundfjord, A., Morison, J., Rember, R., & Yulin, A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Science*. – 2017. – Vol. 356(6335). – P. 285–291.
107. Rani, Alka & Saini, Khem & Gupta, Kriti & Narwal, Sahil & Bast, Felix. Arctic biodiversity amidst looming climate apocalypse: Current status and way forward. – 2021.

108. Reiersen L.-O., Guardans R., Sydnes L.K. The Arctic Monitoring and Assessment Programme // *Chemistry International*. – 2020. – Vol. 42, Issue 2. – P. 8-14. DOI: 10.1515/ci-2020-0202.

109. Rosneft and ExxonMobil have discovered oil and have started production in commercial quantities in the Kara Sea. – URL: <https://www.rosneft.com/press/releases/item/153643/> (дата обращения: 10.09.2025).

110. Schröder C., Reimer N., Jochmann P. Environmental impact of exhaust emissions by Arctic shipping // *Ambio*. – 2017. – DOI: 10.1007/s13280-017-0956-0.

111. Screen J.A., Simmonds I. Declining summer snowfall in the Arctic: causes, impacts and feedbacks. – DOI: 10.1007/s00382-011-1105-2.

112. Shipping // WWF Arctic (Threats section). – URL: <https://www.arcticwwf.org/threats/shipping/> (дата обращения: 24.08.2025).

113. Solovyev B.A., Spiridonov V.A., Onufrenya I., Belikov S., Chernova N., Dobrynin D., Gavrilov M.V., Glazov D., Krasnov Y., Mukharamova S., Pantyulin A., Platonov N.G., Saveliev A., Stishov M., Tertitski G. Identifying a network of priority areas for conservation in the Arctic seas: Practical lessons from Russia. – DOI: 10.1002/aqc.2806.

114. Sumata, H., de Steur, L., Divine, D.V. et al. Regime shift in Arctic Ocean sea ice thickness // *Nature*. – 2023. – Vol. 615. – P. 443–449.

115. Taylor PC, Boeke RC, Boisvert LN, Feldl N, Henry M, Huang Y, Langen PL, Liu W, Pithan F, Sejas SA and Tan I. Process Drivers, Inter-Model Spread, and the Path Forward: A Review of Amplified Arctic Warming // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 9. – P. 758361.

116. Terhaar, J., Kwiatkowski, L. & Bopp, L. Emergent constraint on Arctic Ocean acidification in the twenty-first century // *Nature*. – 2020. – Vol. 582. – P. 379–383.

117. Thiebot J-B, Will AP, Tsukamoto S, Kitaysky AS and Takahashi A. The Designated Shipping Avoidance Area Around St. Lawrence Island, Northern Bering

Sea, Is not Sufficient to Protect Foraging Habitat of the Island's Breeding Seabird Community // *Frontiers in Marine Science*. – 2022. – Vol. 9. – P. 875541.

118. Tishkov A., Belonovskaya E., Vaisfeld M.A., Glazov P., Lappo E.G., Morozova O., Pokrovskaya I., Tertitski G.M., Titova S., Tsarevskaya N.G. Regional biogeographic effects of “fast” climate changes in the Russian Arctic in the 21st century // *Arctic: Ecology and Economy*. – 2020. – P. 31–44. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44.

119. Vihma T. Effects of Arctic Sea Ice Decline on Weather and Climate: A Review. – DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.

120. Wang X., Meng F. Emergency responses to acrylonitrile maritime spills from the perspective of marine ecological protection // *Frontiers in Marine Science*. – 2022. – Vol. 9. – P. 996263. DOI: 10.3389/fmars.2022.996263.

121. Xiao, K., Chen, M., Wang, Q. et al. Low-frequency sea level variability and impact of recent sea ice decline on the sea level trend in the Arctic Ocean from a high-resolution simulation // *Ocean Dynamics*. – 2020. – Vol. 70. – P. 787–802.

122. Ye, X., Zhang, B., Dawson, J., Amon, C.D., Ezechukwu, C., Igwegbe, E., Kang, Q., Song, X., Chen, B. Arctic Oceanic Carbon Cycle: A Comprehensive Review of Mechanisms, Regulations, and Models // *Water*. – 2024. – Vol. 16. – P. 1667. DOI: 10.3390/w16121667.

Метод PROMETHEE

количественное определение предпочтения одной альтернативы над другой для каждого критерия посредством попарных сравнений

Шаг 1: Определение отклонений на основе попарных сравнений

Рассчитывается для каждой пары альтернатив (например, различных маршрутов или стратегий судоходства) и каждого критерия (например, уровня выбросов, риска разлива нефти)

Шаг 2: Применение функции предпочтения, соответствующей индексу

Шаг 3: Расчет общего индекса предпочтения

Рассчитывается с учетом всех критериев, путем суммирования произведения веса каждого критерия и функции предпочтения

Шаг 4: Расчет исходящего потока и входящего потока

Исходящий поток показывает, насколько альтернатива «а» предпочтительнее всех других альтернатив, входящий поток – насколько все другие альтернативы предпочтительнее «а»

Шаг 5: Расчет чистого потока превосходства («Ф»)

Рассчитывается как разница между исходящим и входящим потоками. Более высокий чистый поток указывает на лучшую альтернативу, что позволяет получить полное ранжирование

Тип функции предпочтения	Описание/Характеристики
Обычный критерий	Присваивает степень предпочтения 0, если оценки равны, и 1 при любом различии.
U-образный (квази-критерий)	Вводит порог безразличия, при котором небольшие различия в оценках не приводят к предпочтению.
V-образный (критерий с линейным предпочтением)	Присваивает степень предпочтения, линейно возрастающую с отклонением, от 0 до 1 при определенном пороге предпочтения.
Уровневый критерий	Определяет два порога (безразличия и предпочтения), создавая три уровня предпочтения (0, 0.5, 1).
Линейный (критерий с линейным предпочтением и зоной безразличия)	Сочетает аспекты U-образной и V-образной функций, имея как зону безразличия, так и линейное увеличение предпочтения.
Гауссовский критерий	Использует гауссову кривую для моделирования предпочтения, где степень предпочтения плавно возрастает с отклонением.

**Формула для оценки
экологического состояния арктической морской среды
на основе множественных критериев
(PROMETHEE II)**

Для каждой пары альтернатив (a_i, a_k) по критерию j рассчитывается функция предпочтения:

$$P_j(a_i, a_k) = f(d_j) = f(|g_j(a_i) - g_j(a_k)|),$$

где:

$d_j = |g_j(a_i) - g_j(a_k)|$ - абсолютное отклонение по критерию j ,

$f(d_j)$ - V-образная функция предпочтения.

Взвешенное предпочтение альтернативы a_i над a_k вычисляется как:

$$\pi(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^7 w_j \cdot P_j(g_j(a_i), g_j(a_k)),$$

Данная формула представляет собой линейную комбинацию функций предпочтения по всем критериям, взвешенную в соответствии с их относительной важностью.

В методологии PROMETHEE исходящий поток (Φ^+) характеризует степень превосходства альтернативы над всеми остальными:

$$\Phi^+(a_i) = \frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{k \neq i} \pi(a_i, a_k).$$

Входящий поток (Φ^-) отражает степень, в которой другие альтернативы превосходят данную:

$$\Phi^- (a_i) = \frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{k \neq i} \pi (a_k, a_i).$$

Чистый поток превосходства определяется как разность исходящего и входящего потоков:

$$\Phi (a_i) = \Phi^+ (a_i) - \Phi^- (a_i),$$

подставляя выражения для потоков:

$$\Phi (a_i) = \frac{1}{(n-1)} \cdot \left[\sum_{k \neq i} \pi (a_i, a_k) - \sum_{k \neq i} \pi (a_k, a_i) \right],$$

заменяя $\pi (a_i, a_k)$ на его развернутое выражение:

$$\Phi (a_i) = \frac{1}{(n-1)} \cdot \left[\sum_{k \neq i} p \left(\sum_{j=1}^7 w_j \cdot P_j (g_j (a_i), g_j (a_k)) \right) - \sum_{k \neq i} p \left(\sum_{j=1}^7 w_j \cdot P_j (g_j (a_k), g_j (a_i)) \right) \right],$$

изменяя порядок суммирования:

$$\Phi (a_i) = \frac{1}{(n-1)} \cdot \left[\sum_{j=1}^7 w_j \left(\sum_{k \neq i} P_j (g_j (a_i), g_j (a_k)) \right) - \sum_{j=1}^7 w_j \left(\sum_{k \neq i} P_j (g_j (a_k), g_j (a_i)) \right) \right],$$

выносим общий множитель:

$$\Phi(a_i) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^7 w_j \left[\sum_{k \neq i} P_j(g_j(a_i), g_j(a_k)) - \sum_{k \neq i} P_j(g_j(a_k), g_j(a_i)) \right],$$

таким образом, для нашего конкретного случая геоэкологической оценки экологического состояния арктической морской среды с тремя альтернативами ($n=3$), формула принимает вид:

$$\Phi_{AGES}(a_i) = \left[\sum_{j=1}^7 w_j \cdot P_j(g_j(a_i), g_j(a_k)) \right] - \left[\sum_{j=1}^7 w_j \cdot P_j(g_j(a_k), g_j(a_i)) \right],$$

где коэффициент $\frac{1}{(n-1)} = \frac{1}{2}$ был интегрирован в процедуру нормализации результатов.

Формула Φ_{AGES} представляет собой математическое выражение превосходства одного состояния над другим через:

1. Первое слагаемое - взвешенную сумму степеней превосходства альтернативы a_i над a_k по всем критериям;
2. Второе слагаемое - взвешенную сумму степеней превосходства альтернативы a_k над a_i по всем критериям;
3. Разность этих слагаемых дает чистое превосходство, учитывающее как положительные, так и отрицательные аспекты сравнения.

Положительные значения Φ_{AGES} указывают на превосходство альтернативы a_i , отрицательные - на ее отступление, а значения близкие к нулю свидетельствуют о сопоставимости альтернатив.

**Расчеты по методу
«Арктический эко-стандарт» $\Phi_{AGES-TECH}$**

Применяя аппарат метода PROMETHEE, модифицируя ее под конкретные задачи, а именно сравнение морских судов, эксплуатируемых в Арктики и выявление обобщенной оценки по выбранным конкретным критериям в единый показатель получаем итоговую формулу для комплексной оценки и сертификации судов с пятью альтернативами ($n=5$), формула принимает вид:

$$\Phi_{AGES-TECH}(a_i) = [\sum_{j=1}^5 w_j \cdot P_j(g_j(a_i), g_j(a_k))] - [\sum_{j=1}^5 w_j \cdot P_j(g_j(a_k), g_j(a_i))].$$

где:

a_i – оцениваемая альтернатива, в нашем случае конкретные судно

w_j – весовой коэффициент j -го критерия,

p_j – функция предпочтения по критерию j ,

$g_j(a_i)$ – значение (оценка) судна a_i по критерию j ,

Расчеты осуществляются на основе критериев, весов и оценок судов, представленных в Таблице 4.4. и 4.5., представим судно «А» как a_1 и судно «Б» как a_2 .

Для расчета степени предпочтения одного судна над другим по каждому критерию используется простая линейная (V -образная) функция предпочтения $P_j(a,b)$, как рекомендовано для количественных критериев, которая имеет следующий вид:

$P_j(a,b)=g_j(a)-g_j(b)$ если $g_j(a)>g_j(b)$, и 0 в остальных случаях.

Сравнение a1 против a2: поскольку по всем критериям оценка $g_j(a_1)>g_j(b_2)$, все значения $P_1(a_1,a_2) = 0$.

Сравнение a2 против a1:

$$P_1(a_2,a_1)=g_1(a_2)-g_1(a_1)=3-1=2$$

$$P_2(a_2,a_1)=g_2(a_2)-g_2(a_1)=4-1=3$$

$$P_3(a_2,a_1)=g_3(a_2)-g_3(a_1)=3-2=1$$

$$P_4(a_2,a_1)=g_4(a_2)-g_4(a_1)=2-1=1$$

$$P_5(a_2,a_1)=g_5(a_2)-g_5(a_2)=3-1=2$$

Рассчитаем исходящий поток ($\Phi^+(a)$), который продемонстрирует, насколько судно превосходит все остальные альтернативы. В нашем случае, с двумя судами, формула упрощается до::

$$\Phi^+(a_i) = \sum_{j=1}^5 w_j \cdot P_j(a_i, a_k)$$

Судно «А» (a1):	Судно «Б» (a2):
$\Phi^+(a_1) = (0.30 \cdot 0) + (0.25 \cdot 0) +$ $(0.20 \cdot 0) + (0.15 \cdot 0) + (0.10 \cdot 0) = 0$	$\Phi^+(a_2) = (0.30 \cdot 2) + (0.25 \cdot 3) +$ $(0.20 \cdot 1) + (0.15 \cdot 1) + (0.10 \cdot 2) = 1.90$

Рассчитаем входящих потоков ($\Phi^-(a)$) которые покажет, насколько все остальные альтернативы превосходят данное судно, по формуле:

$$\Phi^-(a_i) = \sum_{j=1}^5 w_j \cdot P_j(a_k, a_i)$$

Судно «А» (a1):	Судно «Б» (a2):
-----------------	-----------------

$\Phi^-(a_1) = (0.30 \cdot 2) + (0.25 \cdot 3) + (0.20 \cdot 1) + (0.15 \cdot 1) + (0.10 \cdot 2) = \mathbf{1.90}$	$\Phi^-(a_2) = (0.30 \cdot 0) + (0.25 \cdot 0) + (0.20 \cdot 0) + (0.15 \cdot 0) + (0.10 \cdot 0) = \mathbf{0}$
--	---

Итоговая оценка, или чистый поток превосходства, рассчитывается как разность исходящего и входящего потоков:

Судно «А» (a1):	Судно «Б» (a2):
$\Phi(a_1) = \Phi^+(a_1) - \Phi^-(a_1) = 0 - 1.90 = \mathbf{-1.90}$	$\Phi(a_2) = \Phi^+(a_2) - \Phi^-(a_2) = 1.90 - 0 = \mathbf{1.90}$

Положительные значения $\Phi_{AGES-TECH}$ указывают на превосходство альтернативы a_i , отрицательные - на ее отступление, а значения близкие к нулю свидетельствуют о сопоставимости альтернатив.

Полученные результаты демонстрируют, что судно «Б» ($\Phi = +1.90$) значительно превосходит судно «А» ($\Phi = -1.90$) с точки зрения экологической безопасности и пригодности для работы в Арктике.

Расчеты

«Индекса экологического вреда» по методу $\Phi_{AGES-MONITOR}$

Применяя аппарат метода PROMETHEE, модифицируя ее под конкретные задачи, а именно оценку тяжести различных инцидентов связанных в эксплуатацией судов в Арктики, и выявление обобщенной оценки по выбранным конкретным критериям в единый показатель получаем итоговую формулу для комплексной оценки антропогенного вреда в Арктике с пятью альтернативами ($n=5$), формула принимает вид:

$$\Phi_{AGES-MONITOR}(a_i) = \left[\sum_{j=1}^5 w_j \cdot P_j(g_j(a_i), g_j(a_k)) \right] - \left[\sum_{j=1}^5 w_j \cdot P_j(g_j(a_k), g_j(a_i)) \right],$$

где:

a_i, a_k – оцениваемые альтернативы, представляющие собой конкретные инциденты или сценарии антропогенной нагрузки (например, инцидент «А», инцидент «В»);

w_j – весовой коэффициент, отражающий относительную важность j -го критерия оценки вреда (сумма всех $w_j = 1$);

P_j – функция предпочтения, которая преобразует разницу в оценках двух инцидентов по критерию j в степень предпочтения от 0 до 1;

$g_j(a_i)$ – количественное или качественное значение (оценка) инцидента a_i по j -му критерию (например, объем разлива нефти, уровень шума в дБ, площадь уязвимой зоны).

Расчеты осуществляются на основе критериев, весов и оценок инцидентов, представленных в Таблице 4.7. представим Инцидент «А» как a_1 и Инцидент «В» как a_2 .

Для расчета степени предпочтения по каждому критерию используется простая линейная функция $P_j(a,b)$, которая имеет следующий вид:

$P_j(a,b)=g_j(a)-g_j(b)$, если разность положительная, и 0 в противном случае.

Сравнение инцидент «А» против инцидента «В» ($P_j(a_1,a_2)$):

$$P_1(a_1,a_2) = 9 - 2 = 7,$$

$$P_2(a_1,a_2) = 0 \text{ (так как } 2 < 8),$$

$$P_3(a_1,a_2) = 0 \text{ (так как } 1 < 7),$$

$$P_4(a_1,a_2) = 0 \text{ (так как } 1 < 5),$$

$$P_5(a_1,a_2) = 10 - 8 = 2.$$

Сравнение инцидент «В» против инцидента «А» ($P_j(a_2,a_1)$):

$$P_1(a_2,a_1) = 0 \text{ (так как } 2 < 9),$$

$$P_2(a_2,a_1) = 8 - 2 = 6,$$

$$P_3(a_2,a_1) = 7 - 1 = 6,$$

$$P_4(a_2,a_1) = 5 - 1 = 4,$$

$$P_5(a_2,a_1) = 0 \text{ (так как } 8 < 10).$$

Рассчитаем исходящий поток ($\Phi^+(a)$), который продемонстрирует, насколько один инцидент превосходит (то есть хуже) другой. В нашем случае, с двумя инцидентами, формула упрощается до:

$$\Phi^+(a_i) = \sum_{j=1}^5 w_j \cdot P_j(a_i,a_k)$$

Инцидента «А» (a1):	Инцидента «В» (a2):
$\Phi^+(a_1) = (0.35 \cdot 7) + (0.10 \cdot 0) + (0.25 \cdot 0) + (0.10 \cdot 0) + (0.20 \cdot 2) = \mathbf{2.85}$	$\Phi^+(a_2) = (0.35 \cdot 0) + (0.10 \cdot 6) + (0.25 \cdot 6) + (0.10 \cdot 4) + (0.20 \cdot 0) = \mathbf{2.50}$

Рассчитаем входящий поток ($\Phi^-(a)$) который покажет, насколько другие инциденты превосходят данный, в случае двух альтернатив

$$\Phi^-(a_1) = \Phi^+(a_2) \text{ и } \Phi^-(a_2) = \Phi^+(a_1),$$

$$\Phi^-(a_1) = 2.50,$$

$$\Phi^-(a_2) = 2.85.$$

Итоговая оценка, или чистый поток превосходства Индекса экологического вреда рассчитывается как разность исходящего и входящего потоков:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a).$$

Индекс для Инцидента «А» (Разлив мазута):	Индекс для Инцидента «В» (Крузный лайнер):
$\Phi(a_1) = 2.85 - 2.50 = +0.35$	$\Phi(a_2) = 2.50 - 2.85 = -0.35$

Положительное значение индекса по $\Phi_{\text{AGES-MONITOR}}$ для Инцидента «А» (+0.35) указывает, что разлив мазута является более тяжелым и разрушительным событием по сравнению с сезонной работой круизного лайнера. Методика позволяет рассчитывать Индекс экологического вреда на основе пяти критериев, учитывающих специфику Арктики, таких как масштаб загрязнения, воздействие черного углерода и уязвимость затронутой экосистемы.