



DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(2)-9
EDN NVSWPK

УДК 528.8

© В. А. Родионов^{1*}, М. И. Калинов¹, В. П. Говорухин^{1,2}, 2025

¹Санкт-Петербургский научный центр РАН, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 5

²Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, д. 1, 199178, г. Санкт-Петербург, 12 линия В.О.

*var1959@mail.ru

Возможности и перспективы мониторинга морской обстановки на Севморпути космическими средствами дистанционного зондирования Земли

Статья поступила в редакцию 20.03.2025, после доработки 04.06.2025, принята в печать 17.06.2025

Аннотация

Проанализированы основные направления развития Северного морского пути на период до 2035 года. Представлены результаты анализа судоходства крупнотоннажных судов в период летней навигации на трассах Северного морского пути, а также параметры боковых отклонений от рекомендованных маршрутов и ширины полосы их движения. Рассмотрены состояние и перспективы развития отечественной орбитальной группировки космических аппаратов, решающих задачи дистанционного зондирования Земли в Арктике. Выполнен прогноз ожидаемых результатов применения существующих и перспективных космических систем при решении задач наблюдения за судоходством на Северном морском пути.

Ключевые слова: Северный морской путь, судоходство, рекомендованный маршрут, боковое отклонение, ширина полосы движения, космический аппарат, орбитальная группировка, космическая система, прогнозирование

© V. A. Rodionov^{1*}, M. I. Kalinov¹, V. P. Govorukhin^{1,2}, 2025

¹St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 5 Universitetskaya Nab., St. Petersburg, 199034, Russia

²N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 1 12th Liniya V.O., St. Petersburg, 199178, Russia

*var1959@mail.ru

Opportunities and Prospects for Monitoring the Marine Environment on the Northern Sea Route by Space Means of Remote Sensing of the Earth

Received 20.03.2025, Revised 04.06.2025, Accepted 17.06.2025

Abstract

The main directions of development of the Northern Sea Route for the period up to 2035 are analyzed. The results of an analysis of the navigation of large-tonnage vessels during summer navigation on the routes of the Northern Sea Route, as well as the parameters of lateral deviations from the recommended routes and the width of their lanes are presented. The state and prospects of development of the Russian orbital constellation of spacecraft solving the problems of remote sensing of the Earth in the Arctic are considered. The forecast of the expected results of the application of existing and prospective space systems in solving the problems of monitoring navigation on the Northern Sea Route has been carried out.

Keywords: Northern Sea Route, navigation, recommended route, lateral deviation, lane width, spacecraft, orbital grouping, space system, forecasting.

Ссылка для цитирования: Родионов В.А., Калинов М.И., Говорухин В.П. Возможности и перспективы мониторинга морской обстановки на Севморпути космическими средствами дистанционного зондирования Земли // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 2. С. 123–136. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-9](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-9) EDN: NVSWPK
For citation: Rodionov V.A., Kalinov M.I., Govorukhin V.P. Opportunities and Prospects for Monitoring the Marine Environment on the Northern Sea Route by Space Means of Remote Sensing of the Earth. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(2):123–136. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-9](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-9)

1. Введение

«В зоне особого внимания — дальнейшее развитие Северного морского пути. Мы приглашаем зарубежные логистические компании, государства активно использовать возможности этого глобального транспортного коридора. В прошлом году по нему прошло 36 миллионов тонн груза. ... Обеспечим круглогодичную навигацию на Севморпути» (из послания Президента Российской Федерации Федеральному собранию 29 февраля 2024 г.) [1].

Цели и стратегические задачи развития Северного морского пути (СМП) на ближайшую перспективу определены рядом документов, основными являются: Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (с изменениями на 12 мая 2018 года, утверждена Постановлением Правительства Российской Федерации № 1734-р от 22.11.2008 г.); Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (в ред. от 02.12.2019 г.); План развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года (утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 г. № 3120-р) [2].

2. Состояние и перспективы мониторинга судоходства на СМП

Северный морской путь ограничен западными входами в новоземельские проливы и меридианом, проходящим на север от мыса Желания, и на востоке в Беринговом проливе параллелью 66°с.ш. и меридианом 168°58'37"з.д. Длина Северного морского пути от Карских Ворот до бухты Провидения составляет около 5600 км (рис. 1).



Рис. 1. Акватория СМП с морскими портами и маршрутами движения судов [3]

Fig. 1. The NSR water area with seaports and shipping routes [3]

Планом развития СМП до 2035 года предусматривается дальнейшее увеличение его грузопотока. Так в 2014 году он составлял около четырех миллионов тонн, к 2026 году с учетом северного завоза, транзитных потоков и прочих грузов стоит задача обеспечить провозную способность на уровне 100 миллионов тонн и 200 миллионов тонн — к 2030 году [1].

План содержит пять основных разделов [1]. Первый — формирование грузовой базы. В настоящее время уже имеются соглашения с ведущими арктическими компаниями на СМП, также планируется привлекать перспективные грузы от новых проектов, развивать каботажные и транзитные перевозки. С 2022 года запущена регулярная каботажная линия между Мурманском и Камчаткой. Второй — создание наземной транспортной инфраструктуры. Создается и модернизируется 14 портов и терминалов от Мурманска до Владивостока. Третий — развитие флота. Ведется строительство нового ледокольного и транспортного флота

ледового класса, всего 153 судна. Четвертый — обеспечение безопасности судоходства по СМП. Включает новую орбитальную группировку (ОГ) космических аппаратов (КА), развитие гидрографического и гидрометеорологического обеспечения, аварийно-спасательной и медицинской инфраструктуры. В ближайшие два года планируется обеспечить оперативную ледовую разведку из космоса. Пятый пункт плана — это централизация управления и развития судоходства по СМП. Основные полномочия по управлению судоходством на СМП переданы Росатому. Создается единая экосистема для всех участников Севморпути, цифровая платформа, где грузоотправители получают эффективную логистику, моряки — безопасную навигацию, а государство — прозрачную систему управления.

СМП в навигационном отношении представляет собой одну из самых сложных и опасных морских транспортных коммуникаций, отличающуюся большой протяженностью, обширными мелководными участками, удаленными от берега на значительные расстояния, многочисленными районами, гидрографическая изученность рельефа дна которых является недостаточной, и тяжелыми ледовыми условиями. Тем не менее, начиная с 2010 года, в арктической транспортной системе стал использоваться режим круглогодичной навигации [4].

Трассы СМП в основном пролегают по участкам арктических морей, где имеются многочисленные подводные опасности (рис. 1, 2). Основной особенностью прибрежных трасс является их мелководность. Прибрежные трассы незначительно удалены от материкового берега, что позволяет на большинстве участков трасс видеть средства навигационного оборудования. Также это не затрудняет проведение морских аварийно-спасательных операций.



Рис. 2. Обзорная схема прогноза Арктических акваториальных производственных комплексов (АТПК) и маршрутов движения судов [5]

Fig. 2. Overview diagram of the forecast of the Arctic aquaterritorial production complexes (ATPC) and ship routes [5]

Высокоширотная трасса делится на альтернативную и основную высокоширотные трассы. Альтернативная трасса проходит севернее основной трассы по относительно большим глубинам. Основной недостаток маршрута — пересечение области вероятного положения многолетних ледовых массивов. Отдельные участки высокоширотных трасс удалены на большое расстояние от материкового берега, что не позволяет использовать зрительные средства навигационного оборудования.

Приполюсная трасса — это глубоководная трасса, которая проходит от Мурманска до Берингова пролива. Приполюсные трассы по всей протяженности имеют достаточно большие глубины. Многолетний лед, перекрывающий трассу практически круглый год, является основным фактором, который влияет на безопасное судоходство. Приполюсные трассы удалены от берега на большие расстояния, что затрудняет проведение морских аварийно-спасательных операций. С наличием мощных ледоколов, которые будут преодолевать ледовые поля до 4 м, трасса станет перспективным маршрутом.

Основной объем грузоперевозок по СМП составляют перевозки Карского моря. Навигационные условия в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях, являются менее благоприятными. Также этим акваториям присуща изменчивость гидрометеорологических условий и обилие мелководных участков, а также районов с недостаточной изученностью рельефа дна.

Современный уровень гидрографической изученности восточной части СМП не в полной мере соответствует стандартам Международной гидрографической организации, устанавливаемым для проведения съемки рельефа дна в районах плавания судов с предельно малым безопасным запасом воды под килем [6, 7]. Для устранения этого несоответствия все районы, по которым проходят маршруты крупнотоннажных судов, требуют высокой точности и подробности обследования, которые должны гарантировать обнаружение подводных препятствий с линейными размерами до 1 м с нанесением их местоположения на морские навигационные карты. Поэтому выход судна за пределы обследованной полосы связан с возможной его посадкой на неизвестную мель, что подтверждается результатами исследований, обобщенных в работах [8–10].

В [11] представлены результаты исследования боковых отклонений траектории движения судов от рекомендованных маршрутов в акваториях Чукотского моря (пролив Лонга), Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых в летне-осеннюю навигацию 2019 года (рис. 3).

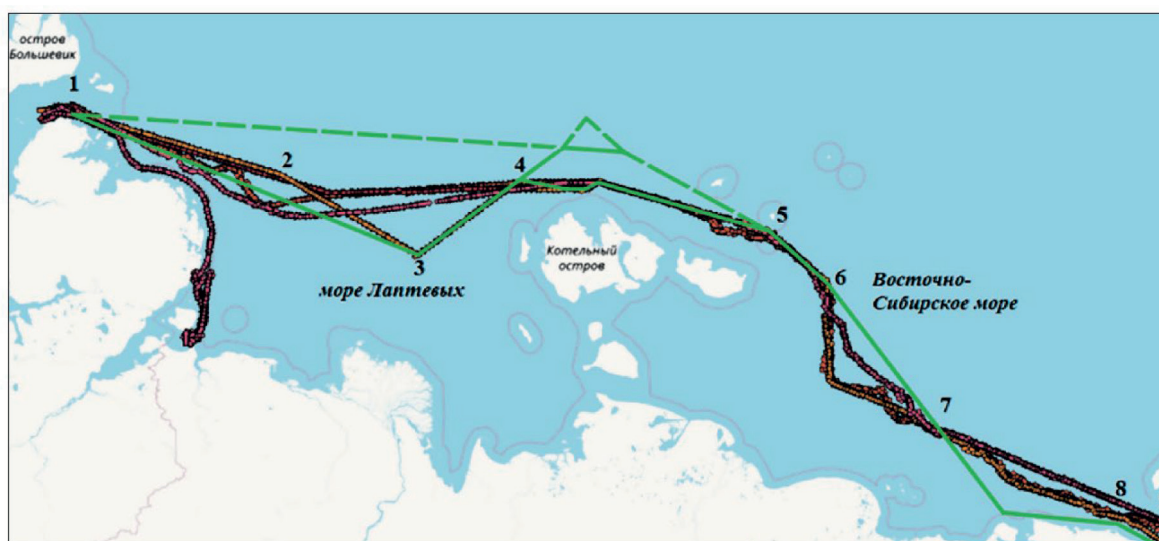


Рис. 3. Схема боковых отклонений траекторий движения судов от рекомендованных маршрутов в акваториях Чукотского моря (пролив Лонга), Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых [11]

Fig. 3. Diagram of lateral deviations of ship trajectories from the recommended routes in the waters of the Chukchi Sea (Long Strait), the East Siberian Sea and the Laptev Sea [11]

Рекомендованные маршруты на схеме выделены зеленым цветом. Сплошными линиями отмечены участки обследованных рекомендованных маршрутов, пунктирными — перспективные маршруты, на которых планируется провести площадное обследование. Коричневыми линиями показаны траектории движения крупнотоннажных судов, построенных по данным, полученным от судовых навигационных систем. В количественном виде боковые отклонения представлены в табл. 1.

В табл. 1 номера участков соответствуют номерам точек, показанных на рис. 3. На участках 1–2 в июле 2019 г. среднее боковое отклонение составляло 8 миль. В августе–октябре средняя величина боковых отклонений увеличилась и составила: в августе до 47 миль, в сентябре до 28 миль, в октябре до 23 мили. В ноябре величина боковых отклонений сократилась до 12 миль.

На участках 2–4 подавляющее большинство крупнотоннажных судов курсируют между основной и альтернативной высокоширотной трассой, и только малая часть — по основной трассе. На данном участке величина боковых уклонений практически постоянна, в течение всей летней навигации она находится в пределах 50,0–67,5 миль.

Трассы движения судов в Восточном-Сибирском море на участках 6–7 и 7–8 значительно отклоняются от рекомендованных маршрутов. На участке 6–7 траектории части судов проходят вдоль основной высокоширотной трассы, траектории другой части судов проходят по альтернативному маршруту. С августа по

Таблица 1

Table 1

Боковые отклонения траекторий движения крупнотоннажных судов от рекомендованных маршрутов [11]

Lateral deviations of the trajectories of large-tonnage vessels from the recommended routes [11]

Месяц	Море Лаптевых		Восточно-Сибирское море		Чукотское море (пролив Лонга)	
	Западная часть, участок 1–2, max/min миль	Восточная часть, участок 2–4, max/min миль	Западная часть, участок 6–7, max/min миль		Восточная часть, участок 7–8, max/min миль	Участок 8–9, max/min миль
			«О»	«А»		
Июль	2/13	45/55	—	8/35	15/40	6/15
Август	7/40	60/90	7/12	1/40	7/40	7/20
Сентябрь	8/20	50/80	8/30	8	30/70	13/16
Октябрь	5/18	60/75	7/70	—	10/95	1/20
Ноябрь	2/10	60/90	5/80	—	40/100	2/30

Примечание. «О» — основная высокоширотная трасса в Восточно-Сибирское море, «А» — альтернативная.

сентябрь 2019 г. по движению судов наблюдались колебания величины боковых отклонений в пределах 8–20,5 миль на альтернативной трассе и 9,5–19,5 миль на основной. С октября по ноябрь суда на участке 6–7 курсировали только по основной трассе, в этот период величина боковых отклонений в среднем составляла 40 миль.

На участке 7–8 с июля по август боковые отклонения от рекомендованного маршрута составляют 23,5–27,5 миль, а с сентября по октябрь данная величина составляет 50–70 миль. В Чукотском море на участке 8–9 величина отклонений колеблется в среднем от 10,5 до 16 миль. Значения ширины полос движения судов на различных участках акватории в зависимости от месяца приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Ширина полосы движения крупнотоннажных судов на участках Чукотского моря (пролив Лонга), Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых в основной период навигации СМП [11]

The width of the traffic lanes of large-tonnage vessels in the sections of the Chukchi Sea (Long Strait), the East Siberian Sea and the Laptev Sea during the main navigation period of the NSR [11]

Месяц	Ширина полосы движения судов, мили				
	Море Лаптевых		Восточно-Сибирское море		Чукотское море (пролив Лонга)
	Западная часть, участок 1–2	Восточная часть, участок 2–4	Западная часть, участок 6–7	Восточная часть, участок 7–8	Участок 8–9
Июль	30	15	35	26	20
Август	24	26	105	40	20
Сентябрь	15	26	75	40	23
Октябрь	14	22	60	35	25
Ноябрь	20	34	60	15	7

Приведенные в таблице данные показывают, что ширина полосы движения судов во всей акватории гораздо больше, чем 2 км, и имеет непостоянный характер. В западной части моря Лаптевых минимальная ширина полосы движения составляет 14 миль, в восточной части — 15 миль. В западной части Восточно-Сибирского моря минимальная ширина полосы движения составляет 35 миль, в восточной части — 15 миль, в Чукотском море (пролив Лонга) — 7 миль. Максимальная ширина полосы движения судов в море Лаптевых достигает 34 миль в ноябре, в Восточно-Сибирском море — 105 миль в августе, в Чукотском море — 25 миль в октябре [11].

Данные, полученные в процессе анализа трасс и полос движения крупнотоннажных судов в период 2019 года, показывают на существенное отклонение от рекомендованных маршрутов на участках, в том числе там, где не проводилось площадное обследование (линия зеленого цвета — рекомендованный маршрут на рис. 4).



Рис. 4. Трассы движения крупнотоннажных судов в период зимней навигации 2020 года в Карском море [2]

Fig. 4. Routes of large-tonnage vessels during the winter navigation in 2020 in the Kara Sea [2]

По данным 2023 года по трассам СМП прошли 430 уникальных судов без ледового класса и 164 — с низкими ледовыми классами (Ice1 — Ice3), а также более оснащенные суда, которые могут перемещаться в достаточно трудных условиях, — 135 (Arc4 — Arc5) и 37 (Arc6 — Arc7), [12]. Данное обстоятельство (загруженность СМП и наличие отклонений (полос) движения судов от рекомендованных маршрутов) приводит к существенному усложнению навигационной коммуникации и необходимости создания постоянно действующей системы мониторинга морской обстановки на СМП с целью контроля и оперативного реагирования на ее изменения в интересах обеспечения безопасного плавания судов (в рамках данной статьи мониторинг морской обстановки ограничивается контролем текущего местоположения судов на маршрутах СМП). С учетом современных реалий важными элементами этой системы могут быть отечественные космические системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), способные решать задачи мониторинга морской обстановки в Арктике и по маршруту Северного морского пути.

По состоянию на 01.01.2025 г. к таким системам можно отнести КС радиолокационного наблюдения (РЛН) с двумя КА типа «Кондор-ФКА», КС оптико-электронного наблюдения (ОЭН) с одним КА типа «Ресурс-П» и КС оптико-электронного наблюдения с пятью КА типа «Канопус».

При прогнозировании результатов применения указанных КС ДЗЗ для мониторинга СМП необходимо учитывать ряд особенностей:

- возможность распознавания морских судов в условиях фоно-целевой обстановки (ФЦО) различной степени сложности;
- наличие (отсутствие) априорной информации о судах, осуществляющих переход в заданном для наблюдения районе;
- условия наблюдения, определяемые освещенностью района;
- времена устаревания данных об обстановке в регионе;
- времена задержки информации от момента подачи заявки на получение данных о морской обстановке до момента получения потребителем готового продукта КС ДЗЗ и др.

Многочисленные исследования и опыт применения КС ДЗЗ для мониторинга морской обстановки показали, что правильное распознавание морских судов возможно на радиолокационных (оптических) изображениях, полученных с разрешением не хуже 5–10 м. Такая разрешающая способность обеспечивается при работе КА типа «Кондор-ФКА» в обзорном режиме с максимальной шириной полосы обзора 100 км. Для КА типа «Ресурс-П» в режиме широкозахватного наблюдения высокого разрешения ширина полосы обзора составляет 97 км (в надире). КА типа «Канопус» в режиме панхроматического наблюдения имеют полосу обзора 20 км (в надире).

При решении задач мониторинга судоходства могут быть использованы два варианта получения данных о морской обстановке. В первом варианте считается, что имеется априорная информация о морской

обстановке, полученная от других источников и объекты наблюдения находятся в некоторой ограниченной области возможного положения. Для просмотра такой области возможного положения объекта наблюдения (ОВПОН) производится необходимый заблаговременный поворот антенного устройства (для КА типа «Кондор-ФКА») или разворот всего КА (для КА типа «Ресурс-П» и КА типа «Канопус»). Потенциальные размеры полос обзора КА при этом существенно увеличиваются с учетом технически возможных углов визирования объектов наблюдения. Для КА типа «Кондор-ФКА» углы визирования (падения) составляют ± 24 – 55 градусов, для КА типа «Ресурс-П» — ± 45 градусов, для КА типа «Канопус» — ± 40 градусов.

При втором варианте предполагается отсутствие априорной информации об объектах наблюдения. В этом случае считается, что КА типа «Кондор-ФКА» просматривает полосу обзора шириной 100 км при минимальном угле визирования (падения) 24 градуса, а КА типа Ресурс-П» и КА типа «Канопус» — 97 км и 20 км (в надире) соответственно. Направление поворота антенного устройства КА типа «Кондор-ФКА» выбирается в зависимости от того, в какую (правую или левую) полосу обзора попадает район наблюдения [13–15].

Для прогнозирования результатов применения КС ДЗЗ, способных решать задачу мониторинга морской обстановки в районе Восточно-Сибирского моря (Восточный сектор маршрута СМП) использовался известный сценарно-временной метод и соответствующая ему компьютерная методика, с адаптированной к решаемой задаче формой представления результатов [16–17].

Содержанием сценарно-временного метода является трансформация массива исходных данных в оценки искомых показателей:

- эффективности применения системы — вероятности слежения за ОН с заданным допустимым временем устаревания данных (далее — вероятности слежения);
- периодичности — максимального интервала времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,8 (далее — периодичности или интервала времени между обнаружениями);
- количества обнаружений ОН в сутки (далее — количества обнаружений).

Основой прогнозирования результатов применения КС ДЗЗ для мониторинга заданного района является определение фактов обнаружения объектов наблюдения (ОН) на морской поверхности. При этом под обнаружением ОН понимается сложное событие, включающее:

- покрытие полосой обзора КА заданного района;
- попадание ОН в полосу обзора КА;
- фиксацию ОН бортовым специальным комплексом (БСК) КА;
- прием информации о зафиксированных объектах на пункте приема информации (ППИ);
- распознавание ОН в условиях фоно-целевой обстановки различной степени сложности.

Основные этапы прогнозирования результатов применения КС ДЗЗ в заданном районе:

- 1) выбор исходных данных;
- 2) моделирование процесса функционирования КС ДЗЗ (генерация событий «обнаружение объекта») и накопление полученных результатов;
- 3) расчет показателей прогноза (эффективности применения КС ДЗЗ, периодичности и количества обнаружений ОН) и их представление в удобной для анализа форме;
- 4) анализ результатов прогнозирования применения КС ДЗЗ, выработка рекомендаций и определение направлений дальнейших исследований.

В общем случае исходные данные включают:

- характеристики космических аппаратов;
- данные о районах наблюдения;
- количество разыгрываемых объектов, имитирующих неопределенность положения ОН в районе;
- характеристики пунктов приема информации;
- устанавливаемое для оценки эффективности слежения за ОН допустимое время устаревания данных;
- время устаревания априорных данных об объектах наблюдения;
- выбор формы представления получаемых результатов;
- время начала интервала оценки;
- продолжительность интервала оценки.

Для оценки эффективности слежения за ОН были заданы два значения допустимого времени устаревания данных: 12 ч и 24 ч. Время устаревания априорных данных (соответствующее минимальному значению вероятности правильного распознавания ОН при его первичном обнаружении) — одни сутки. Продолжительность интервала оценки (с учетом времени стабилизации среднего значения вероятности

слежения за ОН) — 6 сут. Неопределенность положения и состояния объекта наблюдения создавалась путем имитации (розыгрыша) 100 объектов, равномерно распределенных в заданном районе, и их возможного маневра (перемещения) в пределах этого района между пролетами КА. При этом в каждом пролете КА производилось определения координат и состояния каждого объекта, имитирующего один из возможных сценариев действий ОН. Считалось, что КА ДЗЗ, осуществляющие решение задач мониторинга СМП, постоянно находятся в зоне радиовидимости одного или нескольких ППИ Единой территориально распределенной информационной системы ДЗЗ и передают на них первичную целевую информацию о морской обстановке.

Форма отображения получаемых в процессе прогнозирования результатов приведена на рис. 5. В левой верхней части формы представлено графическое отображение района наблюдения и начальных отрезков трасс полета КА на фоне цифровой морской карты, приведены данные о границах района и количестве КА ДЗЗ в орбитальной группировке. Ниже представлены данные о баллистической структуре ОГ КА: долготы восходящих узлов орбит КА и времена их прохождения. КА РЛН обозначены красным цветом, КА ОЭН — синим. В нижней левой части формы приводятся мгновенные и средние значения вероятностей слежения за ОН W_s , W_z с допустимым временем устаревания данных 24 ч и 12 ч соответственно.

В верхней средней части формы представлены в цифровом виде данные о графике пролетов КА над заданным районом (первая или другая страницы): N — номер пролета, КА — номер КА, T — время пролета (сутки, часы, минуты), dT — интервал времени между соседними пролетами (часы, минуты), tip — тип КА (1 — ОЭН, 2 — РЛН). Ниже производится отображение особым символом «•» фактов появления события «Обнаружение объекта» для каждого из 100 разыгранных объектов в каждом пролете КА над заданным районом. В нижней средней части формы представлены дифференциальный и интегральный законы распределения вероятностей попадания в различные временные интервалы между обнаружениями, а также значение максимального интервала между обнаружениями с вероятностью не ниже 0,8.

В правой части формы в графическом виде приводятся данные о временах пролета каждого КА над заданным районом на интервале оценки (обозначены символами «•») (график «Номера КА»), а также данные об их информативности — доле площади района dS, просмотренной каждым КА (nka — номер КА) на интервале оценки (график «Обзор»). В правой нижней части формы представлены данные о количестве обнаружений объектов.

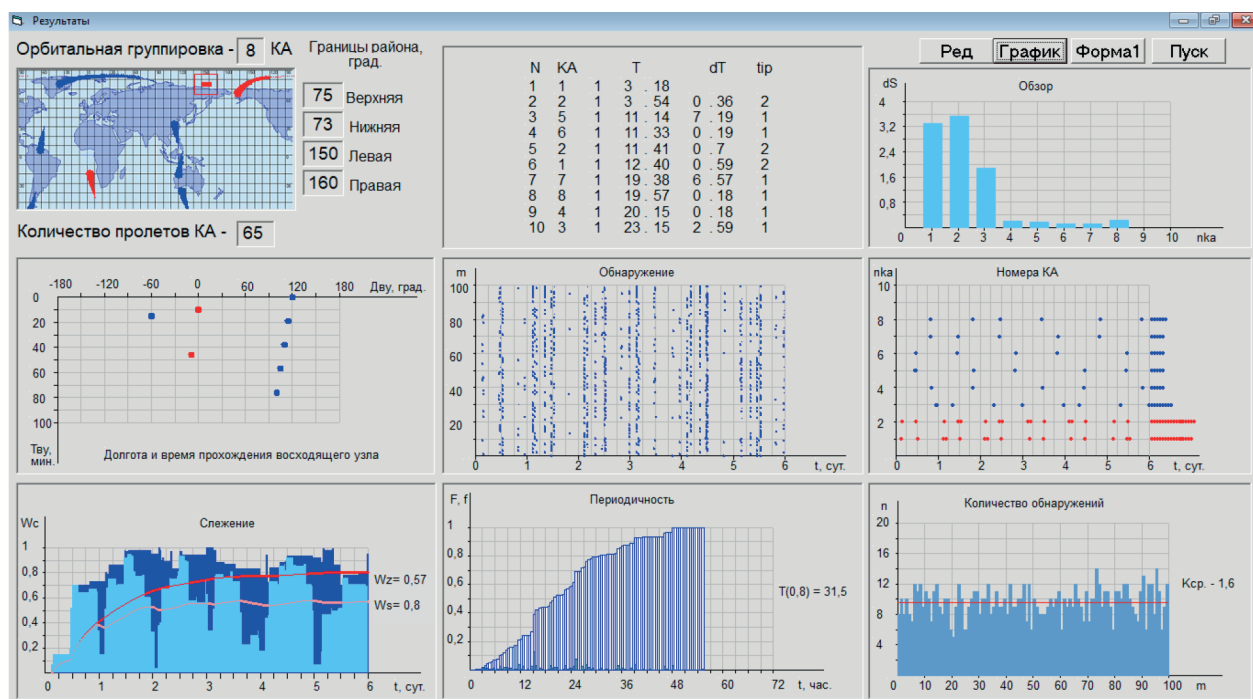


Рис. 5. Форма отображения получаемых результатов при прогнозировании применения КС ДЗЗ в заданном районе при постоянно светлом времени суток (вариант 2)

Fig. 5. The form of displaying the results obtained when predicting the use of remote sensing systems in a given area at a constantly bright time of day (option 2)

Таблица 3

Table 3

Результаты прогнозирования применения КС ДЗЗ для мониторинга судоходства в Восточно-Сибирском море (вариант 1)

The results of forecasting the use of remote sensing systems for monitoring navigation in the East Siberian Sea (option 1)

Условия наблюдения	Вероятность слежения за ОН при времени устаревания данных 12 ч	Вероятность слежения за ОН при времени устаревания данных 24 часа	Максимальный интервал времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,8 ч	Среднее количество обнаружений ОН в сутки
Постоянно светлое время суток	0,97	0,97	6,5	17,1
Постоянно темное время суток	0,87	0,97	15,5	4,6
Светлое время суток с 10 до 16 ч	0,87	0,97	15,0	8,9

Таблица 4

Table 4

Результаты прогнозирования применения КС ДЗЗ для мониторинга судоходства в Восточно-Сибирском море (вариант 2)

The results of forecasting the use of remote sensing systems for monitoring navigation in the East Siberian Sea (option 2)

Условия наблюдения	Вероятность слежения за ОН при времени устаревания данных 12 ч	Вероятность слежения за ОН при времени устаревания данных 24 ч	Максимальный интервал времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,8, ч	Среднее количество обнаружений ОН в сутки
Постоянно светлое время суток	0,57	0,80	31,5	1,6
Постоянно темное время суток	0,49	0,73	38,5	1,2
Светлое время суток с 10 до 16 ч	0,52	0,76	35,5	1,2

Анализ полученных результатов показал их существенную зависимость от выбранного варианта получения данных о морской обстановке. При первом варианте обеспечивается практически непрерывное (с вероятностью не ниже 0,87–0,97) слежение за ОН с периодичностью 6,5–15,5 ч в любое (темное или светлое) время суток. При втором варианте — значения показателей прогноза существенно снижаются: вероятность слежения за ОН составляет 0,4–0,8, а периодичность возрастает до 31,8–38,5 ч. Количество обнаружений ОН при этом снижается в 4–10 раз (с 4,6–17,1 до 1,2–1,6).

Следует учитывать, что время устаревания данных от момента приема передаваемой с КА ДЗЗ информации на ППИ до ее предоставления потребителям составляет от 12 до 24 ч [13–15]. Иными словами, суммарное время ожидания потребителями данных о морской обстановке может составить от 18,5 до 62,5 ч.

В процессе исследований, кроме того, выполнено прогнозирование результатов применения КС ДЗЗ по всему маршруту Северного морского пути [18].

Форма отображения процесса прогнозирования, его результатов и получаемых оценок представлена на рис. 6. В отличие от предыдущего рис.ка на рис. 6 приведена более подробная информация, характеризующая исследуемый процесс.

В левой верхней части формы на фоне ЦМК отображаются:

- маршрутные точки;
- маршрут перехода;
- заданный район;
- области возможного положения ОН при его обнаружении (белые круги в красных окружностях по маршруту перехода);

- потенциальное количество КА в системе (12 красных окружностей в нижней части ЦМК);
- активные КА (белые круги в красных окружностях) и их номера (номера неактивных КА равны нулю).

Ниже приводятся графики с оценками эффективности решения частных задач наблюдения и периодичности обнаружения ОН. В правых частях этих графиков представлены следующие данные (оценки):

- максимальное время, необходимое для решения задачи обнаружения ОН, ч — T_0 ;
- вероятности обнаружения и выявления ОН — W_0 , W_{v2} , W_{v3} ;
- вероятности слежения за ОН — P_s , P_z (мгновенные значения) и W_s , W_z (средние значения) (время устаревания данных — 24 и 12 ч соответственно);
- максимальные значения интервалов времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,5; 0,8; 1,0 — $T(0,5)$; $T(0,8)$; $T(1,0)$.

В средней нижней части формы представлены законы распределения вероятностей попадания в интервалы времен ожидания обнаружения, а также их числовые характеристики. Кроме того, указаны значения количества обнаружений n для каждого из 100 объектов, имитирующих неопределенность положения ОН в его области возможного положения на интервале оценки.

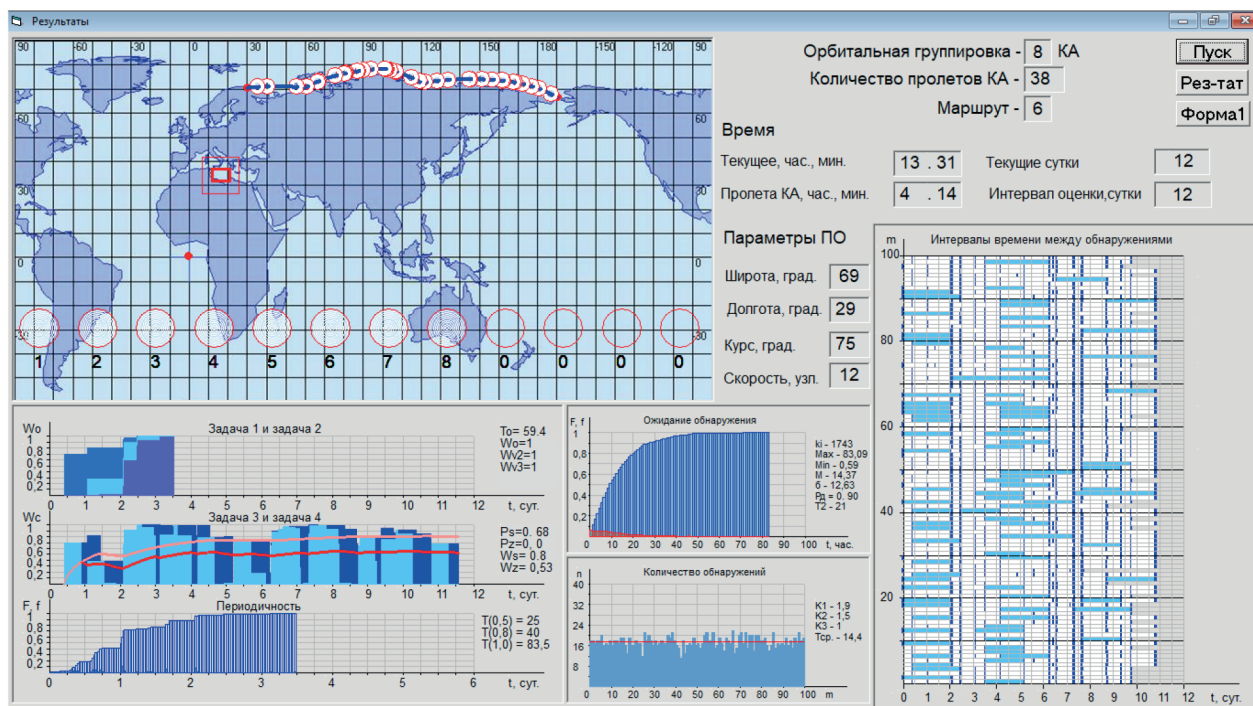


Рис. 6. Форма отображения получаемых результатов при прогнозировании применения КС ДЗЗ по маршруту Северного морского пути при постоянно светлом времени суток (вариант 2)

Fig. 6. The form of displaying the results obtained when predicting the use of remote sensing systems along the route of the Northern Sea Route at a constantly bright time of day (option 2)

Приводятся максимальное значение времени ожидания обнаружения с вероятностью не ниже 0,8 — T_2 и максимальное, среднее и минимальное значения количества обнаружений ОН в сутки (K_1 , K_2 , K_3). Показатель $T_{ср.}$ характеризует среднее время (ч) между обнаружениями ОН (по всей совокупности интервалов времени между его обнаружениями).

В правой средней и нижней частях формы представлен график, иллюстрирующий основные результаты прогнозирования в виде условных символов (синих прямоугольников), соответствующих появлению события «обнаружение ОН» для каждого объекта в каждом пролете КА. Интервалы времени между обнаружениями ОН, превышающие значение $T(0,8)$, показаны на графике более темным цветом.

В правой верхней части формы содержится информация о количестве КА в орбитальной группировке, количестве пролетов КА над ОВПОН, номере маршрута перехода. Ниже указываются текущее время функционирования КС ДЗЗ, время пролета КА, текущие сутки и интервал оценки. Данные о текущих значениях широты, долготы, курса и скорости ОН приведены в средней части формы.

Сравнительный анализ полученных результатов прогнозирования в Восточно-Сибирском море и по маршруту Северного морского пути показал, что в среднем они отличаются не более, чем на 15–20 %, что обусловлено перемещением ОВПОН.

Ожидаемое в ближайшие годы наращивание в 1,5–2 раза орбитальной группировки отечественных КА ДЗЗ, способных фиксировать местоположение морских судов с разрешающей способностью не хуже 5–10 метров, позволит на ≈ 50 –70 % улучшить значения показателей прогноза результатов применения КС ДЗЗ. Тем не менее, даже при таком составе ОГ КА ДЗЗ решение задач мониторинга морской обстановки с допустимым временем устаревания информации (1–2 ч), позволяющем оперативно осуществлять контроль и управление морскими судами при их отклонении от рекомендованного (заданного) маршрута, невозможно.

Одним из путей реализации такой возможности является создание в перспективе многоспутниковых систем ДЗЗ и разработка быстродействующих судовых и наземных комплексов, решающих задачи обра-

ботки поступающей от КА информации в реальном масштабе времени. Пример прогнозирования результатов применения такой КС ДЗЗ представлен на рис. 7. Рассмотрена многоспутниковая КС ДЗЗ, орбитальная группировка которой состоит из 48 КА РЛН (6 групп по 8 КА в группе). Высота орбиты каждого КА — 500 км, наклонение орбиты — 98 градусов, полоса обзора — 2×100 км. Углы между плоскостями орбит первых КА в группе — 60 градусов и углы сдвига по долготе восходящего узла каждого КА в группе — 20 градусов. Район наблюдения — Восточно-Сибирское море. В верхней средней части формы приводится справочная информация о количестве КА в ОГ (nka), номере суток начала интервала оценки (td), продолжительности интервала оценки (toz), временах устаревания (tu1, tu2), наклонении орбиты каждого КА (i), высоте полета КА (h), количестве полос обзора, отстоянии ближней и дальней границ полосы обзора от подспутниковой точки (b).

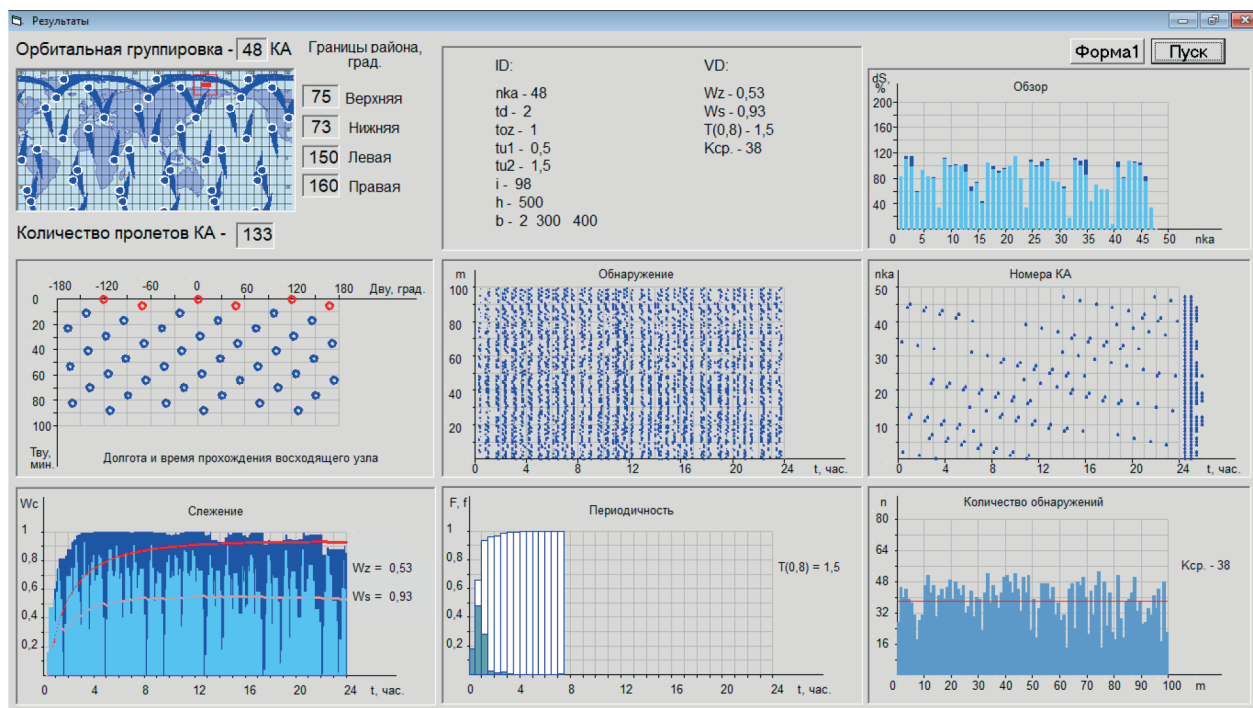


Рис. 7. Форма отображения получаемых результатов при прогнозировании применения КС ДЗЗ в заданном районе (вариант 2)

Fig. 7. The form of displaying the results obtained when predicting the use of remote sensing systems in a given area (option 2)

Анализ полученных результатов показал, что при рассмотренных исходных данных периодичность наблюдения морских судов в районе составит 1,5 ч с вероятностью не ниже 0,8. Передача информации о зафиксированной морской обстановке на наземные комплексы и ее обработка в реальном масштабе времени позволит соответствующим органам управления сформировать необходимые рекомендации по корректуре маршрута движения судов в районе. Аналогичная информация на судовых комплексах послужит предупреждением о необходимости изменения курса судна.

Полученные оценки носят предварительный характер. Для повышения достоверности получаемых оценок целесообразно продолжить исследования в следующих направлениях:

- максимальное приближение исходных данных к реальной обстановке в соответствии с планами развития отечественных космических средств ДЗЗ;
- увеличение количества районов наблюдения;
- рациональное сочетание обзорных и детальных режимов работы БСК КА;
- учет ограничений в работе бортового специального комплекса КА;
- использование данных радиоэлектронного мониторинга района наблюдения другими космическими системами;
- учет пропускной способности пунктов приема информации от КА ДЗЗ;
- учет особенностей планирования применения КА ДЗЗ и определение приоритетности решения задач мониторинга Северного морского пути;

- учет особенностей информационного взаимодействия КС ДЗЗ с другими элементами системы мониторинга морской обстановки на СМП;
- развитие и совершенствование научно-методического аппарата прогнозирования применения КС ДЗЗ для мониторинга морской обстановки в различных районах Мирового океана.

3. Заключение

1. Выявлена необходимость создания системы мониторинга морской обстановки на СМП с целью контроля и оперативного реагирования на ее изменения в интересах обеспечения безопасного плавания судов.
2. Важными элементами этой системы могут быть отечественные космические системы дистанционного зондирования Земли, способные решать задачи мониторинга морской обстановки в Арктике и по маршруту Северного морского пути.
3. Ограниченный состав орбитальных группировок КА существующих отечественных космических систем ДЗЗ позволяет решать задачи мониторинга с большим временем ожидания искомых результатов. Выполненные исследования показали, что суммарное время ожидания потребителями данных о морской обстановке в районах СМП с вероятностью не ниже 0,8 может составить от 18,5 до 62,5 ч.
4. Для решения задачи оперативного контроля и управления морскими судами при их отклонении от рекомендованного (заданного) маршрута необходимы создание многоспутниковых систем ДЗЗ на базе малых космических аппаратов и разработка быстродействующих судовых и наземных комплексов, решающих задачи обработки поступающей от КА информации о морской обстановке в реальном масштабе времени.
5. Прогнозирование результатов применения многоспутниковой системы ДЗЗ показало, что 48 КА радиолокационного наблюдения с полосой обзора 2×100 км способны обеспечить периодичность наблюдения морских судов в районе 1,5 ч с вероятностью не ниже 0,8. Передача информации о зафиксированной морской обстановке на наземные комплексы и ее обработка в реальном масштабе времени позволит соответствующим органам управления сформировать необходимые рекомендации по корректуре маршрута движения судов в районе. Аналогичная информация на судовых комплексах (ППИ) послужит предупреждением о необходимости изменения курса судна.

Финансирование

Работа выполнена в рамках исполнения государственного задания СПбНЦ РАН № 075-00611-24-00 на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 16.01.2025 № 075-03-2025-478); государственного задания ИПТ РАН № 075-00600-25-00 на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 20.01.2025 № 075-03-2025-693).

Funding

The work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00611-24-00 for 2025 and for the planned period of 2026 and 2027 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 15 january 2025 № 075-03-2025-478); part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00600-25-00 for 2025 and for the planned period of 2026 and 2027 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 20.01.2025 № 075-03-2025-693).

Литература

1. *Логинова Н.Н.* Материалы к «Правительственному часу» в Совете Федерации 20 марта 2024 года «О транспортном потенциале СМП». URL: https://parlib.duma.gov.ru/common/upload/document_pravchas/I_ghsf200324.pdf (дата обращения: 03.02.2025).
2. *Андреева Е.В., Исаулова К.Я.* Перспективы развития СМП // Neftegaz.ru/2021. № 6. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/686530-perspektivy-razvitiya-smp/> (дата обращения: 03.02.2025). EDN: FOPMII

3. Акватория СМП с морскими портами и маршрутами движения судов. URL: <https://avatars.mds.yandex.net/i?id=024111abe42c49cec13f5b5b3bcb6cbd3846c1b4-12501258-images-thumbs&n=13> (дата обращения: 03.02.2025).
4. Смирнов А.А. Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомного ледокольного флота России) / А.А. Смирнов, С.А. Головинский // Арктика: экология и экономика. 2014. № 4 (16). С. 108–114. EDN: TIFYBN
5. Обзорная схема прогноза Арктических акваториальных производственных комплексов (АТПК) и маршрутов движения судов. URL: <https://avatars.mds.yandex.net/i?id=3d36c4287efd91c0500fafa3f186e55d4fec7d73-12190079-images-thumbs&n=13> (дата обращения: 03.02.2025).
6. MSC/ Circ.1023. MEPC/Circ.392. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rulemaking process. London: International Maritime organization (IMO), 2002.
7. Zhao Hui, Hao Hu. Study on Economic Evaluation of the Northern Sea Route: Taking the Voyage of Yong Sheng as an Example // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2016;2549:78–85. doi:10.3141/2549–09 EDN: YYCXZV
8. Korolev I. Ju. Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 2016;6(40):105–112. doi:10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112
9. Korolev I. Ju. Verification of methods for assessment of the permissible vessel variation from the highlatitude Northern Sea route // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova. 2017;9.1:88–94. doi:10.21821/2309-5180-2017-9-1-88-94
10. Olkhovik E. Formation of ship's movements in the aquatoria of the northern sea route".Transport business.???
11. Исаулова К.Я. Исследование маршрутов движения крупнотоннажных судов в Восточном секторе акватории Северного морского пути // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12, № 4. С. 726–733. doi:10.21821/2309-5180-2020-12-4-726-733 EDN: JBPDGQ
12. Лежнева Л. Сложности перехода: для развития Севморпути потребуется еще до ста судов. URL: <https://iz.ru/1751203/liubov-lezhneva/slozhnosti-perekhoda-dlia-razvitiia-sevmorputi-potrebuetsia-eshche-do-sta-sudov>.
13. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения». Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА». 2023. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/2023.02.17.rukovodstvo.pol.zovatela.kondorfka.dla.saita.pdf>.
14. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс». Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми с космической системы «Ресурс-П». 2003. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol.zovatela.dannimi.dzz.polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf>.
15. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Акционерное общество «Корпорация «ВНИИЭМ». Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Канопус-В». 2003. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/March/rukovodstvo.k-v.dla.saita.pdf>.
16. Гуляков В.В., Гуляков В.Э., Калинов М.И., Родионов В.А. Сценарно-временной метод прогнозирования результатов применения космических радиолокационных систем в интересах информационного обеспечения ВВСТ // Сборник научных трудов межотраслевой НПК «ВОКОР-2018». СПб.: НИИ КиВ ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2018. С. 101–106.
17. Анцев Г.В., Гуляков В.В., Калинов М.И., Родионов В.А. Опыт и перспективы применения отечественных космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга морской поверхности. М.: АО «Концерн «Моринформсистема-Агат», 2018. № 1(13). С. 8–17.
18. Калинов М.И., Родионов В.А. Прогнозирование результатов применения космической системы радиолокационного наблюдения за судоходством по маршруту Северного морского пути // Сборник тезисов 32-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб.: ООО «РА ФОРТУНА», 2021. 200 с. С. 29–30. EDN: JXDJOI

References

1. Loginova NN. Materials for the “Government Hour” in the Federation Council on March 20, 2024 “On the transport potential of the NSR”. URL: https://parlib.duma.gov.ru/common/upload/document_pravchas/I_ghsf200324.pdf (Accessed 2025 Feb 3).
2. Andreeva EV, Isaulova KY. Prospects for the development of the NSR. Neftegaz.ru. 2021;(6). URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/686530-perspektivy-razvitiya-smp/> (Accessed 2025 Feb 30).

3. The NSR water area with seaports and shipping routes. URL: <https://avatars.mds.yandex.net/i?id=024111abe42c49ce-c13f5b5b3bcb6cbd3846c1b4-12501258-images-thumbs&n=13> (Accessed 2025 Feb 3).
4. Smirnov AA, Golovinsky SA. Prospects for the development of the Northern Sea Route (dedicated to the 55th anniversary of the Russian nuclear icebreaker Fleet). *Arctic: Ecology and Economics*. 2014;(4(16)):108–14.
5. Overview diagram of the forecast of Arctic aquaterritorial production complexes (ATPC) and ship routes. URL: <https://avatars.mds.yandex.net/i?id=3d36c4287efd91c0500fafa3f186e55d4fec7d73-12190079-images-thumbs&n=13> (Accessed 2025 Feb 3).
6. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rulemaking process. MSC/Circ.1023. MEPC/Circ.392. London: International Maritime Organization (IMO); 2002.
7. Zhao H, Hu H. Study on Economic Evaluation of the Northern Sea Route: Taking the Voyage of Yong Sheng as an Example. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016;2549:78–85. doi:10.3141/2549-09
8. Korolev IJ. Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2016;6(40):105–12. doi:10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112
9. Korolev IJ. Verification of methods for assessment of the permissible vessel variation from the highlatitude Northern sea route. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2017;9(1):88–94. doi:10.21821/2309-5180-2017-9-1-88-94
10. Olkhovik E. Formation of ship's movements in the aquatoria of the northern sea route. *Transport business...*
11. Isaulova KY. Research of routes of movement of large-tonnage vessels in the Eastern sector of the Northern Sea Route. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of the Marine and River Fleet*. 2020;12(4):726–33.
12. Lezhneva L. Transition difficulties: up to a hundred more vessels will be required for the development of the Northern Sea Route. URL: <https://iz.ru/1751203/liubov-lezhneva/slozhnosti-perekhoda-dlia-razvitiia-sevmorputi-potrebuetsia-eshche-do-sta-sudov> (Accessed 2025 Feb 3).
13. State Corporation for Space Activities “Roscosmos” Joint-stock Company “Military Industrial Corporation “Scientific and Production Association of Mechanical Engineering”. User’s Guide to remote sensing data of the Earth received by the space system “Condor-FKA”. 2023. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/2023.02.17.rukovodstvo.pol.zovatela.kondor-fka.dla.saita.pdf>.
14. State Corporation for Space Activities “Roscosmos”. Progress Rocket and Space Center Joint Stock Company. Guide user’s remote sensing data received from the Resurs-P space system. 2003. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol.zovatela.dannimi.dzz.polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf>.
15. State Corporation for Space Activities “Roscosmos”. VNIIE Corporation Joint Stock Company. User’s Guide to Earth remote sensing data received by the Canopus-V space system. 2003. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/March/rukovodstvo.k-v.dla.saita.pdf>.
16. Gulyakov VV, Gulyakov VE, Kalinov MI, Rodionov VA. A scenario-time method for predicting the results of using space radar systems in the interests of information support for the Russian Space Forces. Collection of scientific papers of the intersectoral Research and Development Company VOCOR-2018. St. Petersburg, Research Institute of the Naval Research Institute of the Russian Academy of Sciences “Naval Academy”. 2018. pp. 101–106.
17. Antsev GV, Gulyakov VV, Kalinov MI, Rodionov VA. *Experience and prospects of using domestic space systems for radar and radioelectronic monitoring of the sea surface*. Moscow: Concern Morinformsystem-Agat. 2018;(1(13)):8–17.
18. Kalinov MI, Rodionov VA. Forecasting the results of using a space-based radar surveillance system for navigation along the Northern Sea Route. *Collection of abstracts of the 32nd International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”*, St. Petersburg: RA FORTUNA LLC; 2021. p. 29–30.

Об авторах

РОДИОНОВ Владислав Александрович, главный научный сотрудник СПбНЦ РАН, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-7779-7554, Scopus AuthorID: 57221787342, SPIN-код (РИНЦ): 3597-0635, e-mail: var1959@mail.ru

КАЛИНОВ Михаил Иванович, ведущий научный сотрудник СПбНЦ РАН, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-2436-3354, SPIN-код (РИНЦ): 5612-6163, e-mail: cesavo@mail.ru

ГОВОРУХИН Валерий Павлович, заместитель директора по научной работе ИПТ РАН, ведущий научный сотрудник СПбНЦ РАН, кандидат технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-5161-9394, SPIN-код (РИНЦ): 8698-1270, e-mail: vgovorukhin@iptran.ru