

ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС АНАЛИЗА НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ ДЛЯ ПОИСКА И ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ СУДОВ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ

Шарапова Е.Р.

ГК Прометей, Санкт-Петербург, Россия
catherine.charapova@gmail.com

Аристов А.А.

*Институт аэрокосмических приборов и систем,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения», Санкт-Петербург, Россия*
aristandrey@mail.ru

Смолий А.А.

Независимый исследователь, Санкт-Петербург, Россия
artem.smoliy.00000000@gmail.com

Аннотация. Предлагается информационный комплекс для анализа навигационных параметров Северного морского пути. Система выполняет прогнозирование состояния маршрута (толщину льда, свободные проходы, температуру, протяженность) с использованием диффузных нейронных сетей и данных со спутниковой орбитальной группировки. Это повысит экономическую эффективность цепочек поставок и безопасность судоходства.

Ключевые слова: Северный морской путь, оптимизация цепочек поставок, созвездие спутников, диффузионная модель, радиointерферометр, спектрометр, пространственно-временное прогнозирование.

Введение

Северный морской путь (СМП) – судоходный маршрут в Российской Арктике. До начала XX века использовалось название Северо-Восточный проход. Проходит вдоль северных берегов России по морям Северного Ледовитого океана (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и Берингово), соединяет в единую транспортную систему европейские и дальневосточные порты РФ, а также устья судоходных сибирских рек. Длина СМП от пролива Карские Ворота (у архипелага Новая Земля) до бухты Провидения (в районе Берингова пролива) – 5,6 тыс. км. Маршрут через СМП почти в два раза короче других морских путей из Европы на Дальний Восток: так, от Санкт-Петербурга до Владивостока через Суэцкий канал – 23 200 км, а по СМП – 14 280 км (на 40% короче). Продолжительность навигации составляет два-четыре месяца, использование ледоколов позволяет сделать ее круглогодичной. СМП был открыт для международного судоходства с 1991 года.

Для уменьшения рисков и повышения экономической эффективности эксплуатации Северного морского пути предлагается использовать единый информационный комплекс анализа навигационных параметров транспортного пути. Рассматриваемая в настоящей работе система позволит решить задачу пространственно-временного прогнозирования состояния транспортного маршрута и отследить интересующие параметры. К таким параметрам относятся: толщина льда, расположение свободных проходов, температура, протяженность доступных маршрутов.

Для решения задачи пространственного и временного прогнозирования предлагается использовать диффузные нейронные сети. На основании доступной информации о состоянии системы (например, показания метеостанций, результаты проведения научных экспедиций) возможно сформировать единое поле значений. При этом необходимо обеспечить возможности дополнения базы данных, дообучения моделей искусственного интеллекта, подключения новых источников информации.

Для получения значений климатических и погодных параметров на всей протяженности северного морского пути предлагается использовать орбитальную группировку спутников. Это особенно актуально в настоящее время, так как наблюдается тенденция к уменьшению массо-габаритных характеристик космических аппаратов. Использование большого количества малых космических аппаратов, объединенных в созвездия, позволит увеличить площадь покрытия территории, повысить разрешение получаемых данных, а также обеспечить большее количество измерений.

1. Объемы грузоперевозок

В последние десять лет грузоперевозки по СМП демонстрируют устойчивый рост, что обусловлено активным освоением арктических ресурсов и развитием инфраструктуры. Ниже представлены ключевые данные по объемам перевозок, типам судов, ледокольному сопровождению и периодам судоходства. Для сравнения годовой грузопоток Суэцкого канала составляет около 1200-1500 млн тонн.

Таблица 1. Объемы грузоперевозок по СМП (2013–2024 гг., а также планы до 2035 года) [1, 2]

Год	Объем перевозок (млн т)	Разница год к году (%)	Прогноз (млн т)
2013	3,93		
2014	3,98	1.27%	
2015	5,39	35.43%	
2016	7,27	34.88%	
2017	10,7	47.18%	
2018	19,7	84.11%	
2019	31,5	59.90%	
2020	32,98	4.70%	
2021	34,87	5.73%	
2022	34,12	-2.15%	
2023	36,25	6.24%	
2024	37,3	2.89%	60
2030		394.73%	150
2035		46.67%	220

2. Преимущества Северного Морского пути

1. Экономия времени за счет сокращения длины рейса [3];
2. Экономия денег: на топливе и стоимости фрахта судна (если не учитывать, что стоимость строительства подходящих судов на 70-80% выше обычных) [4];
3. Нет платежа за проход судна;
4. Нет очередей;
5. Нет риска нападения пиратов.

3. Недостатки Северного Морского пути

1. Высокая зависимость от метеоусловий и ледовой обстановки.
2. Экономия расстояния не позволяет значительно сократить стоимость перевозок в связи с рядом причин:

- высокая стоимость ледокольного сопровождения [5];
- необходимость использования судов ледового класса, фрахт которых существенно дороже (на 70-80% по некоторым оценкам) по сравнению со стандартными судами, используемыми на традиционных маршрутах;
- повышенные страховые премии;
- затраты на более дорогое экологически чистое топливо [6];
- возможная необходимость снижения скорости движения в ледовых условиях;
- ограниченный сезон навигации и непредсказуемость ледовой обстановки, что ведет к рискам задержек и непредсказуемости расписания;
- дополнительные расходы на специальную подготовку экипажей.

3. Арктические порты требуют комплексной модернизации: от ремонта ветхих зданий до углубления дноуглубительных работ.

4. Возможная угроза экосистеме Арктики.

Решение проблем СМП важно для развития природо-ресурсного потенциала страны, а именно: 25% мировых запасов углеводородов, 50% российских запасов драгметаллов, 90% российских запасов алмазов, 50% российских запасов хрома и марганца, до 15% российского вылова рыбы. Крупнейшие компании, участвующие в развитии Севморпути: АЕОН, «Росатом», «Роснефть», «Новатэк», «Газпромнефть», «Норникель», «ГДК «Баимская».

Другой важной составляющей этого транспортного коридора, помимо обслуживания добычи полезных ископаемых, идёт Северный завоз более чем для 20 млн человек на Крайнем Севере. Для стимулирования перевозок по Севморпути внутри России в 2022 году была запущена регулярная каботажная линия между Мурманском и Камчаткой с субсидированным тарифом. И если первый такой рейс был загружен всего на 15 процентов, то второй – уже на 90.

В планах компании Новатэк – транспортировка на азиатские рынки 80 % произведенного ей СПГ на проекте «Арктик СПГ 2».

4. Проблемы развития Северного Морского пути

1. Тяжелые природные условия и ограниченные сроки навигации.

1.1. Ледовые условия. Даже в летние месяцы температура воды в море Лаптевых редко поднимается выше 1 °С, что обуславливает устойчивое формирование многолетних ледовых образований. Эти массивы льда, сохраняющиеся на протяжении нескольких сезонов, существенно осложняют судоходную деятельность, ограничивая как физическую проходимость маршрутов, так и временные рамки навигации. Более того, присутствие торосов и дрейфующих ледовых полей требует привлечения специализированного ледокольного флота и постоянного мониторинга ледовой обстановки.

1.2. Сезонность. Навигационный период в акватории моря Лаптевых отличается высокой степенью вариативности и напрямую зависит от географической долготы: если в западных районах он может достигать пяти-шести месяцев, то к востоку от Новосибирских островов судоходство зачастую ограничено тремя месяцами в году. Такая неравномерность связана не только с термическими характеристиками, но и с циркуляцией ледяных масс, что делает логистическое планирование в регионе особенно сложным.

1.3. Прогнозирование. Краткосрочные ледовые прогнозы (до 5 суток) дают достаточно точную картину, с точностью около 93%, что позволяет эффективно планировать судоходство и проводить суда по намеченному маршруту. Однако с долгосрочными прогнозами всё сложнее – их точность составляет около 85%, что для таких условий недостаточно, чтобы точно спланировать навигацию на весь сезон. Это значит, что на основе таких прогнозов невозможно построить стабильное расписание на сезон, так как ледовая обстановка и погодные условия могут измениться гораздо быстрее, чем предсказывают модели. Что в свою очередь сулят большими издержками [7].

2. Зависимость от атомных ледоколов и связанные с ними ограничения.

2.1. Экономическая составляющая эксплуатации. Современные атомные ледоколы, такие как «Арктика», «Сибирь» и «Урал», играют ключевую роль в обеспечении круглогодичной судоходной доступности акваторий Северного морского пути. Однако их использование сопряжено с существенными эксплуатационными затратами: по оценкам специалистов, стоимость работы одного атомного ледокола в 3–5 раз превышает аналогичные показатели для дизель-электрических судов ледового класса. Высокие издержки обусловлены как сложностью технического обслуживания ядерной энергетической установки, так и необходимостью постоянного участия обслуживающего персонала повышенной квалификации.

2.2. Технические ограничения при ледовой проводке. На практике проводка судов атомными ледоколами сталкивается с рядом эксплуатационных ограничений. Одним из ключевых факторов является стремительное смерзание ледового канала: при температурных и ветровых условиях арктического региона сформированный канал начинает схватываться уже через 1-3 часа после прохода ледокола. Это обстоятельство требует строгой синхронизации движения каравана и фактически ограничивает его состав пятью судами, сопровождаемыми одним ледоколом.

Дополнительной проблемой является недостаточная ширина прокладываемого канала. Ледоколы текущего поколения формируют судоходный коридор шириной порядка 33–34 метров, что не обеспечивает безопасного прохождения судов типоразмеров Panamax (ширина до 40 м) и Suezmax (до 50 м). В условиях роста интереса к транзитным перевозкам и увеличения тоннажа арктического флота данный параметр становится критическим [8].

С учётом изложенного, в качестве перспективного решения рассматривается ввод в эксплуатацию атомного ледокола нового поколения проекта 10510 «Лидер», строительство которого осуществляется на ССК «Звезда». По проекту судно будет способно формировать канал шириной до 50 метров, что откроет возможность безопасной проводки судов крупнотоннажных классов. Сдача головного ледокола «Россия» планируется в 2027 году, при этом начало его полноценной эксплуатации прогнозируется к 2030 году [9].

3. Малые глубины и необходимость глубоководных маршрутов.

3.1. Традиционные маршруты имеют глубины 10-15 м, которые ограничивают проход судов с осадкой >12 м.

3.2. Альтернативой могут служить высокоширотные маршруты севернее Новосибирских островов (глубины 20–30 м), но они сложнее из-за дрейфующих льдов.

4. Инфраструктурные проблемы.

На сегодняшний день лишь порт Дудинка обладает необходимыми техническими характеристиками для приёма крупнотоннажных судов, включая соответствующую глубину акватории и развитую береговую инфраструктуру. Остальные ключевые порты вдоль маршрута Северного морского пути – в частности, Диксон, Певек и Тикси – требуют масштабной модернизации, без которой их участие в обеспечении стабильного грузопотока остаётся ограниченным.

Несмотря на стратегическое значение проекта подводной волоконно-оптической линии связи «Полярный экспресс», его реализация существенно отстаёт от утверждённого графика. Изначально планировалось завершить строительство к 2026 году, однако по состоянию на начало 2025 года проект не реализован даже наполовину. Участники телекоммуникационного рынка и представители арктических регионов отмечают, что работы тормозятся как по техническим, так и по организационным причинам: сложная логистика, погодные риски, отсутствие необходимой координации между федеральными структурами и подрядчиками. Пробуксовка столь масштабной инициативы ставит под вопрос своевременное обеспечение высокоскоростной связью акватории Северного морского пути. Это, в свою очередь, сохраняет зависимость от спутниковых решений и ограничивает цифровую доступность арктических территорий, несмотря на рост потребностей в передаче данных для мониторинга, навигации и дистанционного зондирования [10].

Дополнительно планируется расширение спутниковой группировки за счёт аппаратов «Гонец» и «Скиф», однако в настоящий момент около 70% данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) по-прежнему закупается у иностранных операторов, что создаёт определённую зависимость от внешних поставщиков [11].

Инфраструктура отстает от необходимого минимального уровня, но запущенные должны улучшить ситуацию к 2030 году. Стоит отметить, что если даже реализация этих проектов будет завершена успешно (в срок, без увеличения бюджета и с сохранением заявленных характеристик), то высока вероятность, что к этому моменту инфраструктура будет вновь отставать от потребности.

Указанные проблемы – изменчивость ледовых условий, недостаточная точность долгосрочных прогнозов и зависимость от ледоколов – требуют высокоточного и оперативного мониторинга в реальном времени. Здесь ключевую роль играют спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), такие как Copernicus (ЕС) и RADARSAT (Канада), обеспечивающие:

- Радиолокационную съемку (SAR) для отслеживания льдов независимо от облачности и полярной ночи,
- Данные сверхвысокого разрешения для детального анализа структуры ледовых полей,
- Регулярное обновление информации (до нескольких раз в сутки), критически важное для корректировки маршрутов.

Например, радарные снимки Sentinel-1 (Copernicus) позволяют выявлять динамику дрейфующих льдов в море Лаптевых, а RADARSAT-2 фиксирует изменения толщины льда с точностью до 10–20 см, что необходимо для прокладки безопасных трасс [12]. Интеграция этих данных с системами навигации судов может сократить зависимость от ледоколов в сезон минимального льдообразования, подтверждая его практическую ценность. Данная платформа сделает судоходство в Арктике более безопасным, прогнозируемым и привлекательным. Подобного продукта в России нет.

5. Архитектура комплекса

Для организации управления судоходством на северном морском пути предлагается использовать единую систему мониторинга и управления. Архитектура системы представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Архитектура системы

В качестве источников информации предлагается использовать данные метеостанций и метеозондов (температура, влажность, давление, направление и скорость ветра, движение циклонов и антициклонов), информацию о положении кораблей с помощью глобальной навигационной спутниковой системы, данные со специализированных космических аппаратов (толщина льда, движение отдельных айсбергов, положение свободных проходов).

Использование большого количества информации позволит повысить качество определения параметров погоды и состояния ледового покрова, определить с большей точностью график движения судов, обеспечить эффективное перемещение транспортного потока. Включение в систему существующих средств анализа погоды, таких как метеорологические станции и данные метеоспутников, позволит снизить затраты на запуск и эксплуатацию системы.

Полученные с сенсоров данные необходимо сохранять на сервере с привязкой ко времени и координатам. На основании этой информации выполняется как первичное обучение модели нейронной сети и настройка алгоритмов, так и дообучение и доработка работающих решений.

Система обработки интегрирует нейросетевые вычислители, показавшие высокую эффективность при решении отдельных типов задач, алгоритмы обработки данных, систему формирования расписания движения кораблей. На основе результатов вычислений транспортная компания получает доступ к актуальной карте доступных маршрутов в реальном времени и с прогнозом до 5 дней, прогнозу погоды на основе комплексной информации, системе расчета оптимального графика движения транспортных кораблей по критерию минимизации затрат на рейс.

Для выполнения поиска оптимального маршрута прохода морских судов предлагается составить карту параметров окружающей среды, оказывающих влияние на безопасность и эффективность морской навигации. При этом необходимо также решить задачу временного прогнозирования модели на длительный промежуток времени. Для формирования маршрута возможно использовать алгоритмы поиска пути с весовой функцией, зависящей от данных на рассматриваемой карте (например, A star).

Типичная логистическая операция достаточно продолжительна. Так, преодолеваемая дистанция составляет порядка 5-10 тысяч километров, а длительность рейса достигает 35-40 дней. Поэтому собранные данные должны покрывать обширную территорию, а также иметь высокое пространственное и временное разрешение.

Оперативный сбор требуемых данных затруднен из-за физических ограничений используемых измерительных приборов, тяжелых погодных условий, трудной доступности региона. Для получения информации о состоянии участков поверхности моря и льдов необходимо использовать спутниковые данные. Однако космические аппараты должны занимать полярные и околополярные орбиты, что требует значительных затрат топлива при выводе спутника в космос.

Для преодоления рассмотренных проблем предлагается использовать метод дополнения (implementation) данных с использованием пространственно-временных диффузионных генеративных моделей (spatio-temporal diffusion). [13].

Диффузионные модели были изначально разработаны для генерации изображений. Однако пространственно-временные диффузионные модели могут экстраполировать и интерполировать практически любые данные, воссоздавая сложные динамики и корреляции. Примером такой модели может быть DYffusion [14]. Модель позволяет восстанавливать полные поля параметров, обеспечивая

реалистичность и статистическую обоснованность сгенерированного дополнения, а также оценку неопределенности на основе вероятностной генерации с помощью интерполятора, осведомленного о времени и прогнозирующей сети, имитирующих соответствующие прямой и обратный процессы стандартных диффузионных моделей.

Диффузионная модель состоит из двух компонентов, а именно прямого процесса диффузии и обратного процесса устранения шумов. Процесс диффузии может быть представлен в виде марковской последовательности [15]:

$$q(x^{1:k} | x^0) = \prod_{k=1}^K q(x^k | x^{k-1}), \quad (1)$$

где k – индекс текущего элемента последовательности; K – количество элементов в последовательности; q – установленный параметр дисперсии, определяющий уровень шума; x – результат диффузионного процесса на соответствующем шаге.

Набор необходимых для анализа параметров окружающей среды может быть представлен в виде:

$$D = \{x_i, y_i, t_i, v_i\}_{i=1}^N, \quad (2)$$

где (x_i, y_i) – пространственные координаты точки наблюдения; t_i – момент времени; $v_i \in \mathbb{R}^d$ – наблюдаемые параметры (толщина льда, температура, свойства верхних слоев территории, температура и другие параметры).



Рис. 2. Прямой процесс диффузии

В каждый момент времени t_i только часть пространственных точек содержит актуальные данные. Для реализации рассматриваемой системы необходимо дополнить поле параметров $v(x, y, t)$ в произвольный момент времени t , используя следующие данные:

- известные значения точек поля в текущий момент времени;
- исторические наблюдения (как за длительный период времени, так и за малое количество предыдущих отсчетов);
- пространственные и временные зависимости рассматриваемых параметров.

Для обучения и практического применения модели нейронной сети необходимо выполнить нормализацию данных и представления информации в единой пространственно-временной сетке с использованием меток пространства и времени.

Также необходимо учесть возможность дополнения данных по следующим причинам:

- получение доступа к уже существующим базам данных (метеорологические базы данных, результаты выполнения научно-исследовательских миссий, журналы наблюдений, связанные параметры из соседних областей пространства);
- ввод в эксплуатацию новых сенсоров (запуск космических аппаратов и зондов, обновление и дополнение метеорологического оборудования на станциях наблюдения);
- формирование новой информации на основе уже существующих данных (реализация новых методов обработки климатических данных, и применение установленных и подтвержденных зависимостей между параметрами на соседних точках поля).

6. Источники данных

Для решения задачи обеспечения навигации на северном морском пути необходимо обеспечить получение качественных данных о параметрах погоды, климата, состояния ледового покрова. В качестве источников данных необходимо использовать различные системы, как уже существующие, так и требующие реализации.

Для сбора информации о погоде вдоль линии побережья предполагается использование метеоданных, полученных с помощью наземных станций, метеозондов и специализированных космических аппаратов (например, National Oceanic and Atmospheric Administration). С помощью указанных систем возможно получить информацию о температуре, влажности, силе и направлении ветра, высоте волн, сезонных изменениях движения воздушных масс, уровня облачности в областях выполнения наблюдений.

Для сбора информации о состоянии ледового покрова предлагается использовать специализированные космические аппараты, оснащенные спектрографами и радиоинтерферометрами.

Использование спектрометра является классическим решением для выполнения задачи дистанционного зондирования Земли. При этом необходимо анализировать излучение в близком и среднем инфракрасных диапазонах [16]. Вода практически полностью поглощает излучение в ближнем инфракрасном диапазоне, что позволяет выделять очертания берегов и идентифицировать даже небольшие водные поверхности (порядка 2-4 га). Снег же отражает большую часть излучения, что ярко выделяется на спектрограмме. Степень поглощения при этом сильно зависит от напитанности снежного покрова водой. Данный метод достаточно хорошо изучен и используется в актуальных миссиях, таких как система «Электро-Л» [17], «Арктика-М» [18], Sentinel-2 [19], Europa Clipper [20].

Использование спектрограмм дает несколько значимых преимуществ. Не требуется установка излучателя, на чувствительный элемент поступает отраженный солнечный свет. Полученные данные могут быть представлены в виде изображений, что удобно для анализа человеком и позволяет применять современные алгоритмы и модели обработки графической информации. Однако при этом трудно анализировать состояние среды под поверхностью (возможно анализировать только небольшую глубину воды на предмет содержания примесей), а также использовать объектив с достаточно большим фокусным расстоянием для анализа отдельных участков поверхности.

Еще одним источником информации могут служить радиоинтерферометры, установленные на спутниках. Данный метод основан на излучении радиосигнала и анализе параметров отраженной электромагнитной волны. Для поиска ледовых объектов на морской поверхности возможно использовать метод определения поверхностного импеданса [21]. Идея заключается в определении изменения импеданса вертикально поляризованной волны при прохождении вдоль поверхности планеты.

$$\delta(h_l) = \frac{1}{\sqrt[4]{(\epsilon_\omega + 1)^2 + (60\lambda\sigma_\omega)^2}} \exp\left(-i \arctg \frac{60\lambda\delta_\omega}{\epsilon_\omega + 1}\right) - i \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) h_l, \quad (3)$$

где h_l – толщина льда; λ – длина электромагнитной волны; δ – поверхностный импеданс моря; ϵ_ω – относительная диэлектрическая проницаемость морской воды; σ_ω – электропроводность пробы соленой воды.

Для выполнения измерений необходимо использовать сигнал с частотой до 1-1.5 ГГц [22]. В этом диапазоне атмосфера прозрачна для излучения. Использование радиоинтерферометра позволяет также определять параметры атмосферы и содержание примесей, пыли, сторонних частиц [23].

Для повышения точности результатов измерений и покрытия больших участков поверхности предлагается использовать рой аппаратов. Однако при этом необходимо с высокой точностью определять положение спутников друг относительно друга. Для решения этой задачи может быть использована глобальная навигационная спутниковая система [24]. Также предлагается использовать лазерный интерферометр для обеспечения точного позиционирования аппаратов друг относительно друга.

Еще одним источником информации являются данные о положении судов, определяемые с помощью глобальной навигационной спутниковой системы. Таким образом, система будет иметь актуальные данные о перемещении судов, что позволит оперативно корректировать маршрут среди льдов, определять загруженность маршрута, эффективно взаимодействовать с ледоколами.

7. Концепция орбитальной группировки

Для сбора данных о состоянии поверхности моря и ледового покрова целесообразно использовать космические аппараты. Они позволяют выполнять мониторинг обширных территорий, обрабатывать и передавать большое количество данных об очень труднодоступных местах, а также использовать специализированное массивное оборудование.

Для увеличения разрешения получаемых данных предлагается использовать околополярную орбиту с эксцентриситетом, близком к единице. Выполнена симуляция движения спутника по орбите с

апогеем 866 км, перигеем 845 км, наклонением 80 градусов. Для проведения симуляции был использован инструмент General Mission Analysis Tool (GMAT) [25]. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

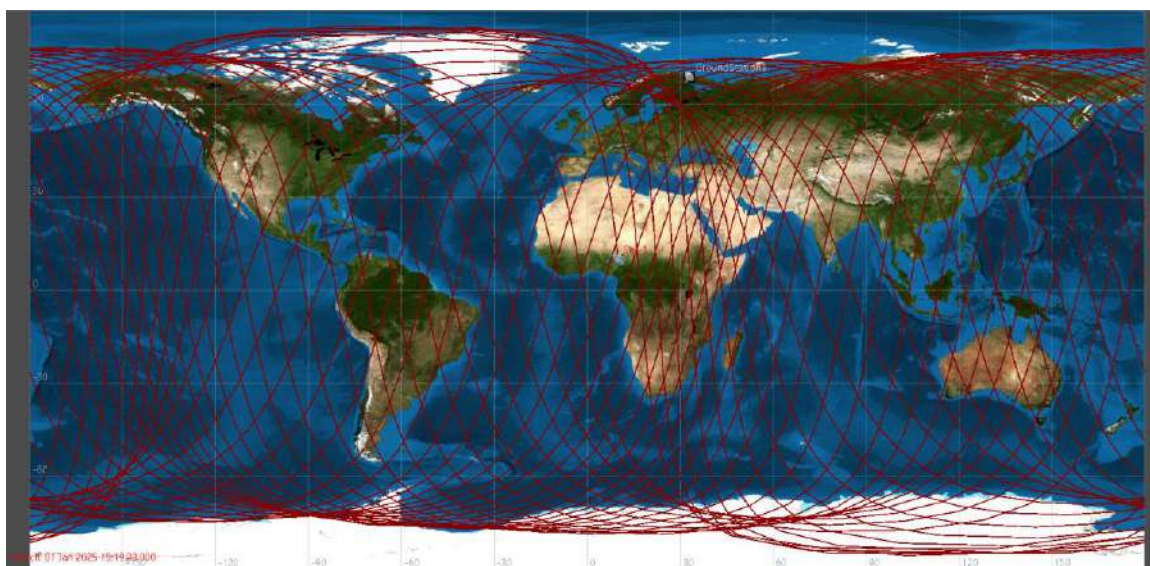


Рис. 3. Результаты моделирования орбиты аппарата

Орбитальный период рассчитывается по формуле [26]:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} \left(\frac{r_p + r_a}{2} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

где T – период обращения, μ – гравитационный параметр Земли, r_p – высота перицентра, r_a – высота апоцентра.

Минимальная скорость аппарата определяется по формуле [26]:

$$v_p = \sqrt{\frac{\mu(1+e)}{r_p}}, \quad (5)$$

где r_p – высота перицентра, v_p – скорость аппарата в точке перицентра, μ – гравитационный параметр Земли, e – эксцентриситет.

Согласно формулам (4), (5) период орбитальный период составляет около 109 минут, и аппарат достигает скорости 7.43 км/с.

Для обеспечения покрытия территории с помощью спектрографов предлагается сформировать группировку из пяти аппаратов. Такое количество спутников позволит обеспечить мониторинг всего северного морского пути с достаточно малыми интервалами перерывов наблюдений одного участка.

При применении аппаратов, оборудованных радиоинтерферометрами, предлагается использовать созвездие спутников, движущихся по одной орбите. Для повышения качества обработки собираемой информации необходимо определять расстояние между аппаратами с помощью лазерного интерферометра, а также определять координаты каждого аппарата посредством данных глобальной навигационной спутниковой системы.

8. Заключение

Ледовые условия остаются главным барьером, поэтому так важно увеличивать точность прогнозов. Атомные ледоколы критически важны, но требуют огромных инвестиций. Поэтому следует уделять больше внимания проектам, которые обеспечивают без ледокольное прохождение маршрута. Также построение глубоководных маршрутов необходимы для крупнотоннажных судов, что сделает логистику более экономически оправданной.

В работе рассмотрен вариант реализации комплекса анализа навигационных параметров и формирования маршрута для северного морского пути. Использование выбранного решения позволит

повысить экономическую эффективность использования транспортного маршрута, увеличить его пропускную способность, сократить время пребывания в пути и риски при доставке груза.

Показано, что использование новых методов обработки информации позволит решить задачу поиска пути в трудных климатических и погодных условиях. Применение диффузионной модели при условии обеспечения большого количества информации о параметрах целевых областей позволяет решить как задачу пространственного прогнозирования, так и временного прогнозирования, что особенно важно при планировании длительных транспортных маршрутов.

В качестве источников информации предлагается использовать орбитальную группировку космических аппаратов, движущуюся по околополярной орбите и состоящую из аппаратов с различным оборудованием. В качестве такого оборудования предлагается использовать спектрометры ближнего и среднего инфракрасного диапазона и радиоинтерферометры. При этом необходимо обеспечить большую зону покрытия, высокое разрешение результатов измерений, точную привязку данных по координатам и времени.

Литература

1. Севморпуть: история и перспективы. ТАСС. 29.02.2024. <https://tass.ru/ekonomika/20118387> (дата обращения: 22.05.2025).
2. Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2022 N 2115-р «Об утверждении Плана развития Северного морского пути на период до 2035 года».
3. *Li Z., Ding L., Huang L., Ringsberg J.W., Gong H., Fournier N., Chuang Z.* Cost–Benefit Analysis of a Trans-Arctic Alternative Route to the Suez Canal: A Method Based on High-Fidelity Ship Performance, Weather, and Ice Forecast Models. *J.Mar. Sci. Eng.* 2023,11, 711. DOI:10.3390/jmse11040711.
4. [Horizonevents.ru](https://horizonevents.ru/chizhov_arktika/), Проблемы, связанные с плаванием судов в акватории Северного морского пути. https://horizonevents.ru/chizhov_arktika/ (дата обращения: 24.05.2025).
5. Middlebury Institute of International Studies, "Cold Calculations: Economic Prospects for Arctic Shipping Routes", 2024 https://www.middlebury.edu/institute/sites/default/files/2024-07/cold-calculations-arctic-shipping-routes_miis_ited-working-paper_june2024.pdf.
6. *Hongzhi Miao, Xinyaun Feng, Xinwei Li.* Frontiers in Marine Science, "Economic viability of arctic shipping under IMO environmental regulations: a well-to-wake assessment of different carbon tax scenarios", *Front. Mar. Sci.*, 23 May 2025 Sec. Marine Affairs and Policy. – 2025. – Volume 12.
7. *Jinlun Zhang, Axel Schweiger, Michael Steele, Harry Stern.* Sea ice floe size distribution in the marginal ice zone: Theory and numerical experiments // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Volume 120, Issue 5 May 2015 Pages i-v. – P. 3175–3871. ISSN 2169-9275.
8. *Grešš M., Ermilova M.I.* Northern Sea Route and Its Geoeconomic Importance. In: Pak E.V., Krivtsov A.I., Zagrebnaya N.S. // *The Handbook of the Arctic*. Palgrave Macmillan, Singapore. DOI:10.1007/978-981-16-9250-5_25-1.
9. Ледоколы проекта "Лидер" смогут пробивать во льдах каналы шириной в 50 м. ТАСС, 6 ноября 2024. <https://tass.ru/ekonomika/22331785> (дата обращения: 26.05.2025).
10. "Полярный экспресс" встал на паузу. ComNews, Павел Королёв, 14.03.2025. <https://www.comnews.ru/content/238257/2025-03-14/2025-w11/1007/polyarnyy-ekspress-vstal-pauzu> (дата обращения: 26.05.2025).
11. *Борисов:* российская группировка связи и ДЗЗ к 2036 году увеличится до 2,6 тыс. спутников. ТАСС. 3 июля 2024. <https://tass.ru/kosmos/21262579> (дата обращения: 26.05.2025).
12. *Meng Qu, Ruibo Lei, Yue Liu, Na Li.* Arctic Sea ice leads detected using sentinel-1B SAR image and their responses to atmosphere circulation and sea ice dynamics, *Remote Sensing of Environment*, 2024. – Volume 308. – 114193. ISSN 0034-4257.
13. *Yuan Yuan, Jingtao Ding, Chenyang Shao, Depeng Jin, Yong Li.* Spatio-temporal Diffusion Point Processes // *KDD '23: Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. – P. 3173 – 3184. ISBN 979-8-4007-0103-0.
14. *Salva Rühling Cachay, Bo Zhao, Hailey Joren, Rose Yu.* DYffusion: A Dynamics-informed Diffusion Model for Spatiotemporal Forecasting // *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2023.
15. *Yuan Yuan, Jingtao Ding, Chenyang Shao, Depeng Jin, Yong Li.* Spatio-temporal Diffusion Point Processes // *KDD '23: Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. – P. 3175.
16. *Шалькевич Ф.Е., Давидович Ю.С., Шестаков Н.А.* Дистанционная спектрометрия // *Электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 03 «Космоаэронавигация»*, Регистрационный № 2.4.2-24/480, Минск, 2024
17. Геоостационарный гидрометеорологический космический аппарат "Электро-Л" № 2 <https://www.laspace.ru/ru/activities/projects/elektro-2/> (дата обращения 15.05.2025).
18. Гидрометеорологический космический аппарат "Арктика-М" № 2 <https://www.laspace.ru/ru/activities/projects/gidrometeorologicheskii-kosmicheskii-apparat-arktika-m-2/> (дата обращения 15.05.2025).

19. sentinel-2 https://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf (дата обращения 15.05.2025).
20. Станция Europa Clipper отправилась в космос <https://nplus1.ru/news/2024/10/14/europa-clipper-go> (дата обращения 15.05.2025).
21. *Башкуев Ю.Б., Нагулаева И.Б., Хантанов В.Б., Дембелов М.Г.* Электрометрический метод определения поверхностного импеданса двухслойной структуры “лед-морская вода” // Журнал технической физики, 2016. – Том 86, вып. 2. – С. 153–155.
22. Ледомеры <https://www.geotech.ru/wp-content/uploads/2019/09/ledomery-1.pdf> (дата обращения 12.05.2025).
23. *Mohammed Hammouti, Christian Natale Gencarelli, Simone Sterlacchini, Riccardo Biondi.* Volcanic clouds detection applying machine learning techniques to GNSS radio occultations // GPS Solutions 2024. – 28:116. DOI:10.1007/s10291-024-01656-0.
24. *Skeens J., York J., Petrov L., Munton D., Herrity K., Ji-Cathriner R., Bettadpur S., Gaussiran T.* First Observations with a GNSS Antenna to Radio Telescope Interferometer // Radio Science. – Volume58, Issue8, research article, 18 NOV 2023. DOI:10.1029/2023RS007734.
25. General Mission Analysis Tool <https://software.nasa.gov/software/GSC-19097-1> (дата обращения 19.05.25)
26. *Howard D. Curtis.* Orbital Mechanics for Engineering Students (Fourth Edition) – Elsevier Ltd, 2020, ISBN 978-0-08-102133-0.