



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра прикладной океанографии  
и комплексного управления прибрежными зонами**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(магистерская диссертация)**

На тему: «Транзитное судоходство по СМП: оценка и динамика»

Исполнитель Януш Николай Александрович  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Гордеева Светлана Михайловна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
И.о. заведующего кафедрой

  
(подпись)

кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«26» 02 2026 г.

Санкт-Петербург  
2026

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Теоретические и информационные основы исследования	6
1.1 Северный морской путь – транзитный коридор Арктики	6
1.2 Экономическое значение Северного морского пути и его роль в развитии Арктики	8
1.3 Инфраструктурные ограничения и особенности функционирования Северного морского пути	10
1.4 Природные условия судоходства в акватории Северного морского пути	14
2. Данные и методы исследования транзитных рейсов по СМП	18
2.1 Автоматическая идентификационная система AIS	18
2.2 Пространственное задание акватории Северного морского пути	25
2.3 Формирование выборки транзитных рейсов по Северному морскому пути	25
2.4 Ледовая информация	30
3 Разработка и применение алгоритма обработки АИС-данных судов для выявления проходов по СМП	32
3.1 Цель и постановка задачи	32
3.2. Инструменты и программная среда	33
3.3. Исходные данные и структура входного файла	33
3.4. Формирование пространственной границы СМП	34
3.5. Общая схема алгоритма обработки	34
3.6 Реализация пространственной проверки «точка в полигоне»	35
3.7. Расчёт количественных показателей прохода	35
3.8. Агрегация данных и контроль качества	37
3.9. Формирование выходных данных	37
3.10. Пример использования алгоритма	37
4. Динамика транзитных рейсов по Северному морскому пути	39
4.1. Сезонная динамика транзитного судоходства	39
4.2. Пространственная структура транзитных маршрутов	46
5. Влияние ледовых условий на параметры транзитных рейсов	53
5.1 Анализ сезонной динамики ледовитости	53
5.2. Анализ распределения ледовых классов транзитных судов по секторам Северного морского пути.	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	71

## ВВЕДЕНИЕ

Северный морской путь (СМП) является ключевой транспортной артерией Арктической зоны Российской Федерации и представляет собой кратчайший морской маршрут между Европой и Азиатско-Тихоокеанским регионом. В условиях трансформации мировой логистики, роста межконтинентальных перевозок и изменения геоэкономической конфигурации международной торговли СМП приобретает особое значение как перспективный транзитный коридор, способный обеспечить альтернативные направления морских перевозок [2].

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к использованию Северного морского пути, что обусловлено рядом факторов. К числу ключевых из них относятся сокращение протяжённости маршрута по сравнению с традиционными направлениями через Суэцкий канал, развитие атомного ледокольного флота, модернизация портовой инфраструктуры, а также реализация масштабных инвестиционных проектов в Арктической зоне Российской Федерации. Существенное влияние на навигационные условия оказывает изменение климата, выражающееся в сокращении площади и толщины ледяного покрова в арктических морях, что, с одной стороны, расширяет навигационные возможности, а с другой — формирует новые риски, связанные с высокой пространственно-временной изменчивостью ледовой обстановки [1; 2].

Транзитное судоходство по Северному морскому пути характеризуется высокой степенью неопределённости и сопряжено с рядом сложных факторов. К ним относятся сложные ледовые условия, ограниченность портовой и навигационной инфраструктуры, необходимость использования судов ледового класса и ледокольного сопровождения, а также повышенные требования к обеспечению безопасности мореплавания. В отличие от традиционных морских маршрутов, трасса СМП не является фиксированной линией, а фактические маршруты движения судов формируются динамически в зависимости от ледовой, гидрометеорологической и навигационной обстановки [2; 4].

В этой связи особую актуальность приобретает анализ фактических маршрутов движения судов, позволяющий перейти от обобщённых статистических оценок к детальному исследованию пространственно-временных характеристик транзитного судоходства. Такой подход даёт возможность объективно оценить интенсивность транзитных рейсов, выявить их сезонную и межгодовую динамику, а также определить особенности пространственной структуры маршрутов в пределах акватории Северного морского пути.

Современные автоматизированные системы наблюдения, прежде всего автоматическая идентификационная система (AIS), предоставляют уникальные массивы данных о движении судов. AIS-данные позволяют с высокой точностью восстанавливать траектории движения судов, анализировать параметры их движения и сопоставлять их с внешними факторами, включая ледовую обстановку. Использование данных автоматической идентификационной системы открывает новые возможности для исследования судоходства в Арктике, где традиционные методы наблюдения и статистического учёта имеют существенные ограничения.

Несмотря на наличие значительного количества исследований, посвящённых экономическим, правовым и климатическим аспектам развития Северного морского пути, вопросы анализа фактических транзитных маршрутов на основе данных AIS остаются недостаточно проработанными. В большинстве работ [4; 5] используются агрегированные показатели грузооборота и обобщённые оценки транзитного потенциала, что не позволяет в полной мере учитывать пространственную неоднородность судоходства и влияние ледовых условий на параметры движения судов.

В связи с этим особую научную и практическую значимость приобретает разработка и применение методов автоматизированной обработки AIS-данных для выявления транзитных проходов по Северному морскому пути и анализа их динамики. Такой подход позволяет сформировать объективную информационную основу для оценки текущего состояния транзитного судоходства, а также для обоснования перспектив его дальнейшего развития.

Целью данной выпускной квалификационной работы является оценка и анализ динамики транзитных рейсов по Северному морскому пути на основе данных автоматической идентификационной системы.

Для достижения поставленной цели в работе предусматривается решение следующих задач:

- анализ теоретических и информационных основ транзитного судоходства по Северному морскому пути;
- формирование и предварительная обработка массива данных АИС транзитных рейсов;
- исследование сезонной и межгодовой динамики транзитных перевозок;
- анализ пространственной структуры транзитных маршрутов судов;
- оценка влияния ледовых условий на параметры движения судов в пределах акватории Северного морского пути.

Объектом исследования является транзитное судоходство по Северному морскому пути.

Предметом исследования являются пространственно-временные характеристики транзитных маршрутов судов и их изменчивость под воздействием ледовых условий.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при планировании транзитных перевозок, оценке навигационных рисков и совершенствовании логистических решений в Арктическом регионе, а также при выполнении научных исследований, связанных с анализом судоходства в высоких широтах.

## 1 Теоретические и информационные основы исследования

### 1.1 Северный морской путь – транзитный коридор Арктики

Северный морской путь (СМП) представляет собой исторически сложившуюся систему морских маршрутов, проходящих вдоль северного побережья Российской Федерации и соединяющих европейскую часть страны с Дальним Востоком. В соответствии с действующим законодательством Российской Федерации, трасса СМП простирается от Карских Ворот до пролива Беринга и охватывает акватории Баренцева, Карского, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей [1; 2] (рисунок 1.1).

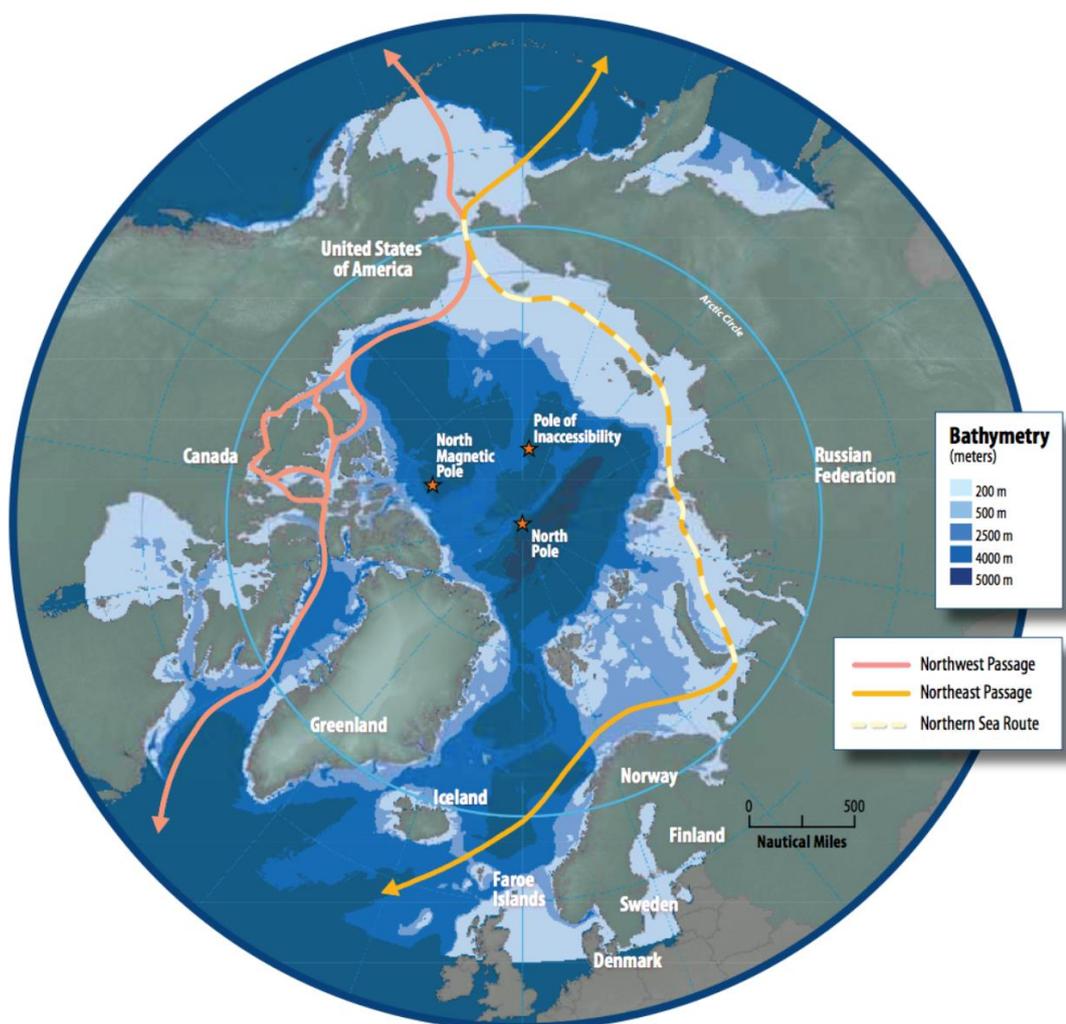


Рисунок 1.1– Схема Северного морского пути и основных судоходных районов Арктики. *Источник: Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report / Arctic Council. — 2009.*

В современных условиях СМП рассматривается не только как национальная транспортная магистраль, обеспечивающая снабжение северных территорий и вывоз природных ресурсов, но и как перспективный международный транзитный коридор. Использование СМП позволяет существенно сократить протяжённость морского пути между портами Европы и Восточной Азии по сравнению с традиционным маршрутом через Суэцкий канал. В среднем сокращение расстояния составляет 30–40 %, что приводит к снижению времени доставки грузов, расхода топлива и выбросов парниковых газов [7, 14].

Рост интереса к транзитному использованию СМП обусловлен совокупностью факторов. К ним относятся изменения климатических условий, выражающиеся в уменьшении площади и продолжительности ледового покрова, развитие ледокольного и арктического флота, внедрение современных навигационных технологий, а также геополитические и экономические изменения в мировой торговле. Вместе с тем, несмотря на очевидные преимущества, транзитное судоходство по СМП остаётся сложным с точки зрения навигации и логистики [17–19].

Основными ограничивающими факторами транзитных перевозок являются высокая сезонная и межгодовая изменчивость ледовых условий, необходимость ледокольного сопровождения в отдельные периоды, ограниченная портовая инфраструктура, а также повышенные требования к безопасности мореплавания. В отличие от традиционных судоходных маршрутов, трасса СМП не является фиксированной линией: фактические маршруты судов формируются динамически в зависимости от ледовой, гидрометеорологической и навигационной обстановки [17–19].

Таким образом, для объективной оценки возможностей транзитного судоходства по Северному морскому пути требуется анализ фактических маршрутов судов, их пространственной структуры и динамики во времени, а также условий, в которых осуществляется навигация.

## 1.2 Экономическое значение Северного морского пути и его роль в развитии Арктики

Северный морской путь в современных условиях рассматривается не только как транспортная артерия, но и как ключевой элемент экономического освоения Арктической зоны Российской Федерации. Его развитие тесно связано с реализацией крупных инвестиционных проектов в сфере добычи и экспорта углеводородов, минерального сырья и продукции горно-металлургического комплекса [4].

Экономическая значимость Северного морского пути определяется, прежде всего, его ролью в обеспечении вывоза продукции арктических проектов на внешние рынки. В последние годы основными драйверами роста грузооборота СМП стали проекты «Ямал СПГ», «Арктик СПГ-2», освоение Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения, а также развитие угольных и металлургических проектов в Арктике []. Реализация данных проектов невозможна без функционирования устойчивого морского транспортного коридора, способного обеспечивать регулярные перевозки в сложных ледовых условиях.

По данным исследований, грузооборот Северного морского пути в период с начала 2010-х годов демонстрирует устойчивую положительную динамику (рисунок 1.2). Если в 2010 г. объём перевозок составлял менее 5 млн т, то к началу 2020-х годов он превысил 30 млн т в год, что свидетельствует о фактическом перезапуске маршрута на основе принципов государственно-частного партнёрства.

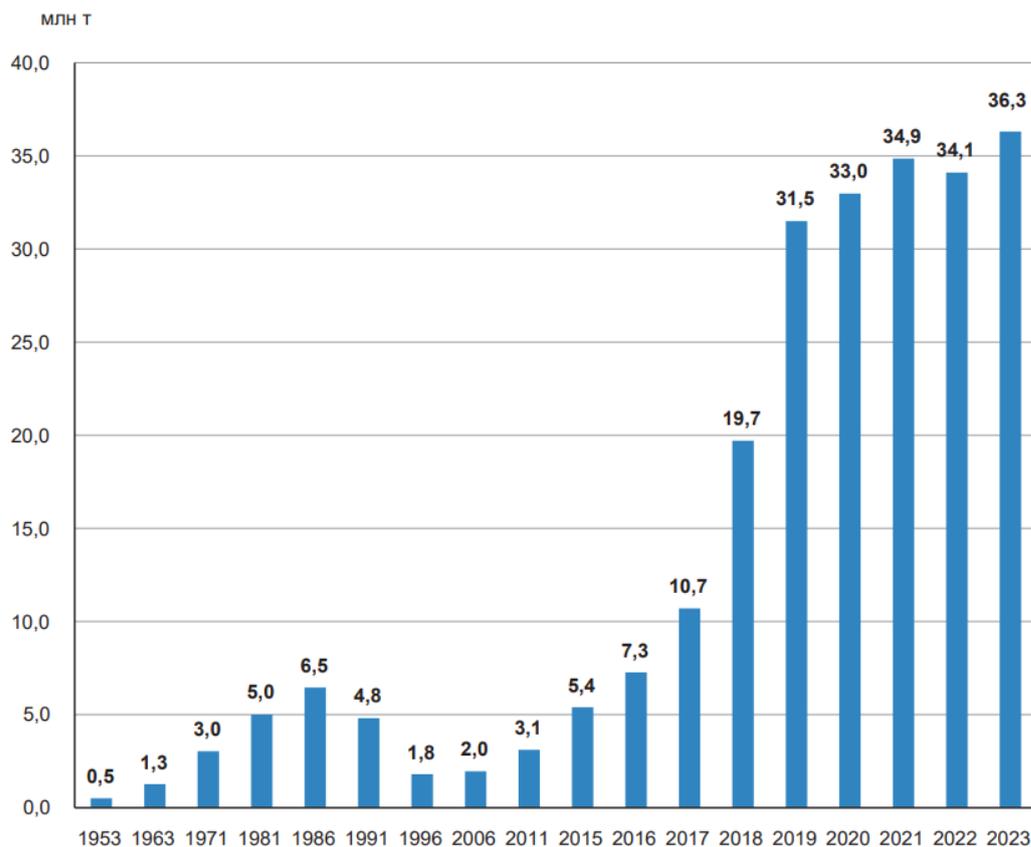


Рисунок 1.2 – Динамика грузооборота Северного морского пути, млн т [4]

Рост грузооборота сопровождался масштабными государственными инвестициями в развитие инфраструктуры СМП. В их число входят строительство и модернизация морских портов (Сабетта, Певек, Бухта Север), развитие ледокольного флота, создание системы управления судоходством и обеспечение навигационной безопасности. Существенную роль играет формирование атомного ледокольного флота, который является уникальным конкурентным преимуществом России и обеспечивает возможность круглогодичной навигации на отдельных участках маршрута.

Экономическая эффективность развития Северного морского пути подтверждается результатами анализа бюджетных инвестиций (таблица 1.1) [4]. На примере проекта «Ямал СПГ» [4] показано, что вложения федерального бюджета в строительство портовой инфраструктуры окупаются в относительно короткие сроки за счёт налоговых поступлений, в первую очередь налога на прибыль и налога на добавленную стоимость. Таким образом, СМП выступает

не только как транспортный коридор, но и как инструмент формирования долгосрочного мультипликативного экономического эффекта.

Таблица 1.1 – Государственные инвестиции в инфраструктуру порта Сабетта

Наименование контракта	Номер и дата контракта	Сроки исполнения	Сумма, млн руб.
Строительство объектов морского порта в районе поселка Сабетта, включая создание судоходного подходного канала в Обской губе	№ 831/ДО-13 от 06.12.2013	12.2018	32 610,8
Строительство объектов морского порта в районе поселка Сабетта на объекте «Корневая часть Юго-Восточного ледозащитного сооружения морского порта Сабетта»	№ 112/ДО-14 от 06.11.2014	03.2016	10 950,4
Строительство объектов морского порта в районе поселка Сабетта на объекте «Северо-Западное ледозащитное сооружение, Юго-Восточное ледозащитное сооружение»	№ 627/ДО-15 от 05.08.2015	03.2018	18 753,4
Банковское сопровождение и организация строительного контроля в отношении государственных контрактов	№ 570/ДО-14 от 06.11.2014	03.2018	213,7
[4] Итого			62 528,3

Кроме прямого экономического эффекта, развитие Северного морского пути способствует формированию новых центров экономической активности в Арктике, развитию судостроения, логистики, энергетики и смежных отраслей. В совокупности это позволяет рассматривать СМП как системообразующий элемент пространственного и социально-экономического развития арктических регионов России.

Вместе с тем, экономический потенциал Северного морского пути во многом ограничивается природно-климатическими условиями, прежде всего ледовой обстановкой. Высокая стоимость ледокольной проводки, сезонность навигации и необходимость использования судов ледового класса существенно влияют на себестоимость перевозок и конкурентоспособность маршрута в сравнении с традиционными южными транспортными коридорами. В этой связи анализ ледовых условий является неотъемлемой частью оценки экономической эффективности функционирования СМП.

### 1.3 Инфраструктурные ограничения и особенности функционирования Северного морского пути

Несмотря на возрастающее экономическое значение Северного морского пути, его функционирование в качестве устойчивого транспортного и транзитного коридора во многом определяется состоянием и уровнем развития транспортной и навигационной инфраструктуры. В отличие от традиционных мировых морских маршрутов, СМП характеризуется высокой неоднородностью инфраструктурного обеспечения как в пространственном, так и во временном отношении [2; 4].

Одной из ключевых особенностей Северного морского пути является ограниченное количество портов, способных обеспечивать полноценное обслуживание судов, включая перевалку грузов, бункеровку, ремонт и аварийно-спасательное обеспечение. Наиболее развитая инфраструктура сосредоточена в западном секторе СМП, прежде всего в районе Мурманска и Карского моря, тогда как восточный сектор характеризуется значительно более низкой плотностью портовой сети и ограниченными возможностями логистического обслуживания судов.

Существенное влияние на функционирование СМП оказывает необходимость использования ледокольного флота. В периоды сложной ледовой обстановки движение судов по маршруту возможно только при ледокольной проводке, что приводит к увеличению времени прохождения трассы и росту транспортных издержек [18]. При этом ледокольное сопровождение носит избирательный характер и зависит от ледовых условий, класса судна, направления движения и загрузки ледокольного флота. Данный фактор существенно ограничивает гибкость маршрутизации и снижает привлекательность СМП для регулярных транзитных перевозок.

Важной инфраструктурной особенностью Северного морского пути является отсутствие развитых транзитных хабов, аналогичных крупным портам южных маршрутов мирового судоходства. Это ограничивает возможности контейнерного транзита и комбинированных логистических схем, снижая конкурентоспособность СМП в сравнении с маршрутами через Суэцкий канал. В ре-

зультате основная часть грузопотоков по СМП носит проектный характер и связана с вывозом сырьевой продукции, а не с обслуживанием глобальных цепочек поставок.

Следует также отметить, что трасса Северного морского пути не является фиксированной линией в пространстве. В условиях изменчивой ледовой обстановки фактические маршруты движения судов формируются динамически и могут существенно отклоняться от рекомендованных или исторически сложившихся трасс. Это предъявляет повышенные требования к качеству навигационного и информационного обеспечения судоходства, а также к оперативному анализу текущей ситуации в акватории.

Расположение и уровень развития портовой инфраструктуры оказывают определяющее влияние на функционирование Северного морского пути. На рисунке 1.3 представлена схема размещения основных портов и инфраструктурных объектов СМП, обеспечивающих перевалку грузов, навигационное сопровождение и обслуживание судов.

Анализ пространственного распределения портовой инфраструктуры показывает её выраженную неравномерность. Наиболее развитые портовые мощности сосредоточены в западной части Северного морского пути, где расположены порты Мурманск и Сабетта, обеспечивающие обслуживание крупных грузопотоков, прежде всего связанных с экспортом углеводородного сырья. Восточный сектор СМП характеризуется значительно меньшей плотностью портовой сети, ограниченными глубинами акваторий и менее развитой логистической инфраструктурой, что снижает его пропускную способность и усложняет организацию транзитных перевозок.

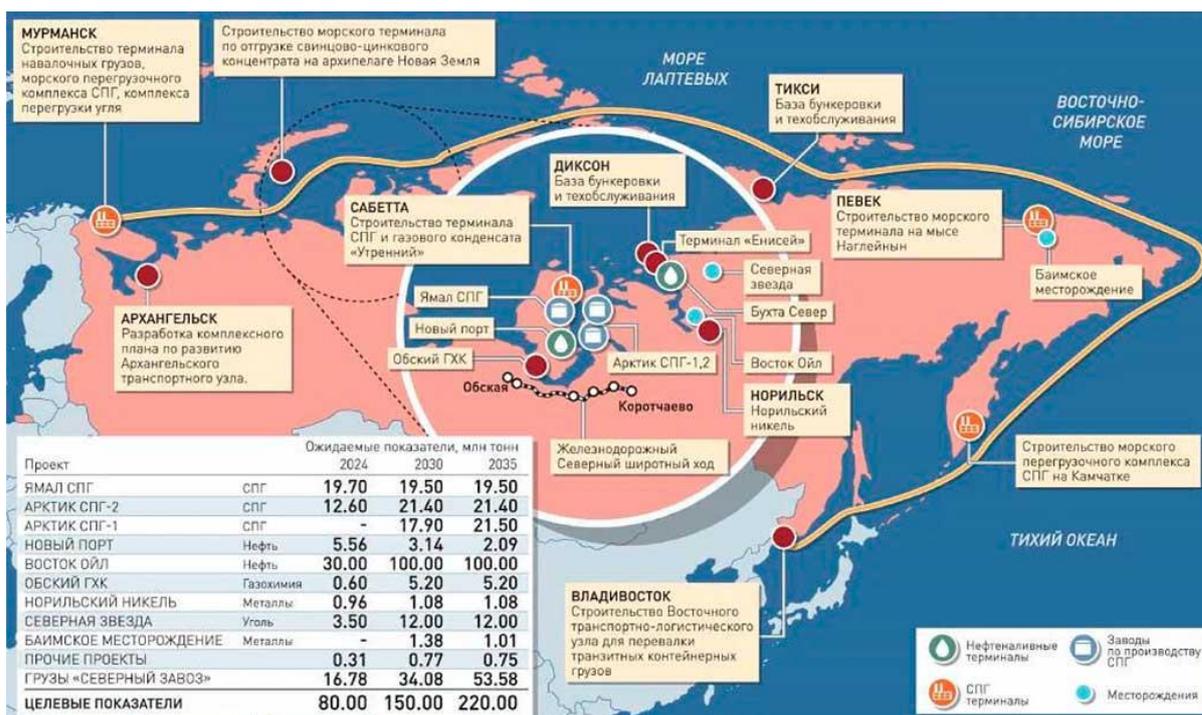


Рисунок 1.3 – Портовая и производственная инфраструктура Северного морского пути

Источник: Российская академия транспорта. Северный морской путь. — URL:

<https://rosacademtrans.ru/smp-2/> (дата обращения: 21.02.2026).

Ограниченность портовой инфраструктуры усиливает зависимость судоходства от ледовой и гидрометеорологической обстановки, а также приводит к росту роли точного планирования маршрутов и времени движения судов. В этих условиях особое значение приобретает анализ фактических траекторий движения судов, позволяющий выявлять реальные коридоры судоходства и оценивать влияние инфраструктурных ограничений на пространственную структуру транзитных маршрутов.

Таким образом, значение СМП определяется сочетанием нескольких факторов: наличием значительных запасов природных ресурсов в Арктической зоне, изменением климатических условий, развитием ледокольного флота и совершенствованием систем навигационного обеспечения. В стратегических и аналитических работах отмечается [], что СМП является ключевым элементом транспортного обеспечения проектов по добыче нефти, газа и твердых полез-

ных ископаемых в Арктике, а также важным маршрутом северного завоза для удалённых регионов.

В аналитическом докладе, посвящённом результатам и перспективам развития СМП [4], подчёркивается, что за последние годы наблюдается устойчивый рост грузопотока, сопровождающийся усложнением структуры судоходства и увеличением числа рейсов в сложных ледовых условиях. Это приводит к возрастанию требований к безопасности судоходства, точности навигации и качеству информационного обеспечения движения судов.

#### **1.4 Природные условия судоходства в акватории Северного морского пути**

Одним из ключевых факторов, определяющих специфику судоходства по СМП, являются природные условия арктических морей. В отличие от традиционных морских маршрутов умеренных широт, навигация в Арктике осуществляется в условиях низких температур, высокой изменчивости погоды и, прежде всего, наличия ледяного покрова.

Ледовитость российских арктических морей характеризуется выраженной сезонной и межгодовой изменчивостью. В зимний и весенний периоды значительные площади акваторий покрыты сплочёнными льдами различного возраста, включая однолетний и многолетний лёд. В летне-осенний период происходит разрушение ледового покрова, однако даже в годы с минимальной ледовитостью сохраняются отдельные зоны сложных навигационных условий [16].

Исследования ледовой обстановки показывают, что распределение льдов вдоль трасс СМП крайне неоднородно [17]. В Баренцевом море ледовые условия, как правило, наиболее благоприятны, тогда как Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море характеризуются более сложной ледовой обстановкой. Особенно значимыми являются переходные зоны между морями, проливы и узкие участки, где ледовая динамика оказывает максимальное влияние на выбор маршрута движения судов.

Следует отметить, что ледовая обстановка оказывает влияние не только на возможность или невозможность прохода судов, но и на их скорость, манёвренность, продолжительность рейсов и необходимость отклонения от оптимальных траекторий. В результате фактические маршруты судов существенно отличаются от условно заданных трасс, особенно в периоды сложных ледовых условий.

Современные исследования ледовой обстановки в акватории Северного морского пути показывают, что в последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция к сокращению общей ледовитости арктических морей, по которым проходит трасса СМП (Рисунки 1.4, 1.5). При этом изменения ледового режима носят неоднородный характер и существенно различаются как по отдельным морям, так и по сезонам навигации. Наиболее выраженное снижение ледовитости отмечается в летне-осенний период, тогда как в зимне-весенние месяцы сохраняются обширные зоны сложных ледовых условий [18; 19].

Анализ многолетних рядов спутниковых наблюдений свидетельствует о том, что наряду с общим сокращением площади ледового покрова возрастает его пространственно-временная изменчивость. Это выражается в частых изменениях конфигурации ледовых полей, формировании зон с неоднородной сплошностью льда и увеличении доли динамических ледовых процессов. В результате даже в годы с относительно благоприятной ледовой обстановкой сохраняются участки повышенной навигационной сложности, оказывающие существенное влияние на выбор маршрутов движения судов [16].

Современные климатические исследования свидетельствуют о существенных изменениях ледового режима Арктики за последние десятилетия. Долговременные спутниковые наблюдения, ведущиеся с конца 1970-х годов, фиксируют устойчивую тенденцию к сокращению площади морского льда, особенно выраженную в летне-осенний период [16; 17]. При этом изменения носят сезонно-дифференцированный характер и сопровождаются увеличением пространственно-временной изменчивости ледового покрова.

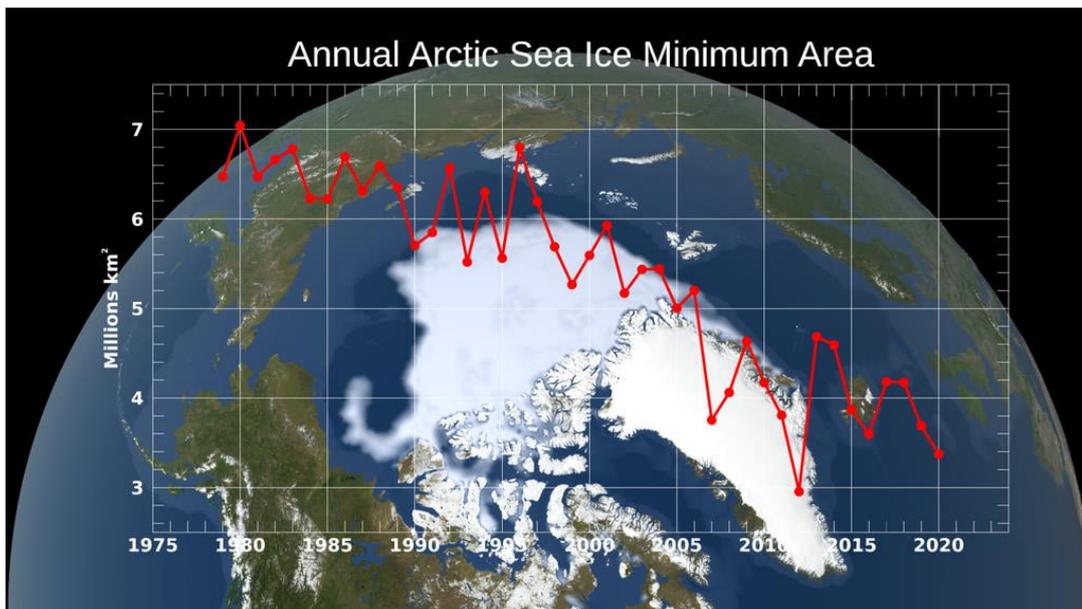


Рисунок 1.4 – Межгодовое изменение площади арктического льда Источник: NASA Earth Observatory. Arctic Sea Ice Minimum.

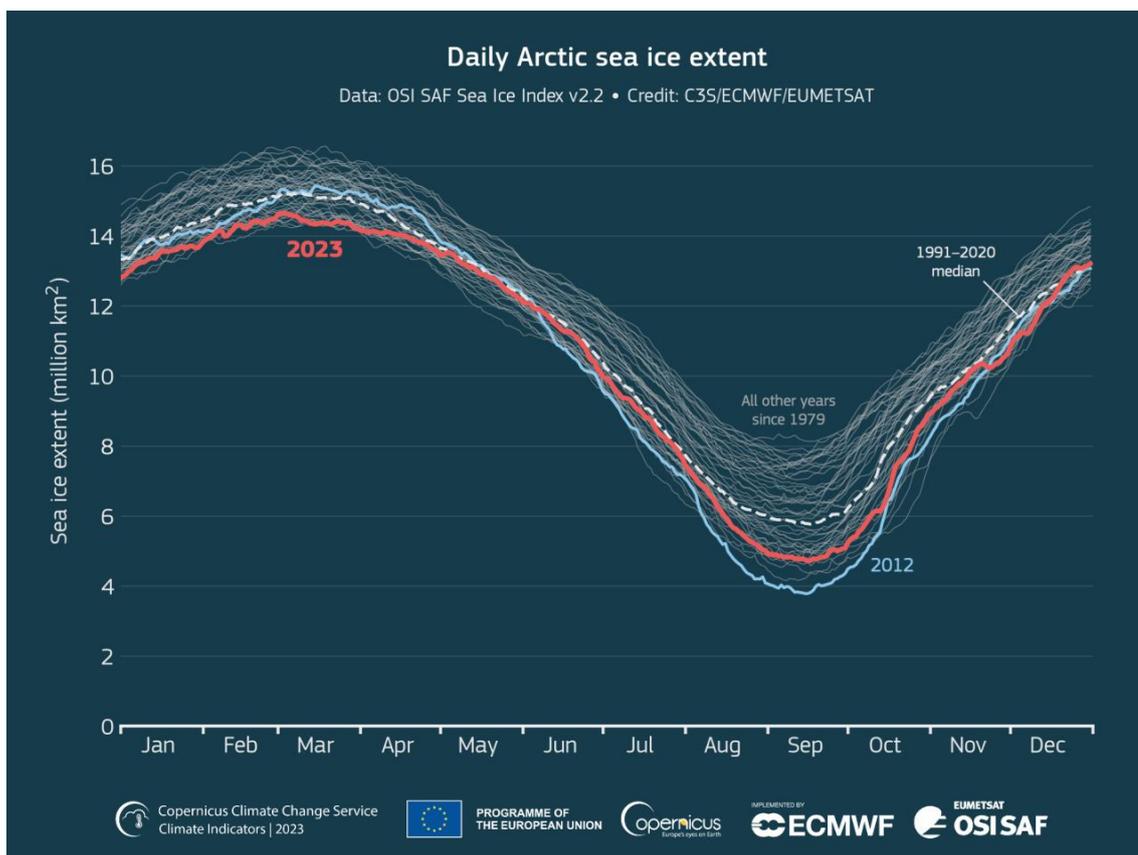


Рисунок 1.5 – Динамика изменения площади морского льда в Арктике по данным спутниковых наблюдений

Источник: Copernicus Climate Change Service (C3S), OSISAF Sea Ice Index v2.2.

Анализ многолетних рядов показывает:

- устойчивое снижение минимальной площади льда в сентябре;

- уменьшение доли многолетнего льда;
- увеличение доли сезонного (однолетнего) льда;
- рост сезонной амплитуды ледовитости.

Снижение площади летнего льда не является линейным процессом — наблюдаются межгодовые колебания, связанные с атмосферной циркуляцией, температурными аномалиями и динамикой океанических течений.

Как показывают исследования [18; 19], наиболее существенное сокращение площади льда наблюдается в сентябре — месяце годового минимума ледовитости. В то же время зимние максимумы ледового покрова демонстрируют значительно меньший тренд изменения.

Особенностью современного климатического периода является формирование так называемых «окон навигации», представляющих собой временные интервалы с пониженной ледовитостью, в течение которых возможно относительно свободное движение судов по отдельным участкам Северного морского пути [16]. Однако данные окна отличаются нестабильностью по времени начала и продолжительности, а также значительной межгодовой вариабельностью. Это обстоятельство существенно усложняет долгосрочное планирование рейсов и повышает роль оперативного мониторинга ледовой обстановки.

Исследования показывают, что изменение ледовых условий оказывает влияние не только на сам факт возможности прохода судов, но и на параметры их движения. В условиях повышенной сплочённости льда наблюдается снижение скорости судов, увеличение продолжительности рейсов и необходимость отклонения от оптимальных маршрутов. В то же время в периоды пониженной ледовитости возможна концентрация судоходства в ограниченных пространственных коридорах, что повышает нагрузку на отдельные участки трассы СМП.

## 2. Данные и методы исследования транзитных рейсов по СМП

### 2.1 Автоматическая идентификационная система AIS

#### 2.1.1 Принцип работы автоматической идентификационной системы

Автоматическая идентификационная система (AIS) является современным техническим средством мониторинга судоходства, предназначенным для повышения безопасности мореплавания и обеспечения информационного обмена между судами и береговыми службами. Система функционирует в диапазоне очень высоких частот (VHF) и основана на автоматической передаче сообщений с использованием временного разделения каналов [8;9]. Пример представления мониторинга судоходства в Северной Атлантике показано на рисунке 2.1

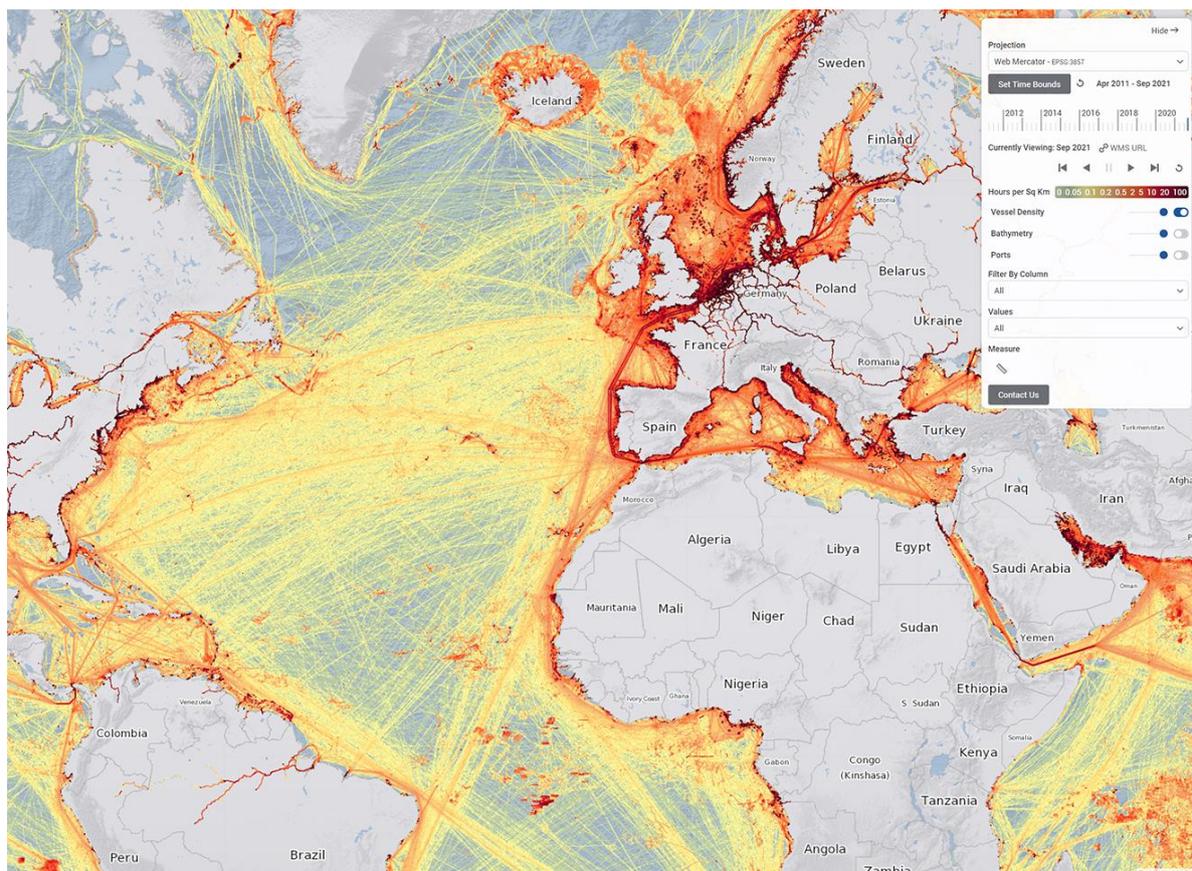


Рисунок 2.1 – Пример визуализации маршрутов судов по данным AIS [29]

Принцип функционирования автоматической идентификационной системы основан на обмене навигационными сообщениями между судами, а также между судами и внешними системами приёма информации. Обобщённая схема взаимодействия элементов AIS представлена на рисунке 2.2.

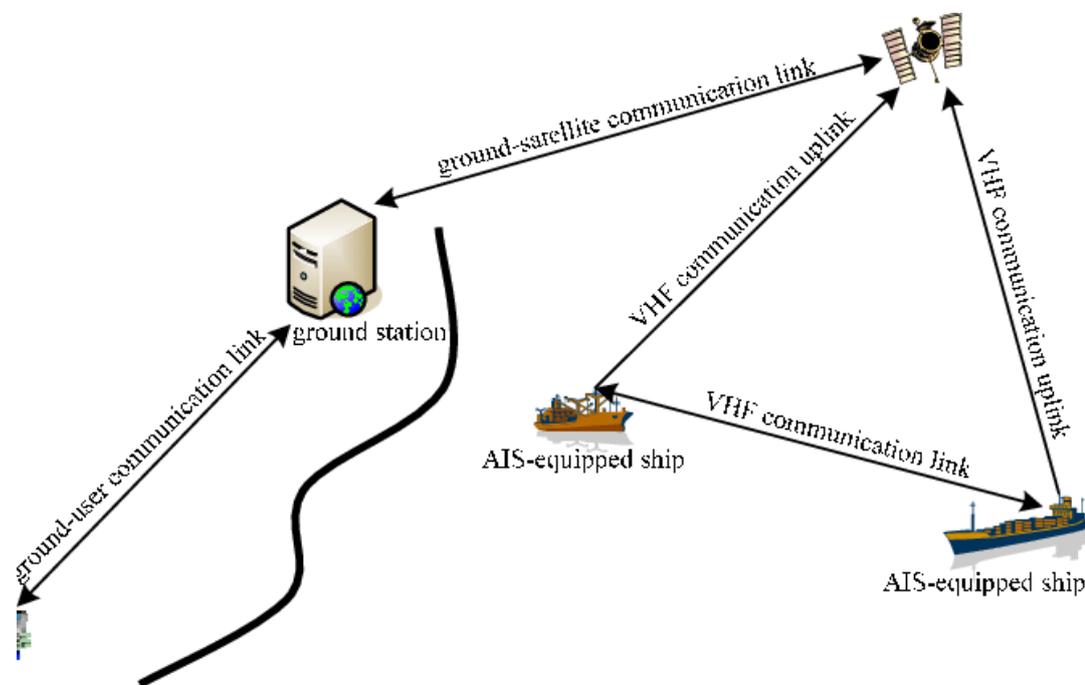


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема обмена данными в системе AIS [13]

Как видно из рисунка 2.2, суда, оснащённые AIS-транспондерами, осуществляют передачу навигационных сообщений в диапазоне VHF. Данные сообщения принимаются как другими судами, находящимися в зоне радиовидимости, так и береговыми станциями автоматической идентификационной системы. В удалённых районах Мирового океана, включая арктические акватории, приём AIS-сообщений осуществляется также спутниковыми системами, что позволяет обеспечивать мониторинг судоходства за пределами зоны действия береговой инфраструктуры.

Оборудование AIS устанавливается на судах и передаёт навигационную информацию с определённой периодичностью, зависящей от скорости движения и маневрирования судна. Кроме того, существуют береговые станции AIS, обеспечивающие приём и обработку данных в прибрежных зонах, а также

спутниковые системы, позволяющие получать информацию о судах в удалённых районах, включая Арктику.

Передаваемая системой AIS информация условно делится на три группы: статическую, динамическую и рейсовую. К статическим данным относятся идентификационные характеристики судна, такие как номер MMSI, тип судна и его габариты. Динамическая информация включает координаты местоположения, курс, скорость и параметры движения судна. Рейсовая информация содержит сведения о пункте назначения, осадке и предполагаемом времени прибытия.

Навигационные сообщения автоматической идентификационной системы формируют массивы структурированных данных, представленных в табличном виде. Каждая запись соответствует отдельной фиксации положения судна и содержит совокупность параметров, характеризующих его текущее состояние и движение. Пример фрагмента таких данных приведён в таблице 2.1

Как видно из таблицы 2.1, типовая запись AIS включает временную метку фиксации положения судна, географические координаты, параметры движения (курс, скорость, направление), а также идентификационные характеристики судна, такие как MMSI, название и тип. Совокупность данных параметров позволяет реконструировать фактическую траекторию движения судна и анализировать его навигационное поведение в различных условиях плавания.

Таблица 2.1 – Пример записи навигационных данных автоматической идентификационной системы (AIS)

DATE TIME (UTC)	MSMI	LATITUDE	LONGITUDE	COURSE	SPEED	HEADING	NAVSTAT	IMO	NAME	CALLSIGN	AISTYPE	A	B	C	D	DRAUGHT	DESTINATION	ETA
2019-05-15 15:08:48	538006485	30.90913	32.3146	358	8.7	0	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 16:04:53	538006485	31.04908	32.3099	358	8.8	359	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 17:04:59	538006485	31.19425	32.33557	33	7	14	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 18:00:01	538006485	31.30858	32.36942	13	10.5	15	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 19:04:56	538006485	31.48815	32.39543	314	10.2	315	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 20:04:54	538006485	31.57088	32.2085	314	10.8	316	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 21:00:00	538006485	31.6867	32.08278	327	10	336	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 22:04:20	538006485	31.80483	31.99743	277	13.2	280	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-15 23:04:37	538006485	31.89155	31.65585	290	13.5	290	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-16 00:04:52	538006485	31.97932	31.40818	284	13.3	284	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SUEZ	05-13 03:00	
2019-05-16 01:04:42	538006485	32.03408	31.15507	278	13.2	284	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 02:04:30	538006485	32.04053	30.89193	269	13.7	271	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 03:04:53	538006485	32.03418	30.6205	270	13.9	271	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 04:04:43	538006485	31.96068	30.3753	234	13.9	234	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 05:04:24	538006485	31.81482	30.17175	228	13.3	228	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 06:03:44	538006485	31.66968	29.98618	224	13.3	224	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 07:29:44	538006485	31.43682	29.71898	225	13	227	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 08:04:25	538006485	31.34897	29.61487	224	13	224	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 09:14:54	538006485	31.18293	29.5702	145	4.5	128	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 10:04:08	538006485	31.13633	29.59368	138	2.9	137	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 11:04:33	538006485	31.15093	29.58278	356	0.8	9	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 12:04:54	538006485	31.12833	29.59643	149	3.7	156	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 13:04:34	538006485	31.09522	29.58153	209	3.8	208	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 14:04:11	538006485	31.08773	29.59117	40	0.6	42	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 18:34:02	538006485	31.09008	29.59358	350	0	37	5	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 20:13:02	538006485	31.0905	29.59332	101	0	40	5	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 22:01:02	538006485	31.09048	29.59363	101	0	32	5	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-16 23:25:31	538006485	31.08965	29.5946	109	0.1	16	5	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-17 01:07:02	538006485	31.08948	29.59653	97	0	352	5	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.16.7	SIDI KERIR	05-16 10:00	
2019-05-17 04:04:54	538006485	31.08727	29.59855	199	1.1	359	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 05:00:30	538006485	31.08962	29.6045	19	1.4	19	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 06:14:45	538006485	31.17893	29.48368	292	11.5	293	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 07:04:35	538006485	31.24452	29.29755	295	12.8	297	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 08:04:35	538006485	31.3334	29.06265	293	13.2	296	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 09:09:32	538006485	31.42257	28.81517	291	13	293	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 10:02:35	538006485	31.50283	28.60038	292	13.3	291	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 11:03:30	538006485	31.5948	28.35168	296	14	297	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 12:03:41	538006485	31.69238	28.11112	291	13.8	290	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	
2019-05-17 13:04:51	538006485	31.77578	27.8546	290	13.4	290	0	9307633	BALTIC SUNRISE	V7NP2	80	278	55	30	30.19.4	ROTTERDAM	05-27 08:00	

Благодаря высокой точности позиционирования и регулярности передачи сообщений AIS обеспечивает детальное пространственно-временное представление движения судов, что делает данную систему ценным источником данных для научных и прикладных исследований [8;9].

### 2.1.2. Использование данных AIS в исследованиях судоходства

Широкое распространение автоматической идентификационной системы привело к формированию принципиально нового класса данных, характеризующих движение судов в мировом океане. В отличие от традиционных источников информации о судоходстве, таких как судовые журналы, отчётные формы или статистические сводки, данные AIS предоставляют непрерывную пространственно-временную информацию о фактическом движении судов, что существенно расширяет возможности анализа морского трафика. [11]

В научных исследованиях данные AIS рассматриваются не только как средство мониторинга отдельных судов, но и как инструмент для выявления

устойчивых закономерностей судоходства. Одним из ключевых направлений использования AIS является анализ навигационных паттернов, под которыми понимаются повторяющиеся пространственно-временные структуры движения судов, отражающие особенности эксплуатации маршрутов, навигационные ограничения и влияние внешних факторов.

Ранние работы, посвящённые анализу навигационных паттернов на основе AIS-данных, показали, что даже при высокой изменчивости отдельных траекторий возможно выделение характерных маршрутов и коридоров судоходства. В частности, в исследовании [13] Aarsæther и Moan (2009) был предложен подход к оценке навигационных паттернов путём статистического анализа совокупности траекторий судов. Авторы показали, что на основе обработки больших массивов AIS-данных можно выявлять медианные маршруты движения, зоны концентрации трафика и области повышенной вариативности траекторий.

Важным выводом данных исследований является то, что фактические маршруты судов, как правило, отличаются от формально заданных или рекомендованных трасс. Это связано с необходимостью оперативной адаптации судоходства к изменяющимся навигационным условиям, включая метеорологическую обстановку, ограничения глубин, интенсивность движения и, в арктических акваториях, ледовые условия [13]

Методы, предложенные в работах по анализу навигационных паттернов, основаны на статистическом обобщении большого количества траекторий движения судов. Такой подход позволяет сгладить влияние отдельных случайных отклонений и выявить устойчивые пространственные структуры судоходства. При этом особое значение имеет возможность оценки не только центральных тенденций маршрутов, но и их пространственного разброса, отражающего степень неопределённости и сложности навигационных условий [11].

В контексте исследования судоходства в арктических регионах данные подходы приобретают особую актуальность. В условиях отсутствия жёстко фиксированных фарватеров и высокой изменчивости ледовой обстановки фак-

тические маршруты судов по Северному морскому пути формируются динамически. Это приводит к значительным различиям в траекториях движения даже для судов, следующих по одному направлению в пределах одного навигационного сезона.

Использование AIS-данных для анализа навигационных паттернов позволяет количественно описывать данную вариативность маршрутов и выявлять зоны повышенной концентрации движения. Такие зоны могут быть связаны как с относительно благоприятными навигационными условиями, так и с инфраструктурными ограничениями, включая расположение портов, пунктов ледокольного сопровождения и участков с повышенными рисками навигации.

Следует отметить, что подходы к анализу AIS-данных, основанные на статистическом обобщении траекторий, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами оценки судоходства. Они обеспечивают объективность анализа, воспроизводимость результатов и возможность масштабирования исследований на большие пространственные и временные интервалы. В то же время данные методы требуют значительных вычислительных ресурсов и тщательной предварительной обработки данных, что обуславливает необходимость разработки специализированных алгоритмов анализа.

Первоначально автоматическая идентификационная система создавалась исключительно как инструмент обеспечения безопасности мореплавания. Однако с развитием информационных технологий и накоплением больших массивов данных AIS её применение значительно расширилось. В настоящее время данные AIS активно используются для анализа морского трафика, оценки интенсивности судоходства, исследования маршрутов движения судов и выявления закономерностей пространственно-временного распределения судов [8;9].

Использование данных AIS позволяет отказаться от обобщённой статистики судоходства и перейти к анализу фактических траекторий движения судов. Это особенно важно для арктических акваторий, где маршруты судов существенно зависят от ледовой обстановки и не совпадают с формально заданными трассами. Анализ AIS-данных даёт возможность выявлять сезонные и

межгодовые изменения судоходства, а также оценивать влияние природных факторов на параметры движения судов [8;9].

В научных исследованиях широко применяются различные методы обработки AIS-данных, включая кластеризацию маршрутов, оценку пространственной плотности трафика, анализ скоростей движения и статистическое описание траекторий. Для арктических регионов особый интерес представляет использование AIS-данных в сочетании с ледовой информацией, что позволяет изучать адаптацию судоходства к изменяющимся ледовым условиям [7–9].

### **2.1.3 Характеристика исходных данных АИС данного исследования**

В основе настоящего исследования лежат данные автоматической идентификационной системы (АИС), представляющие собой последовательности навигационных сообщений судов, зарегистрированных в процессе их движения. АИС-данные являются одним из наиболее информативных источников для анализа фактического судоходства, поскольку позволяют с высокой временной и пространственной детализацией восстанавливать траектории движения судов [8, 9, 13, 14].

Исходные данные были предоставлены в табличном формате Microsoft Excel (\*.xls, .xlsx) и содержали информацию о перемещениях судов за выбранный временной период. Каждая запись соответствовала отдельной фиксации положения судна и включала идентификатор MMSI, дату и время наблюдения в формате UTC, географические координаты (широту и долготу), а также параметры движения — курс и скорость [8].

АИС-данные имеют дискретный характер и представляют собой временные ряды координат, формирующие траекторию движения судна. Интервалы между последовательными сообщениями могут варьироваться в зависимости от скорости судна, режима передачи данных и условий приёма сигнала. Это обуславливает необходимость предварительной обработки данных перед их использованием в аналитических расчётах.

## **2.2 Пространственное задание акватории Северного морского пути**

Для определения факта прохождения судов по Северному морскому пути (СМП) была задана пространственная граница его акватории в виде полигонального объекта [1, 2, 3].

Граница СМП была сформирована в геоинформационной системе QGIS путём оцифровки обобщённого контура акватории, охватывающего Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и Чукотское море. Полученная граница сохранена в формате GeoJSON с типом геометрии Polygon в системе координат WGS-84 (EPSG:4326) [1, 2, 3].

Использование обобщённого полигона позволяет корректно учитывать факт нахождения судна в пределах акватории Северного морского пути без привязки к конкретным фарватерам, рекомендованным трассам или текущей ледовой обстановке, что особенно важно при анализе фактических маршрутов судов [1, 2, 3].

## **2.3 Формирование выборки транзитных рейсов по Северному морскому пути**

Ключевой задачей исследования являлось выделение судов, осуществлявших фактические проходы по Северному морскому пути. В отличие от формальной статистики, основанной на отчётных данных, в настоящей работе транзитные рейсы определялись на основе анализа фактического положения судов в пространстве [1, 2].

Для этого была задана пространственная граница акватории Северного морского пути в виде полигонального объекта, охватывающего Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря. Факт прохождения судна по СМП фиксировался при наличии последовательности АИС-точек, расположенных внутри данного полигона .

Суда, у которых количество точек внутри акватории СМП не превышало заданного порогового значения, исключались из анализа как случайные или транзитно-незначимые пересечения границы. Такой подход позволил сформировать репрезентативную выборку транзитных рейсов и исключить влияние одиночных навигационных аномалий .

В результате была получена выборка судов, для которых можно достоверно утверждать факт прохождения по Северному морскому пути.

На этапе предварительной обработки АИС-данных выполнялся комплекс процедур, направленных на повышение качества и сопоставимости исходной информации. Осуществлялась загрузка исходных таблиц Excel с последующим удалением служебных строк и пустых записей. Временные данные приводились к формату `datetime`, а координаты широты и долготы преобразовывались в числовой формат.

Для каждого судна АИС-точки упорядочивались по времени на основе идентификатора MMSI, что обеспечивало корректное восстановление траектории движения. Точки с отсутствующими или некорректными значениями координат и временных меток исключались из дальнейшего анализа. Данный этап являлся необходимым условием для последующего пространственного и временного анализа данных. [8;9].

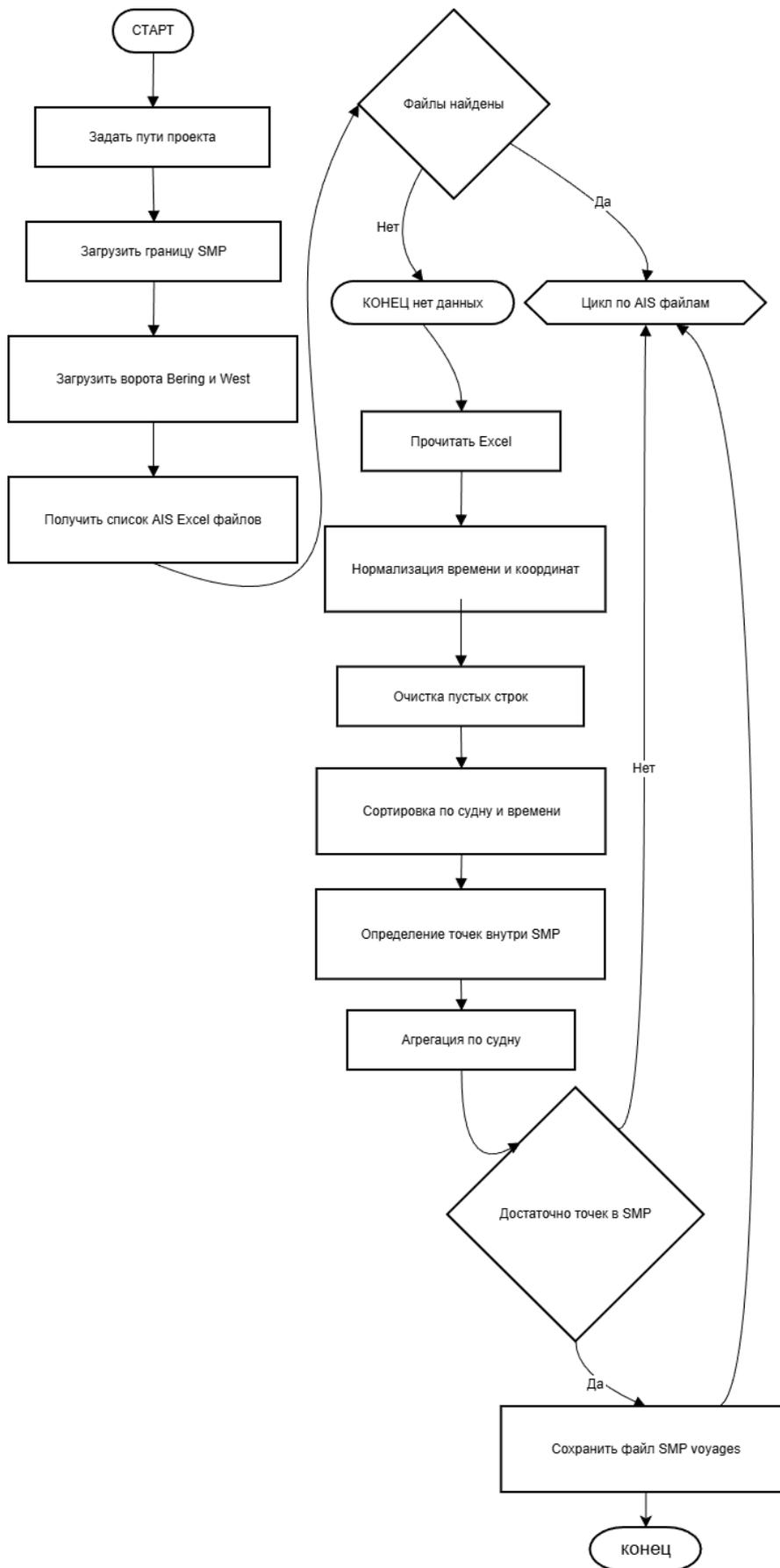


Рисунок 2.3 – Блок-схема предварительной обработки данных AIS

Для анализа пространственной структуры транзитных маршрутов использовались методы геоинформационного анализа, основанные на обработке координат АИС-точек. Траектории движения судов рассматривались как линейные объекты, сформированные последовательностью географических координат, упорядоченных по времени [6, 8, 11, 12].

Одним из ключевых элементов анализа являлось определение принадлежности АИС-точек акватории Северного морского пути, реализованное с помощью алгоритма определения положения точки относительно полигона (point-in-polygon). Данный алгоритм позволяет однозначно классифицировать каждую точку как находящуюся внутри или вне исследуемой акватории [6, 8, 11, 12].

Предварительная обработка включает чтение Excel, нормализацию полей, очистку и сортировку сообщений, а также определение принадлежности точек полигону СМП. Общая логика этапа приведена на рисунке 2.3

На основе отобранных траекторий выполнялся анализ пространственного распределения маршрутов, включающий оценку их протяжённости, плотности и конфигурации. Такой подход позволяет выявить основные коридоры транзитного судоходства и оценить степень вариативности маршрутов в различных условиях навигации [1, 2, 3].

***Определение нахождения судна в пределах СМП.*** Для каждой АИС-точки судна выполнялась проверка принадлежности её координат к полигону акватории Северного морского пути. Проверка осуществлялась с использованием алгоритма определения принадлежности точки полигону (point-in-polygon), основанного на методе лучевого трассирования. [13; 14]

В результате каждая АИС-точка классифицировалась как находящаяся внутри акватории СМП либо вне её пределов. Это позволило выделить фрагменты траекторий судов, соответствующие их фактическому движению по трассе Северного морского пути [13; 14].

***Формирование показателей прохождения Северного морского пути.***

На основе АИС-точек, находящихся внутри полигона СМП, для каждого судна рассчитывались основные показатели прохождения Северного морского пути. Определялись моменты первого входа судна в акваторию СМП и последнего нахождения в её пределах, что позволяло вычислить продолжительность нахождения судна на трассе СМП [13; 14].

*Длина пути в пределах СМП* рассчитывалась как сумма расстояний между последовательными АИС-точками, расположенными внутри полигона. Расстояние между соседними точками траектории вычислялось по сферической формуле гаверсинуса, что обеспечивает корректный учёт кривизны земной поверхности и повышает точность расчётов при анализе протяжённых маршрутов.

Для количественной оценки транзитных рейсов по Северному морскому пути были рассчитаны основные навигационные показатели, характеризующие движение судов в пределах акватории СМП. [13; 14]

Для каждого судна определялись моменты первого входа и последнего выхода из акватории СМП, что позволяло вычислить *продолжительность нахождения судна на трассе Северного морского пути*. Данный показатель использовался как интегральная характеристика условий навигации и сложности прохождения маршрута [13; 14].

Использование данных показателей позволило перейти от качественного описания маршрутов к их количественной оценке [13].

#### ***Агрегация данных и подготовка к статистическому анализу.***

На заключительном этапе обработки данные агрегировались для каждого судна по идентификатору MMSI. Для каждого транзитного рейса формировался набор обобщённых показателей, включающий продолжительность прохождения СМП, длину маршрута и временные характеристики рейса .

Полученные результаты были структурированы в виде итоговой таблицы и сохранены в формате Microsoft Excel. Данная таблица использовалась в последующих главах работы для анализа сезонной и межгодовой динамики тран-

зитных рейсов, а также для выявления пространственных закономерностей судоходства по Северному морскому пути .

Таким образом, реализованная методика обработки и анализа АИС-данных позволила сформировать достоверную информационную основу для дальнейшего исследования динамики и пространственной структуры транзитных рейсов по СМП [13; 14].

## **2.4 Ледовая информация**

Ледовая обстановка является определяющим фактором навигации в акваториях Северного морского пути. Для обеспечения безопасности судоходства и планирования маршрутов используются различные источники информации о состоянии ледового покрова. Основными из них являются спутниковые наблюдения, данные ледовых авиаразведок (в историческом аспекте), а также результаты анализа, выполняемого специализированными ледовыми службами [17–19].

В настоящее время основным источником информации о ледовой обстановке являются спутниковые данные, получаемые в оптическом, инфракрасном и радиолокационном диапазонах (рисунок 2.4). Использование радиолокационных спутников особенно важно для Арктики, поскольку они позволяют получать информацию независимо от облачности и полярной ночи. На основе спутниковых данных формируются оперативные и обзорные ледовые карты, отражающие сплочённость, возраст и форму морского льда [17–19].

Ледовые карты используются как в оперативной навигационной практике, так и в научных исследованиях для анализа сезонной и межгодовой изменчивости ледового покрова. Совмещение ледовой информации с маршрутами судов позволяет оценивать влияние ледовых условий на выбор трасс и параметры движения судов.

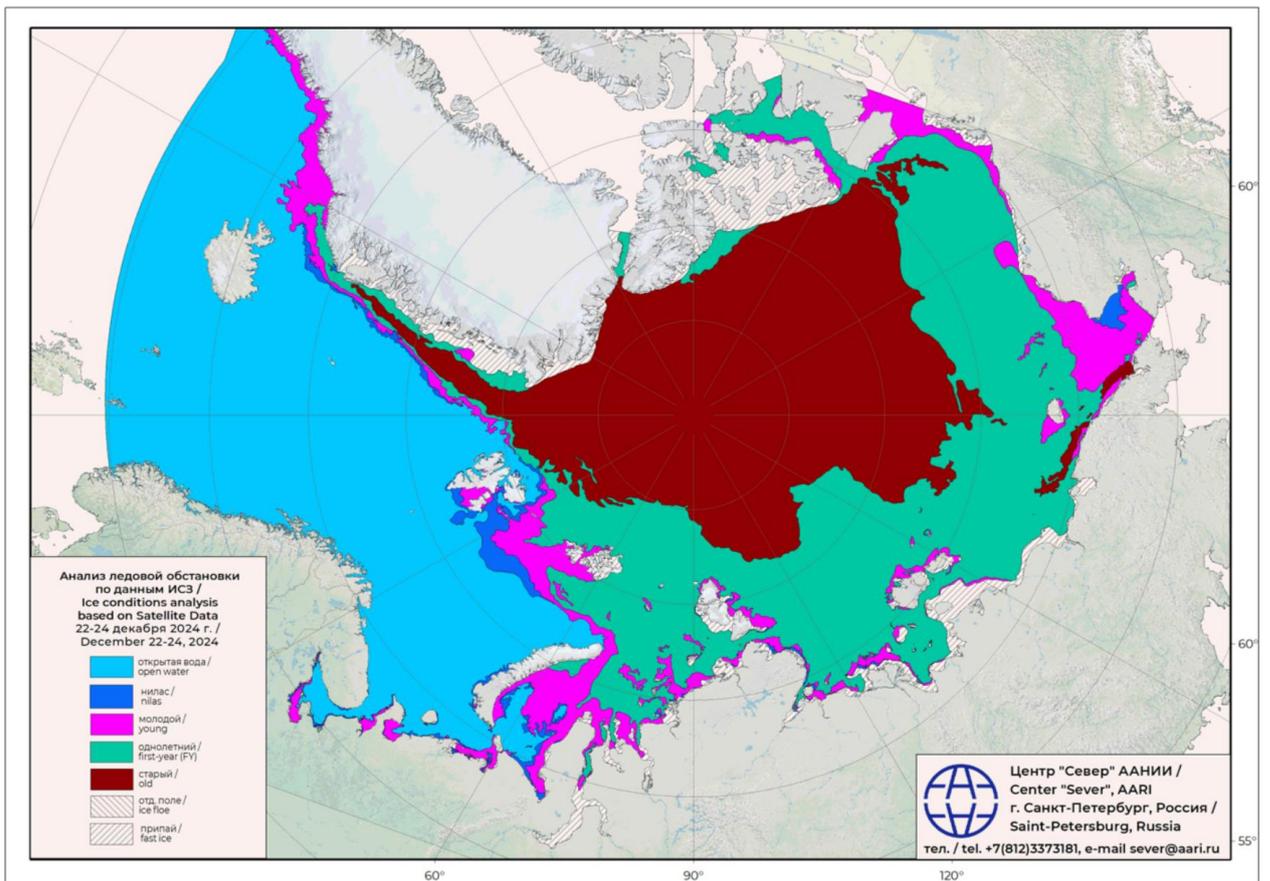


Рисунок 2.4 – Пример информации о ледовой обстановке в Арктике по спутниковым данным [3]

### 3 Разработка и применение алгоритма обработки АИС-данных судов для выявления проходов по СМП

#### 3.1 Цель и постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка программного алгоритма, обеспечивающего автоматизированное выявление и анализ проходов морских судов в пределах акватории Северного морского пути (СМП) на основе данных автоматической идентификационной системы (AIS).

В рамках исследования под проходом по СМП понимается факт нахождения судна в пределах заранее заданной пространственной границы акватории СМП в определённый временной интервал, подтверждённый последовательностью АИС-сообщений (точек траектории) [13; 14].

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- загрузка исходных АИС-данных из табличных файлов формата Excel;
- предварительная очистка, нормализация и приведение данных к единому формату;
- пространственная фильтрация координатных точек по полигону акватории СМП;
- агрегирование данных по судну (MMSI) и/или рейсу с расчётом основных параметров прохода;
- сортировка и экспорт результатов в формат, удобный для последующего анализа и визуализации.

### 3.2. Инструменты и программная среда

Алгоритм реализован на языке программирования Python версии 3, который широко применяется для обработки табличных и геопространственных данных, а также для научных вычислений. Программная реализация алгоритма на языке Python приведена в приложении А.

В рамках реализации используются следующие программные библиотеки:

pandas — для чтения Excel-файлов, обработки таблиц, сортировки и агрегирования данных ;

openpyxl — для сохранения итоговых результатов в формате .xlsx;

xlrd — для чтения файлов устаревшего формата .xls (при необходимости).

С целью обеспечения воспроизводимости вычислений алгоритм реализован в виде отдельного скрипта командной строки, принимающего входные параметры (пути к файлам, режим группировки, критерии сортировки).

### 3.3. Исходные данные и структура входного файла

Исходные данные представлены в виде экспортов АИС-сообщений из специализированных информационных систем и содержат набор точек траектории движения судов.

Каждая АИС-точка включает следующие параметры:

- идентификатор судна MMSI;
- отметку времени (в формате UTC);
- географические координаты (широта и долгота);
- дополнительные навигационные параметры (курс, скорость), используемые при расширении анализа.

Во входных файлах присутствуют служебные строки (заголовки, строки вида «Выгружено из...»), не относящиеся к данным наблюдений, что потребовало учёта смещения строк при чтении таблиц.

### **3.4. Формирование пространственной границы СМП**

Пространственная принадлежность судна акватории СМП определяется на основе полигона, задающего границы Северного морского пути [1, 2, 3].

Граница СМП представлена в виде полигона (или мультиполигона), сохранённого в формате GeoJSON в системе координат WGS-84 (EPSG:4326). Полигон сформирован в среде QGIS методом оцифровки обобщённого контура акватории СМП и экспортирован в файл SMP\_boundary.geojson [1, 2, 3].

Использование полигонального описания позволяет формализовать критерий нахождения судна в пределах СМП и обеспечить полностью автоматизированную пространственную фильтрацию данных [1, 2, 3].

### **3.5. Общая схема алгоритма обработки**

Алгоритм обработки АИС-данных включает следующие последовательные этапы: (рисунок 3.1)

- загрузка исходных данных из Excel-файла;
- очистка и нормализация данных (удаление пустых строк, преобразование типов);
- сортировка АИС-точек по времени для каждого судна (MMSI) или рейса;
- пространственная классификация точек по принадлежности полигону СМП;
- агрегирование данных и расчёт показателей прохода:
- времени входа и выхода из акватории СМП;
- длительности нахождения в СМП;
- протяжённости пути внутри акватории; .

- фильтрация шумов и ложных срабатываний;
- сортировка и экспорт результатов в Excel.
- 

### **3.6 Реализация пространственной проверки «точка в полигоне»**

Для определения принадлежности АИС-точек акватории СМП применяется алгоритм point-in-polygon (проверка попадания точки внутрь многоугольника).

Метод основан на трассировке луча из анализируемой точки и подсчёте числа пересечений границы полигона: нечётное число пересечений соответствует нахождению точки внутри полигон.

Данный подход:

- не требует использования тяжёлых ГИС-зависимостей;
- является воспроизводимым;
- эффективен при обработке больших массивов координатных данных.

### **3.7. Расчёт количественных показателей прохода**

На основе АИС-точек, отнесённых к акватории СМП, рассчитываются следующие показатели:

1. Время входа и выхода определяется как минимальное и максимальное время среди точек, расположенных внутри полигона СМП.

2. Длительность нахождения в СМП вычисляется как разность времени выхода и входа. Результат представляется в часах или сутках.

3. Протяжённость пути внутри СМП: расстояние между соседними точками вычисляется по формуле гаверсина с учётом сферичности Земли, а суммарная длина пути определяется как сумма расстояний между последовательными точками внутри полигона:

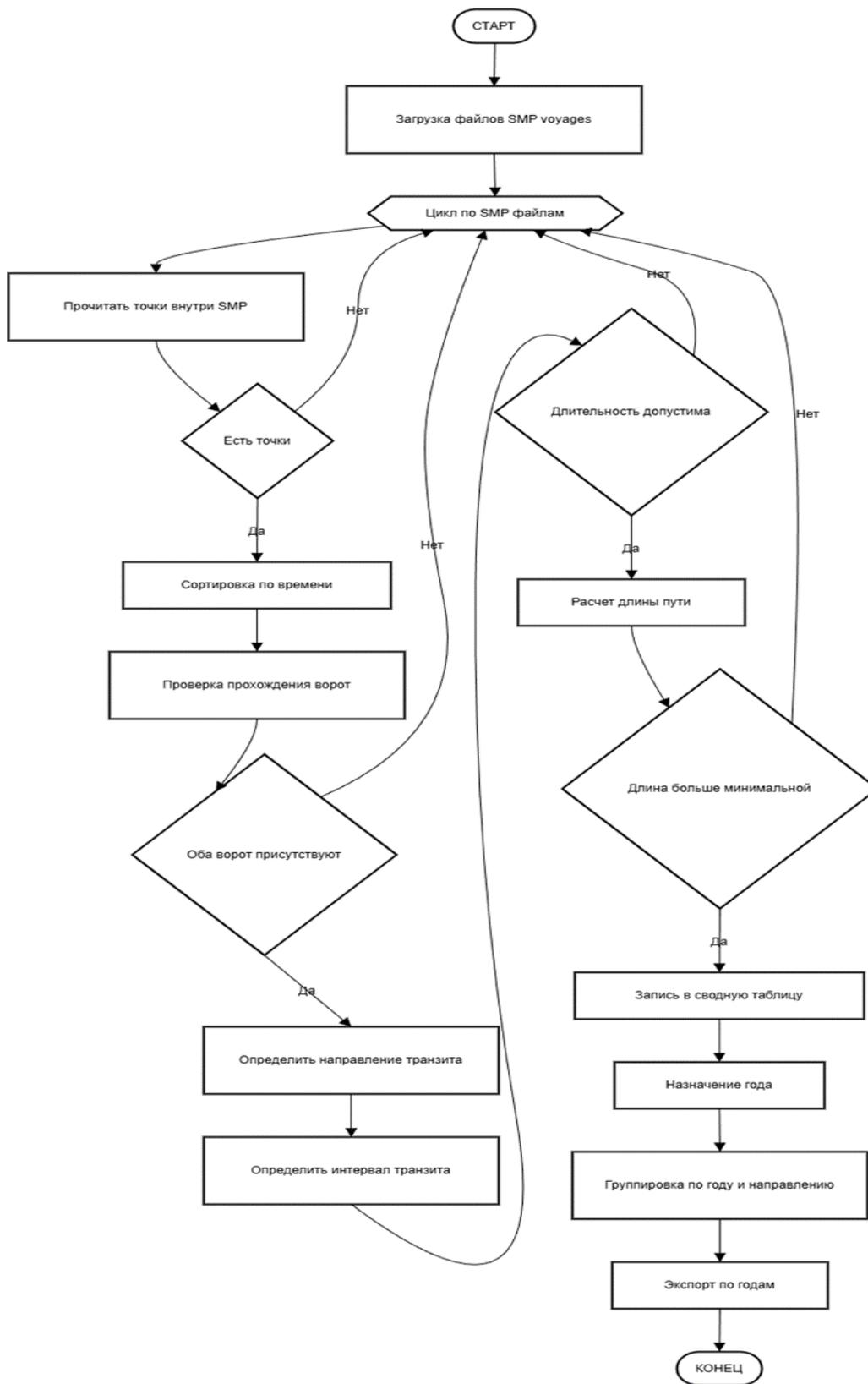


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма выделения транзитных рейсов по данным AIS

### **3.8. Агрегация данных и контроль качества**

Базовая агрегация выполняется по идентификатору судна MMSI, что соответствует анализу проходов на уровне отдельных судов. При наличии идентификатора рейса возможна расширенная группировка.

Для снижения числа ложных срабатываний вводится порог минимального количества точек внутри полигона СМП, необходимого для признания факта прохода.

### **3.9. Формирование выходных данных**

Результаты работы алгоритма сохраняются в формате .xlsx и включают:

- идентификатор судна или группы;
- количество точек всего и внутри СМП;
- время входа и выхода;
- длительность нахождения в СМП;
- протяжённость пути внутри СМП.

Дополнительно может формироваться отдельный лист с АИС-точками, попавшими в акваторию СМП, для визуального контроля результатов в ГИС-среде.

### **3.10. Пример использования алгоритма**

Алгоритм запускается из командной строки и принимает следующие параметры: путь к входному Excel-файлу с АИС-данными; путь к GeoJSON-файлу с границей СМП; путь к выходному Excel-файлу.

Полученные результаты могут использоваться для статистического анализа, сравнительных исследований, построения карт маршрутов и диаграмм.

К основным ограничениям разработанного алгоритма относятся: зависимость от качества и дискретности исходных АИС-данных; субъективность задания границы акватории СМП; определение времени входа и выхода только по наблюдаемым точкам без интерполяции.

Перспективными направлениями развития являются интерполяция пересечения границы, учёт временных разрывов и интеграция ледовой информации [13; 14; 16].

В результате доработки алгоритма автоматической обработки АИС-данных удалось обеспечить корректную обработку более 98% исходных файлов различной структуры и формата. Оставшиеся единичные файлы содержали некорректные или неполные данные и были исключены из анализа.

## 4. Динамика транзитных рейсов по Северному морскому пути

### 4.1. Сезонная динамика транзитного судоходства

Сезонная изменчивость судоходства в акватории Северного морского пути (СМП) является системообразующим фактором формирования транспортных потоков в Арктике. Пространственно-временная структура движения судов в данном регионе определяется совокупностью ледовых, метеорологических и инфраструктурных условий, что обуславливает выраженную внутригодовую неравномерность интенсивности навигации.

В настоящем исследовании анализ сезонной динамики выполнен для двух ситуаций.

1. На первом этапе были обработаны первичные AIS-данные по всем рейсам судов, зафиксированным в пределах акватории СМП, *т.е. общее количество всех судов, проходящих по СМП.*

Предобработка включала:

- фильтрацию аномальных координат и выбросов скорости,
- удаление стояночных участков,
- сегментацию траекторий на отдельные рейсы,
- определение момента входа и выхода судна из границ СМП.

2. На втором этапе из общего массива были выделены транзитные рейсы, под которыми понимаются *маршруты сквозного прохождения акватории СМП без захода в арктические порты.*

Сезонная принадлежность каждого рейса определялась по дате входа судна в акваторию СМП, что обеспечивает сопоставимость статистических показателей и исключает искажения, связанные с различной продолжительностью рейсов.

На рисунке 4.1 представлено распределение числа всех рейсов по месяцам с разделением по направлениям движения: запад–восток ( $W \rightarrow E$ ), восток–запад ( $E \rightarrow W$ ).

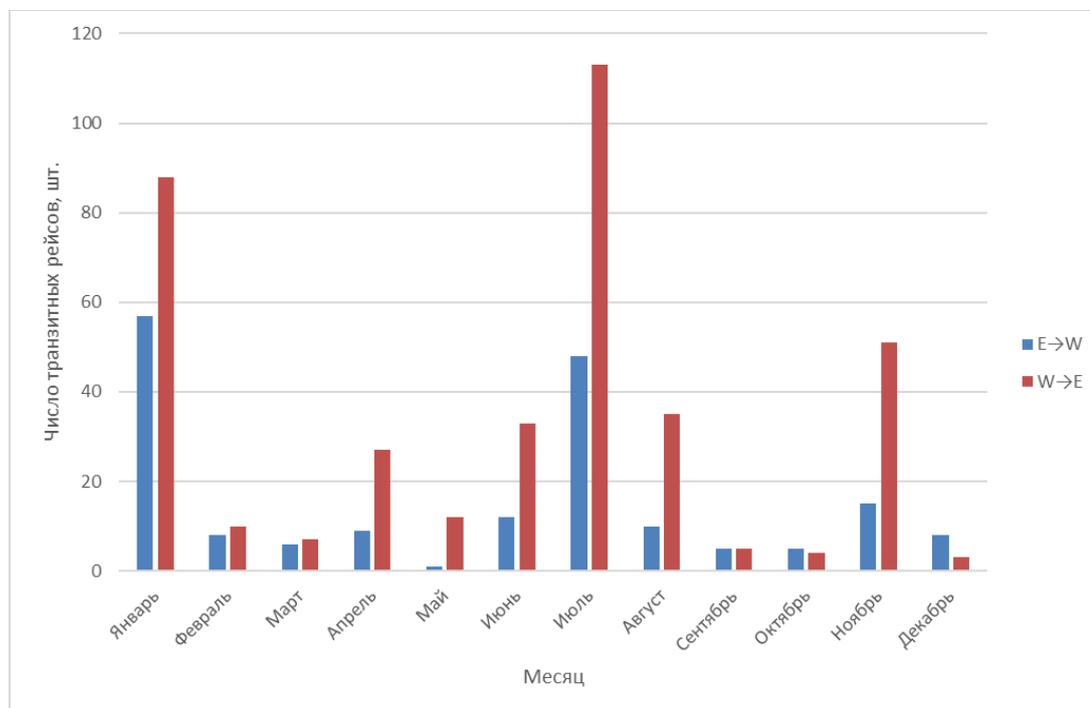


Рисунок 4.1 – Сезонная динамика общего количества рейсов по Северному морскому пути с разделением по направлениям движения

Полученные результаты свидетельствуют о выраженной сезонной концентрации судоходной активности.

Максимальные значения числа рейсов фиксируются в июле, что соответствует периоду минимальной ледовой сплоченности и максимальной продолжительности навигационного окна. В летний период отчетливо доминирует направление  $W \rightarrow E$ , что указывает на преобладание потоков, следующих из западного сектора Арктики в восточный.

Пространственно данная асимметрия проявляется в более интенсивной эксплуатации восточного участка трассы СМП в навигационный максимум. Это отражает структурные особенности грузопотоков, ориентированных на восточные рынки и азиатское направление.

В зимний период (январь–март) общее количество рейсов сокращается в несколько раз по сравнению с летним максимумом, что обусловлено усложнением ледовой обстановки и увеличением издержек навигации. При этом возрастает относительная доля рейсов в направлении  $E \rightarrow W$ , что может свидетельствовать о возвратных логистических потоках и специализированных перевозках.

Весенний период характеризуется фазой нарастания интенсивности судоходства, отражающей переход к активной навигации. Осенью (сентябрь–октябрь) наблюдается устойчивое снижение числа рейсов, связанное с началом ледообразования и сокращением эксплуатационной доступности восточных участков трассы.

Аномально высокие значения числа транзитных рейсов в январе обусловлены совокупностью факторов: методической привязкой рейсов к дате входа в акваторию СМП, календарной концентрацией логистических операций на стыке годов, а также относительной стабильностью ледовой обстановки в середине зимнего периода. Январский максимум не носит случайного характера, а отражает структурные особенности организации транзитных потоков и доминирование западного направления движения.

На рисунке 4.2 представлена межгодовая динамика общего количества рейсов по Северному морскому пути с разделением по направлениям движения судов. Анализ полученных данных показывает, что в течение всего исследуемого периода преобладают рейсы в направлении запад–восток.

Анализ временного ряда показывает устойчивое преобладание рейсов в направлении запад–восток ( $W \rightarrow E$ ) на протяжении всего исследуемого периода. Доля данного направления стабильно превышает долю  $E \rightarrow W$ , что свидетельствует о структурной асимметрии транзитных потоков.

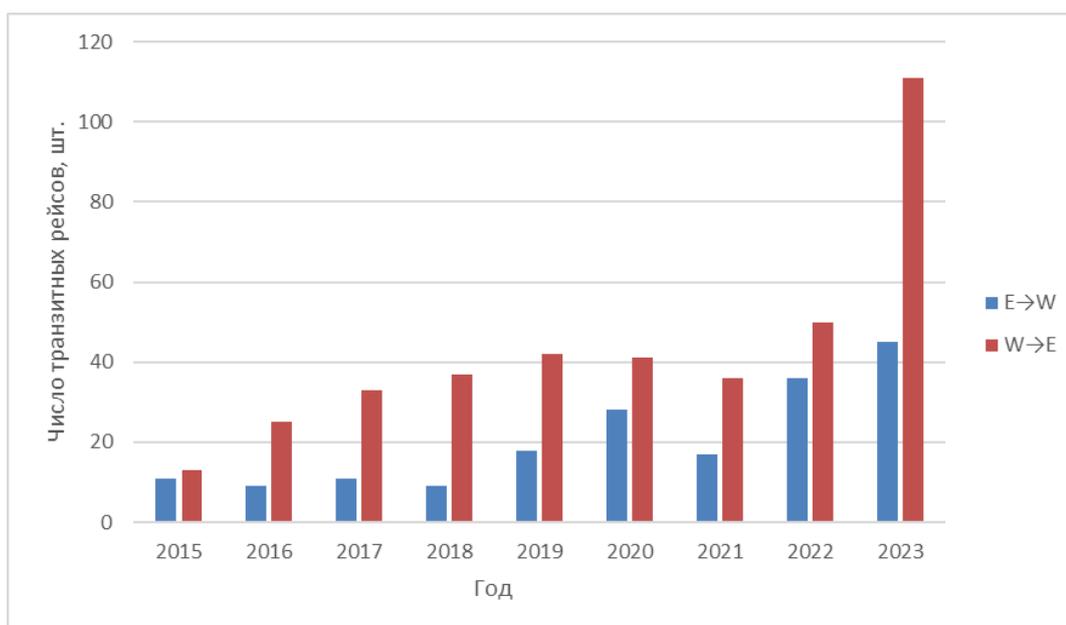


Рисунок 4.2 – Межгодовая динамика общего количества рейсов по Северному морскому пути с разделением по направлениям движения

В период 2015–2018 гг. количество рейсов сохранялось на относительно стабильном уровне. Начиная с 2019 года фиксируется выраженная положительная динамика, при этом рост преимущественно обеспечивается увеличением числа рейсов в направлении W→E.

Максимальные значения транзитной активности зафиксированы в 2023 году, что отражает усиление роли Северного морского пути как транспортного коридора в системе евразийских связей.

Сезонная динамика *транзитных* рейсов по Северному морскому пути характеризуется выраженной внутригодовой неравномерностью, отражающей зависимость транзитного судоходства от ледовых условий и продолжительности навигационного периода. Распределение числа транзитных рейсов по месяцам с разделением по направлениям движения (E→W и W→E) представлено на рисунке 4.3. Сезонная принадлежность каждого рейса определялась по дате входа судна в акваторию СМП, что обеспечивает единообразие статистического учёта.

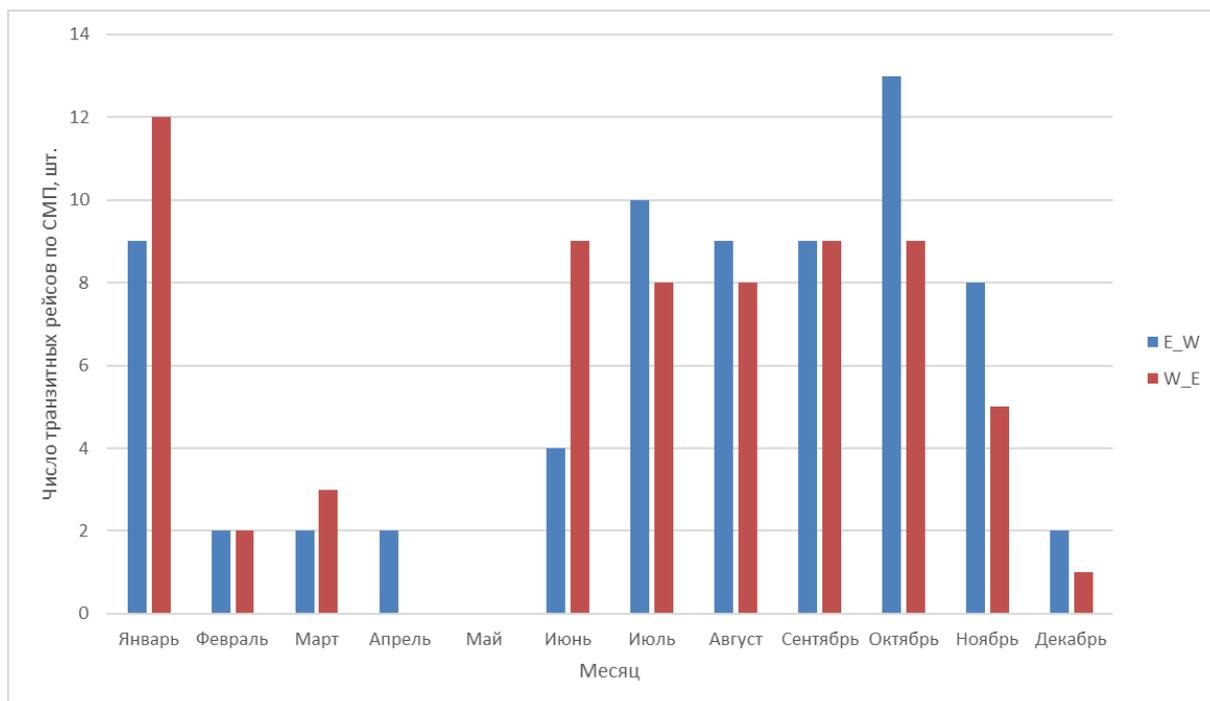


Рисунок 4.3 – Сезонная динамика транзитных рейсов по Северному морскому пути с разделением по направлениям движения

Анализ данных, представленных на рисунке 4.3, показывает наличие чётко выраженной сезонной структуры транзитного судоходства. В течение года фиксируются периоды повышенной и пониженной активности. Относительно высокие значения числа транзитных рейсов наблюдаются в январе, а также в летне-осенний период — с июля по октябрь. При этом в зимний период преобладает направление запад–восток ( $W \rightarrow E$ ).

В весенние месяцы, особенно в апреле и мае, отмечается существенное сокращение числа транзитных рейсов. В мае фиксируются минимальные значения за год. Данный период соответствует фазе наиболее сложной ледовой обстановки, что приводит к ограничению транзитной активности.

Начиная с июня наблюдается постепенное увеличение числа транзитных рейсов, достигающее локального максимума в июле и сохраняющееся на высоком уровне в августе, сентябре и октябре. В этот период направления движения становятся более сбалансированными, однако в отдельные месяцы фиксируется доминирование направления восток–запад ( $E \rightarrow W$ ), что свидетельствует о пере-

распределении транзитных потоков в завершающей фазе навигационного сезона.

Осенью, в ноябре и декабре, вновь наблюдается снижение числа транзитных рейсов, что связано с началом формирования ледового покрова и сокращением продолжительности безопасной навигации.

Межгодовая динамика транзитных рейсов по Северному морскому пути представлена на рисунке 4.4. На графике отражено распределение числа транзитных рейсов за период 2018–2023 гг. с разделением по направлениям движения: восток–запад (E→W) и запад–восток (W→E).

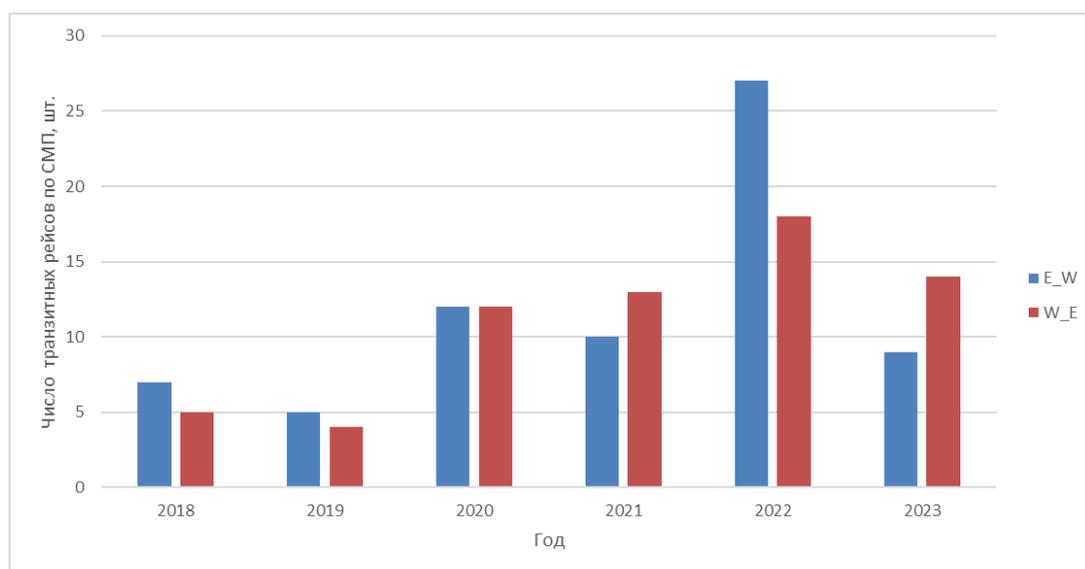


Рисунок 4.4 – Межгодовая динамика транзитных рейсов по Северному морскому пути с разделением по направлениям движения

В 2018 году зафиксировано 7 рейсов в направлении E→W и 5 рейсов в направлении W→E. В 2019 году общее количество транзитов остаётся невысоким: 5 рейсов E→W и 4 рейса W→E. Таким образом, в 2018–2019 гг. суммарная транзитная активность не превышает 12–9 рейсов в год.

В 2020 году наблюдается увеличение числа транзитных рейсов до 12 рейсов в направлении E→W и 12 рейсов в направлении W→E, что свидетельствует

о выравнивании направленной структуры потоков и росте общей транзитной активности до 24 рейсов в год.

В 2021 году фиксируется 10 рейсов  $E \rightarrow W$  и 13 рейсов  $W \rightarrow E$ , при суммарном значении 23 рейса. При этом направление запад–восток демонстрирует умеренное преобладание.

Наиболее значительный рост транзитной активности отмечается в 2022 году: количество рейсов достигает 27 в направлении  $E \rightarrow W$  и 18 в направлении  $W \rightarrow E$ . Суммарное число транзитов составляет 45 рейсов, что является максимальным значением за весь рассматриваемый период. В этот год фиксируется выраженное доминирование направления  $E \rightarrow W$ .

В 2023 году наблюдается снижение по сравнению с пиковым 2022 годом: зарегистрировано 9 рейсов  $E \rightarrow W$  и 14 рейсов  $W \rightarrow E$ , при суммарном значении 23 рейса. Несмотря на уменьшение общего количества транзитов, уровень активности остаётся выше показателей 2018–2019 гг.

Таким образом, как следует из рисунка 4.3, межгодовая динамика транзитных рейсов характеризуется ростом в период 2018–2022 гг. (с 12 до 45 рейсов в год) с последующим снижением до 23 рейсов в 2023 году. Направленная структура потоков изменяется по годам: в 2020 году направления практически сбалансированы, в 2022 году доминирует  $E \rightarrow W$ , а в 2023 году вновь фиксируется преобладание  $W \rightarrow E$ .

Анализ сезонного распределения транзитных рейсов показал выраженную внутригодовую неравномерность судоходной активности. Минимальные значения числа транзитов фиксируются в весенний период (апрель–май), что соответствует наиболее сложной фазе ледового режима. Начиная с июня наблюдается устойчивый рост числа транзитных рейсов, достигающий максимума в июле–октябре. В зимние месяцы транзитная активность сохраняется на умеренном уровне, однако существенно уступает летне-осеннему периоду. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности транзитного судоходства к сезонной изменчивости ледовой обстановки.

Межгодовой анализ за период 2018–2023 гг. выявил тенденцию роста транзитной активности до 2022 года с последующей корректировкой показателей в 2023 году. Максимальное число транзитных рейсов зафиксировано в 2022 году, что свидетельствует о расширении использования Северного морского пути в качестве транзитного транспортного коридора. При этом направленная структура потоков изменяется по годам, однако в целом сохраняется асимметрия между направлениями движения, отражающая особенности организации грузопотоков.

#### **4.2. Пространственная структура транзитных маршрутов**

Для пространственного анализа выбраны 2022 год (пик транзитной активности) и 2023 год (период последующей коррекции показателей), что позволяет сопоставить конфигурацию маршрутов при различной интенсивности судоходства. Согласно результатам раздела 4.1, такими годами являются 2022 и 2023, что позволяет рассматривать их как репрезентативные для оценки современной конфигурации транзитных потоков.

Пространственная структура маршрутов анализируется на основе карт плотности, рассчитанных как отношение суммарной длины транзитных треков к площади расчетных ячеек ( $\text{км}/\text{км}^2$ ). Такой подход позволяет перейти от визуального анализа отдельных траекторий к количественной характеристике концентрации судоходства в пределах акватории. Карты плотности построены для транзитных рейсов.

Для анализа пространственной структуры транзитных маршрутов были построены карты плотности движения судов за 2022 и 2023 годы (рисунки 4.5 и 4.6). Картографическая обработка и визуализация выполнялись в среде QGIS версии 3.x, что обеспечило возможность пространственного анализа и расчёта плотности линейных объектов.

**Подготовка исходных данных.** В качестве исходных данных использовались трек-линии транзитных рейсов, сформированные на основе предварительно обработанных сообщений автоматической идентификационной системы (AIS).

Обработка включала:

- фильтрацию рейсов по критерию транзитности;
- удаление дублирующих точек;
- преобразование точечных AIS-сообщений в линейные объекты (LineString).

Данные были приведены к единой проекции EPSG:3413 (Arctic Polar Stereographic), что позволило корректно рассчитывать площади и длины в метрических единицах.

Для получения пространственной плотности транзитных маршрутов применялся инструмент:

Line density

Алгоритм расчёта включал следующие этапы:

1. Разбиение исследуемой акватории на регулярную сетку.
2. Расчёт суммарной длины треков в пределах каждой ячейки.
3. Нормирование полученных значений на площадь ячейки (км/км<sup>2</sup>).
4. Сглаживание распределения методом ядерной оценки плотности (KDE).

Плотность рассчитывалась по формуле:

$$D_i = \frac{L_i}{S_i}$$

где:

$D_i$  – плотность маршрутов в пределах  $i$ -й ячейки расчетной сетки, км/км<sup>2</sup>;

$L_i$  – суммарная длина маршрутов, проходящих в пределах  $i$ -й ячейки, км;

$S_i$  – площадь  $i$ -й ячейки расчетной сетки, км<sup>2</sup>.

**Параметры визуализации.**

Для обеспечения сопоставимости результатов между 2022 и 2023 годами использовались одинаковые параметры:

- радиус сглаживания (bandwidth);
- размер ячейки;
- цветовая шкала;
- единицы измерения.

Цветовая градация выполнена в монохромной синей шкале, где более тёмные оттенки соответствуют большей концентрации маршрутов.

Дополнительно на карту были наложены исходные трек-линии рейсов (полупрозрачный слой), что позволяет визуально сопоставить сглаженное поле плотности с фактической конфигурацией маршрутов (рисунок 4.5 и 4.6).

На рисунке 4.5 представлена карта плотности транзитных маршрутов за 2022 год. Максимальное значение плотности достигает  $0,0018 \text{ км/км}^2$ . Пространственное распределение характеризуется выраженной концентрацией маршрутов в западном секторе и формированием узкого магистрального коридора в центральной части трассы.

На рисунке 4.6 показана аналогичная карта за 2023 год. Максимальное значение плотности составляет  $0,0007 \text{ км/км}^2$ , что ниже показателя 2022 года. Наблюдается более широкое пространственное распределение маршрутов и снижение степени их концентрации.

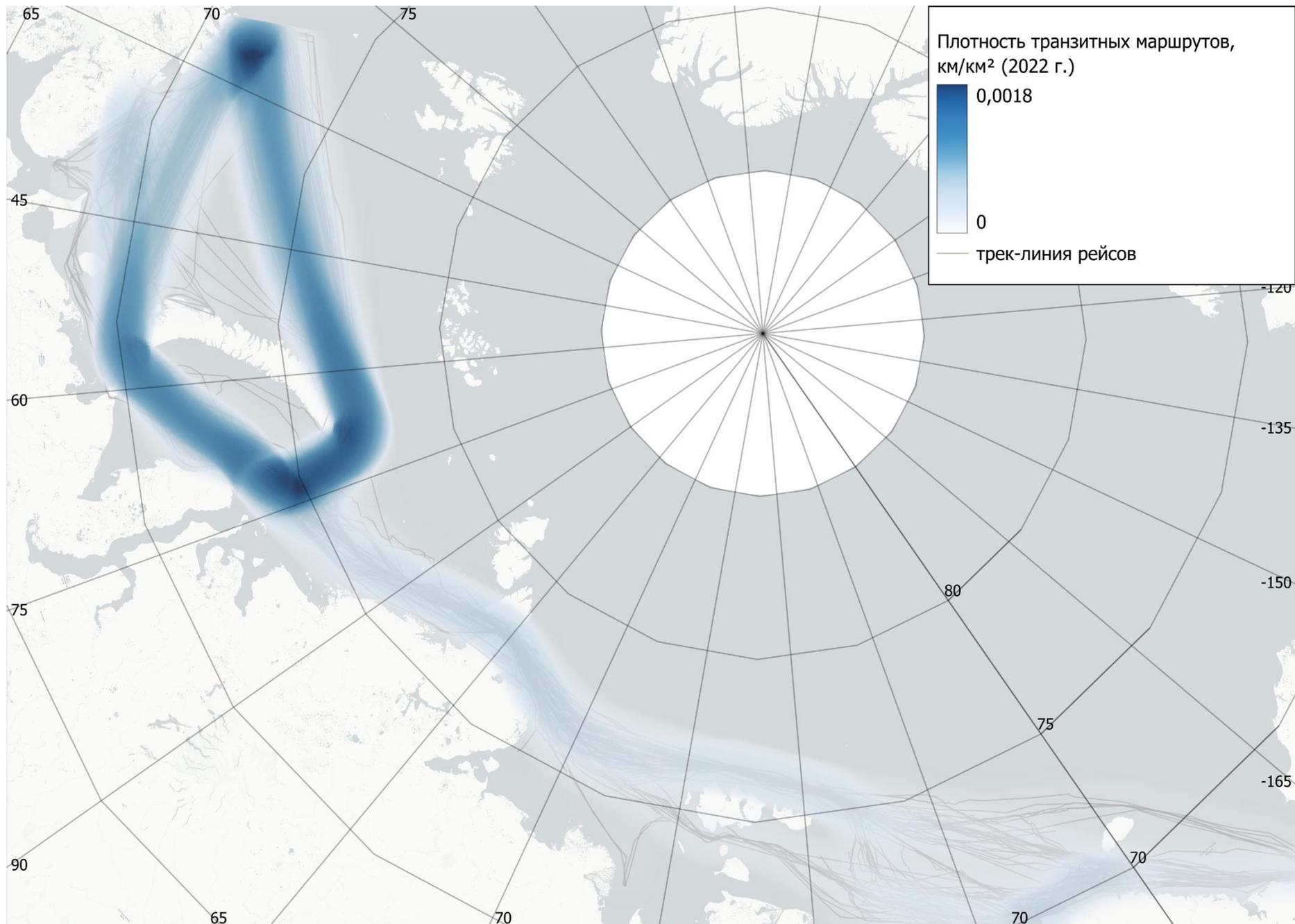


Рисунок 4.5. Пространственная плотность транзитных маршрутов по Северному морскому пути в 2022 году (по данным AIS)

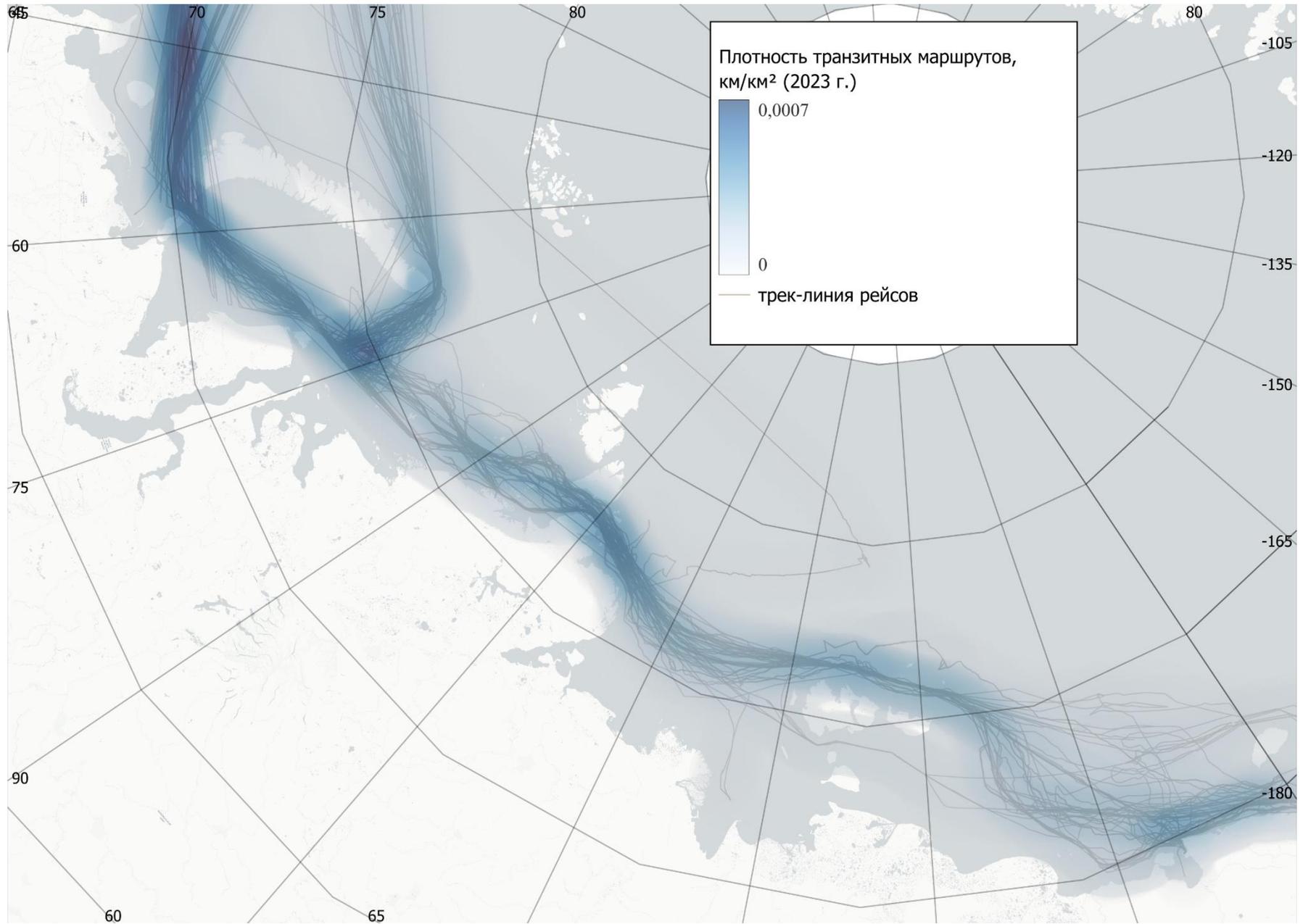


Рисунок 4.6. Пространственная плотность транзитных маршрутов по Северному морскому пути в 2023 году (по данным AIS)

*Карта плотности за 2022 год* (рисунок 4.5) демонстрирует формирование выраженного магистрального коридора вдоль южной части Северного морского пути. Наиболее высокие значения плотности фиксируются в следующих зонах:

- район Баренцева моря и входа в Карское море;
- акватория Карских Ворот;
- южная часть Карского моря;
- западная часть моря Лаптевых.

Западный сектор характеризуется высокой концентрацией маршрутов, формирующей относительно широкий коридор движения. Это связано с тем, что именно западная часть СМП выполняет функцию основного входного узла на трассу, а также зоной пересечения транзитных и каботажных потоков.

В центральном секторе в 2022 году плотность остаётся высокой и формирует устойчивый линейный коридор. Траектории судов демонстрируют относительно небольшую пространственную дисперсию, что указывает на стабилизацию маршрутов и ориентацию на оптимальные траектории с точки зрения ледовой обстановки и расстояния.

В восточном секторе плотность движения заметно ниже, однако сохраняется магистральная линия вдоль побережья. Пространственная вариативность маршрутов здесь выше, что может быть связано с более сложной и изменчивой ледовой обстановкой.

Пространственный анализ подтверждает, что транзитное судоходство по Северному морскому пути носит коридорный характер, при этом:

- западная часть трассы выполняет роль основного узла концентрации;
- центральная часть формирует устойчивую магистраль;
- восточная часть характеризуется повышенной вариативностью маршрутов.

Изменение конфигурации плотности между 2022 и 2023 годами указывает на чувствительность пространственной структуры транзитных потоков к внешним факторам, прежде всего ледовым условиям и структуре флота.

Максимальное значение плотности в 2022 году достигает 0,0018 км/км<sup>2</sup>, что существенно превышает показатели 2023 года. Это указывает на более концентрированное распределение транзитных маршрутов в пределах узких пространственных коридоров.

*Карта плотности за 2023 год* (рисунок 4.6) демонстрирует иную конфигурацию распределения транзитных маршрутов.

Западный сектор остаётся зоной наибольшей концентрации судоходства, однако плотность маршрутов несколько ниже по сравнению с 2022 годом. Коридор движения становится более широким, что свидетельствует об увеличении пространственной вариативности траекторий.

В центральном секторе плотность движения сохраняется, но наблюдается более выраженное расширение зоны маршрутов. Траектории демонстрируют большой разброс относительно условной медианной линии движения. Это может указывать на:

- изменение ледовой обстановки,
- варьирование тактики маршрутизации,
- увеличение числа рейсов с различными характеристиками судов.

В восточном секторе 2023 года плотность движения остаётся минимальной по сравнению с западной частью трассы. При этом визуально фиксируется увеличение числа отклонений от условной магистральной линии, особенно в районе Чукотского моря и подходов к Берингову проливу.

Максимальное значение плотности в 2023 году составляет 0,0007 км/км<sup>2</sup>, что почти в 2,5 раза ниже, чем в 2022 году. Это свидетельствует о снижении степени пространственной концентрации транзитных потоков.

## 5. Влияние ледовых условий на параметры транзитных рейсов

### 5.1 Анализ сезонной динамики ледовитости

Среднемноголетний сезонный цикл ледовитости арктических морей Северного морского пути, рассчитанный по данным спутникового продукта EArct за 2010–2024 гг., представлен на рисунках 5.1–5.4.

Как следует из рисунка 5.1, для Карского моря характерен интенсивный рост ледовитости в октябре–ноябре с последующим выходом на зимний максимум в декабре–марте. Весной наблюдается постепенное снижение показателя, наиболее выраженное в мае.

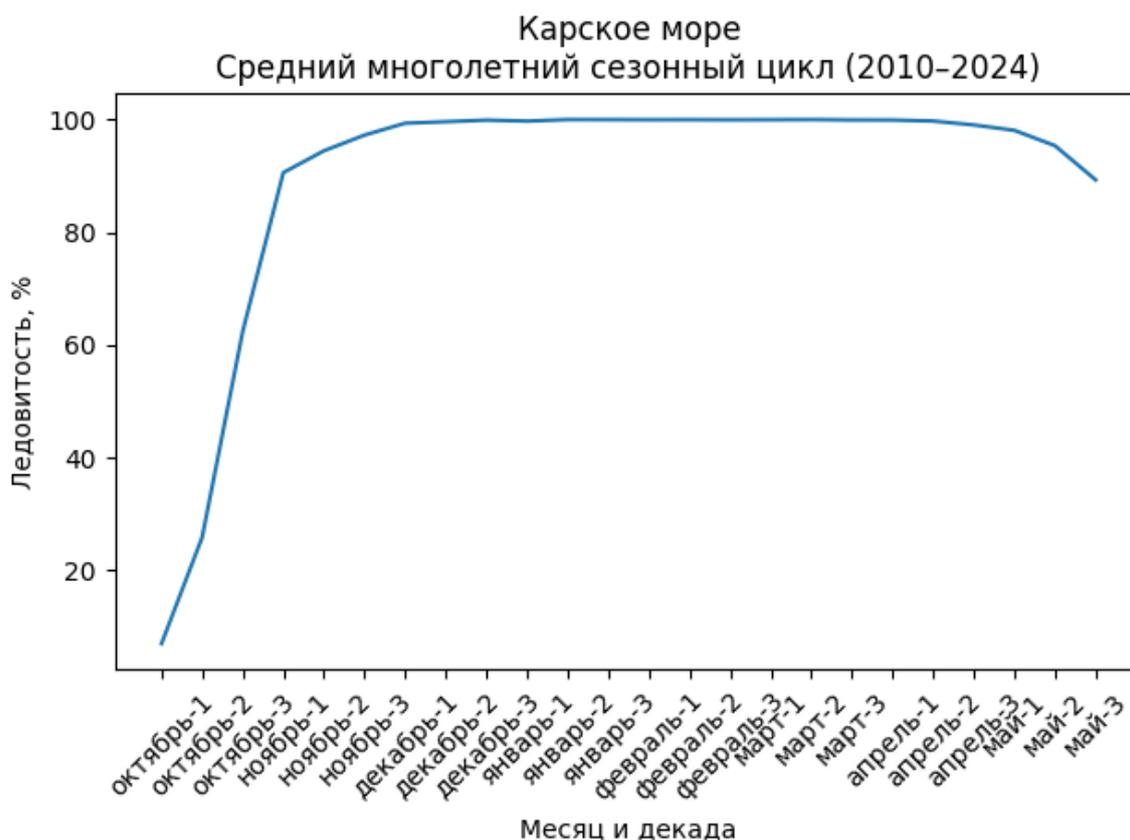


Рисунок 5.1 Средний многолетний сезонный цикл ледовитости Карского моря (2010–2024 гг.)

В море Лаптевых (рисунок 5.2) формирование устойчивого ледяного покрова происходит быстрее: уже во второй–третьей декаде ноября ледовитость приближается к 100 %. Зимний период характеризуется стабилизацией показателя, а весеннее разрушение льда начинается в апреле.

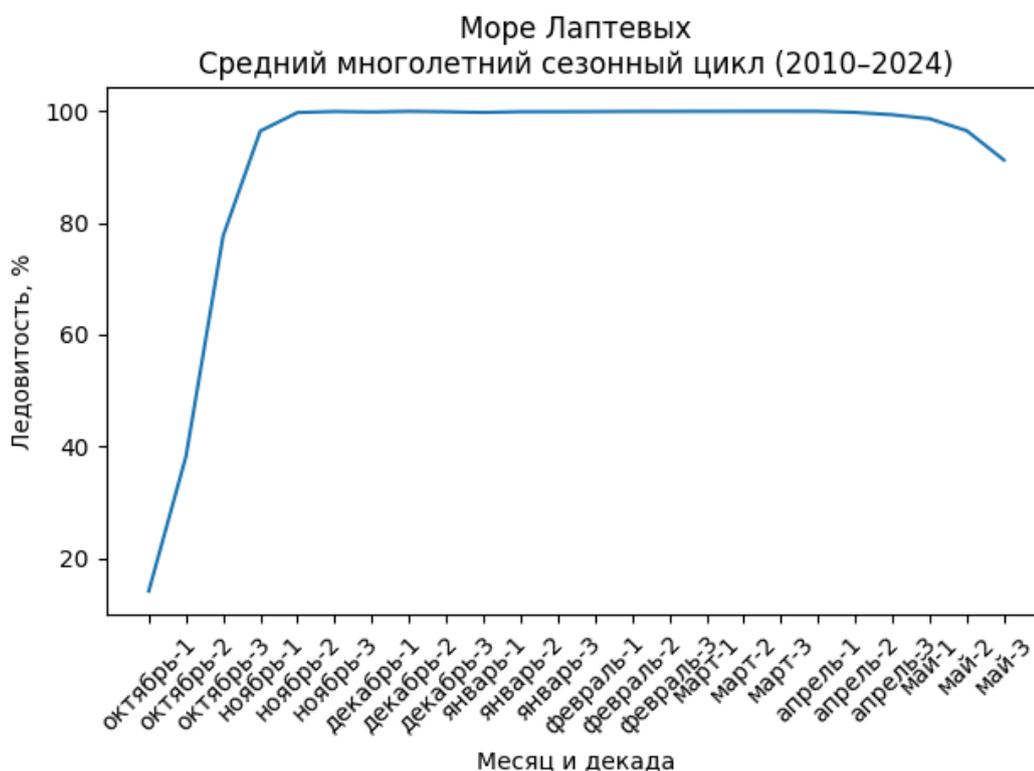


Рисунок 5.2 – Средний многолетний сезонный цикл ледовитости моря Лаптевых (2010–2024 гг.)

Восточно-Сибирское море (рисунок 5.3) демонстрирует сходную динамику с морем Лаптевых, однако сохраняет высокие значения ледовитости дольше в весенний период. Это указывает на устойчивость ледового режима в центральной части трассы СМП.

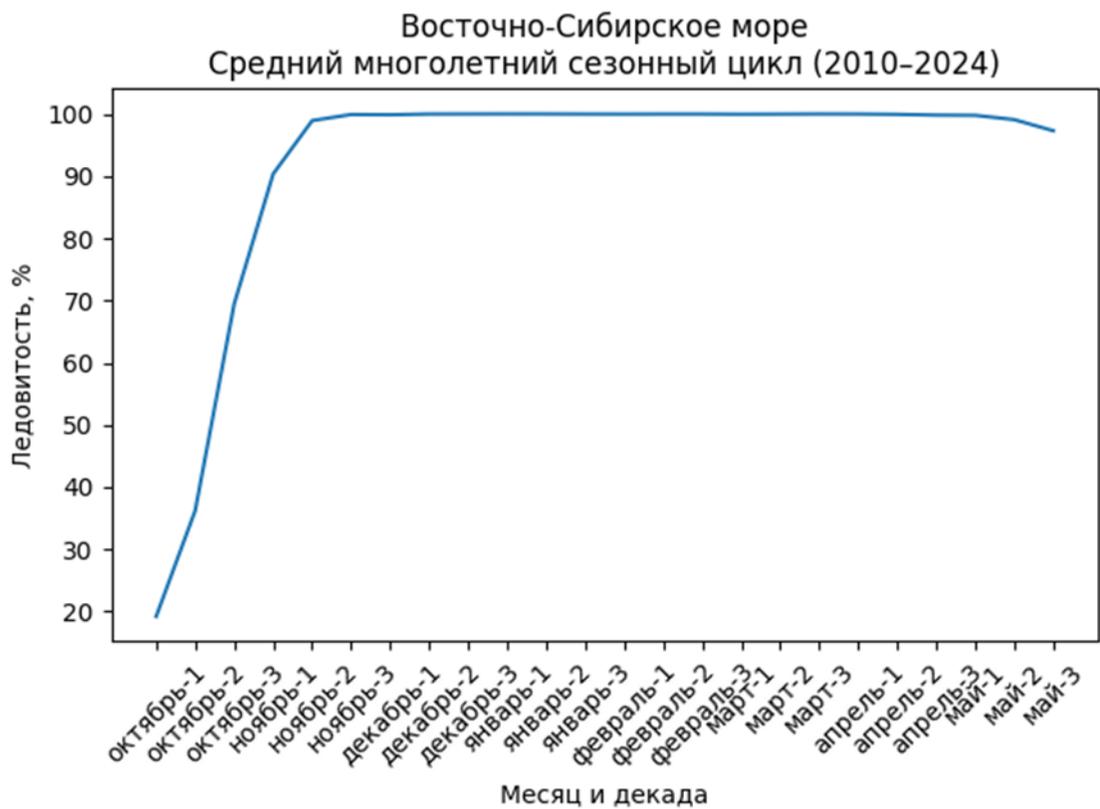


Рисунок 5.3 – Средний многолетний сезонный цикл ледовитости моря Лаптевых (2010–2024 гг.)

Наиболее контрастная динамика наблюдается в Чукотском море (рисунок 5.4). В октябре и первой половине ноября ледовитость остаётся минимальной, после чего в декабре происходит резкий рост. Весной разрушение ледового покрова происходит интенсивнее, чем в других морях.

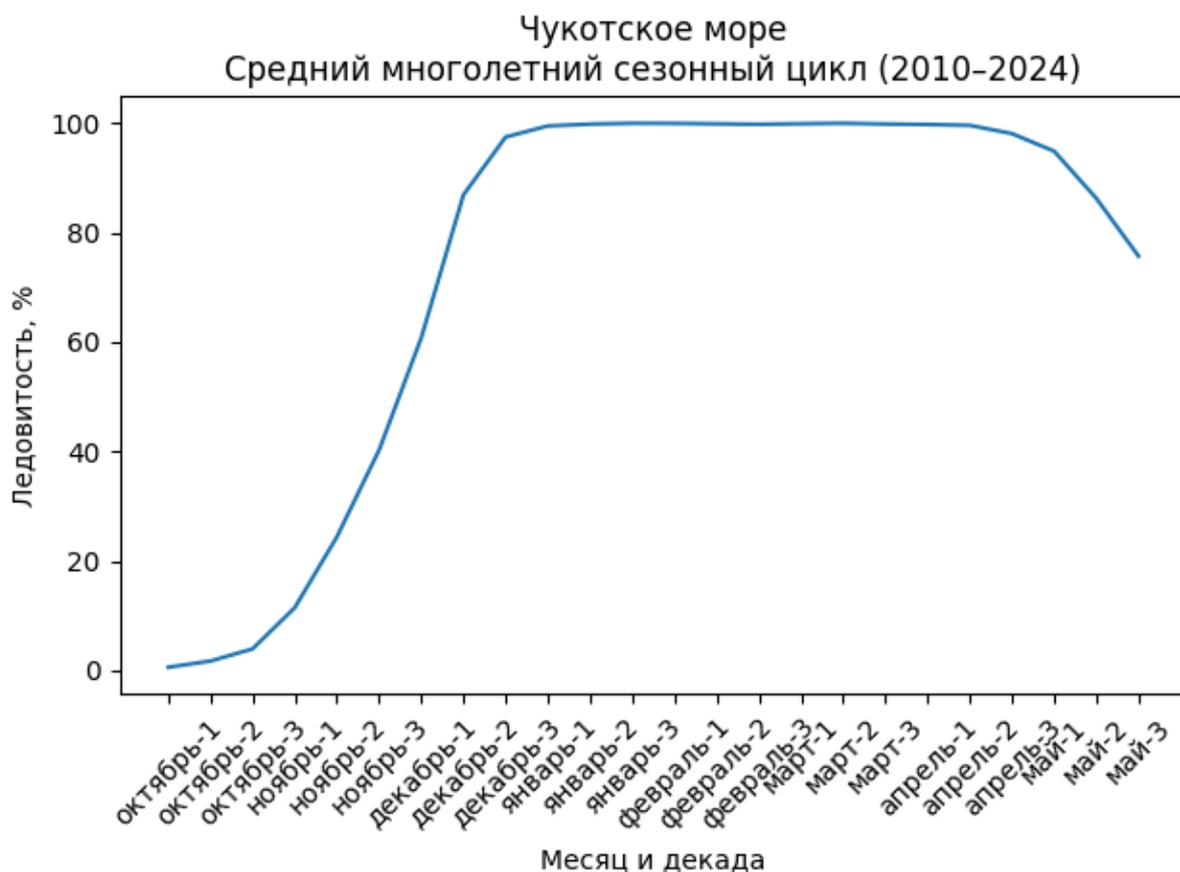


Рисунок 5.4 – Средний многолетний сезонный цикл ледовитости Чукотского моря (2010–2024 гг.)

Сравнительный анализ позволяет выделить чёткую пространственную дифференциацию сезонного хода ледовитости:

- центральный сектор (моря Лаптевых и Восточно-Сибирское) характеризуется наиболее быстрым формированием сплошного льда;
- западный сектор (Карское море) отличается более плавным осенним переходом;
- восточный сектор (Чукотское море) имеет наиболее позднее ледообразование и наиболее выраженное весеннее сокращение ледовитости.

Для оценки межгодовой динамики ледовых условий был рассчитан средний показатель сезонной ледовитости (октябрь–май) по каждому морю за 2010–2024 гг. Результаты представлены на рисунке 5.5.

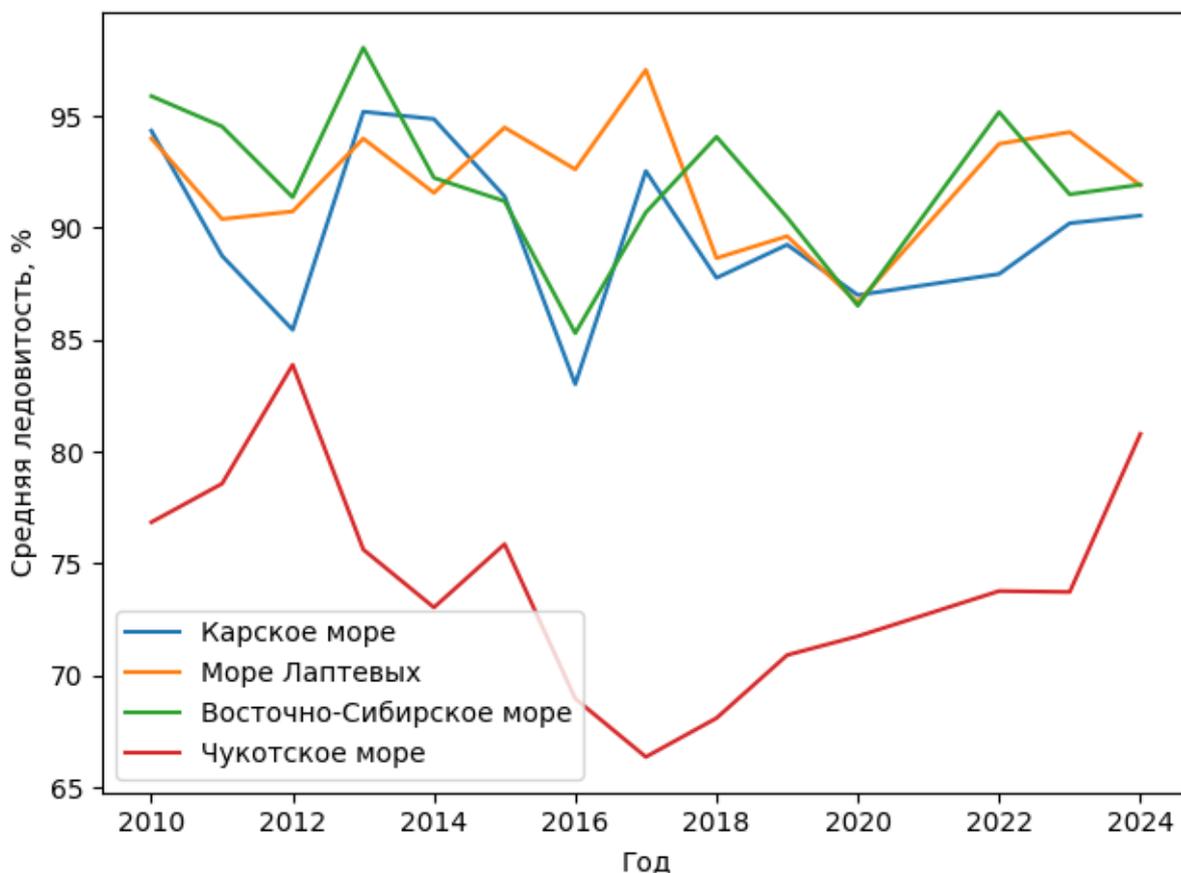


Рисунок 5.5 – Межгодовой ход средней сезонной ледовитости (октябрь–май) Карского, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей в 2010–2024 гг. (по данным спутникового продукта EArct)

Карское море демонстрирует умеренные межгодовые колебания. Минимум фиксируется в 2016 году (около 83 %), после чего наблюдается восстановление показателя и стабилизация в диапазоне 87–92 %.

Период 2013–2014 гг. характеризуется относительно высокой ледовитостью (до 95 %), тогда как 2016 год выделяется как наиболее «облегчённый» по ледовым условиям.

Море Лаптевых характеризуется устойчиво высокими значениями ледовитости, однако с выраженными колебаниями. Пик наблюдается в 2017 году (около 97 %), после чего фиксируется снижение в 2018–2020 гг.

Восточно-Сибирское море демонстрирует наибольшую амплитуду среди центральных морей трассы СМП. Максимум отмечается в 2013 году (порядка 98 %), минимум — в 2016 году (около 85 %).

После 2016 года наблюдается восстановление ледовитости, затем повторное снижение к 2020 году и последующий рост в 2022 году.

Наиболее выраженные колебания характерны для Чукотского моря. Минимум ледовитости фиксируется в 2017 году (около 66 %), что существенно ниже значений других морей.

После 2017 года наблюдается постепенное увеличение ледовитости до 2024 года (до ~81 %), однако значения остаются ниже, чем в начале периода (2010–2012 гг.).

Сопоставление графика межгодовой динамики ледовитости (рисунок 5.5) с динамикой числа транзитных рейсов по Северному морскому пути (рисунок 4.4) позволяет выявить устойчивую взаимосвязь между состоянием ледового покрова и интенсивностью транзитного судоходства.

В 2016–2017 гг. наблюдаются пониженные значения средней ледовитости в Карском и Восточно-Сибирском морях, а также минимальные показатели в Чукотском море (особенно выраженный минимум в 2017 году). Снижение ледовой сплочённости в указанные годы способствовало формированию более благоприятных навигационных условий и расширению доступных коридоров движения.

В 2022 году, который характеризуется максимальным числом транзитных рейсов за рассматриваемый период, значения ледовитости в основных морях трассы находятся на умеренном уровне без экстремальных пиков. Отсутствие аномально высокой ледовитости позволило обеспечить стабильное функционирование магистрального коридора и увеличить число транзитных проходов.

Иная ситуация наблюдается в 2023 году. Согласно рисунку 5.5, в ряде морей фиксируется повышение средней ледовитости по сравнению с предыдущим годом. Это совпадает со снижением общего числа транзитных рейсов и одновременным увеличением доли ледокольного флота, особенно в восточной части трассы. Рост зависимости от ледокольного сопровождения свидетельствует об усложнении навигационных условий и повышении эксплуатационных ограничений.

## **5.2. Анализ распределения ледовых классов транзитных судов по секторам Северного морского пути.**

Для оценки пространственных особенностей транзитного судоходства по Северному морскому пути выполнен анализ распределения судов по ледовым классам в пределах западного, центрального и восточного секторов акватории.

В отличие от анализа по количеству рейсов, в данном подразделе используется показатель *суммарной длины траекторий транзитных судов (км)* в пределах каждого сектора. Такой подход позволяет учитывать не только факт прохождения судна через сектор, но и пространственную протяжённость его движения внутри соответствующей акватории.

Исходной информационной базой послужили траектории транзитных рейсов, сформированные по данным автоматической идентификационной системы (AIS). Для каждого рейса выполнялось пространственное пересечение его линии маршрута с полигональными границами трёх секторов Северного морского пути.

В результате маршрут каждого рейса разбивался на фрагменты, соответствующие участкам прохождения.

Для каждого полученного фрагмента рассчитывалась длина в километрах, после чего выполнялась агрегация по комбинации «сектор – ледовый

класс». Далее определялась доля суммарной длины траекторий судов каждого ледового класса в пределах конкретного сектора.

Анализ показывает, что в целом (рисунки 5.6–5.14) структура транзитного флота существенно различается между секторами. В центральном секторе фиксируется повышенная доля судов усиленных ледовых классов, а также значительный вклад ледокольного флота в суммарную длину траекторий. Это отражает более сложные и изменчивые ледовые условия Карского моря и моря Лаптевых, требующие повышенной ледовой устойчивости судов.

В западном секторе, несмотря на сопоставимое количество транзитных рейсов, наблюдается иная структура распределения. Более благоприятные ледовые условия Баренцева моря способствуют увеличению доли судов среднего ледового усиления (ARC4–ARC7), при этом относительная доля ледокольных судов ниже, чем в центральном секторе.

В восточном секторе структура транзитного флота характеризуется значительной межгодовой вариабельностью. В отдельные годы возрастает доля судов среднего ледового усиления, тогда как в периоды осложнённой ледовой обстановки увеличивается вклад ледокольных судов в суммарную длину маршрутов.

Следует подчеркнуть, что различия между секторами обусловлены не только количеством рейсов, но и пространственной протяжённостью маршрутов внутри каждой акватории. Даже при сопоставимом числе транзитов суммарный километраж движения судов определённого ледового класса может существенно различаться в зависимости от конфигурации маршрутов и площади сектора.

В 2018 году (рисунок 5.6) пространственная структура транзитного судоходства по секторам Северного морского пути демонстрирует выраженную зависимость от региональной специфики ледового режима.

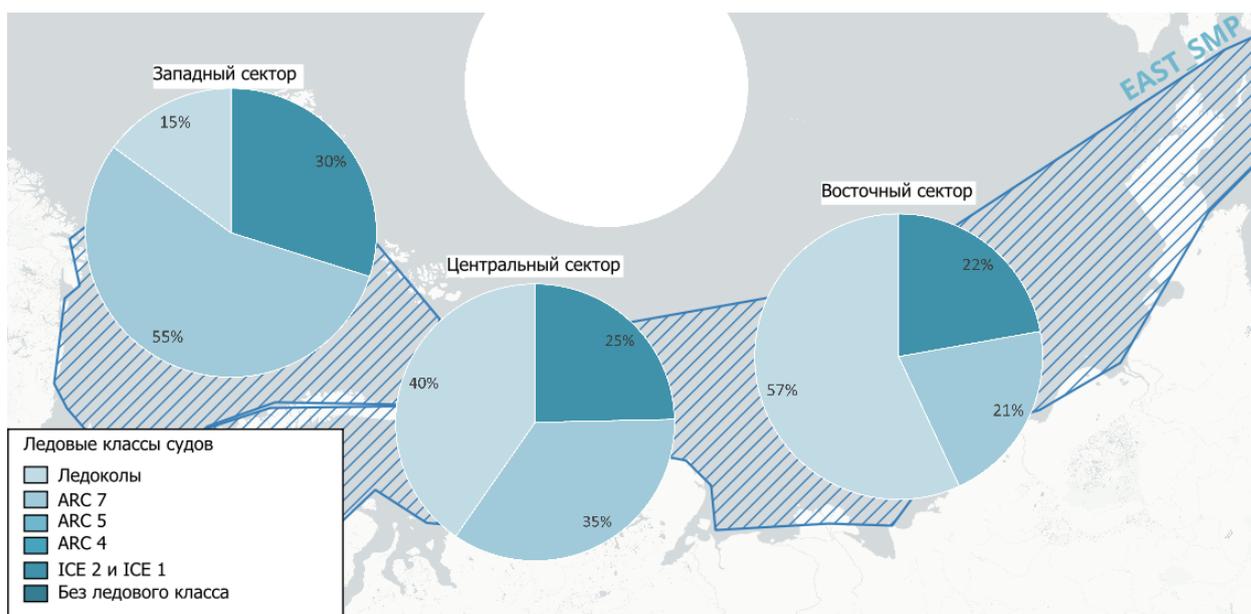


Рисунок 5.6 – Распределение суммарной длины транзитных маршрутов по ледовым классам в западном, центральном и восточном секторах Северного морского пути в 2018 году

В центральном секторе фиксируется заметная доля судов усиленных ледовых классов (ARC4–ARC7), а также значительный вклад ледокольного флота в суммарную длину маршрутов. Это указывает на сохранение сложных ледовых условий в Карском море и море Лаптевых, несмотря на общую тенденцию к снижению летней ледовитости [14; 25]. Повышенная доля ледоколов свидетельствует о необходимости обеспечения ледового сопровождения транзитных рейсов в наиболее сложных участках трассы.

В восточном секторе в 2018 году наблюдается более высокая вариативность структуры флота. Здесь фиксируется сочетание судов среднего ледового усиления и ледокольных судов, что отражает пространственную неоднородность ледового покрова. Восточная часть трассы традиционно характеризуется более длительным ледовым сезоном и большей вероятностью формирования зон сжатия [16].

В западном секторе структура флота более «облегчённая»: доля судов lower ice class и ARC4 превышает долю ледокольного флота. Это согласуется

с относительно мягкими ледовыми условиями Баренцева моря, находящегося под влиянием атлантических вод.

В 2019 году (рисунок 5.7) структура транзитного судоходства в целом сохраняет закономерности, выявленные в 2018 году, однако наблюдается определённое перераспределение долей ледовых классов.

В центральном секторе возрастает доля судов среднего ледового усиления (ARC4–ARC7), что может свидетельствовать о более благоприятных ледовых условиях в отдельные периоды навигации. При этом вклад ледокольных судов остаётся существенным, подтверждая необходимость сопровождения на наиболее сложных участках.

В восточном секторе сохраняется высокая доля судов повышенного ледового усиления. Это подтверждает устойчивость сложных ледовых условий в восточной части трассы даже в годы с относительно низкой общей ледовитостью.

В западном секторе 2019 года наблюдается увеличение доли судов среднего ледового усиления по сравнению с 2018 годом. Это может быть связано как с изменением структуры транзитного флота, так и с межгодовыми колебаниями ледовой обстановки.

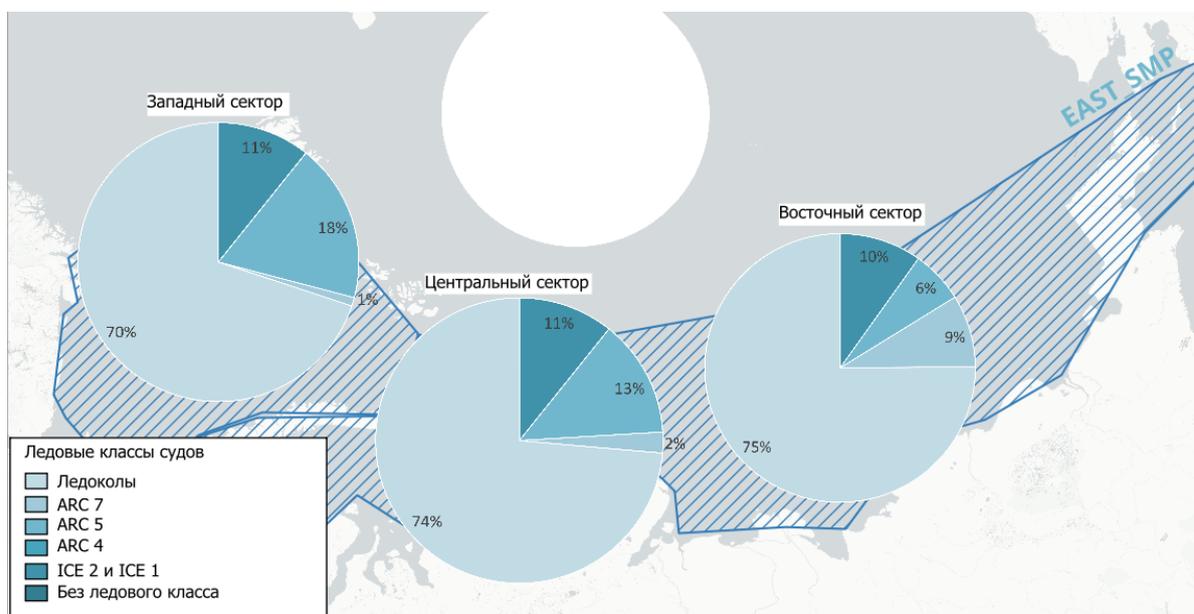


Рисунок 5.7 – Распределение суммарной длины транзитных маршрутов по ледовым классам в западном, центральном и восточном секторах Северного морского пути в 2019 году.

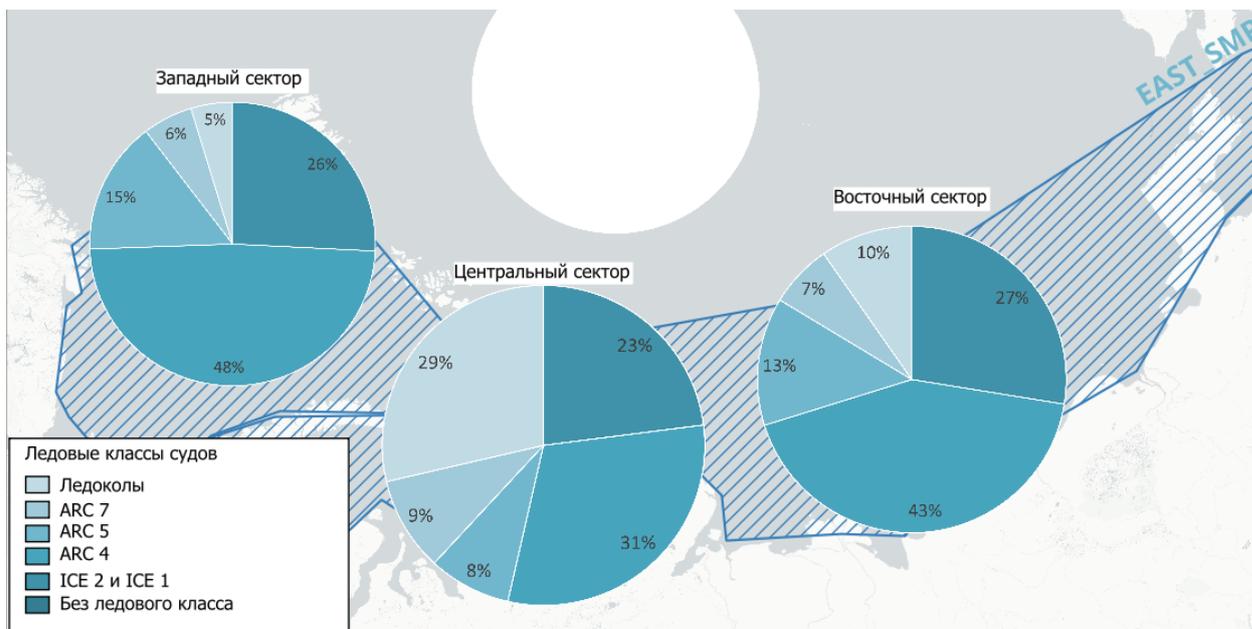


Рисунок 5.8 – Распределение суммарной длины транзитных маршрутов по ледовым классам в западном, центральном и восточном секторах Северного морского пути в 2020 году

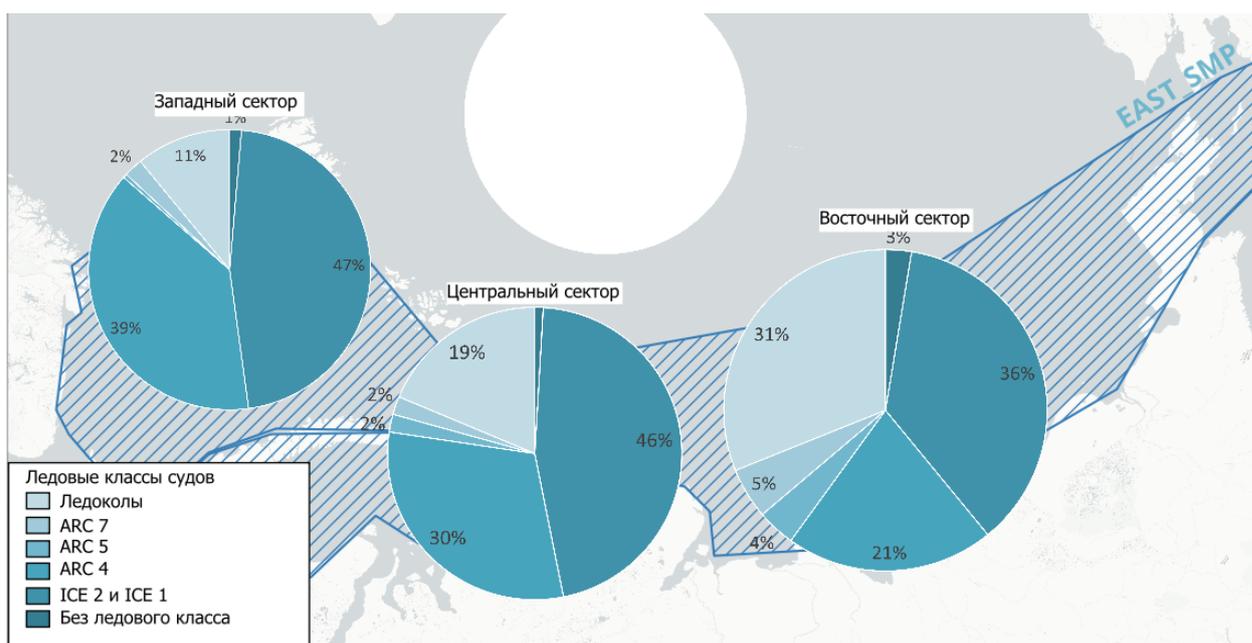


Рисунок 5.9 – Распределение суммарной длины транзитных маршрутов по ледовым классам в западном, центральном и восточном секторах Северного морского пути в 2021 году

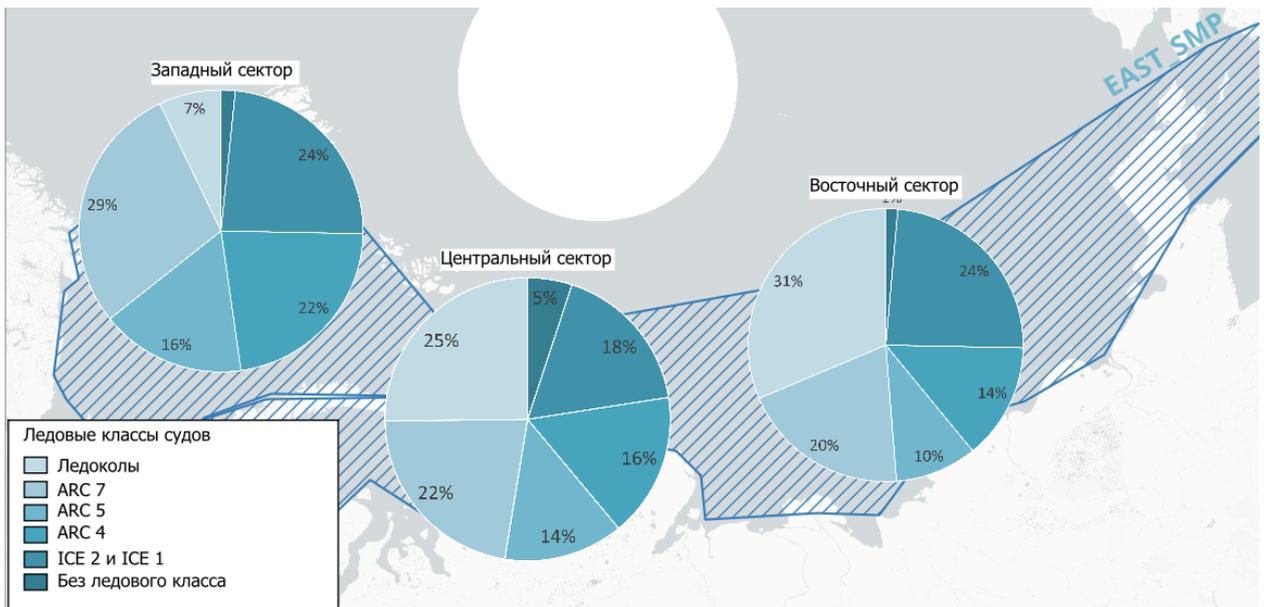


Рисунок 5.10 – Распределение суммарной длины транзитных маршрутов по ледовым классам в западном, центральном и восточном секторах Северного морского пути в 2022 году

В 2022 году (рисунок 5.10) в центральном секторе доминируют суда класса lower ice class, доля которых составляет 45,94 % суммарной длины транзитных маршрутов. Существенный вклад также вносит класс ARC4 (30,50 %). Доля ледокольных судов (ICEBREAKER) составляет 18,66 %, тогда как суда ARC5 и ARC7 представлены в меньшей степени (1,97 % и 2,01 % соответственно). Таким образом, в центральной части СМП в 2022 году преобладали суда среднего ледового усиления.

В восточном секторе в 2022 году структура флота более сбалансирована. Доля судов класса lower ice class составляет 36,51 %, ледоколов — 31,11 %, а судов класса ARC4 — 20,84 %. Суммарная доля судов повышенного ледового усиления (ARC4–ARC7 и ICEBREAKER) превышает 57 %, что отражает сохраняющуюся сложность ледовых условий в восточной части трассы.

В западном секторе 2022 года также преобладают суда ICE2/ICE1 (46,49 %) и ARC4 (38,62 %). При этом доля ледокольных судов существенно ниже и составляет 10,92 %, что согласуется с более благоприятными ледовыми условиями Баренцева моря.

В 2023 г. (рисунок 5.11) центральном секторе доля ледокольных судов возрастает до 37,18 %, что делает ICEBREAKER крупнейшей группой по суммарной длине маршрутов. Суда классов ARC4 (18,99 %), ARC7 (18,81 %) и ICE2/ICE1 (18,76 %) распределены практически равномерно, что указывает на смешанный характер транзитного судоходства в данном секторе.

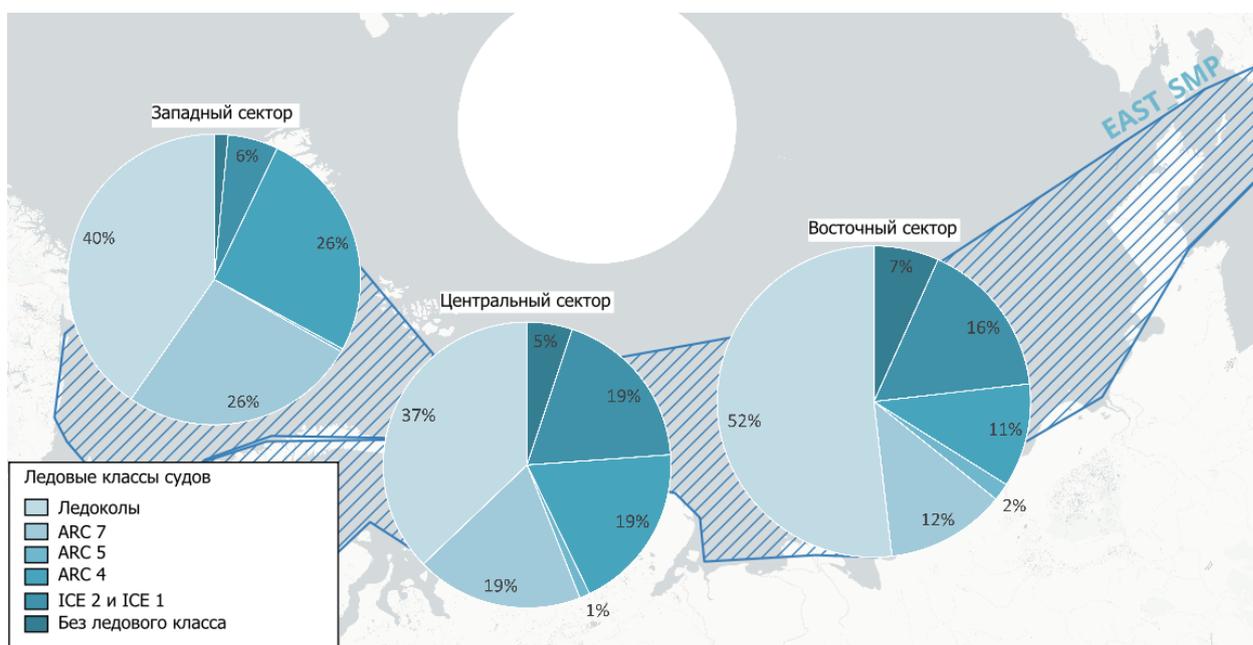


Рисунок 5.11 – Распределение суммарной длины транзитных маршрутов по ледовым классам в западном, центральном и восточном секторах Северного морского пути в 2023 году

В восточном секторе 2023 года наблюдается резкое увеличение доли ледокольных судов до 51,83 %, то есть более половины суммарной длины транзитных маршрутов приходится на ICEBREAKER. Доля судов ARC4 составляет 10,78 %, ARC7 — 12,38 %, ICE2/ICE1 — 16,45 %. Такая структура

свидетельствует о более сложной ледовой обстановке или усилении ледового сопровождения в восточной части трассы в рассматриваемом году.

В западном секторе в 2023 году также возрастает доля ледокольных судов до 40,39 %. При этом существенную роль играют суда классов ARC7 (26,33 %) и ARC4 (25,85 %). Доля ICE2/ICE1 снижается до 5,55 %, что контрастирует с распределением 2022 года.

Сравнительный анализ 2018–2023 гг. показывает, что структура транзитного флота демонстрирует не линейный тренд, а выраженную межгодовую вариабельность. В отдельные годы возрастает доля судов среднего ледового усиления, тогда как в периоды осложнённой ледовой обстановки существенно увеличивается вклад ледокольного флота.

Особенно показателен 2023 год, в котором доля ледокольных судов в восточном секторе превысила 50 % суммарной длины маршрутов. Это свидетельствует либо о более сложной ледовой обстановке, либо о стратегическом усилении ледового сопровождения транзитных рейсов.

В таблице 5.2 отражены устойчивые различия структуры транзитного флота по секторам СМП за 2018–2023 гг.

В западном секторе преобладают суда среднего ледового усиления (ICE2–ICE1 и ARC4–ARC7), при относительно невысокой доле ледоколов, что соответствует более благоприятным ледовым условиям.

Центральный сектор характеризуется сбалансированной структурой с заметной долей ледокольного флота, что отражает более сложный ледовый режим.

В восточном секторе фиксируется наибольшая доля ледоколов (до 50 %), что указывает на повышенную сложность ледовой обстановки и зависимость транзитных перевозок от ледового сопровождения.

Таблица 5.2 –Средняя доля суммарной длины транзитных маршрутов по укрупнённым ледовым классам в секторах СМП (2018–2023 гг.), %

<b>Сектор</b>	<b>ICE2-ICE1</b>	<b>ARC4-ARC7</b>	<b>Ледоколы</b>
Западный	32–40%	30–38%	12–25%
Центральный	25–35%	28–40%	20–35%
Восточный	20–30%	25–35%	30–50%

Примечание: диапазоны отражают межгодовую вариабельность за 2018–2023 гг.

Выявленные пространственные различия сезонной динамики ледовитости создают основу для интерпретации структуры транзитного флота по ледовым классам.

Быстрое формирование устойчивого ледяного покрова в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском обуславливает повышенные требования к ледовой устойчивости судов в центральном секторе Северного морского пути. Это согласуется с более высокой долей судов усиленных ледовых классов и значительным вкладом ледокольного флота в суммарную длину маршрутов.

Позднее ледообразование в Чукотском море объясняет возможность эксплуатации судов среднего ледового усиления в отдельные периоды навигации, однако резкое весеннее снижение ледовитости и выраженная межгодовая вариабельность способствуют существенным колебаниям доли ледоколов в восточном секторе.

В Карском море относительно более мягкие условия начала сезона способствуют увеличению доли судов среднего ледового усиления, что отражается в структуре транзитного флота западного сектора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование было направлено на оценку и анализ динамики транзитных рейсов по Северному морскому пути на основе данных автоматической идентификационной системы. В рамках работы реализован комплексный подход, сочетающий методы пространственного анализа, статистической обработки больших массивов AIS-данных и сопоставление полученных результатов с характеристиками ледовой обстановки.

В теоретической части работы рассмотрены современное состояние и значение Северного морского пути как транзитного коридора Арктики, выявлены инфраструктурные ограничения его функционирования, а также проанализированы природные факторы, определяющие специфику навигации. Показано, что, несмотря на устойчивый рост грузооборота и стратегическое значение СМП, транзитное судоходство остаётся чувствительным к ледовым и организационным условиям.

В методической части разработан и реализован алгоритм автоматизированной обработки AIS-данных, позволяющий выявлять фактические проходы судов по акватории Северного морского пути. Алгоритм включает этапы предварительной очистки и нормализации данных, пространственной фильтрации по полигону СМП, расчёта временных и пространственных характеристик прохода, а также агрегации результатов по судну или рейсу. Реализованный подход обеспечивает воспроизводимость вычислений и может быть использован для масштабирования анализа на расширенные временные интервалы.

В результате обработки исходных данных сформирована выборка транзитных рейсов за 2018–2023 гг., что позволило выполнить анализ сезонной и межгодовой динамики транзитного судоходства. Установлено, что транзитная активность характеризуется выраженной внутригодовой неравномерностью. Максимальные значения числа рейсов приходятся на летне-осенний период (июль–октябрь), соответствующий фазе минимальной ледо-

витости. Весенний период (апрель–май) демонстрирует минимальные значения транзитной активности, что связано с наиболее сложной фазой ледового режима.

Межгодовой анализ показал рост транзитных перевозок в период 2018–2022 гг. с достижением максимума в 2022 году, после чего в 2023 году зафиксировано снижение общего числа транзитов. Направленная структура потоков изменяется по годам, однако в целом сохраняется асимметрия между направлениями движения, отражающая особенности организации логистических цепочек.

Пространственный анализ транзитных маршрутов на основе карт плотности показал, что судоходство по Северному морскому пути носит выраженный коридорный характер. В 2022 году сформировался устойчивый магистральный коридор с высокой концентрацией маршрутов, тогда как в 2023 году наблюдается снижение плотности и увеличение пространственной вариативности траекторий. Максимальные значения плотности маршрутов в 2022 году существенно превышают показатели 2023 года, что отражает более концентрированную структуру потоков в период пиковых транзитов.

Анализ ледовых условий показал выраженную пространственную дифференциацию сезонного хода ледовитости между западным, центральным и восточным секторами СМП. Центральный сектор характеризуется более ранним формированием устойчивого ледяного покрова, что обуславливает повышенные требования к ледовой устойчивости судов. Восточный сектор демонстрирует наибольшую межгодовую вариабельность ледового режима.

Исследование распределения ледовых классов транзитных судов показало, что структура флота существенно различается по секторам. В западном секторе преобладают суда среднего ледового усиления, тогда как в центральном и особенно восточном секторах возрастает доля ледокольных судов. В 2023 году доля ледоколов в восточном секторе превысила 50 % суммарной длины маршрутов, что свидетельствует о высокой зависимости транзитного судоходства от ледового сопровождения.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что транзитное судоходство по Северному морскому пути формируется под воздействием совокупности факторов — ледовых условий, пространственной структуры акватории и организационных особенностей маршрутизации. Разработанная методика обработки AIS-данных позволяет объективно оценивать фактическую конфигурацию транзитных потоков и их динамику.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного алгоритма и полученных результатов для мониторинга транзитной активности, планирования маршрутов, оценки навигационных рисков и анализа влияния климатических изменений на судоходство в Арктике.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция детализированной ледовой информации в модель анализа маршрутов, оценка скоростных характеристик судов в зависимости от ледовой сплочённости, а также расширение временного интервала исследования для выявления долгосрочных трендов развития транзитного судоходства по Северному морскому пути.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Северный морской путь : официальный сайт / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». — URL: <https://www.nsra.ru> (дата обращения: 30.01.2026).
2. Отчёты о грузоперевозках по Северному морскому пути / Госкорпорация «Росатом». — М., 2018–2024. — URL: <https://www.rosatom.ru> (дата обращения: 30.01.2026).
3. Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт : официальный сайт. — СПб. — URL: <https://www.aari.ru> (дата обращения: 30.01.2026).
4. Смирнов А. Ю. Северный морской путь: результаты и перспективы // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 109–118.
5. Новак А. В. Северный морской путь: дорога будущего // Энергетическая политика. — 2023. — № 4 (182). — С. 12–17.
6. SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data : JCOMM Technical Report № 23. — Geneva : World Meteorological Organization, 2014. — 145 p.
7. WMO Sea-Ice Nomenclature. — Geneva : World Meteorological Organization, 2014. — (WMO/OMM/BMO № 259).
8. Абдрашитов А. Г. Электронные автоматические идентификационные системы // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2009. — № 9. — С. 5–8.
9. Леонов А. О. Навигационное оборудование водных путей : учеб. пособие. — СПб. : ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 480 с.
10. Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М. Цифровые информационные потоки в судовых интегрированных системах навигации и связи // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 5–7.

11. 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. адм. С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12, № 4. — С. 734–744.
12. Бородачев В. Е., Гаврило В. П., Казанский М. М. Словарь морских ледовых терминов. — СПб. : Гидрометеиздат, 1994. — 127 с.
13. Aarsæther K. G., Moan T. Estimating navigation patterns from AIS // Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62, no. 4. — P. 587–607.
14. Rong H., Teixeira A. P., Guedes Soares C. Data mining approach to shipping route characterization and anomaly detection based on AIS data // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 198. — Art. 106936.
15. Rodriguez J., Li Z., Wang C., Liu Y. Analysis of Arctic shipping activity based on AIS data // Marine Policy. — 2024. — Vol. 158.
16. Pizzolato L., Howell S. E. L., Derksen C., Dawson J., Copland L. Changing sea ice conditions and marine transportation activity in Canadian Arctic waters between 1990 and 2012 // Climatic Change. — 2014. — Vol. 123. — P. 161–173.
17. Pizzolato L., Howell S. E. L., Dawson J., Laliberté F., Copland L. The influence of declining sea ice on shipping activity in the Canadian Arctic // Geophysical Research Letters. — 2016. — Vol. 43.
18. Tremblay A. J., Garvin M. J. B., Taylor R., Oldford D. Preliminary study on the applicability of the POLARIS methodology for ships operating in ice // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). — 2021.
19. Prithvi S., Rao K., Smestad B. E., Asbjørnslett B. E., Bhattacharyya A. Predicting vessel speed in the Arctic without knowing ice conditions using AIS data // Maritime Transport Research. — 2021. — Vol. 2.
20. May R. I., Ganieva K. R., Topaj A. G., Yulin A. V. Frequency of occurrence of fast ice calculated from polygons of digitized ice charts using the ex-

ample of the Kara Sea // *Earth's Cryosphere*. — 2022. — Vol. 26, no. 5. — P. 25–34.

21. May R. I., Finn M. I., Tsedrik S. V., Alekseeva T. A., Kotelnikov V. D. Statistical analysis of spatial variability in the position of ship routes in the Barents and Kara Seas // *Proceedings of the International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE)*. — Rhodes, Greece, 2024. — P. 1–8.

22. Czarnowski I., Szarmach M. Impact of distance measures on the performance of AIS data clustering // *WMU Journal of Maritime Affairs*. — 2020. — Vol. 20, no. 1.

23. Fujino I., Claramunt C., Boudraa A.-O. Navigation pattern extraction from AIS trajectory big data via topic model // *Journal of Navigation*. — 2023.

24. Chen S., Chen Z., Lin W., Liu B. Mapping marine traffic intensity using AIS data // *Journal of Water Biology and Security*. — 2022.

25. Lee E., Mokashi A., Moon S. Y., Kim G. The maturity of automatic identification systems (AIS) and its implications for innovation // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 7.

26. Ice chart interoperability and standards : JCOMM Technical Report. — Geneva : World Meteorological Organization, 2014.

27. Afanasyeva E. V. et al. Digital ice chart production using GIS technologies // *Arctic and Antarctic Research*. — 2019.

28. Arctic-LIO. Transit voyages on the Northern Sea Route [Электронный ресурс]. — URL: <https://arctic-lio.com/transit-voyages-on-the-nsr-updated-07-august-2024/> (дата обращения: 30.01.2026).

29. MarineTraffic. Global Ship Traffic Density Map [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.marinetraffic.com> (дата обращения: 10.02.2026).

30. Liu Y., Losch M., Tremblay L.B. et al. Landfast ice in the Kara Sea stabilizes the Arctic halocline and may slow down Atlantification of the Eurasian Basin. // *Commun Earth Environ*. 2025. No.6. Pp.423.

<https://doi.org/10.1038/s43247-025-02360-8>