

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ СУДАМИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВО ЛЬДАХ

М. В. Васёха^{1,2}, Ж. В. Васильева¹, А. И. Белухин¹, Т. А. Алексеева^{3,4}, Р. И. Май^{3,5}

¹ Мурманский арктический университет (Мурманск, Российская Федерация)

² Кольский научный центр РАН (Апатиты, Российская Федерация)

³ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

⁴ Институт космических исследований РАН (Москва, Российская Федерация)

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Для цитирования

Васёха М. В., Васильева Ж. В., Белухин А. И. и др. Методология оценки выбросов парниковых газов судами при движении во льдах // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 4. — С. 151—162. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-151-162.

Представлена методология оценки выбросов парниковых газов судами, осуществляющими плавание в арктической акватории как по чистой воде, так и в ледовом покрове. В основу методологии положено совмещение АИС-данных и ледовых карт с последующей количественной оценкой сопротивления ледового покрова движению судна. Предложенный методологический инструментарий обеспечивает высокую точность при определении эмиссионной нагрузки и учитывает специфику судоходства в арктических акваториях с учетом динамических характеристик ледовой обстановки. Для верификации методологии выполнено сопоставление вычисленных по разработанной методологии годовых объемов парниковых газов для судов проекта «Новый порт» за 2024 г. с объемами выбросов, вычисленными по фактически потребленному бункеровочному топливу.

Ключевые слова: арктическое судоходство, суда ледового плавания, парниковые газы, акватория Северного морского пути, АИС-данные, ледовые карты.

Введение

Морское судоходство играет ключевую роль в глобальной экономике, обеспечивая перемещение значительных объемов грузов и товарной продукции. При транспортировке крупных партий грузов на большие расстояния морские перевозки характеризуются высокой экономической эффективностью. В арктическом регионе с экстремальными климатическими условиями и дефицитом развитой наземной транспортной инфраструктуры морской транспорт зачастую выступает в качестве безальтернативного средства обеспечения межрегиональных и локальных логистических связей.

В настоящее время наблюдаются сокращение площади дрейфующих и припайных льдов, их толщины, а также увеличение пространства чистой воды [1], скорости выноса льдов в пролив Фрама [2]. Ледовые условия становятся легче, увеличиваются окна навигации для судов определенного ледового класса [3; 4]. По всем принятым сценариям изменения климата до конца XXI в. [5] будет проходить сокращение площади льдов в акватории Северного морского пути, ледовитость в период наибольшего развития ледяного покрова сократится на 5—16%.

На фоне тенденции к сокращению площади льдов, способствующей развитию морских перевозок, наблюдается ужесточение международных экологических требований к морскому судоходству в Арктике, проявляющееся в таких ключевых

аспектах, как снижение выбросов парниковых газов, ограничения по содержанию серы в топливе и использованию тяжелого топлива, и в других требованиях [6].

Для расчета выбросов парниковых газов с судов существует два основных подхода, использующих разные методы или модели: подход top-down (сверху вниз) и подход bottom-up (снизу вверх) [7; 8].

Подход top-down обычно используется для подголки национальных и международных кадастров выбросов. Он основан исключительно на данных о продажах судового топлива, которые пересчитываются с помощью коэффициентов выбросов, выраженных в единицах загрязняющих веществ на единицу использованного топлива. Точность оценок в подходе top-down напрямую зависит от качества исходных данных. Ошибки, пробелы, задержки в их сборе и обработке, отсутствие детализации приводят к значительным погрешностям в оценке выбросов [9].

Методы bottom-up основаны на технических характеристиках судна, показателях его судовой активности и условиях деятельности (погодные условия, течения и др.). Эти методы могут включать данные о расходе топлива отдельными судами [10]. Последние работы в рамках этого подхода основываются на использовании данных автоматической идентификационной системы (АИС) судов для количественной оценки часов работы двигателя, мгновенных скоростей и времени в пути между точками передачи АИС-данных в акватории [11; 12]. Использование данных АИС позволило более реалистично и точно описать источники эмиссии парниковых газов в акватории, уменьшив неопределенность, связанную с показателями судовой деятельности [13]. Основанный на данных АИС подход впервые был использован при разработке методики оценки выбросов парниковых газов для арктической акватории в [14].

Методики для нахождения объемов выбросов парниковых газов для судов ледового плавания с учетом ледовой обстановки в настоящее время не существует. Если маршрут движения судна пролегал через льды, то достоверную оценку выбросов парниковых газов конкретным судном можно дать лишь на основании объемов топлива, затраченного конкретным судном в конце отчетного периода. Отчет о потреблении топлива судами валовой вместимостью более 5000 тыс. т передается с 2019 г. [15] в Российский морской регистр судоходства (РМРС) и Международную морскую организацию (ИМО). Зачастую информация о потребленном судами топливе является закрытой и недоступна для исследователей.

Первая попытка оценить объемы выбросов парниковых газов при хождении судов по трассам Северного морского пути (СМП) была предпринята на основе коэффициента энергетической эффективности судов высокого ледового класса [16]. Однако

расчет коэффициента энергоэффективности (ЕЕХI) согласно требованиям Полярного кодекса не применяется для судов категории А, к которым относятся суда ледовых классов Arc6—Arc9, у которых корпус имеет свои особенности и значительно увеличена мощность главных двигателей.

Ввиду того, что Россия является лидером в арктическом судоходстве, необходима отечественная методология, позволяющая давать независимую оценку объемов парниковых газов при выполнении полярных маршрутов. Такая методология должна одновременно учитывать расход топлива в зависимости от формы носовой части судна ледового класса, а также от характеристик ледяного покрова, таких как размеры ледяных полей, толщины и сплошность льда.

Расчет потребления топлива и выбросов парниковых газов может быть основан на вычислении затрат энергии на преодоление сопротивления льда при движении судна.

В отечественной и зарубежной литературе известны методы расчета ледового сопротивления при движении судна В. И. Каштеляна [17], Б. П. Ионова [18], Р. Эдвардса [19], Г. Линдквиста [20], К. Риска [21; 22], Л. Г. Цоя [23], В. А. Зуева [24] и др. Указанные методы учитывают различные параметры судна (длину, ширину, осадку, скорость движения, угол наклона форштевня, угол наклона конструктивной ватерлинии, водоизмещение, формы обводов и др.) и различные характеристики льда (толщину, предел прочности на изгиб, удельный вес и плотность льда), а также сопротивление на его разрушение, притапливание и трение. Также известна модель Е. М. Грамузова, разработанная на основе энергетического подхода [25].

В статье [26] выполнен анализ сильных и слабых сторон методов Ионова, Линдквиста, Риски, Кейнонена, Каштеляна, Максудова, Джонга. Автор указывает на то, что метод Ионова дает оценку невысокой точности для судов с традиционными обводами, точность метода Линдквиста снижается при увеличении толщины льда, модель Риски не учитывает свойства льда, результаты расчетов по методике Кейнонена становятся неточными при повышении скорости движения судна, методика Каштеляна не дает корректных значений для судов современных проектов. Автор делает вывод, что в настоящее время нет универсального метода вычисления сопротивления ровного сплошного льда движению судов различного типа.

В [27] представлены результаты сравнения значений ледового сопротивления сплошного льда, полученные по методикам Каштеляна, Каштеляна — Фадеева, Ионова, Максудова, Риски, Линдквиста, которые были сопоставлены с результатами натуральных испытаний ледоколов «Москва» и «Ермак». Показано, что точность эмпирических методов может изменяться в широких пределах (от 2% до 250%). Наиболее точные результаты были получены для

Таблица 1. Технические характеристики головного судна «Штурман Альбанов»
Table 1. Technical characteristics of the lead vessel “Shturman Albanov”

Характеристика	Значение
Валовой тоннаж, рег. т	44354
Водоизмещение, т	63186
Дедвейт, т	41457
Длина наибольшая (теоретическая), м	248.92
Ширина габаритная, м	34
Осадка, м	9,5
Главные двигатели	2 двигателя (STX-MAN 14V32/40) по 7000 кВт, 2 двигателя (STX-MAN 14V32/40) по 9000 кВт
Суммарная мощность главных двигателей, кВт	32 000
Мощность на валах полная, кВт	22 000
Паспортное потребление топлива, т/сут	65
Удельный расход топлива, г/кВтч	185
Эксплуатационная скорость, уз	14,7
Максимальная скорость, уз	16,0
Пропульсивная установка	Две установки Azipod IV 1800 по 11 000кВт
Коэффициент полноты конструктивной ватерлинии	0,87
Коэффициент ледокольности	0,28
Коэффициент ледорезности	0,33

методики В. И. Каштеляна, и указано, что данный подход может быть использован для всех типов ледовых судов.

Цель настоящей работы — разработка методологии оценки выбросов парниковых газов при хождении судов во льдах. Для реализации поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- разработать алгоритм совмещения АИС-данных и ледовых карт по маршруту следования судна;
- установить порядок вычисления затрат топлива и выбросов парниковых газов судна для открытой воды;
- разработать алгоритм вычисления выбросов парниковых газов в различных режимах ледового плавания судна;
- применить разработанный алгоритм для определения эмиссии парниковых газов от танкеров проекта «Новый порт» за 2024 г.;
- выполнить верификацию разработанной методологии путем сопоставления результатов вычисления годовых объемов парниковых газов для судов проекта «Новый порт» за 2024 г. с объемами выбросов, найденными по фактически потребленному бункеровочному топливу.

Методика исследования

Настоящее исследование опирается на ранее созданную методологию [14], предлагающую оценку парниковых выбросов судов в арктической акватории. Используются АИС-данные движения танкеров проекта «Новый порт» за 2004 г., их технические характеристики, данные о ледовой обстановке по маршруту следования танкеров, методики вычисления сопротивления льда при движении судов и данные бункеровочных компаний о потреблении топлива судами за 2024 г.

Танкерный флот

В состав флота проекта «Новый порт» входят шесть судов ледового класса Arc7 проекта SHI 42K Arctic Shuttle Tanker серии «Штурман» с техническими характеристиками, представленными в табл. 1. Суда имеют кормовое расположение машинного отделения, ледокольную форму носовой оконечности и специальную форму кормовой оконечности [28]. Основным видом топлива для главных двигателей является Low Sulphur Heavy Fuel Oil (LSHFO) — тяжелое топливо с массовой долей серы менее 0,5%.

Три танкера-челнока «Штурман Альбанов», «Штурман Щербинин» и «Штурман Овцын» в 2024 г.

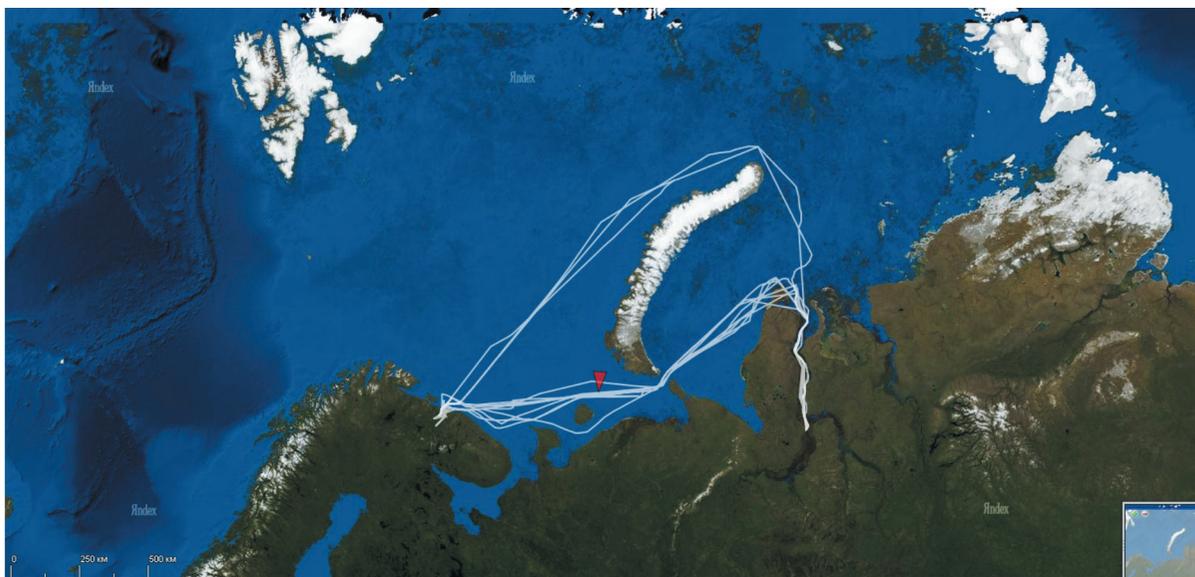


Рис. 1. Маршруты движения танкерного флота проекта «Новый порт» (визуализация выполнена в программе SASPlanet)
 Fig. 1. Routes the tanker fleet of the “New Port” project (visualization is performed in the SASPlanet program)

осуществляли перевозки нефти исключительно на маршруте от терминала «Ворота Арктики» (Обская губа) до места перевалки в порту Мурманска. По этим судам имеется информация бункеровочных компаний об объемах их годовой заправки. Остальные танкеры проекта («Штурман Скуратов», «Штурман Кошелев», «Штурман Малыгин») помимо основного маршрута в 2024 г. также работали за пределами СМП от одного до трех месяцев, и по ним отсутствуют достоверные данные о дополнительных бункеровках. Поэтому верификация разработанной методологии оценки углеродного следа была выполнена по первым трем танкерам.

Ледовые условия на маршруте следования

На основном маршруте следования танкеров терминал «Ворота Арктики» — порт Мурманск в акватории юго-восточной части Баренцева моря и юго-западной части Карского моря ежегодно формируется ледяной покров, период наличия льдов значительно превосходит безледный период. Начало осеннего замерзания акваторий приходится на октябрь, затем с октября по апрель-май происходит нарастание ледяного покрова, а в мае-июле начинаются процессы летнего таяния. В период максимального развития ледяного покрова в апреле-марте ледяной покров в юго-западной части Баренцева моря обычно состоит из тонких однолетних льдов толщиной 0,3—0,7 м и однолетних льдов средней толщины 0,7—1,2 м. Однолетние толстые льды толщиной более 1,2 м в этом районе образуются редко, но иногда поступают из Карского моря через пролив Карские Ворота. В юго-западной части Карского моря они нарастают в среднем за зиму до 1,5 м, однако вследствие повышенной динамики льдов, выноса льдов из моря, формиро-

вания заприпайных полыней и тонких льдов на акватории формируется ледяной покров различного возрастного состава [29].

Более короткий путь движения через пролив Карские Ворота используется большую часть года. Однако в апреле, в период максимального развития ледяного покрова, происходит разделение Новоземельского и Североземельского ледяных массивов, вследствие чего появляется зона разрежений в ледяном покрове по маршруту от мыса Желания к Обской губе. Судходный поток в апреле-мае частично перемещается на этот маршрут — через мыс Желания [30] (рис. 1).

Совмещение АИС-данных и ледовых карт

Координаты и скорость движения танкерного флота анализировались на основании обработки АИС-данных за 2024 г. Для получения характеристик ледовых условий по маршруту движения судна на каждой точке АИС присваивалась информация из ледовой зоны (толщина и сплоченность льда). При этом датировка ледовых карт по отношению ко времени прохождения судна может иметь запаздывание от 0 до 7 сут. Совмещение АИС-данных и ледовой обстановки позволяет выделять участки маршрута с чистой водой и льдом.

Характеристики ледяного покрова (толщина, степень покрытия акватории, горизонтальные размеры льдин) неоднородны в пространстве. Для их описания используется понятие «ледовая зона» — область, в которой наблюдаются схожие характеристики льда. В современных ледовых картах однородная ледовая зона содержит информацию о соотношении покрытия выбранной акватории льдами различной толщины и различных размеров. Обычно толщина льда описывается возрастом льда, где

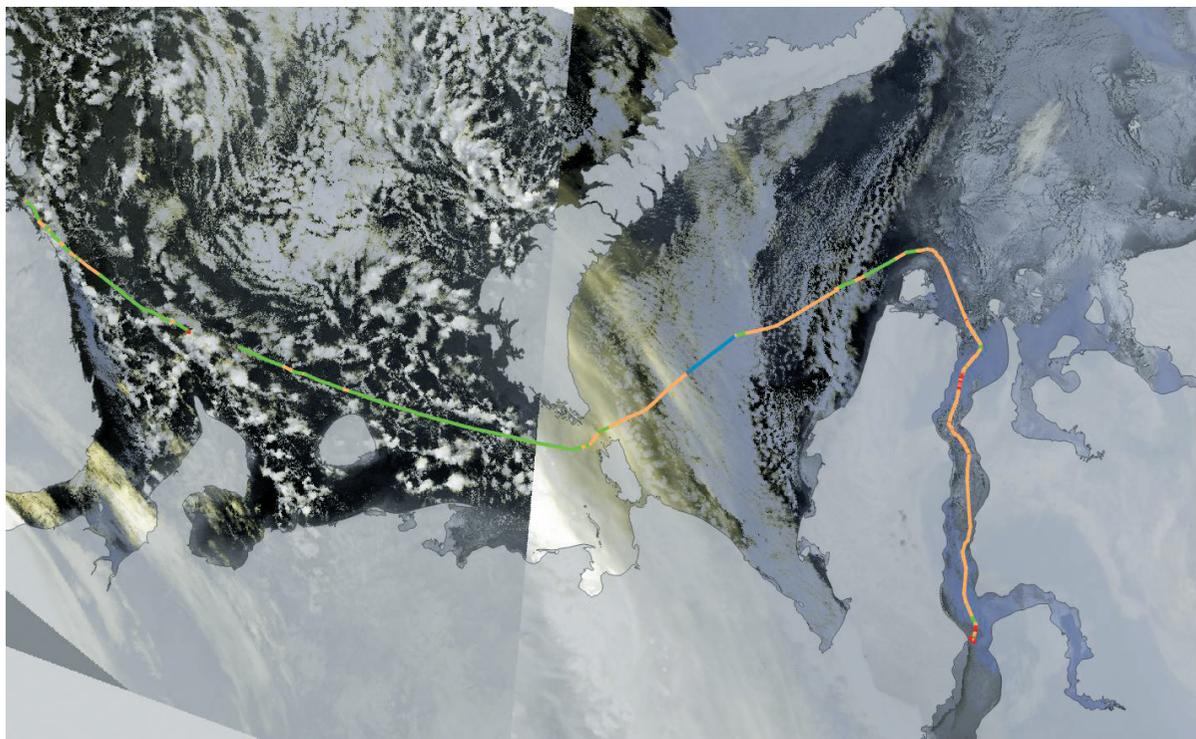


Рис. 2. Визуализация наложения AIS-данных на ледовую карту на примере маршрута Ворота Арктики – Мурманск, выполненного танкером «Штурман Щербинин» (апрель 2024 г.): 0–4 уз – красный цвет, 4–8 уз – желтый, 8–12 уз – зеленый, 12 уз и более – синий

Fig. 2. Visualization of AIS data overlay on the ice map using the example of the route Arctic Gates – Murmansk, completed by the tanker "Shturman Shcherbinin" (April 2024): 0–4 knots – red, 4–8 – yellow, 8–12 – green, 12 and above – blue

для каждой возрастной градации определен соответствующий диапазон толщин. Размеры льдин описываются термином «форма льда», где для каждой формы задан соответствующий диапазон преобладающих горизонтальных размеров. Степень покрытия льдами одной возрастной градации или одних форм называется частной сплоченностью. Сумма частных сплоченностей будет соответствовать общей сплоченности льда в данной ледовой зоне.

В 1996 г. Всемирная метеорологическая организация приняла формат SIGRID3 в качестве основного формата хранения, распространения и анализа ледовой информации [31]. Этот формат основан на использовании ледовой зоны, контуры которой записываются в виде последовательности координат и которой соответствует атрибутивные признаки трех возможных возрастных градаций.

В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте в оперативном режиме для каждого моря создаются электронные ледовые карты с недельной дискретностью [32]. Ледовые карты создаются в ГИС-среде по географически привязанной спутниковой информации различных диапазонов электромагнитного спектра (рис. 2). Из-за использования спутниковых снимков за несколько суток ледовая карта отражает обобщенную информацию с задержкой до одной недели.

Для присвоения каждому сигналу AIS информации о ледяном покрове выполнялся следующий комплекс процедур. Трек судна разбивался на недельные отрезки таким образом, чтобы каждому отрезку соответствовала определенная ледовая карта. Затем последовательно перебирались все ледовые зоны выбранной электронной ледовой карты и проверялось попадание координат сигналов AIS внутрь полигона ледовой зоны. При попадании точки AIS сигнала внутрь полигона ледовой зоны ей присваивались общая и частная сплоченность, возраст и формы льдов, свойственные данной ледовой зоне. Такая процедура одновременно позволяет проводить фильтрацию сигналов AIS, содержащих заведомо ложные координаты, возникающие в случае помех.

Таким образом, каждый AIS-сигнал, содержащий информацию о времени, координатах, скорости и курсе судна, дополняется данными об общей сплоченности, частных сплоченностях, возрасте и форме ледяных полей. При автоматизации расчетов возраст и форма ледяных полей заменялись средними для диапазона значениями толщины льда и размеров льдин. Также рассчитывалась средневзвешенная толщина льда как сумма произведений толщин льда и частных сплоченностей, выраженных в долях единицы.

Методология оценки выбросов парниковых газов при движении по маршрутам с ледовыми полями

Совмещенные данные АИС и ледовой обстановки позволяют выявить следующие условия плавания: открытая вода, битый лед (ледяные поля со сплоченностью 4,5—9,5), сплошной лед (сплоченность 10). В настоящей работе движение танкера в ледовом канале при ледокольной проводке отдельно не рассматривается. Делается допущение, что сопротивление льда в канале соответствует сопротивлению битого льда со сплоченностью 8 баллов [33].

Вычисление выбросов парниковых газов для открытой воды

Расчет выбросов парниковых газов на открытой воде осуществлялся с использованием разработанной авторами методики [14], основанной на скоростно-мощностном подходе. Этот расчет выполнялся для всей длины маршрута судна.

Вычисление сопротивления сплошного льда

Для вычисления сопротивления сплошного льда движению судна использован подход В. И. Каштеляна [34]. Его выбор основан на том, что он учитывает все параметры, полученные при совмещении АИС-данных с картами ледовой обстановки. Кроме того, в данной методике учитываются особенности носовой части судов новых проектов с помощью коэффициентов ледокольности и ледорезности, характеризующих форму корпуса в районе конструктивной ватерлинии [35]:

$$R_{\lambda} = (0,004\sigma_p B h \mu_0 + 3,6\gamma_{\lambda} B h^2 \mu_0 + 0,25B^{1,65} h \eta^{-1} + R_{\beta}) 1,02 \cdot 10^{-4},$$

где R_{λ} — полное сопротивление льда, Н; R_{β} — сопротивление воды, Н; B — ширина судна, м; h — толщина льда, м; σ_p — предел прочности льда на изгиб, т/м²; γ_{λ} — удельный вес льда, т/м³; ϑ — скорость движения судна, м/с; μ_0 и η — коэффициенты ледокольности и ледорезности, характеризующие форму обводов судна и равные соответственно 0,28 и 0,33.

Предел прочности льда на изгиб принят равным 0,7 МПа [36]. Сопротивление льда вычисляется для расстояния между соседними АИС-сигналами, затем суммируется по всей длине маршрута. Во избежание двойного учета при преодолении ледовых полей сопротивление воды движению судна дополнительно не учитывалось, так как было учтено на предыдущем этапе вычисления при использовании скоростно-мощностного подхода для всей длины маршрута.

Вычисление сопротивления битого разреженного льда

Для вычисления сопротивления битого льда при движении судна также использован подход В. И. Каштеляна, рекомендованный правилами разработки и проведения морских операций РМРС [37],

учитывающий скорость движения судна, средний размер льдин и сплоченность:

$$R_{\lambda} = g \left[\rho \sqrt{rh} \left(\frac{B}{2} \right)^2 k_1 \left(1 + 2f_{ID} \alpha_B \frac{L}{B} \right) + k_2 \rho rh B (f_{ID} + \alpha_B \operatorname{tg} \alpha_0) Fr + k_3 \rho rh L \operatorname{tg}^2 \alpha_0 Fr^2 \right] 10^{-3};$$

$$Fr = \frac{\vartheta}{\sqrt{gL}},$$

где ρ — плотность льда, принята равной 850 кг/м³; r — протяженность льда, м; h — толщина льда, м; B — ширина судна, м; f_{ID} — коэффициент трения льда о борт, кН; α_n — коэффициент полноты конструктивной ватерлинии, для судов серии «Штурман» принят 0,87; S — сплоченность льдов; α_n — угол входа носовой ветви, град; Fr — число Фруда; ϑ — скорость судна, м/с; L — длина судна, м; g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; rh — характерный параметр мелкобитого разряженного льда, равный 4 м²; k_1, k_2 — безразмерные коэффициенты, зависящие от сплоченности льда.

Для нахождения k_1, k_2 использованы формулы:

$$k_1 = (3 - 2s + 0,25S^2) 10^{-2}; 6 \leq S < 10;$$

$$k_1 = 0; S < 6;$$

$$k_2 = 0,46 - 0,305S + 0,1125S^2.$$

Коэффициент k_3 для всего диапазона значений сплоченности равен 4,2.

Вычисление количества энергии и топлива, затраченного на преодоление сопротивления льда

Эффективная (полезная) мощность, необходимая для преодоления льда, равна произведению сопротивления льда на скорость судна с учетом механических потерь на валах и редукторах, пропульсивного коэффициента на участке между двумя АИС-сигналами:

$$P_{AIS} = \frac{R_{\lambda} \vartheta}{\eta_{ред} \eta_{вал} \eta_{пропульс}},$$

где P_{AIS} — фактическая мощность главного двигателя при средней скорости между двумя АИС-сигналами, кВт; ϑ — скорость судна во льдах, определяемая по АИС, м/с; $\eta_{ред}$ — коэффициент потери мощности на редукторах, равный 0,94 [38]; $\eta_{вал}$ — коэффициент потери мощности на валах, равный 0,97 [38]; $\eta_{пропульс}$ — пропульсивный коэффициент (КПД гребного винта), на ходовых режимах обычно лежит в диапазоне 0,53—0,55 [39], для вычисления принимаем среднее значение — 0,54.

Расход топлива рассчитывался по формуле [14]

$$\Omega = n \cdot 10^{-6} P_{AIS} \tau,$$

где Ω — расход судном топлива между соседними навигационными точками на преодоление льда, т;

Таблица 2. Коэффициенты эмиссии, использованные в расчетах эмиссии парниковых газов при международных морских перевозках — МЕРС.376(80)

Table 2. Emission coefficients used in calculations of greenhouse gas emissions from international maritime transport — МЕРС.376(80)

Вид топлива	Коэффициент эмиссии Cf_{CO_2} , г CO_2 /г топлива	Коэффициент эмиссии Cf_{CH_4} , г CH_4 /г топлива	Коэффициент эмиссии Cf_{NO_x} , г NO_x /г топлива
Heavy fuel oil (HFO)	3,114	0,00 005	0,00 018

n — удельный расход топлива, г/кВт·ч; τ — время прохождения судна между двумя навигационными сигналами, ч.

Оценка выбросов судами парниковых газов CO_2 , CH_4 , NO_x осуществлялась согласно [26] по формулам:

$$\mu_{CO_2} = \sum_{i=1}^m \Omega_i Cf_{CO_2};$$

$$\mu_{CH_4} = \sum_{i=1}^m \Omega_i Cf_{CH_4};$$

$$\mu_{NO_x} = \sum_{i=1}^m \Omega_i Cf_{NO_x},$$

где Ω — расход топлива, т; Cf_{CO_2} — коэффициент эмиссии углекислого газа; Cf_{CH_4} — коэффициент эмиссии метана; Cf_{NO_x} — коэффициент эмиссии оксидов азота.

Для расчета выбросов судами парниковых газов были использованы рекомендованные резолюцией ИМО МЕРС.376(80) коэффициенты эмиссии CO_2 , CH_4 , NO_x (табл. 2).

Обобщенно методологию оценки выбросов парниковых газов (ПГ) при движении судна во льдах можно представить в виде схемы (рис. 3).

Результаты и их верификация

В ходе опробования разработанной методологии в отношении выбросов танкеров «Штурман Щербинин», «Штурман Овцын» и «Штурман Альбанов» было установлено, что за исследуемый годовой период эти суда суммарно выбросили в атмосферу 120 142,27 т углекислого газа, 1,93 т метана и 6,65 т оксидов азота.

Объемы годовых выбросов парниковых газов по каждому танкеру представлены на рис. 4. Наибольшее количество выбросов установлено для судна «Штурман Щербинин», что соответствует 29 выполненным рейсам в течение 2024 г., 12 из которых происходили в ледовых условиях (период январь-июнь). Выбросы танкеров «Штурман Овцын»



Рис. 3. Методология оценки выбросов парниковых газов судами при движении во льдах
Fig. 3. Methodology for estimating greenhouse gas emissions from ships moving in ice

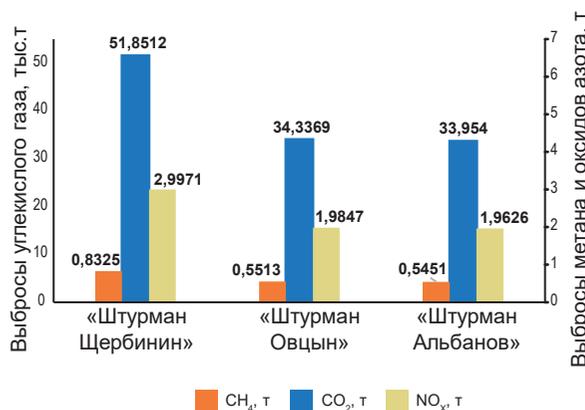


Рис. 4. Годовые выбросы парниковых газов (углекислый газ, метан и оксиды азота) исследуемыми судами
Fig. 4. Annual greenhouse gas emissions (carbon dioxide, methane and nitrogen oxides) by the studied vessels

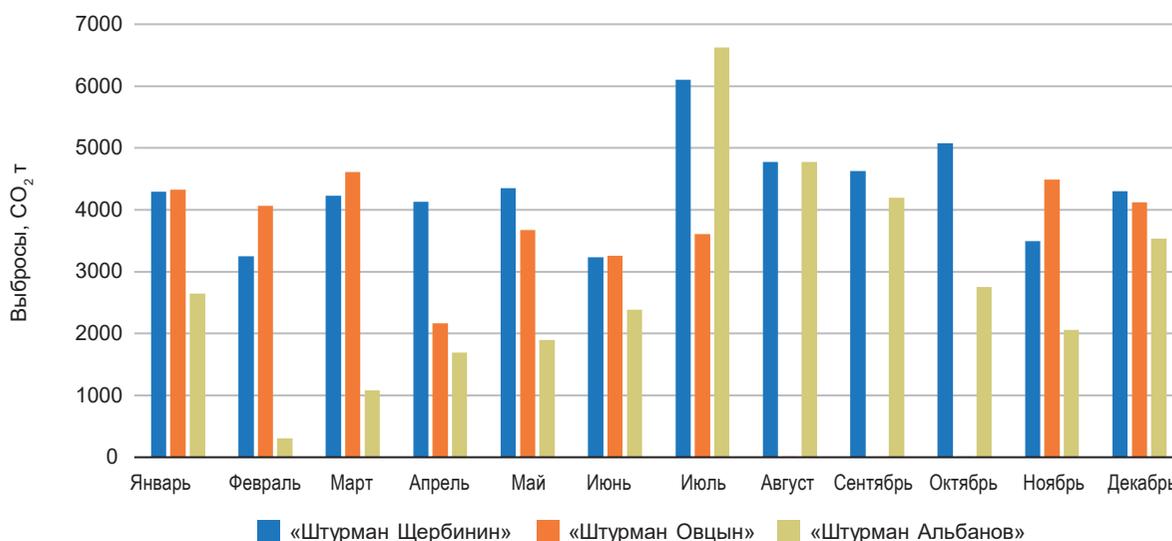


Рис. 5. Годовая динамика выбросов парникового газа CO₂ для танкеров
 Fig. 5. Annual dynamics of greenhouse gas CO₂ emissions for tankers

и «Штурман Альбанов» составляют величины на 33—35% меньше.

Анализ месячной и сезонной эмиссии парниковых газов (рис. 5) позволяет более точно отслеживать экологическую нагрузку на морскую среду. Можно увидеть, что эмиссия парниковых газов от 12 рейсов в ледовых условиях за первое полугодие 2024 г. для танкера «Штурман Щербинин» сопоставима с эмиссией от 17 рейсов на открытой воде и по молодому льду (ноябрь-декабрь) во втором полугодии.

Верификация методологии осуществлялась путем сопоставления вычисленных по разработанной методологии годовых объемов парниковых газов с объемами выбросов, вычисленными по фактически потребленному бункеровочному топливу за 2024 г. (табл. 3).

Диапазон отклонений результатов, полученных по представленной методике, может изменяться как в меньшую, так и в большую сторону. Максимальное отклонение не превышает 15%.

Полученные отклонения в расходе топлива могут быть связаны как с погрешностями координат АИС-сигналов при огибании судами северного острова архипелага Новая Земля и северной оконечности полуострова Ямал, так и со снижением их частоты в арктических широтах. В результате фактически пройденное расстояние может отличаться от значения, полученного при автоматизированном вычислении. Кроме того, погрешности в расчетах могут быть связаны с запаздыванием ледовых карт (данных о возрасте льда и его сплоченности) по отношению к АИС-сигналам. Дальнейшая работа по устранению погрешностей может быть связана с разработкой компенсационных методик для интерполяции пропущенных данных при снижении частоты АИС-сигналов в арктических широтах и созданием синхронизированной системы обновления ледовой информации с минимизацией временного лага относительно поступающих АИС-данных.

Таблица 3. Расход топлива и выбросы парниковых газов танкерами согласно методологии и по данным бункеровки

Table 3. Fuel consumption and greenhouse gas emissions of tankers according to methodology and bunkering data

Показатель	«Штурман Щербинин»		«Штурман Овцын»		«Штурман Альбанов»	
	По методике	По данным бункеровки	По методике	По данным бункеровки	По методике	По данным бункеровки
Расход топлива, т	16 651,0	17 423,8	11 017,5	95 86,5	10 903,7	9 640,3
Выбросы CO ₂ , т	51 851,2	54 257,7	34 308,5	29 852,4	33 954,1	30 019,9
Выбросы CH ₄ , т	0,83	0,87	0,55	0,48	0,55	0,48
Выбросы NO _x , т	2,99	3,14	1,98	1,73	1,96	1,74
Отклонение, %	-4,4		+14,9		+13,1	

Выводы

Созданная методология оценки выбросов парниковых газов при движении судов во льдах представляет собой комплексный подход, обеспечивающий высокую точность при определении эмиссионной нагрузки с учетом специфики судоходства в арктических акваториях и динамических характеристик ледовой обстановки. Это отличает новую методологию от нынешних методов оценки выбросов, ориентированных на открытую воду. Разработка новой методологии — важный шаг к более точной оценке экологического воздействия судоходства в арктической акватории.

Ключевым элементом методологии является алгоритм совмещения АИС-данных и ледовых карт, позволяющий связать информацию о местоположении судна с характеристиками льда на соответствующем участке маршрута. Это обеспечивает возможность анализа воздействия ледовых условий на расход топлива и, как следствие, на объемы выбросов.

Применение разработанного алгоритма для определения эмиссии парниковых газов в отношении судоходной деятельности танкеров проекта «Новый порт» за 2024 г. демонстрирует практическую применимость методологии. Это значит, что разработанный подход может быть использован для оценки экологического воздействия шельфовых проектов на арктическую акваторию.

Важным шагом к подтверждению надежности и достаточно высокой точности разработанной методологии является ее верификация путем сопоставления годовых объемов парниковых газов, вычисленных по фактически затраченному топливу (данные бункеровки) с объемами выбросов, полученными в результате вычислений. Более высокая степень соответствия результатов может быть достигнута за счет повышения качества АИС-данных в высоких широтах и оперативного совмещения карт ледовой обстановки.

Разработанная методология обеспечивает адекватную оценку выбросов парниковых газов и может быть использована для разработки экологически обоснованных стратегий развития устойчивого судоходства в Арктике и для оценки эффективности мер по снижению выбросов парниковых газов.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-27-20102.

Литература/References

1. Chen J., Kang S., Du W., Guo J., Xu M., Zhang Y., Zhong X., Zhang W., Chen J. Perspectives on future sea ice and navigability in the Arctic. *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, iss. 12, pp. 5473—5482. DOI: 10.5194/tc-15-5473-2021.
2. Belter H. J., Krumpfen T., von Albedyll L., Alekseeva T. A. et al. C. Interannual variability in Transpolar Drift summer sea ice thickness and potential impact

- of Atlantification. *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, iss. 6, pp. 2575—2591. DOI: 10.5194/tc-15-2575-2021.
3. Xing-he Liu, Long Ma, Jia-yue Wang, Ye Wang, Li-na Wang. Navigable windows of the Northwest Passage. *Polar Science*, 2017, vol. 13, pp. 91—99. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2017.02.001>.
4. Май Р. И., Гузенко Р. Б., Таровик О. В. и др. Стохастическое моделирование полей сплоченности ледяного покрова для оценки условий плавания по трассе Северного морского пути // *Лед и Снег*. — 2022. — Т. 62. — № 1. — С. 125—140. — DOI: 10.31857/S2076673422010121.
5. May R. I., Guzenko R. B., Tarovik O. V., Topazh A. G., Yulin A. V. Stochastic modeling of ice cover cohesion fields for assessing navigation conditions along the Northern Sea Route. *Ice and Snow*, 2022, vol. 62, no. 1, pp. 125—140. DOI: 10.31857/S2076673422010121. (In Russian).
6. Цедрик С. В., Май Р. И. Изменение ледовитости морей Российской Арктики в XXI веке по результатам климатических моделей проекта CMIP6 // *Лед и Снег*. — 2025. — Т. 65, № 3. — С. 476—486.
7. Tsedrik S. V., May R. I. Changes in the arctic seas of the Russian Arctic in the 21st century based on the results of climate models of the CMIP6 project. *Ice and Snow*, 2025, vol. 65, no. 3, pp. 476—486. (In Russian).
8. Brigham L. The IMO Polar Code: Safety and Environmental Protection for Polar Waters. *Proceedings*, 2024, vol. 150, № 1.
9. Li Y., Zhang Y., Cheng J., Zheng C., Li M., Xu H., Wang R., Chen D., Wang X., Fu X. et al. Comparative Analysis, Use Recommendations, and Application Cases of Methods for Develop Ship Emission Inventories. *Atmosphere*, 2022, 13, p. 1224. DOI: 10.3390/atmos13081224.
10. Moreno-Gutiérrez J., Pájaro-Velázquez E., Amado-Sánchez Yo., Rodríguez-Moreno R., Calderay-Cayetano F., Durán-Grados V. Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 650, pp. 575—584.
11. Nunes R. A. O., Alvim-Ferraz M. C., Martins F. G., Sousa S. I. V. The activity-based methodology to assess ship emissions — a review. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 231, pt. 1, pp. 87—103. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.099.
12. Deniz C., Kilic A., Civkaroglu G. Estimation of shipping emissions in Candarli Gulf, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010., vol. 171, pp. 219—228. DOI: 10.1007/s10661-009-1273-2.
13. Jalkanen J. P., Brink A., Kalli J., Pettersson H., Kukkonen J., Stipa T. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, vol. 9 (23), pp. 9209—9223. DOI: 10.5194/acp-9-9209-2009.
14. Coello J., Williams I., Hudson D. A., Kemp S. An AIS-based approach to calculate atmospheric emissions from the UK fishing fleet. *Atmospheric Envi-*

- ronment, 2015, vol. 114, pp. 1—7. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.05.011.
13. *Moreno-Gutiérrez J., Durán-Grados V.* Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: towards zero uncertainties. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 750, p. 141471. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141471.
14. *Васильева Ж. В., Дзапаров С. А., Васёха М. В.* Методология оценки выбросов парниковых газов от судоходства в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 596—604. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-596-604.
- Vasileva Zh. V., Dzaparov S. A., Vasekha M. V.* Methodology for estimating greenhouse gas emissions from shipping in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 596—604. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-596-604. (In Russian).
15. *Березин А. О., Толмачев С. А., Шурпяк В. К.* Сравнительный анализ документов стратегического планирования ИМО и Российской Федерации в области сокращения выбросов парниковых газов // Науч.-техн. сб. Рос. морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 23—34. — EDN WZWOPO.
- Berezin A. O., Tolmachev S. A., Shurpyak V. K.* Comparative analysis of IMO and Russian Federation strategic planning documents in the field of greenhouse gas emissions reduction. *Scientific and Technical Collection of the Russian Maritime Register of Shipping*, 2025, no. 78, pp. 23—34. EDN WZWOPO. (In Russian).
16. *Реуцкий А. С., Якимов В. В., Буцанец А. А.* Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги // Науч.-техн. сб. Рос. морского регистра судоходства. — 2024. — № 1 (76). — С. 87—95.
- Reutsky A. S., Yakimov V. V., Butsanets A. A.* Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of a transport service. *Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping*, 2024, no. 1 (76), pp. 87—95. (In Russian).
17. *Каштелян В. И., Поздняк И. И., Рывлин А. Я.* Сопротивление льда движению судна. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с.
- Kashtelyan V. I., Pozdnyak I. I., Ryvlin A. Ya.* Ice resistance to ship movement. Leningrad, Sudostroenie, 1968, 238 p. (In Russian).
18. *Ионов Б. П., Грамузов Е. М.* Ледовая ходкость судов. — СПб.: Судостроение, 2001. — 512 с.
- Ionov B. P., Gramuzov E. M.* Ice seaworthiness of ships. St. Petersburg, Sudostroenie, 2001, 512 p. (In Russian).
19. *Edwards R. Y. et al.* Full Scale and Model Tests of a Great Lakes Icebreaker. *The society of Naval Architects and Marine Engineers*, 1972, vol. 80, pp. 1—31.
20. *Lindqvist G.* A straightforward method for calculation of ice resistance of ships. *Proceedings of POAC1989*, 1989, pp. 722—735.
21. *Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T.* Performance of merchant vessels in ice in the Baltic. *Research Report no. 52.* Helsinki Univ. of Technology. Espoo, 1997.
22. *Цой Л. Г.* К вопросу о критерии ледовой ходкости судов // Морской флот. — 2019. — № 2. — С. 24—28.
- Tsoi L. G.* On the issue of the criteria for the ice seaworthiness of ships. *Marine Fleet*, 2019, no. 2, pp. 24—28. (In Russian).
23. *Зуев В. А.* Средства продления навигации на внутренних водных путях. — Л.: Судостроение, 1986. — 207 с.
- Zuev V. A.* Means of prolonging navigation on inland waterways. Leningrad, Sudostroenie, 1986, 207 p. (In Russian).
24. *Грамузов Е. М., Калинина Н. В., Куркин А. А.* Теоретическая модель сопротивления разрушения льда при движении ледокола в ровном сплошном ледяном поле // Экол. системы и приборы. — 2022. — № 10. — С. 25—35.
- Gramuzov E. M., Kalinina N. V., Kurkin A. A.* Theoretical model of ice fracture resistance during icebreaker movement in a flat continuous ice field. *Ecological systems and devices*, 2022, no. 10, pp. 25—35. (In Russian).
25. *Родионов Н. Ю.* Анализ существующих методик расчета сопротивления движению судна в ровном льду // Науч.-техн. сб. Рос. морского регистра судоходства. — 2024. — № 1 (76). — С. 22—37.
- Rodionov N. Yu.* Analysis of existing methods for calculating the resistance to ship movement in flat ice. *Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping*, 2024, no. 1 (76), pp. 22—37. (In Russian).
26. *Зиневич А. Н., Китаев М. В.* Сравнительный анализ методов расчета ледовой ходкости ледоколов // Вестн. Инженер. школы Дальневост. федер. ун-та. — 2017. — № 2 (31). — С. 21—29.
- Zinevich A. N., Kitaev M. V.* Comparative analysis of methods for calculating icebreaker ice strength. *Bull. of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*, 2017, № 2 (31), pp. 21—29. (In Russian).
27. *Платонов В. В., Тряскин В. Н.* Архитектурно-конструктивные особенности арктических судов двойного действия // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 84—96. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-84-96.
- Platonov V. V., Tryaskin V. N.* Architectural and structural features of Arctic double-acting vessels. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 3 (35), pp. 84—96. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-84-96. (In Russian).
28. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей европейской части России. — М.: ИГ-СОЦИН, 2014. — 605 с.
- Dumanskaya I. O.* Ice conditions of the seas of the European part of Russia. Moscow, IG-SOCIN, 2014, 605 p.
29. *Алексеева Т. А., Фролов С. В., Федяков В. Е. и др.* Анализ ледовых условий круглогодичного плавания судов ледового класса Arc7 в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики.

- тики. — 2021. — Т. 67. — № 3. — С. 236—248. — DOI: 10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248.
- Alekseeva T. A., Frolov S. V., Fedyakov V. E., Makarov E. I., Mironov E. U., Sokolova Yu. V. Analysis of ice conditions for year-round navigation of Arc7 ice class vessels in the southwestern part of the Kara Sea. Problems of the Arctic and Antarctic, 2021, vol. 67, no. 3, pp. 236—248. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248>. (In Russian).
30. JCOMM Technical Report No. 23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data. — 2014.
31. Афанасьева Е. В., Алексеева Т. А., Соколова Ю. В. и др. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Рос. Арктика. — 2019. — № 7. — С. 5—20. — DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
- Afanasyeva E. V., Alekseeva T. A., Sokolova Yu. V., Demchev D. M., Chufarova M. S., Bychenkov Yu. D., Devyataev O. S. Methods of drawing up ice maps of the AARI. Russian Arctic, 2019, no. 7, pp. 5—20. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071. (In Russian).
32. Анисимов А. Н. К вопросу о мореходных качествах судна при ледовом плавании // Вестн. МГТУ: Тр. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 16, № 1. — С. 17—22. — EDN RHMBLV.
- Anisimov A. N. On the issue of the seaworthiness of a vessel during ice navigation. Bull. of the Murmansk State Technical University. Proceedings of the Murmansk State Technical University, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 17—22. EDN RHMBLV. (In Russian).
33. Каштелян В. И., Поздняк И. И., Рывлин А. Я. Сопротивление льда движению судна. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с.
- Kashtelyan V. I., Pozdnyak I. I., Ryvlin A. Ya. Ice resistance to ship movement. Leningrad, Sudostroenie, 1968, 238 p. (In Russian).
34. Калинина Н. В., Блинов К. Д. Настройка полуэмпирических моделей сопротивления сплошного льда движению судов // Транспорт. системы. — 2024. — № 1 (31). — С. 25—32.
- Kalinina N. V., Blinov K. D. Setting up semi-empirical models of solid ice resistance to ship movement. Transport Systems, 2024, no. 1 (31), pp. 25—32. (In Russian).
35. Шуньин Ли, Чэн Пэн, Пяткин В. А. Экспериментальные исследования и анализ характеристик предела прочности морского льда на изгиб вдоль побережья Бохайского залива. Сравнение с пределом прочности морского льда на изгиб морей русской Арктики // Евраз. союз ученых. — 2018. — № 4-1 (49).
- Shunying Li, Cheng Peng, Pyatkin V. A. Experimental studies and analysis of the characteristics of sea ice bending strength along the coast of the Bohai Bay. Comparison with the ultimate strength of sea ice for bending the seas of the Russian Arctic. Eurasian Union of Scientists, 2018, no. 4-1 (49). (In Russian).
36. Правила разработки и проведения морских операций Российского морского регистра судоходства (НД № 2-090601-010). Действуют с 1 октября 2022 г.
- The Rules for the development and Conduct of Maritime operations of the Russian Maritime Register of Shipping (ND No. 2-090601-010). Effective from October 1, 2022. (In Russian).
37. Справочник по теории корабля: В 3 т. / Под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. — 764 с.
- Handbook of the theory of the ship. In 3 vol. Edited by Ya. I. Voitkunsky. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. Vol. 1. Hydromechanics. Resistance to ship traffic. Ship propellers, 764 p.

Информация об авторах

Васёха Михаил Викторович, доктор технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Логистика в Арктике», Мурманский арктический университет (183010, Россия, Мурманск, Спортивная ул., д. 13); заведующий научно-исследовательской лабораторией арктической логистики, Кольский научный центр РАН (184209, Россия, Мурманская область, Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14), e-mail: vasyoha@mail.ru.

Васильева Жанна Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая научно-исследовательской лабораторией «Экоинжиниринг и мониторинг загрязнений Арктической зоны РФ», Мурманский арктический университет (183010, Россия, Мурманск, Спортивная ул., д. 13), e-mail: kuchugura@mail.ru.

Белухин Александр Игоревич, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Логистика в Арктике», Мурманский арктический университет (183010, Россия, Мурманск, Спортивная ул., д. 13), e-mail: belukhin.aleksandr@mail.ru.

Алексеева Татьяна Алексеевна, кандидат географических наук, заведующая лабораторией изучения ледового плавания, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38); научный сотрудник, Институт космических исследований РАН (117997, Россия, Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32), e-mail: taa@aari.ru.

Май Руслан Игоревич, кандидат географических наук, доцент кафедры океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9); старший научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: rimay@mail.ru.

METHODOLOGY FOR ESTIMATING GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM SHIPS MOVING IN ICE

Vasekha, M. V.^{1,2}, Vasileva, Zh. V.¹, Belukhin, A. I.¹, Alekseeva, T. A.^{3,4}, May, R. I.^{3,5}

¹ Murmansk Arctic University (Murmansk, Russian Federation)

² Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Apatity, Russian Federation)

³ Arctic and Antarctic Research Institute (Saint Petersburg, Russian Federation)

⁴ Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

⁵ Saint Petersburg State University (Saint Petersburg, Russian Federation)

The article was received on July 15, 2025

For citing

Vasekha M. V., Vasileva Zh. V., Belukhin A. I., Alekseeva T. A., May R. I. Methodology for estimating greenhouse gas emissions from ships moving in ice. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 4, pp. 151—162. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-151-162. (In Russian).

Abstract

The article presents a methodology for estimating greenhouse gas emissions by vessels navigating in the Arctic waters, both in open water and in the ice cover. The methodology is based on the combination of AIS data and ice charts with subsequent quantitative assessment of ice cover resistance to vessel movement. The proposed methodological tools ensure high accuracy in determining the emission load, including the specifics of navigation in Arctic waters, taking into account the dynamic characteristics of the ice situation. To verify the methodology, the annual greenhouse gas volumes for the vessels of the “Novy Port” project for 2024 calculated using the developed methodology have been compared with the emission volumes calculated based on the actually consumed bunker fuel.

Keywords: *Arctic shipping, ice navigation vessels, greenhouse gases, Northern Sea Route, AIS data, ice charts.*

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 25-27-20102.

Information about the authors

Vasekha, Mikhail Viktorovich, Doctor of Engineering, Head of the Research Laboratory “Logistics in the Arctic” of Murmansk Arctic University (13, Murmansk, Sportivnaya St., Russia, 183010); Head of the Research Laboratory of Arctic Logistics at the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (14, Fersman St., Apatity, Murmansk region, 184209), e-mail: vasyoha@mail.ru.

Vasileva, Zhanna Vyacheslavovna, PhD of Engineering, Associate Professor, Head of the Research Laboratory “Ecoengineering and Pollution Monitoring of the Arctic Zone of the Russian Federation” of the Murmansk Arctic University (13, Murmansk, Sportivnaya St., Russia, 183010), e-mail: kuchugura@mail.ru.

Belukhin, Alexander Igorevich, Junior Researcher at the Research Institute of Logistics in the Arctic, Murmansk Arctic University (13, Murmansk, Sportivnaya St., Russia, 183010), e-mail: belukhin.aleksandr@mail.ru.

Alekseeva, Tatiana Alekseevna, PhD of Geography, Head of laboratory for the Study of ice Navigation, Federal State Budgetary Institution “Arctic and Antarctic Research Institute” 38 Bering St., St. Petersburg, Russia, 199397); Researcher, Space Research Institute RAS (84/32, Profsoyusnaya St., Moscow, GSP-7, Russia, 117997), e-mail: taa@aari.ru.

May, Ruslan Igorevich, PhD of Geography, Associate Professor of the Department of Oceanology, Saint Petersburg State University (7-9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, Russia, 199034); Senior Researcher at the Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering St., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: rimay@mail.ru.

© Vasekha M. V., Vasileva Zh. V., Belukhin A. I., Alekseeva T. A., May R. I., 2025