Научная статья

УДК 504.054

DOI: 10.24412/2658-4255-2025-4-48-58

EDN: WXQJML

Для цитирования:
Бразовская Я.Е. Оценка степени трансформации арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства // Российская Арктика. 2025. Т. 7. № 4. С. 48-58. https://doi.org/10.24412/2658-4255-2025-4-48-58

Получена: 19.09.2025
Принята: 14.10.2025
Опубликована: 08.12.2025

For citation:
Brazovskaya YaE. Assessment of the degree of transformation of the arctic marine environment under intensifying shipping activities. Russian Arctic. 2025;7(4):48-58. (In Russian). https://doi.org/10.24412/2658-4255-2025-4-48-58

Конфликт интересов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Финансирование.
Исследование не имело спонсорской поддержки

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ТРАНСФОРМАЦИИ АРКТИЧЕСКОЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СУДОХОДСТВА

Я. Е. Бразовская

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: *bye2004@mail.ru

Аннотация
В статье представлена разработка интегральной оценки состояния арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства. С помощью методологии многокритериального анализа PROMETHEE II была получена формула для оценки, позволяющая провести полное ранжирование экологических состояний на основе множественных критериев. В качестве альтернатив были рассмотрены три временных периода: базовый (2012-2017 гг.), переходный (2018-2023 гг.) и прогнозный (2030 г.). Были определены семь ключевых критериев оценки: атмосферные выбросы оксидов азота и черного углерода, концентрация приповерхностного озона, степень закисления океана, интенсивность биологических инвазий, потеря ключевых местообитаний и темп арктического потепления. Результаты показали, что базовый период имеет максимальный чистый поток превосходства (0.9892), переходный - пороговое состояние (0.0108), а прогнозный период демонстрирует критическое ухудшение (-1.0000). Полученная формула позволяет количественно оценить степень деградации арктической морской среды и может быть использована для мониторинга изменений экосистемы, планирования природоохранных мероприятий и разработки стратегий устойчивого развития арктического судоходства.

Ключевые слова: Арктика, PROMETHEE II, изменение климата, черный углерод, закисление океана, биологические инвазии, многокритериальный анализ, судоходство

ASSESSMENT OF THE DEGREE OF TRANSFORMATION OF THE ARCTIC MARINE ENVIRONMENT UNDER INTENSIFYING SHIPPING ACTIVITIES

Ya. E. Brazovskaya

Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation

E-mail: *bye2004@mail.ru

Abstract
This article presents the development of an integrated assessment of the Arctic marine environment state under intensifying shipping activities. Using the PROMETHEE II multi-criteria analysis methodology, a formula was derived for assessment that enables comprehensive ranking of environmental states based on multiple criteria. Three time periods were considered as alternatives: baseline (2012-2017), transitional (2018-2023), and forecast (2030). Seven key assessment criteria were identified: atmospheric emissions of nitrogen oxides and black carbon, near-surface ozone concentration, degree of ocean acidification, intensity of biological invasions, loss of key habitats, and rate of Arctic warming. The results

showed that the baseline period has the maximum net outranking flow (0.9892), the transitional period represents a threshold state (0.0108), and the forecast period demonstrates critical deterioration (-1.0000). The derived formula enables quantitative assessment of the degree of Arctic marine environment degradation and can be used for monitoring ecosystem changes, planning conservation measures, and developing sustainable Arctic shipping strategies.

Keywords: Arctic, PROMETHEE II, climate change, black carbon, ocean acidification, biological invasions, multi-criteria analysis, shipping

Введение

Арктический регион переживает изменения под воздействием климатических факторов и антропогенной деятельности. Морское судоходство в Арктике представляет собой источник атмосферных загрязнителей, включая оксиды серы и азота, твердые частицы и парниковые газы - метан и черный углерод, влияющие на климатическую систему региона. Арктика является «горячей точкой» изменения климата, нагреваясь в 2 раза быстрее, чем в среднем по планете, что известно как арктическое усиление. С 1971 по 2017 год среднегодовая температура воздуха в Арктике повысилась на 2.7°C, температура в холодный сезон (октябрь-май) - на 3.1°C, а в теплый сезон (июнь-сентябрь) - на 1.8°C [1].

Основные факторы, оказывающие влияние на изменение хрупкой экосистемы Арктики – это выбросы в атмосферу, закисление океана, интродукция биомассы. Так 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), их исследование показало увеличение выбросов NO_x на 115% и SO_2 на 68% в период с 2013 по 2023 годы, прогнозы демонстрируют, 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 [2]. Особую обеспокоенность вызывает эмиссия черного углерода от судоходства в Арктике и его прямое воздействие на таяние льда, так в исследовании Цюн Ч. и соавторов, утверждается, что выбросы черного углерода с судов способствуют таянию арктического льда и снега [3].

Серьезной угрозой для арктической морской экосистемы является закисление океана, вызванное поглощением антропогенного углерода из атмосферы [4]. Северный Ледовитый океан считается наиболее уязвимым к будущему закислению из-за изначально низких показателей насыщенности. Согласно прогнозам моделей земной системы, в рамках сценария с высокими выбросами (RCP 8.5) от Терхаара Й. и соавторов, к концу двадцать первого века весь Северный Ледовитый океан станет недонасыщенным по отношению к арагониту[1] [5]. Непрерывное снижение насыщенности арагонитом и кальцитом, вызванное закислением, в сочетании с потеплением океана, может оказать значительное воздействие на морские экосистемы региона. По данным Чань Ф.Т. и соавторов, 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%) [6]. Согласно исследованию Дорте К. и соавторов, за период с 1940–1950 годов до 2000–2017 годов потенциальная площадь распространения макроводорослей прибрежной части океана увеличилась примерно на 30%, а приливно-отливных макроводорослей - на 6%, при этом средняя скорость полярной миграции составляла от 18 до 23 км за десятилетие [7]. Согласно исследованию Марелля Л. и соавторов арктическое судоходство является значимым источником приповерхностных аэрозолей и озона в летний период, особенно в Норвежском и Баренцевом морях [8].

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

[1]Это означает, что морская вода будет растворять арагонит - форму карбоната кальция, из которого строят свои раковины и скелеты многие морские организмы (моллюски, кораллы, некоторые планктонные организмы). В таких условиях этим организмам будет крайне сложно формировать и сохранять защитные структуры, что угрожает выживанию целых групп арктических видов и может привести к разрушению морских экосистем.

увеличилось с 466 до 596, в Лонгйирбюен – с 771 до 1542, а количество транзитных проходов судов мимо Кембридж-Бей выросло с 20 до 37. При этом число пассажиров, посетивших Соловецкий архипелаг, возросло с 22,9 до 74,4 тысяч человек, а Лонгйирбюен – с 38,6 до 75,2 тысяч человек. 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 условий [9]. Интенсификацию судоходства в акватории Северного морского пути демонстрирует и объем перевозок грузов, который согласно статистическим данным Единой межведомственной информационно–статистической системы, неуклонно растёт. В 2024 совокупный объем перевозки грузов составил почти 37,9 млн тонн, что на 1,6 млн тонн превышает предшествующий максимальный показатель.

Представленные факторы обусловили цель исследования и необходимость создания механизма комплексной оценки состояния арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства, основанной на системном подходе и анализе её компонентов с использованием методологии многокритериального анализа PROMETHEE II для обеспечения научной основы принятия управленческих решений в области охраны арктических экосистем и устойчивого развития региона.

Автор апробирует методический подход к комплексной оценке экосистемы Северного Ледовитого океана, подверженной совокупности климатических и антропогенных факторов. Настоящее исследование не претендует на полную оценку всех антропогенных воздействий, а фокусируется на специфическом и возрастающем факторе судоходства. Комплексная оценка с учетом Топливно-энергетических комплексов (ТЭК) и других источников является задачей для последующих исследований.

Методы и материалы

Экстраполяция локальных данных на региональный и циркумполярный уровни без учета пространственной изменчивости экологических процессов представляется методологически проблематичной. Различия в гидрологических режимах, ледовых условиях, биологической продуктивности между арктическими морями являются неоднородными. Для интегральной оценки состояния арктической среды рассматривались следующие методы многокритериального анализа:

- AHP (Analytic Hierarchy Process) - требует полных попарных сравнений всех критериев, что затруднительно при разнородных экологических данных;
- TOPSIS - чувствителен к выбору идеальных решений, которые в экологическом контексте часто не определены;
- ELECTRE - дает частичное ранжирование, что недостаточно для сравнения временных периодов;
- Weighted Sum Model - не учитывает пороговые эффекты в экологических системах.

Для разработки методики оценки состояния арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства применена методология PROMETHEE II, позволяющая получить полное ранжирование экологических состояний на основе множественных критериев [10].

Метод PROMETHEE II изначально разработан именно для работы с неполными, разнородными и пространственно-неоднородными данными, что является его ключевым преимуществом в контексте арктических исследований. В условиях объективной ограниченности данных по арктическим экосистемам (связанной с экстремальными климатическими условиями, логистическими трудностями и высокой стоимостью исследований), способность метода интегрировать имеющуюся информацию различного качества и пространственного охвата становится преимуществом.

Применительно к оценке состояния арктической морской среды в условиях интенсификации судоходства будут использованы такие шаги как определение отклонений на основе попарных сравнений; применение функции предпочтения, соответствующей типу критерия (например, V-образная функция для количественных показателей или функция с порогом безразличия для показателей с естественной изменчивостью); расчет общего индекса предпочтения; расчет исходящего потока и входящего потока; расчет чистого потока превосходства. В качестве альтернатив рассматривались три временных периода: базовый период a_1 (2012-2017 гг.), переходный период a_2 (2018-2023 гг.) и прогнозный период a_3 (2030 г.).

Исходя из комплексного анализа научной литературы, определен набор из семи ключевых критериев геоэкологической оценки:

- критерий C_1 характеризует атмосферные выбросы оксидов азота от судоходства;
- критерий C_2 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 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 ±20% не изменяет итогового ранжирования альтернатив.

Выбросы NO_x, весовой коэффициент $w_1 = 0.18$ – 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 предпочтения[2] $p_1 = 2000$ 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 альбедо льда, определим его весовой коэффициент как $w_2 = 0.16$, порог предпочтения $p_2 = 10$ тонн/год установлен на основе данных о критической концентрации BC (≥50 нг/г снега), необходимой для значимого снижения альбедо поверхности.

Далее выделим приповерхностный озон, который 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 эффекта [11][3]. Изменения менее 5 % соответствуют фоновым флуктуациям и не приводят к детектируемым физиологическим эффектам: не нарушается фотосинтетическая активность фитопланктона и репродуктивные функции ключевых видов арктической фауны остаются в норме.

Закисление океана, весовой коэффициент $w_4 = 0.15$, 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, весовой коэффициент $w_5 = 0.14$, 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 $p_5 = 15$ случаев (для биологических инвазий) установленное на ос-

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

[3]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

нове анализа данных о скорости распространения инвазивных видов в арктических условиях.

Потеря местообитаний, весовой коэффициент 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 коэффициент 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 p_7 = 0.01°C/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.

Определение весовых коэффициентов будет рассчитываться как $\sum_j w_j = 1.00$.

Для всех критериев применена функция предпочтения V-образная как наиболее подходящая для количественных данных, представим ее формулой:

$$P_j(a,b) = \min\left(\frac{d_j}{p_j}, 1\right) \text{ при } d_j > 0,$$

где $d_j = |g_j(a) - g_j(b)|$ – абсолютное отклонение по критерию j, p_j - порог предпочтения для критерия j.

Результаты исследования

Количественные оценки альтернатив по каждому критерию основаны на фактических данных научных исследований и статистических наблюдений, рассмотренных в первом разделе работы.

Для критерия C_1 (выбросы NO_x в тоннах в год) значения определены следующим образом: $g_1(a_1)$ = 8000 тонн/год (базовый период); $g_1(a_2)$ = 17200 тонн/год (переходный период с приростом 115%) и $g_1(a_3)$ = 33700 тонн/год (прогнозный период согласно высокому сценарию к 2030 году).

По критерию C_2 (черный углерод от пассажирских судов в тоннах в год) установлены значения на основе среднегодовых показателей: $g_2(a_1)$ = 39.17 тонн/год (с/з данных 25.90,31.90,45.93,42.22,44.30,44.75 тонн для 2012-2017 гг.; $g_2(a_2)$ = 65.41 тонн/год (оценочное увеличение на 67%) и $g_2(a_3)$ = 200 тонн/год (прогнозное значение согласно высокому сценарию).

Для критерия C_3 (приповерхностный озон, процентный вклад судоходства): $g_3(a_1)$ = 15% (нижняя граница диапазона 15-25% для Норвежского и Баренцева морей); $g_3(a_2)$ = 20% (средняя оценка) и $g_3(a_3)$ = 40% (прогнозируемое увеличение с учетом роста до 10 ppbv к 2050 году).

Критерий C_4 характеризует степень недонасыщенности арагонитом по шкале от 0 до 1: $g_4(a_1)$ = 0.2 (частичная недонасыщенность в локальных зонах); $g_4(a_2)$ = 0.5 (увеличивающаяся недонасыщенность в мезопелагической зоне) и $g_4(a_3)$ = 1.0 (полная недонасыщенность Северного Ледовитого океана по прогнозам RCP 8.5).

По критерию C_5 (биологические инвазии, количество зафиксированных случаев интродукции): $g_5(a_1)$ = 54 случая (зафиксированные первичные интродукции за период 1960-2015 гг.); $g_5(a_2)$ = 78 случаев (значение с учетом 25% роста судоходства и 73% роста пассажиропотока) и $g_5(a_3)$ = 125 случаев (прогноз с учетом троекратного увеличения трафика к 2025 году).

Критерий C_6 отражает потерю площади ключевых местообитаний в процентах: $g_6(a_1)$ = 6% (увеличение интертидальных макроводорослей при потере криофильных видов); $g_6(a_2)$ = 15% (ускорение процессов деградации местообитаний) и $g_6(a_3)$ = 30% (предположительно: прогнозируемая потеря с учетом 15% видов к 2050 году).

Критерий C_7 характеризует темп потепления в градусах Цельсия за год: $g_7(a_1)$ = 0.0587°C/год (период 1971-2017 гг.); $g_7(a_2)$ = 0.0669°C/год (ускорение на 14%) и $g_7(a_3)$ = 0.0828°C/год (прогнозируемое ускорение арктического усиления на 41%).

Для наглядности приведем в таблице 1 критерии и их значения:

Таблица 1

Критерии и их значения

Критерий	Вес	a_1	a_2	a_3	Порог
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, °C/год)	0.12	0.0587	0.0669	0.0828	0.01

Осуществляя расчет функций предпочтения Шаг 1 и сравнение a_1 vs a_2 по критерию C_1, получаем:

$$d = |8000 - 17200| = 9200, \quad P_1(a_1, a_2) = \min\left(\frac{9200}{2000}, 1\right) = 1.0$$

Используя аналогичный подход к расчету, для C_2 - C_6 также получаем предпочтение равное 1.0 и только C_7 = 0.82.

Обратное направление: P (a_2,a_1) = 0 для всех критериев (поскольку a_2 хуже a_1) при сравнении a_1 vs a_3 по всем критериям C_1 - C_7 = 1.0.

Обратное направление: P (a_3,a_1) = 0 для всех критериев при сравнении a_2 vs a_3 по всем критериям C_1 - C_7 = 1.0

Обратное направление: P (a_3,a_2) = 0 для всех критериев.

При расчете взвешенных предпочтений Шаг 2 для пары (a_1, a_2):

$$\pi\,(a_1,a_2) = \sum w_j \cdot P_j\,(a_1,a_2) = 0.18 \cdot 1.0 + 0.16 \cdot 1.0 + 0.12 \cdot 1.0 + 0.15 \cdot 1.0 + 0.14 \cdot 1.0 + 0.13 \cdot 1.0 + 0.12 \cdot 0.82 = 0.9784,$$

$$\pi\,(a_2,a_1) = 0 \text{ (все предпочтения равны 0).}$$

Для пар (a_1, a_3) и (a_2, a_3) взвешенное предпочтение равно 1.0000, а π = 0.

Расчет потоков по Шагу 3:

Исходящие потоки Φ^+:

$$\Phi^+(a_1) = \frac{\pi(a_1, a_2) + \pi(a_1, a_3)}{(n-1)} = \frac{0.9784 + 1.0000}{2} = 0.9892$$

$$\Phi^+(a_2) = \frac{0 + 1.0000}{2} = 0.5000$$

$$\Phi^+(a_3) = \frac{0 + 0}{2} = 0.0000$$

Входящие потоки Φ^-:

$$\Phi^-(a_1) = \frac{\pi(a_2, a_1) + \pi(a_3, a_1)}{(n-1)} = \frac{0 + 0}{2} = 0.0000,$$

$$\Phi^-(a_2) = \frac{0.9784 + 0}{2} = 0.4892,$$

$$\Phi^-(a_3) = \frac{1.0000 + 1.0000}{2} = 1.0000.$$

Чистые потоки Φ:

$$\Phi(a_1) = \Phi^+(a_1) - \Phi^-(a_1) = 0.9892 - 0.0000 = 0.9892,$$

$$\Phi(a_2) = \Phi^+(a_2) - \Phi^-(a_2) = 0.5000 - 0.4892 = 0.0108,$$

$$\Phi(a_3) = \Phi^+(a_3) - \Phi^-(a_3) = 0.0000 - 1.0000 = -1.0000.$$

Полученные значения формируют окончательное ранжирование экологических состояний арктической морской среды: a_1 > a_2 > a_3, что соответствует последовательному ухудшению состояния от базового к прогнозному периоду.

Таблица 2

Шкала интерпретации интегрального показателя ФAGES

Диапазон ФAGES	Категория состояния	Характеристика
$0.75 < Ф \le 1.00$	Относительно стабильное	Экосистема сохраняет адаптационный потенциал, воздействия не превышают компенсаторных возможностей
$0.25 < Ф \le 0.75$	Умеренно трансформированное	Заметные изменения в структуре экосистемы, отдельные функции нарушены
$-0.25 < Ф \le 0.25$	Пороговое	Баланс деградационных и адаптационных процессов, высокий риск перехода в критическое состояние
$-0.75 < Ф \le -0.25$	Деградированное	Системные нарушения экосистемных функций, частичная необратимость изменений
$-1.00 \le Ф \le -0.75$	Критически деградированное	Утрата ключевых экосистемных функций, доминирование необратимых процессов

Далее теоретически обоснуем и сделаем вывод по оценки для каждой пары альтернатив (a_i, a_j) 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 ($Ф^+$) 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 ($Ф^-$) 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 π (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 арктической среды с семью альтернативами (n=7), 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 1 (n-1)= 12 был интегрирован в процедуру нормализации результатов.

Формула ФAGES 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 ФAGES указывают на превосходство альтернативы a_i, отрицательные – на ее отступание, а значения близкие к нулю свидетельствуют о сопоставимости альтернатив.

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.

Детализация компонентов итоговой формулы можно представить следующим образом:

Система критериев (j = 1,...,7), формула интегрирует семь ключевых геоэкологических критериев:

- C_1: атмосферные выбросы NO_x от судоходства (w_1 = 0.18);
- C_2: эмиссия черного углерода от круизно-экспедиционных судов (w_2 = 0.16);
- C_3: концентрация приповерхностного озона (w_3 = 0.12);
- C_4: степень закисления океана (w_4 = 0.15);
- C_5: интенсивность биологических инвазий (w_5 = 0.14);
- C_6: потеря ключевых местообитаний (w_6 = 0.13);
- C_7: скорость климатических изменений (w_7 = 0.12).

Функции предпочтения P_j, все критерии используют V-образную функцию предпочтения:

$$P_j(g_j(a_i), g_j(a_k)) = \min\left(\frac{d_j}{p_j}, 1\right) \text{ при } d_j > 0,$$

$$= 0 \text{ при } d_j \leq 0,$$

где $d_j = |g_j(a_i) - g_j(a_k)|$ и p_j - соответствующий порог предпочтения.

Формула ФAGES 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.

Таким образом, формула объединяет в себе все компоненты многокритериального анализа: систему критериев с их весовыми коэффициентами, функции предпочтения, отражающие нелинейные зависимости между отклонениями и степенью предпочтения, и процедуру агрегирования, обеспечивающую получение интегрального показателя геоэкологического состояния. Данная формула 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.

Обсуждение

За последнее время мы наблюдаем значительные структурные изменения, так в период с 2003 по 2021 год объем льда в Арктике сократился примерно на 6000 км³, что сделало арктические воды более доступными для морского судоходства. К концу настоящего столетия температура воздуха в Арктике может повыситься на 7-9°С, такие изменение несомненно повлияют на арктические виды, которые в значительной частя являются эндемиками. Уже сегодня учеными зарегистрирован 341 чужеродный вид растений в рассматриваемом регионе [12].

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.

В частности, биологические инвазии представляют долгосрочную угрозу, поскольку инвазивные виды способны необратимо изменить структуру сообществ. Увеличение случаев интродукции с 54 до прогнозируемых 125 означает ускорение биогомогенизации арктических экосистем и потерю уникального эндемичного биоразнообразия. Критическая ситуация с кайрами, 84% кормовых маршрутов которых проходят вне охраняемых зон, демонстрирует недостаточность существующих природоохранных мер [13].

Следует отметить, что прогнозное значение для 2030 года (Φ = -1.00) основано на сценарии высоких выбросов (RCP 8.5) и максимальной интенсификации судоходства. Фактическая траектория может отличаться в зависимости от эффективности международных климатических соглашений, внедрения «зеленых» технологий в судоходстве, регуляторных мер по ограничению трафика в уязвимых акваториях. Метод PROMETHEE II позволяет пересчитать оценку для альтернативных сценариев при появлении новых данных, что делает формулу Φ_{AGES} инструментом адаптивного мониторинга.

Заключение

Результаты исследования количественно подтверждают гипотезу о прогрессирующей деградации арктической морской среды под совокупным воздействием интенсификации судоходства, климатических изменений и связанных с ними экологических процессов. Базовый период характеризуется максимальным чистым потоком превосходства (0.9892), переходный период показывает пороговое состояние с минимальным положительным значением (0.0108), а прогнозный период демонстрирует критическое ухудшение с максимальным отрицательным чистым потоком (-1.0000).

Полученная формула интегральной оценки арктической среды методом PROMETHEE позволяет 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.

Применение метода анализа иерархий Т. Саати для определения весовых коэффициентов обеспечивает научную обоснованность интеграции различных критериев. Более того, система весов может быть адаптирована для различных арктических регионов путем корректировки коэффициентов в соответствии с локальными особенностями экосистем.

Возможность работы с пространственно-неоднородными данными является одним из главных достоинств метода PROMETHEE II. В отличие от традиционных подходов, требующих создания отдельных моделей для каждого региона, данная методология позволяет:

- интегрировать данные различного пространственного охвата – от локальных измерений до региональных оценок, учитывая ограниченную репрезентативность точечных наблюдений;
- получать сопоставимые оценки для различных арктических регионов.

Сравнение замерзающих и незамерзающих морей подчеркивает гибкость предложенной методологии. Метод позволяет учесть различия между типами экосистем через дифференцированную систему функций предпочтения и пороговых значений. Формула ФAGES обладает высокой степенью масштабируемости: локальный уровень (оценка отдельных акваторий); региональный уровень (интеграция данных по морским бассейнам) и циркумполярный уровень (общая оценка состояния арктических морей). При этом методология сохраняет возможность детализации и декомпозиции результатов, что позволяет выявлять наиболее проблемные регионы и факторы воздействия.

Комплексный характер угроз для арктического биоразнообразия, вызванных изменением климата и увеличением человеческой деятельности, требует принятия срочных мер для сохранения этой уникальной и хрупкой экосистемы.

Список литературы:

1. Rani A., Gupta K., Saini K.C., Narwal S., Bast F. Arctic biodiversity amidst looming climate apocalypse: current status and way forward. In: Khare N., editor. Understanding Present and Past Arctic Environments. Elsevier; 2021. P. 213–255. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822869-2.00003-7
2. Figenschau N., Lu J., Batalden B.-M., Panieri G. Linking ship-associated emissions and resource development in the Arctic: Trends and predictions along the Northern Sea Route // Ocean & Coastal Management. 2024. Vol. 257. Article. 107314. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107314
3. Chen Q., Lau Y., Ge Y.-E., Dulebenets M.A., Kawasaki T., Ng A.K.Y. Interactions between Arctic passenger ship activities and emissions // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021. Vol. 97. Article.102925. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102925
4. Авдыш Д.М., Бразовская Я.Е. Закисление и потепление морской среды: международно-правовые механизмы реагирования // Экологическое право. 2025. № 3. С. 37-39. https://doi.org/10.18572/1812-3775-2025-3-37-39
5. Terhaar J., Kwiatkowski L., Bopp L. Emergent constraint on Arctic Ocean acidification in the twenty-first century // Nature. 2020. Vol. 582(7812). P. 379–383. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2360-3
6. Chan F.T., Stanislawczyk K., Sneekes A.C. et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks // Global change biology. 2018. Vol. 25(1). P. 25–38. https://doi.org/10.1111/gcb.14469
7. Krause-Jensen D., Archambault P., Assis J., et al. Imprint of Climate Change on Pan-Arctic Marine Vegetation // Frontiers in Marine Science. 2020. Vol. 7. Article. 617324. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.617324
8. 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. 12942–12963. https://doi.org/10.1029/2018JD028863
9. Olsen J, Carter NA, 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). C. 1609189. https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1609189
10. 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. Vol. 73. P. 94–101. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.896
11. Deb J.C., Bailey S.J. Arctic marine ecosystems face increasing climate stress // Environmental Reviews. 2023. Vol. 31(3). P. 403–451. https://doi.org/10.1139/er-2022-0101
12. Agathokleous E., Feng Z., Oksanen E., et al. Ozone affects plant, insect, and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity // Science Advances. 2020. Vol. 6(33). eabc1176. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1176
13. Thiebot J-B., Will A.P., Tsukamoto S., Kitaysky A.S., 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. Article. 875541. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.875541

References:

1. Rani A, Gupta K, Saini KC, Narwal S, Bast F. Arctic biodiversity amidst looming climate apocalypse: current status and way forward. In: Khare N, editor. Understanding Present and Past Arctic Environments. Elsevier; 2021. P. 213–255. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822869-2.00003-7
2. Figenschau N, Lu J, Batalden B-M, Panieri G. Linking ship-associated emissions and resource development in the Arctic: Trends and predictions along the Northern Sea Route. Ocean & Coastal Management. 2024;257:107314. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107314
3. Chen Q, Lau Y, Ge Y-E, Dulebenets MA, Kawasaki T, Ng AKY. Interactions between Arctic passenger ship activities and emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021;97:102925. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102925
4. Avdysh DM, Brazovskaya YaE. Acidification and warming of the marine environment: international legal response mechanisms. Ekologicheskoe pravo. 2025;(3):37-39. (In Russ.). https://doi.org/10.18572/1812-3775-2025-3-37-39
5. Terhaar J, Kwiatkowski L, Bopp L. Emergent constraint on Arctic Ocean acidification in the twenty-first century. Nature. 2020;582(7812):379–383. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2360-3
6. 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. 2018;25(1):25–38. https://doi.org/10.1111/gcb.14469
7. Krause-Jensen D, Archambault P, Assis J, et al. Imprint of Climate Change on Pan-Arctic Marine Vegetation. Frontiers in Marine Science. 2020;7:617324. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.617324
8. 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;123:12942–12963. https://doi.org/10.1029/2018JD028863
9. Olsen J, Carter NA, Dawson J. Community perspectives on the environmental impacts of Arctic shipping: Case studies from Russia, Norway and Canada. Cogent Social Sciences. 2019;5(1):1609189. https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1609189
10. 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
11. Deb JC, Bailey SJ. Arctic marine ecosystems face increasing climate stress. Environmental Reviews. 2023;31(3):403–451. https://doi.org/10.1139/er-2022-0101
12. Agathokleous E, Feng Z, Oksanen E, Sicard P, et al. 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
13. Thiebot J-B, Will AP, Tsukamoto S, Kitaysky AS, 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;9:875541. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.875541