

Закрытое акционерное общество
«Институт телекоммуникаций»

На правах рукописи

Истомин Иннокентий Евгеньевич

**ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И
ОЦЕНКИ РИСКОВОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В
ЛОКАЛЬНЫХ АКВАТОРИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АРКТИЧЕСКОГО
СУДОХОДСТВА**

Специальность 1.6.20 – «Геоинформатика, картография»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Научный руководитель: **Биденко Сергей Иванович**,
доктор технических наук, профессор, советник генерального директора Закрытого акционерного общества «Институт телекоммуникаций».

Официальные оппоненты: **Тезиков Александр Львович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидрографии моря» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.

Драбенко Дмитрий Вадимович,
кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Арктик шельф» Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт».

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет».**

Защита диссертации состоится «29» мая 2026 года в 11-00 на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, дом 98, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.365.01
кандидат технических наук (к.т.н.)

Петров Я. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Акватория Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) занимает значительное географическое пространство приполярной зоны и характеризуется сложными природными условиями и географическими факторами. Низкие температуры, мелководность, ледовитость, изменчивость рельефа дна, слабая изученность, недостаточная инфраструктурная оборудованность, отсутствие полнофункциональной системы освещения обстановки в акватории АЗРФ обуславливают значительные риски арктической территориальной активности, одной из основных составляющих которой является судоходство и транспортная логистика.

Риски любого судоходства во многом связаны с запасом чистой воды под килем судна, т. е. с глубинами или уровнем моря района плавания. На уровень моря локальной акватории в конкретный момент времени оказывают влияние такие гидрометеорологические (ГМ-) факторы, как ветровые сгонно-нагонные и приливные явления, осадки, течения и т.д. Морские риски арктической навигации наряду с ГМ-факторами уровня моря во многом сопряжены с ледовитостью, мелководностью акватории, изменчивостью ее рельефа дна, так как затрудняют маневры судна для выхода на безопасные глубины плавания.

Существующие геоинформационные, вероятностно-статистические и ГМ-методы опираются на ограниченный набор навигационных и гидрометеорологических данных, слабо учитывают территориальную неоднородность мелководных арктических акваторий, совместное действие негативных факторов и динамический характер локальной геоситуации. По этой причине снижается достоверность оценки рискованной навигационной обстановки, ухудшается качество рекомендаций по безопасному судоходству и возрастает вероятность принятия ошибочных решений.

Имеется противоречие между необходимостью оперативной и достоверной оценки рискованной геоситуации в локальных арктических акваториях и ограниченными возможностями существующих методов, ориентированных на частные ГМ-параметры, либо на фрагментарное логистическое описание без единой геоинформационной модели обстановки.

Налицо проблемный вопрос, связанный с адаптацией существующего модельно-методического аппарата анализа и прогнозирования рискованной навигационной ситуации к особенностям арктического района плавания. Существующие вероятностно-статистические методы прогнозирования ГМ-ситуации ограничены общими математическими постановками и требуют своей территориально-ситуационной специализации и адаптации применительно к условиям арктических морей.

Требуют своего разрешения противоречия, связанные с моделированием геоситуации в системе рискованного арктического судоходства (РАС) и решением методических задач оперативной оценки ГМ- и ситуационных рисков арктических акваторий и выработки рекомендаций по обеспечению безопасной навигации в морях Арктической зоны, что и обуславливает актуальность диссертационной работы.

Объект исследования: акватория и судоходство в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ).

Предмет исследования: модельно-методический аппарат представления и анализа геосистемы «рискованное арктическое судоходство» (РАС) на основе аналитического геоконтроллингового прогнозирования гидрометеорологических условий.

Цель диссертационного исследования: разработка модельно-методического аппарата представления и оценки состояния территориальной системы РАС и выработки геоконтроллинговых рекомендаций по снижению рисков судоходства в АЗРФ.

Задачи исследования:

1. проанализировать назначение, задачи, состав, структуру, архитектуру, а также специфику судоходства в акватории АЗРФ в территориальном контексте;
2. разработать вероятностно-статистическую модель оценки параметрических георисков;
3. разработать геоинформационную модель обстановки в территориальной системе РАС;
4. разработать геоинформационную методику оценки состояния РАС;
5. разработать практические рекомендации по проектированию геоинформационной системы управления по обеспечению безопасности деятельности морского транспортного комплекса в полуоткрытых мелководных акваториях.

Выносимые на защиту научные результаты и их новизна:

1. Геоинформационная модель системы РАС.
2. Геоинформационная методика оперативной оценки обстановки и выработки рекомендаций по организации функционирования системы РАС.

Научная новизна:

1. Геомодель системы «рискового арктического судоходства» (РАС) отличается территориальной интерпретацией навигационно-гидрографических процессов в единой геосистеме РАС, что обеспечивает на базе оперативного гидрометеорологического прогнозирования более полное, адекватное и оперативное отображение реальной навигационно-ситуационной и рискованной геоситуации в стеснённых полярных водах в интересах обеспечения безопасной арктической навигации.

2. Геоинформационная методика дополнительно содержит процедуры глубокого территориального прогноза ГМ-обстановки, комплексной оценки ситуационной и рискованной составляющих элементов геоситуации в акватории, территориальным представлением геоконтроллинговых элементов системы арктической навигации, что обеспечивает повышение точности навигационных параметров, повышение оперативности выработки рекомендаций для арктического судоходства, картографическое представление компонентов территориальной логистической активности, выработку оптимальных рекомендаций.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании подходов к использованию аппарата территориального анализа при разработке системы РАС, разработке территориально ориентированной методики вероятностно-статистической оценки уровня моря для минимизации гидрометеорологических и ситуационных рисков судоходства в Обской Губе, формулировке системы ограничений при перевозке грузов водным транспортом в акваториях АЗРФ, разработке формализмов описания и представления сложных логистических транспортных систем, функционирующих в интересах Морского Флота.

Практическая ценность работы определяется способностью модельно-методического аппарата организации регулирования безопасного судоходства в акваториях АЗРФ, которые обеспечивают прирост быстродействия при обработке больших массивов входных данных об окружающей среде и процессах морской транспортной логистики в сравнении с традиционными методиками за счет рискованно-адаптированных прогнозов, рациональной организации и планирования технологических процессов морского судоходства в современных условиях. При этом значение показателя полноты оперативного представления и анализа геоситуации в зоне арктического судоходства повысилось: для функционального подпространства системы рискованных морских арктических грузоперевозок на 9%; для операционного подпространства системы рискованных морских арктических грузоперевозок на 13%. Значение показателя своевременности вычисления оптимального маршрута судна повысилось на 7% по сравнению с существующими показателями оперативности.

Методы исследования. При проведении диссертационного исследования использовались методы формальной аксиоматической логики, теории функциональных систем, системного анализа, теории случайных процессов, картографического синтеза, теории вероятности и математической статистики, математического моделирования, теории множеств, теории управления, сетевого анализа, численного анализа, теоретической географии и геоинформатики.

Методологическую базу исследования составили труды ведущих ученых – докторов наук: Алаева Э.Б., Анохина П.К., Асланикашвилли А.Ф., Берлянта А.М., Биденко С.И., Бунге В., Буркова В.Н., Бурлова В.Г., Вагизова М.Р., Григорьева А.И., Гуссейн-Заде С.М., Де Мерса М.Н., Дмитриева В.В., Заболотского В.П., Завгороднего В.Н., Истомина Е.П., Кошкарева А.В., Лисицкого Д.В., Лурье И.К., Малинина В.Н., Малыгина И.Г., Макарова А.С., Матвеева В.В., Миронова Е.У., Нестерова Н.А., Новикова В.В., Оводенко А.А., Охорзина В.А., Перцика Е.Н., Поповича В.В., Присяжнюка С.П., Саушкина А.В., Сафонова К.В., Свешникова А.А., Серапинаса Б.Б., Соколова А.Г., Сперанского К.С., Тезиков А.Л., Тикунова В.С., Топчиева А.Г., Трофимова А.М, Цветкова В.Я., Шаркова А.М., Якушева Д.И., Яшина А.И.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов обусловлена применением хорошо апробированных методов анализа и синтеза, всесторонним учетом факторов, влияющих на результаты исследования, доведением теоретических выкладок до конечных машинных алгоритмов и программ, совпадением полученных результатов с представлениями ведущих экспертов. Достоверность подтверждается внедрением, апробацией и публикацией результатов исследования.

Соответствие паспорту специальности. Область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.6.20 – «Геоинформатика, картография»:

- 6. Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС.
- 7. Геоинформационное картографирование и другие виды геомоделирования, системный анализ многоуровневой и разнородной геоинформации.
- 20. Геоинформационное картографирование и компьютерные технологии.

Апробация и публикация результатов работы.

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях (с публикацией в сборниках докладов):

- Международная научно-практическая конференция ИНФОГЕО 2018. «Стратегическое управление развитием территорий»;
- Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях» (2023);
- International Scientific and Practical Conference “ON EARTH SCIENCES, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, AND REMOTE SENSING” (2025);
- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященной 90-летию создания факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ. Воронеж, 2024.
- Международная научно-практическая конференция ИНФОГЕО 2025 «Единое геоинформационное пространство для обеспечения устойчивого развития регионов: от сбора данных к интеграции», Санкт-Петербург, 2025.

Основные результаты работы **опубликованы** в 13 изданиях, из них 7 статей – в изданиях из рекомендованного ВАК перечня. Получено свидетельство ФСИС РФ от 25.09.2025 №2025685683 о **регистрации программы для ЭВМ «ДестРегК».**

Результаты работы внедрены: в НИР ГЗ «Беспшовное численное моделирование одновременного изменения климата, погоды, газового и аэрозольного состава атмосферы в

глобальном и региональном масштабах и создание цифровой географической информационной системы обработки баз данных о составе и структуре атмосферы» № FSZU-2023-0002 от 01.01.2023; НИР «Развитие систем навигационно-гидрографического обеспечения акватории Северного морского пути с учётом современных требований по безопасности мореплавания»; в учебный процесс РГГМУ на кафедре Прикладной информатики.

Личный вклад соискателя. Соискатель непосредственно занимался подготовкой и обработкой исходных материалов, разработкой требований, моделей и методики, анализом и формированием полученных результатов, в апробации результатов исследования, в подготовке основных публикаций.

Структура работы. Диссертация состоит из списка сокращений и обозначений, введения, трёх глав, содержащих 11 разделов, заключения, списка использованных источников. Объем работы составляет 169 страниц и 2 приложений, включает 41 рисунок, 14 таблиц. В список использованных источников включены 139 публикаций.

Содержание работы

Во **введении** определены актуальность, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования. Определены структура исследований, результаты, представляемые к защите. Определена научная новизна результатов и их практическая значимость.

В **главе 1** выполнен пространственно-содержательный анализ физико-географических и хозяйственно-географических условий системы рисков арктического судоходства, арктической территориальной активности (АТА), арктического флота РФ, рисков арктического судоходства, методов моделирования и поддержки безопасности РАС, проблемных вопросов РАС. Установлено:

1. Арктическое судоходство характеризуется глобальным территориальным охватом АЗРФ (рис. 1) и сложным содержательным функционированием.

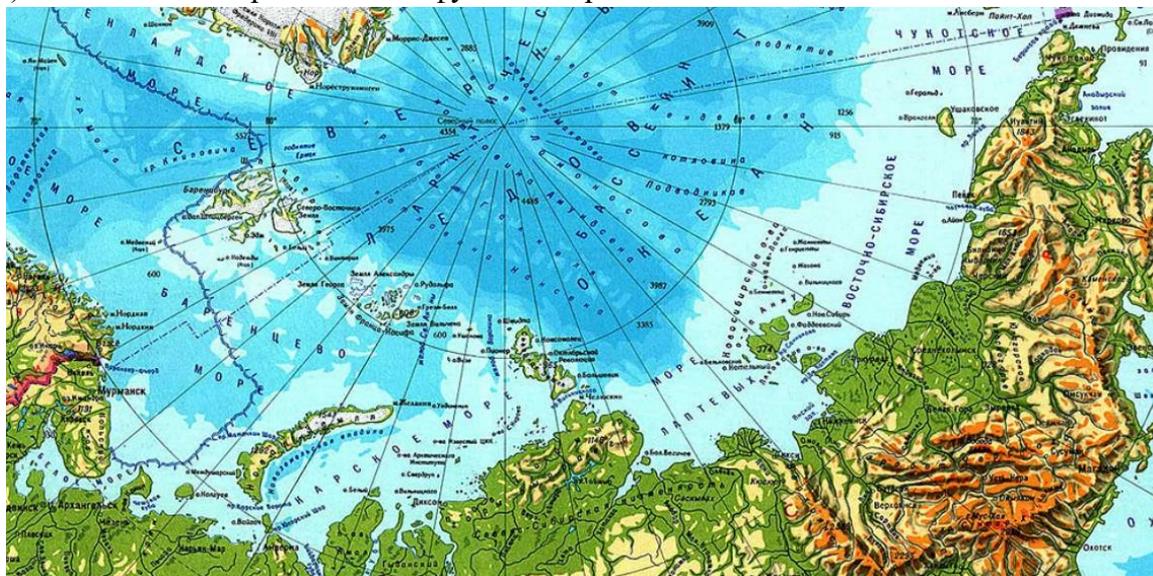


Рис. 1. Территориальный охват АЗРФ

2. Акватория АЗРФ является мелководной (табл. 1), ледовитой (табл. 2, рис.2), слабо изученной, недостаточно оборудованной в навигационном, инфраструктурном и киберфизическом (связь, освещение обстановки, координатное обеспечение) отношении. Это зона значительных аномалий физических полей Земли, низких температур, высокой влажности, сильных ветров, слабой освещенности, обильных осадков. Рельеф дна восточных морей Арктической зоны (Карское, Восточно-Сибирское, Чукотское, море Лаптевых) характеризуется высокой изменчивостью, обусловленной сильными выносами грунта сибирских рек.

Табл. 1. Распределение глубин по площади арктических морей – иллюстрация мелководности арктической акватории

Диапазон глубин, м	Доля площади, %			
	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
0-10	3,5	11,1	14	1
10-20	5,3	37,4	47	
20-30	10,1	22,7	25,5	6
> 30	81,1	28,8	13,5	93

Табл. 2. Основные характеристики площади покрытия льдом арктических морей для марта (числитель) и сентября (знаменатель)

Море	Площадь моря, млн км ²	Средняя площадь покрытия льдом (1981–2000 гг.), тыс. км ²	Доля ледового покрытия, %	Тренд, тыс. км ² /10 лет	СКО, тыс. км ²
Баренцево	1,62	744,6/47,2	45.9/6.3	-81,9/-8,1	131,8/41,6
Карское	0,98	898,5/146,2	91.6/14.8	-8,9/-44,0	10,6/96,0
Лаптевых	0,68	544,2/117,0	80.1/17.2	0, 3/-29,8	3,5/74,0
Восточно-Сибирское	0,99	688,6/223,6	69.5/22.5	-0,1/-92,7	4,0/134,3
Чукотское	0,64	344,8/19,4	53.9/2.9	0,3/-6,8	4,7/23,4

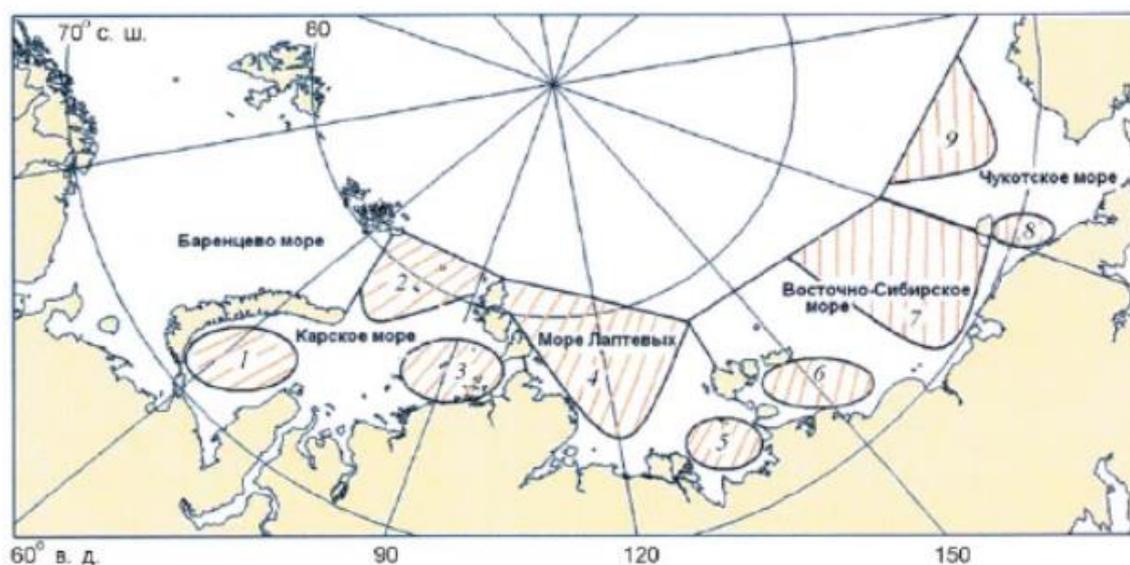


Рис. 2. Распределение ледовых массивов по площади арктических морей: 1. Новоземельский; 2. Карский северный; 3. Североземельский; 4. Таймырский; 5. Янский; 6. Новосибирский; 7. Айонский; 8. Врангелевский; 9. Чукотский северный – основные динамические ледовые массивы Арктической зоны

3. Обская губа (табл. 3) Карского моря характеризуется: а) в хозяйственном отношении - наибольшей территориальной активностью; б) особыми физико-географическими условиями,

связанными с ее пространственной топологией, ледовым, ветровым и уровневым режимом, экстремально высокой изменчивостью рельефа из-за выносов грунта рекой Обь.

Табл. 3. Природные, техногенные и социальные параметры акватории Обской губы

Физико-географические характеристики		
Размеры и морфометрия	длина и ширина	> 800 км, 30—90 км
	глубина	средняя: 12 м, максимальная: 25 м
	особенности берега	западный берег — низкий и пологий, восточный — возвышенный и обрывистый
	донный грунт	вязкий синий ил
Гидрологический режим	температура воды	июль: от +10°C до +22°C август: около +5°C сентябрь: около +2°C октябрь: ниже 0°C март: колебания от +1°C до +4°C
	уровень моря	высота прилива (летом) – до 1,5 м высота прилива (зимой) – до 0,9 м сгонно-нагонные колебания – до 2 м
Климатические условия	среднегодовая температура	зима: от -24°C до -29°C весна: от -5°C до +5°C лето: от +8°C до +12°C
	осадки	снежный покров зимой, дождливый летний сезон
	ветровой режим	зима: юг–юго-запад; весна: юг; лето: север–северо-запад; осень: запад
Хозяйственно-географические характеристики		
Экономическое значение	транспортная инфраструктура	ключевой элемент СМП; порты: Порт Сабетта, Новый Порт и др.
	нефтегазовая промышленность	разработка нефтегазовых месторождений компаниями «НОВАТЭК» и «Газпром»
	рыболовство	промысел рыбы, крабов, моллюсков
Проблемы судоходства	основные трудности	мелководье, ледовитость, короткий период навигации, сложные погодные условия
	возможные решения	углубление фарватеров, применение специальных судов, обеспечение безопасности движения

4. Арктическое судоходство осуществляется через ограниченные проливы (рис. 3), по установленным трассам плавания (рис. 4), лимитируется состоянием динамических ледовых полей (наличие полыней, каналов и разводий, торосистость и сплоченность льда), малыми глубинами рельефа дна, текущим уровнем моря.



Рис. 3. Основные проливы акватории АЗРФ, по которым может осуществляться арктическое судоходство

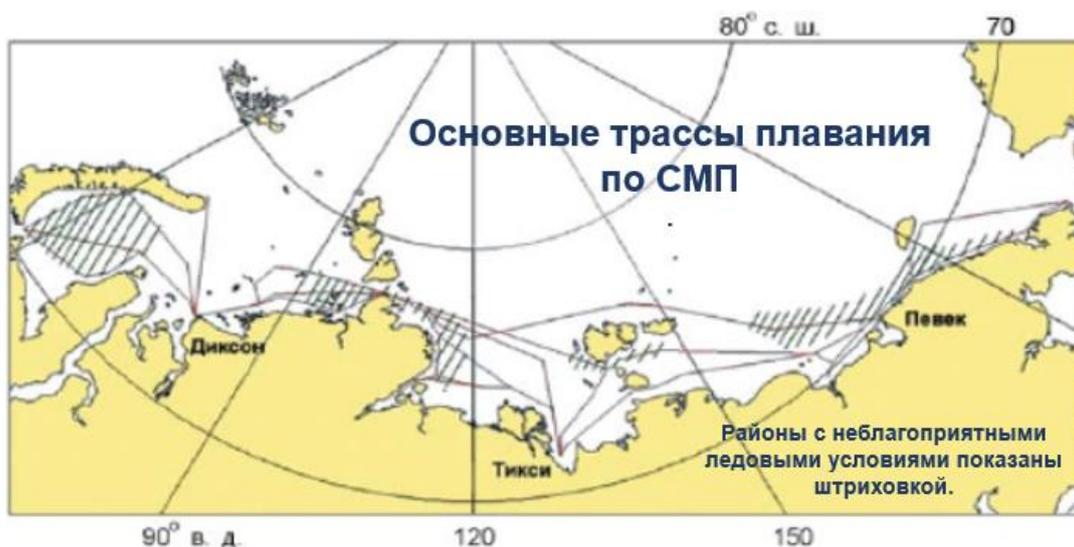


Рис. 4. Основные трассы плавания по СМП

5. Арктический флот РФ (табл. 4, 5) в целом обеспечивает потребности в грузоперевозках в полярной зоне, но значительные осадки судов требуют точного прогнозирования уровня, особенно в мелководных арктических морях.

Табл. 4. Сравнительные характеристики атомных ледоколов РФ

Характеристики	Пр. 1052 «Ямал», «50 лет Победы»	Пр. 10580 «Таймыр», «Вайгач»	Пр. 22220 «Арктика», «Сибирь», «Урал»	Пр. 10510 «Лидер»	Пр. 10570 лк офшорного типа
Район эксплуатации	СМП	Устья рек, мелководные участки	СМП, мелководные участки	СМП	Арктический шельф, мелководные участки
Западный сектор	постоянно	постоянно	постоянно	постоянно	постоянно
Восточный сектор	лето-осень	-	лето-осень	постоянно	-
Длина / ширина, м	148.0/30.0	150.0/29.2	173.3/34.0	209.2/47.7	152.0/31.0
Осадка, включая min	11.0	8.1	10.5	12	8.5
Мощность на валах, МВт	49.0	32.5	60.0	120.0	40.0
Водоизмещение, тыс. т	20.9	19.6	33.5	68.6	20.7
Ледопробитность, м	2.25	1.95	2.9	4.3	2.4

Табл. 5. Основные характеристики ледокольно-транспортных судов для Российской Арктики, построенных в 21 веке

Название головного судна	Норильский Никель (Енисей)	Василий Динков	Михаил Ульянов	Кристоф де Маржери	Штурман Альбанов	Б.Соколов (Ю.Кучиев)	Audax
Количество судов в серии	5 + 1	3	2	15	7	1 + 1	2
Годы постройки	2006-09, 2011	2008-09	2010	2016-2019	2016-17, 2019	2018-19	2016
Ледовый класс	Arc7	Arc6	Arc6	Arc7	Arc7	Arc7	Arc7/PC3
Длина наибольшая, м	169	257,3	257,7	299	245	214 (229)	206,3
Ширина, м	23,1	34	34	50	34	34 (32,5)	43
Осадка проектная, м	9,0	14,0	14,0	11,7	9,0	11,7	7,5
Дедвейт, т	14500	70000	70000	80000	38000	43400	24500
Ледопроницаемость, м носом/кормой	1,5/1,65	1,7/1,7	1,0/1,6	1,5/2,1	1,4/1,7	1,5/1,8	1,5

6. Риски арктического судоходства (рис. 5) связаны с мелководностью и ледовитостью акватории арктических морей, сильными ветрами и течениями, ограниченной видимостью из-за обильных осадков и слабой освещенности, слабой изученностью и оборудованностью в навигационно-гидрографическом отношении. Одним из значимых рисков является опасность малого запаса глубины (свободная вода) под килем судна. Знание уровня моря в мелководной ледовитой арктической акватории критически важно для маневра и выбора маршрута судна при плавании в динамических ледовых полях мелководных арктических морях в условиях многочисленных морских опасностей.

7. Традиционные методы прогноза уровня моря (гармонический анализ (метод Дарвина), численные гидродинамические модели, методы эмпирических функций влияния) ориентированы на оценку уровня чистой воды. Стохастические методы (случайные процессы, Марковские модели, анализ временных рядов) в определенной мере снимают ограничения вышеперечисленных подходов, но в своем изначальном виде нацелены на частные случаи локализованных морских акваторий. Т. е., неэффективны, например, в акватории Обской губы Карского моря с ее особыми ФГУ и ХГУ.



Рис. 5. Структура рисков арктического судоходства

8. Методы пространственного анализа теоретической и прикладной геоинформатики по своему предназначению также не в состоянии адекватно решать вопросы оценки и прогнозирования рисков уровня моря, хотя и обеспечивают оперативный параллельный анализ множественных опасностей природной, техногенной и социальной геосреды на значительной территории (акватории).

Таким образом, выявлен проблемный вопрос, связанный с необходимостью интеграции геоинформационных методов с аппаратом вероятностно-статистического анализа для решения вопроса адекватной оценки риска глубины и других морских опасностей в достаточно обширных и сложных для мореплавания условиях акватории Арктической зоны.

Сформулирована постановка задачи исследования для преодоления выявленного противоречия как операция построения и реализации трех последовательных отображений множества геопространственных данных о ситуации и территориальной активности в рискованных арктических акваториях (рис. 6).

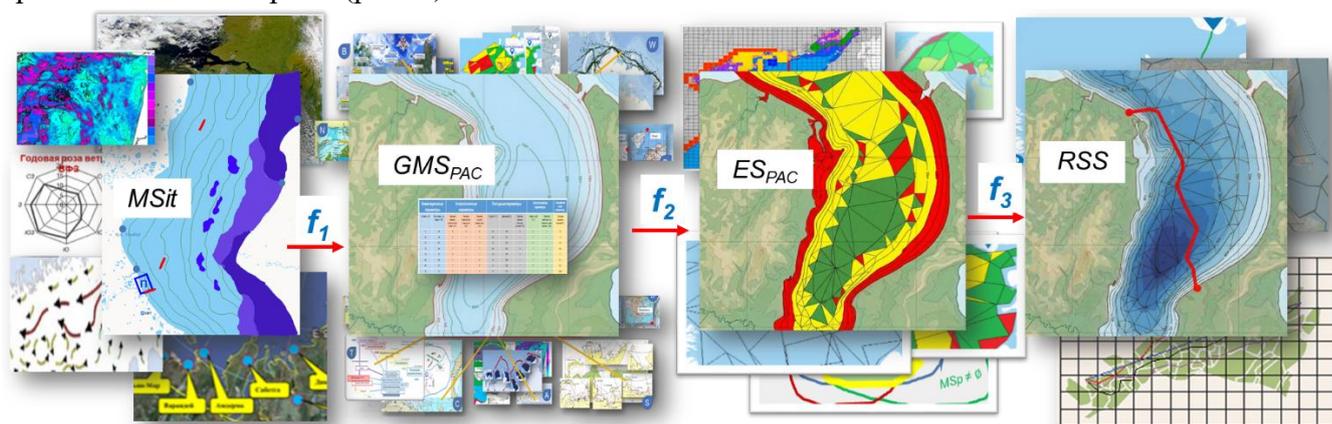


Рис. 6. Иллюстрация схемы постановки задач: *MSit* – реальная ситуация в морской акватории; *GMS_{PAC}* – геомодель обстановки в системе PAC; *ES_{PAC}* – оценка обстановки в системе PAC; *RSS* – пространственно-содержательные рекомендации по обеспечению безопасного судоходства; f_1 – отображение обстановки в геомодель ситуации; f_2 – отображение обстановки в оценку геоситуации; f_3 – отображение оценки обстановки и базы правил в пространственно-содержательные рекомендации по безопасному плаванию в рискованной акватории

Это первое: отображение f_1 реальной морской геоситуации в Арктической акватории $MSit$ в модель обстановки в акватории GMS_{PAC} . Далее, отображение f_2 модельного представления обстановки GMS_{PAC} в территориально-содержательную оценку геоситуации ES_{PAC} с учетом уровневых и др. морских рисков. И, наконец, отображение f_3 оценки обстановки ES_{PAC} в пространственно-содержательные рекомендации RSS по обеспечению безопасного судоходства в сложных условиях Арктической акватории.

Отображения f_1, f_2, f_3 реализуются с помощью модельно-методического аппарата и процедур математического и геопространственного описания, преобразования, отображения, анализа больших динамических массивов гидрометеорологической, навигационно-гидрографической, ситуационной геоинформации с использованием инструментов, формализмов, процедур и методик хорологизации, топологизации, анаморфирования, генерализации, масштабирования, утрирования и др. приложений геоинформатики и теории геоконтроллинга рисков территории активной.

В главе 2 исследована геомодель рискованного арктического судоходства. Геомодель РАС представляется через описание ее структуры, состава и содержания. Формально структура геомодели РАС и, в первую очередь, территориальной обстановки в системе рискованного судоходства GM_{RAS} представляется, как множество составляющих территориальную ситуацию геообъектов Ob_{RAS} (географических, хозяйственных, транспортных) с определенными над ними отношениями Rel_{RAS} . Т.е. это множество со структурой:

$$GM_{RAS} = (GOB_{RAS}, Rel_{RAS}), GOB_{RAS} \subset (R^m, S_{RAS}^n), m = \overline{2,3}, n \gg m, \quad (1)$$

Здесь GOB_{RAS} – геообъекты; Rel_{RAS} – отношения над объектами РАС (упорядочивающие отношения); R^m – физическое (евклидово) пространство; S_{RAS}^n – многомерное пространство признаков геообъектов и геоструктур РАС (содержательное описание).

Геообъект РАС (GO_{PAC}) – это, в первую очередь, некое плавсредство, функционирующее в рискованной морской среде, являющееся субъектом и объектом окружающей геосреды.

С точки зрения теории геопространств GO_{PAC} характеризуется собственным пространством $OSp_{GO_{RAS}}$ (пространственная протяженность и конфигурация) и собственным многомерным пространством признаков $MSSp_{GO_{RAS}}$ (описательные параметры, атрибуты, свойства и характеристики объекта):

$$GOB_{RAS} = (OSp_{GO_{RAS}}, MSSp_{GO_{RAS}}), \quad (2)$$

$$OSp_{GO_{RAS}}: GOB_{RAS} \rightarrow R^m, \quad MSSp_{GO_{RAS}}: GOB_{RAS} \rightarrow S_{RAS}^n.$$

С помощью отношений осуществляется структурирование (упорядочение) геопространства. В геопространстве между объектами выделяются отношения реальные (объективные), идеальные (или условно субъективные). Субъективным отношениям принадлежат оценочные отношения (например, рискованные). Формально отношения можно описать следующим способом:

$$Rel_{RAS} = \{RSp_{RAS}, RSc_{RAS}, Pr_{RAS}, Ev_{RAS}\}, \quad (3)$$

где RSp_{RAS} – отношения пространственной упорядоченности (ОПУ), обуславливают территориальную структуру геопространства для выражения содержания геообъектов и служат основой пространственного анализа геоситуации; RSc_{RAS} – отношения (предикаты) содержательной упорядоченности (ОСУ), определяют многомерное пространство признаков, и играют подчиненную по отношению к территории роль и служат для тематической характеристики горизонтальной составляющей геопространства; Pr_{RAS} – реально-объективные отношения проецирования, Ev_{RAS} – идеально-субъективные отношения – оценки.

Основу модели РАС составляет учёт географического положения и гидрографической сети региона, в рамках которых реализуются хозяйственные и природные процессы. Ключевую роль

в модели также играют транспортно-логистические операции и инфраструктура. Модель включает следующие подмодели (группы), содержащие параметры и характеристики специальных (отдельных) видов обстановки в РАС: навигационно-гидрографические параметры обстановки (подмодель N – топография, поле глубин, грунты, батиметрия, средства навигационного оборудования); гидрометеорологические параметры обстановки (подмодель A – температура, течения, ветер, осадки, влажность, видимость, ледовая обстановка); параметры обстановки на основных трассах и путях движения (подмодель S – топологию и содержательные характеристики основных арктических трасс и путей движения); параметры территориальной системы базирования флота, портовой инфраструктуры (подмодель B – территориальное распределение объектов инфраструктуры в АЗРФ и содержательное описание); параметры территориального распределения судов и транспортных потоков (подмодель W – отображают положение судов); ситуационно-тактические параметры обстановки (подмодель C – формальное описание действий флота, районы подготовки, опасные или закрытые зоны, районы учений, карантинные зоны, районы якорной стоянки, радиационные могильники); параметры рискованной обстановки (подмодель R – характеристики опасностей, угроз, неопределенностей, формирующих морские риски); описание задач, решаемых системой РАС (подмодель T – параметры контроллинговой обстановки, установочные контролируемые параметры, критерии оценки обстановки).

Состав модели общей обстановки в регионе (акватории), в т. ч. и транспортно-логистической ситуации, представляет собой совокупность значений векторов параметров и оценок составляющих факторов компонентов обстановки, а также геоизображения территорий (акватории), параметров и соответствующих оценок (рис.7).

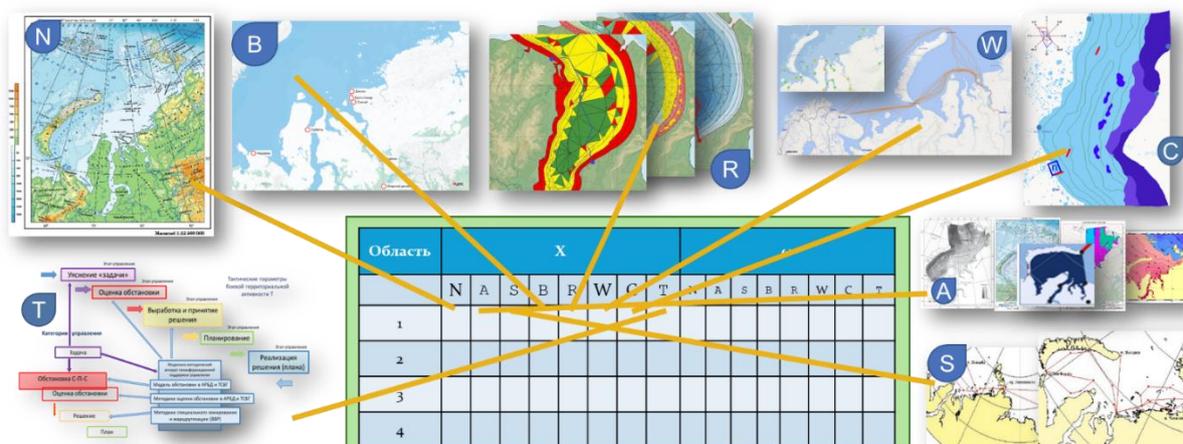


Рис.7. Состав модели обстановки в РАС: N – навигационно-гидрографические параметры обстановки, N_1, N_2, \dots, N_s ; A – гидрометеорологические параметры обстановки, A_1, A_2, \dots, A_k ;

S – параметры обстановки на основных трассах и путях движения в акватории АЗРФ, S_1, S_2, \dots, S_6 ; B – параметры территориальной системы базирования сил, войск и флота в АЗРФ, B_1, B_2, \dots, B_n ;

W – параметры территориального распределения судов и транспортных потоков, W_1, W_2, \dots, W_r ; R – параметры рискованной обстановки в акватории АЗРФ, R_1, R_2, \dots, R_m ; C – ситуационно-операционные параметры обстановки, C_1, C_2, \dots, C_q ; T – контроллинговые параметры РАС (решаемые задачи),

T_1, T_2, \dots, T_p .

Содержательная часть модели включает математические, множественные, инфологические и др. описания процессов и явлений в системе РАС. В первую очередь, - это модели и описания

ГМ-процессов, связанных с изменением уровня моря (воды) в локальных акваториях АЗРФ. Так, для количественного определения параметров рисков волновых процессов модели РАС построена статистически-вероятностная модель. Модель оценки вероятности выхода случайного процесса за заданные границы $D(t) = [a(t), b(t)]$ на интервале времени $[0, t_f]$ при заданном начальном условии (далее называем вероятностью выхода) основана на следующем определении:

$$Q(t_f|x_b) = 1 - P(t_f|x_b). \quad (4)$$

Здесь определяем вероятность выхода через противопоставление понятию, т. е. через вероятность выхода случайного процесса за заданные границы $D(t) = [a(t), b(t)]$ на интервале времени $[0, t_f]$ при заданном начальном условии:

$$P(t_f|x_b) = P\{X(\tau) \in D(\tau), \forall \tau \in [0, t_f], X(0) = x_b\}, \quad (5)$$

где t_f – данный момент времени, x_b – значение параметра в начальный момент времени.

Так как нельзя получить точное значение $Q(t_f|x_b)$, введём понятие верхней границы $Q^*(t_f|x_b)$ и нижней границы $Q_*(t_f|x_b)$ оценки риска:

$$0 \leq Q_*(t_f|x_b) \leq Q(t_f|x_b) \leq Q^*(t_f|x_b) \leq 1. \quad (6)$$

Получено аналитическое выражение оценок рисков для случая нормального процесса. Нижняя граница оценки имеет вид:

$$Q_*(t_f|x_b) = 1 - \min_{\theta \in [0, t_f]} \left(\Phi \left(\frac{b(\theta) - m(\theta) - \frac{\sigma(\theta)}{\sigma(0)} \rho(0, \theta) (x_b - m(0))}{\sigma(\theta) \sqrt{1 - \rho^2(0, \theta)}} \right) - \Phi \left(\frac{a(\theta) - m(\theta) - \frac{\sigma(\theta)}{\sigma(0)} \rho(0, \theta) (x_b - m(0))}{\sigma(\theta) \sqrt{1 - \rho^2(0, \theta)}} \right) \right), \quad (7)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy.$$

Верхняя граница оценки имеет вид:

$$Q^*(t_f|x_b) = 1 - \int_0^{t_f} \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi(1 - \rho_f^2)}} W(t|x_b) - \frac{1}{8\sqrt{2\pi(1 - \rho^2)}} \cdot U(t|x_b) \right| dt \quad (8)$$

Где введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(0, t), \rho_f = \rho(0, t_f), \partial\beta = \frac{d\beta(t|x_b)}{dt}, \partial\alpha = \frac{d\alpha(t|x_b)}{dt} \\ W(t|x_b) &= (\partial\beta + g'(t) \cdot \beta) \cdot \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) - (\partial\alpha + g'(t) \cdot \alpha) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right) \\ U(t|x_b) &= \exp\left(-\frac{\delta}{2} \cdot \beta^2\right) \cdot \left(-\partial\beta + \sqrt{2}\eta\nu \cdot \beta + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2c_0}} \cdot \eta\right) - \\ &\quad - \exp\left(-\frac{\delta}{2} \cdot \alpha^2\right) \cdot \left(-\partial\alpha + \sqrt{2}\eta\nu \cdot \alpha - \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2c_0}} \cdot \eta\right) \\ \alpha &= \alpha(t|x_b) = (a(t) - m(t)) \frac{1}{\sigma(t)} - \rho(0, t) \cdot (x_b - m(0)) \cdot \frac{1}{\sigma(0)} \end{aligned}$$

$$\beta = \beta(t|x_b) = (b(t) - m(t)) \frac{1}{\sigma(t)} - \rho(0, t) \cdot (x_b - m(0)) \cdot \frac{1}{\sigma(0)}$$

$$g(t, t + \tau) = \frac{1}{\rho(t, t + \tau)}; \quad g'(t) = \left. \frac{dg(t, t + \tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0}, \quad \eta = -2\partial\rho_{tt}, \quad \partial\rho_{tt} = \left. \frac{\partial}{\partial s} (\rho(t, s)) \right|_{s=t}$$

$$v = d_1 + d_2 - d_3, \quad d_i = \sum_{j=0}^3 v_{ij}, \quad \delta = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 v_{ij}, \quad c_0 = \sum_{i=1}^3 \sqrt{i}$$

Обозначения имеют следующий физический смысл: $X(t)$ – случайный параметр (геопараметр), который может характеризовать геопроцесс, например, уровень водной поверхности; ρ – автокорреляционная функция, которая описывает взаимосвязь геориска в данный момент с геориском в предыдущий момент времени; $[a(t), b(t)]$ – заданный промежуток (может зависеть от времени); $m(t)$ – математическое ожидание (среднее значение) случайного процесса; $\sigma(t)$ – среднеквадратическое отклонение случайного процесса, которое показывает, насколько сильно отдельные значения отличаются от среднего; x_b – значение параметра в начальный момент времени, который должен принадлежать промежутку $[a(0), b(0)]$.

Рассматривается модель ветровых волн в мелководных акваториях, и строится численная модель. Для расчётов в акваториях с малыми значениями глубин может использоваться уравнение мелкой воды, которое описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} ((H + h) \cdot u_x) + \frac{\partial}{\partial y} ((H + h) \cdot u_y) = 0$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} - f \cdot u_y = -g \frac{\partial h}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{H + h} - \frac{\tau_{bx}}{H + h} \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + f \cdot u_x = -g \frac{\partial h}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{H + h} - \frac{\tau_{by}}{H + h}$$

Здесь $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематическая вязкость; $h(x, y, t)$ – отклонение высоты горизонтальной поверхности давления от её «нулевой» отметки, $H(x, y)$ – рельеф дна, так же справедливо следующее: $\eta(x, y, t) = h(x, y, t) + H(x, y)$; f – коэффициент Кориолиса, связанный с силой Кориолиса, который для Земли имеет следующий вид: $f = 2\Omega \cdot \sin(\varphi)$, $\Omega = \frac{\pi}{12}$ рад/час – угловая скорость вращения Земли, φ – широта Земли; $\tau_{sx} = \gamma_s w_s^2 \cdot n_{sx}$ – трение, связанное с ветром вдоль x ; $\tau_{sy} = \gamma_s w_s^2 \cdot n_{sy}$ – трение, связанное с ветром вдоль y ; γ_s – коэффициент трения ветра о поверхность воды; (n_{sx}, n_{sy}) – вектор направления скорости ветра, модуль которого равен единице; $w_s = \sqrt{w_{sx}^2 + w_{sy}^2}$ – скорости ветра; $\tau_{bx} = \gamma_b u \cdot u_x$ – трение, связанное с дном вдоль x ; $\tau_{by} = \gamma_b u \cdot u_y$ – трение, связанное с дном вдоль y ; γ_b – коэффициент трения воды о поверхность дна; $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ – скорости потока воды.

Для получения единственного решения необходимо задать начальные и граничные условия. Условие непроницаемости и прилипания имеет следующий вид:

$$\mathbf{u}|_S = 0,$$

где $\mathbf{u} = (u_x, u_y)$ – вектор скорости потока воды, S – уравнение, которое задаёт границу акватории. Условие втекания или вытекания воды имеет следующий вид:

$$\mathbf{u}|_{S_i} = \mathbf{u}_i(x, y). \quad (106)$$

Здесь S_i – промежутки на границе, где имеются втекания или вытекания воды; $\mathbf{u}_i(x, y)$ – скорости потоков воды на промежутке границы S_i . Начальные условия будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
u_x(x, y, t)|_{t=0} &= u_x^0(x, y) \\
u_y(x, y, t)|_{t=0} &= u_y^0(x, y) \\
h(x, y, t)|_{t=0} &= h^0(x, y),
\end{aligned} \tag{11}$$

где $u_x^0(x, y)$, $u_y^0(x, y)$ и $h^0(x, y)$ – некоторые функции, которые задают скорость потока воды вдоль x , скорость потока воды вдоль y и уровень воды в начальный момент времени соответственно.

Система уравнений (9) для сложного типа акваторий не имеет аналитических решений, поэтому ставится задача получения численных решений этой системы уравнений. Используя метод конечных разностей, задача решена следующим образом:

$$\begin{aligned}
h_{n,m}^{(k+1)} &= h_{n,m}^{(k)} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (H_{n+1,m} + h_{n+1,m}^{(k)}) \cdot u_{n+1,m}^{(k)} + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (H_{n-1,m} + h_{n-1,m}^{(k)}) \cdot \\
&\cdot u_{n-1,m}^{(k)} - \frac{\Delta t}{2\Delta y} (H_{n,m+1} + h_{n,m+1}^{(k)}) \cdot v_{n,m+1}^{(k)} + \frac{\Delta t}{2\Delta y} (H_{n,m-1} + h_{n,m-1}^{(k)}) \cdot v_{n,m-1}^{(k)}.
\end{aligned} \tag{12a}$$

$$\begin{aligned}
u_{n,m}^{(k+1)} &= u_{n,m}^{(k)} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \cdot u_{n,m}^{(k)} \cdot u_{n+1,m}^{(k)} + \frac{\Delta t}{2\Delta x} \cdot u_{n,m}^{(k)} \cdot u_{n-1,m}^{(k)} - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \cdot v_{n,m}^{(k)} \cdot u_{n+1,m}^{(k)} + \\
&+ \frac{\Delta t}{2\Delta y} \cdot v_{n,m}^{(k)} \cdot u_{n-1,m}^{(k)} + \Delta t \cdot f_{n,m} \cdot v_{n,m}^{(k)} - g \frac{\Delta t}{2\Delta x} \cdot h_{n+1,m}^{(k)} + g \frac{\Delta t}{2\Delta x} \cdot h_{n-1,m}^{(k)} - \\
&- \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot u_{n-1,m}^{(k)} + \frac{2 \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot u_{n,m}^{(k)} - \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot u_{n+1,m}^{(k)} - \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \cdot u_{n,m-1}^{(k)} + \\
&+ \frac{2 \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \cdot u_{n,m}^{(k)} - \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \cdot u_{n,m+1}^{(k)} + \Delta t \cdot \frac{S_{n,m}^{(x,k)}}{H_{n,m} + h_{n,m}^{(k)}} - \Delta t \cdot \frac{b_{n,m}^{(x,k)}}{H_{n,m} + h_{n,m}^{(k)}}.
\end{aligned} \tag{12б}$$

$$\begin{aligned}
v_{n,m}^{(k+1)} &= v_{n,m}^{(k)} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \cdot u_{n,m}^{(k)} \cdot v_{n+1,m}^{(k)} + \frac{\Delta t}{2\Delta x} \cdot u_{n,m}^{(k)} \cdot v_{n-1,m}^{(k)} - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \cdot v_{n,m}^{(k)} \cdot v_{n+1,m}^{(k)} + \\
&+ \frac{\Delta t}{2\Delta y} \cdot v_{n,m}^{(k)} \cdot v_{n-1,m}^{(k)} + \Delta t \cdot f_{n,m} \cdot u_{n,m}^{(k)} - g \frac{\Delta t}{2\Delta y} \cdot h_{n+1,m}^{(k)} + g \frac{\Delta t}{2\Delta y} \cdot h_{n-1,m}^{(k)} - \\
&- \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot v_{n-1,m}^{(k)} + \frac{2 \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot v_{n,m}^{(k)} - \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot v_{n+1,m}^{(k)} - \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \cdot v_{n,m-1}^{(k)} + \\
&+ \frac{2 \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \cdot v_{n,m}^{(k)} - \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \cdot v_{n,m+1}^{(k)} + \Delta t \cdot \frac{S_{n,m}^{(y,k)}}{H_{n,m} + h_{n,m}^{(k)}} - \Delta t \cdot \frac{b_{n,m}^{(y,k)}}{H_{n,m} + h_{n,m}^{(k)}}.
\end{aligned} \tag{12в}$$

Получена система уравнений (12), в которой параметры (уровень воды, скорость потока вдоль x и y) в последующий момент времени явно выражаются через параметры в данный момент времени, что значительно упрощает и ускоряет вычисления.

В **третьей главе** разработана геоинформационная методика оперативной оценки обстановки и выработки рекомендаций по организации функционирования системы РАС, которая включает следующие основные этапы и процедуры: оценку краткосрочных георисков, оценку долгосрочных георисков, оценку волновых георисков, которые учитывают особенности краткосрочных и долгосрочных прогнозов, интегральную методику оценки георисков арктического судоходства, а также программную методику пространственного анализа рисков арктических акваторий и выработки пространственно-содержательных рекомендаций по безопасности арктической навигации.

Особенности краткосрочного прогнозирования георисков заключаются в том, что содержат слабо автокоррелированные ограничивающие факторы. Слабо автокоррелированные ограничивающие факторы можно определить, как факторы, значение автокорреляционной функции между двумя временными точками которых меньше 0,2. Если значения величины

уровня водной поверхности слабо зависит от времени, то автокорреляционная функция будет быстро спадать от 1 до малых значений (значений меньше 0,2). Следующая особенность – это наличие двух процессов, которые связаны с приливными явлениями и с отливными явлениями. Каждый из процессов подчиняется нормальному закону распределения. На рис. 8 а) представлена схема методики краткосрочного прогноза георисков волновых явлений.

Особенности долгосрочного прогнозирования георисков заключается в том, что содержат сильно автокоррелированные ограничивающие факторы. Сильно автокоррелированные ограничивающие факторы можно определить как факторы, значение автокорреляционной функции между двумя временными точками которых больше 0,2. Если значения величины уровня водной поверхности имеют зависимость от времени, то значение автокорреляционной функции будет уменьшаться или увеличиваться в промежутке от 1 до 0,2. Следующая особенность – это наличие лишь одного процесса, который подчиняется нормальному закону распределения. На рис. 8 б) представлена схема методики долгосрочного прогноза георисков волновых явлений.

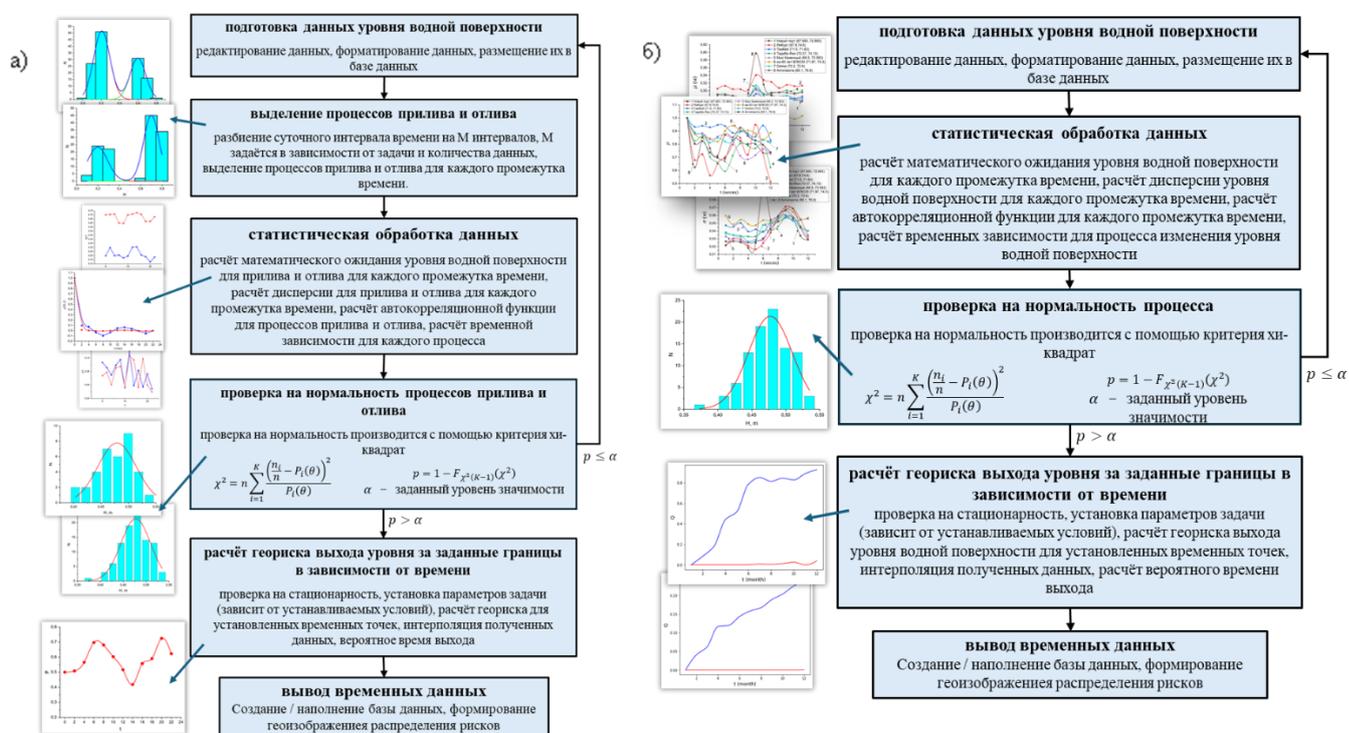


Рис. 8. Схемы геоинформационных методик: а) краткосрочного прогноза георисков волновых явлений; б) долгосрочного прогноза георисков волновых явлений

Для одной из точек акватории Обской губы (точка Сеяха (70,2; 72,6)) проведён статистический анализ процесса изменения уровня водной поверхности для промежутка времени в 24 часа (рис. 9). Выделены два процесса (прилив и отлив) и показано, что значение автокорреляционной функции малы. Значение вероятности прилива или отлива зависят от времени.

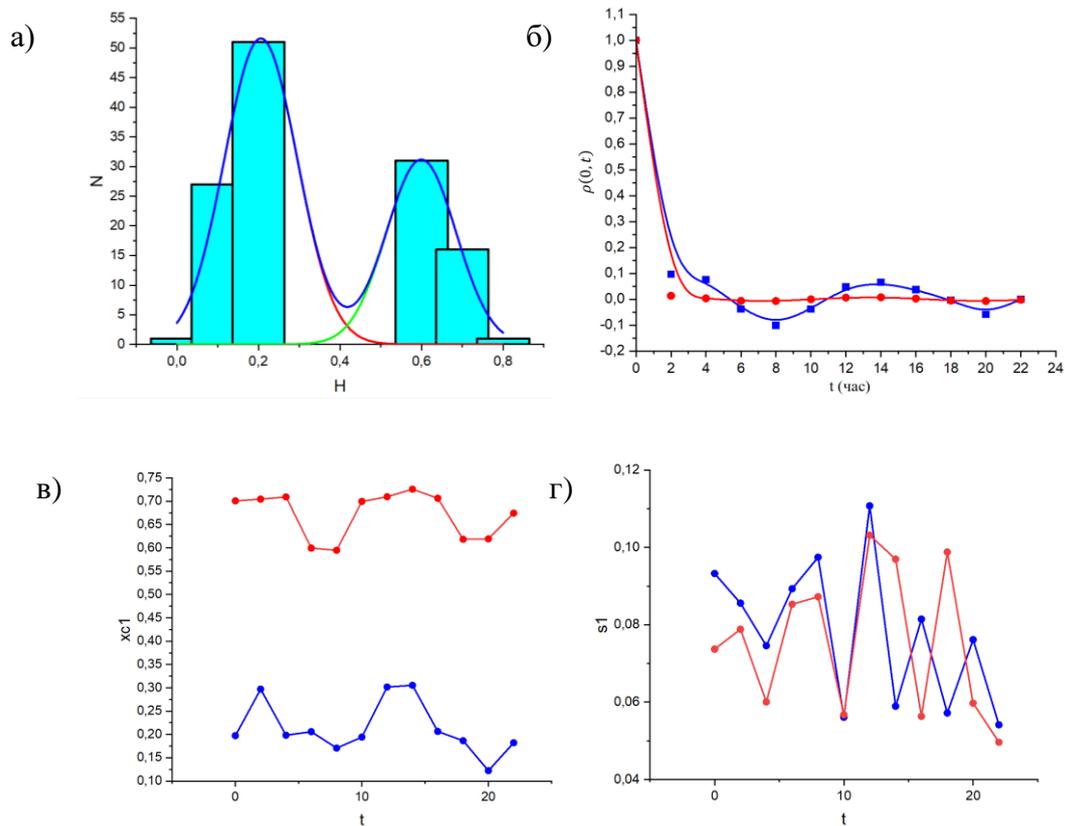


Рис. 9. Параметры статистической обработки значений уровня водной поверхности в точке Сеяха: а) статистика наблюдений по уровню за сутки; б) автокорреляционная функция $\rho(0, t)$ прилива и отлива в зависимости от времени (красные кривые – прилив, синие кривые – отлив); в) среднее значение прилива и отлива в зависимости от времени (красные кривые – прилив, синие кривые – отлив); г) среднеквадратичное отклонение прилива и отлива в зависимости от времени (красные кривые – прилив, синие кривые – отлив)

На рис. 10 показано значение риска выхода уровня воды за границы промежутка $[0; 0,6]$ в зависимости от времени. Вероятное время выхода уровня воды за границы заданного промежутка – среднее время, в течение которого уровень водной поверхности будет выше 0,6 м. Для заданного промежутка высот $[0; 0,6]$ вероятное время выхода уровня водной поверхности $T_{\text{ВЫХ}} = 11,42$ часов.

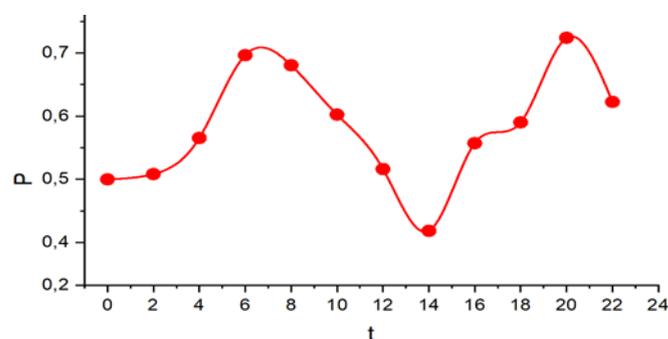


Рис. 10. Зависимость риска выхода уровня воды за границы промежутка $[0; 0,6]$ от времени t . Сплошной кривой изображена кубическая сплайн интерполяция

Для нескольких точек акватории Обской губы (Сеяха (70,2; 72,6), Новый порт (67,683; 72,883), Ямбург (67,9; 74,8), Тамбей (71,5; 71,83), Тадибе-Яха (70,37; 74,13), Мыс Каменный (68,5; 73,583), им.60 лет ВЛКСМ (71,97; 74,3), Антипаюта (69,1; 76,9)) проведён статистический анализ процесса изменения уровня водной поверхности для промежутка времени в 1 год (рис. 11). Выделен один процесс и показано, что значение автокорреляционной функции не является малым.

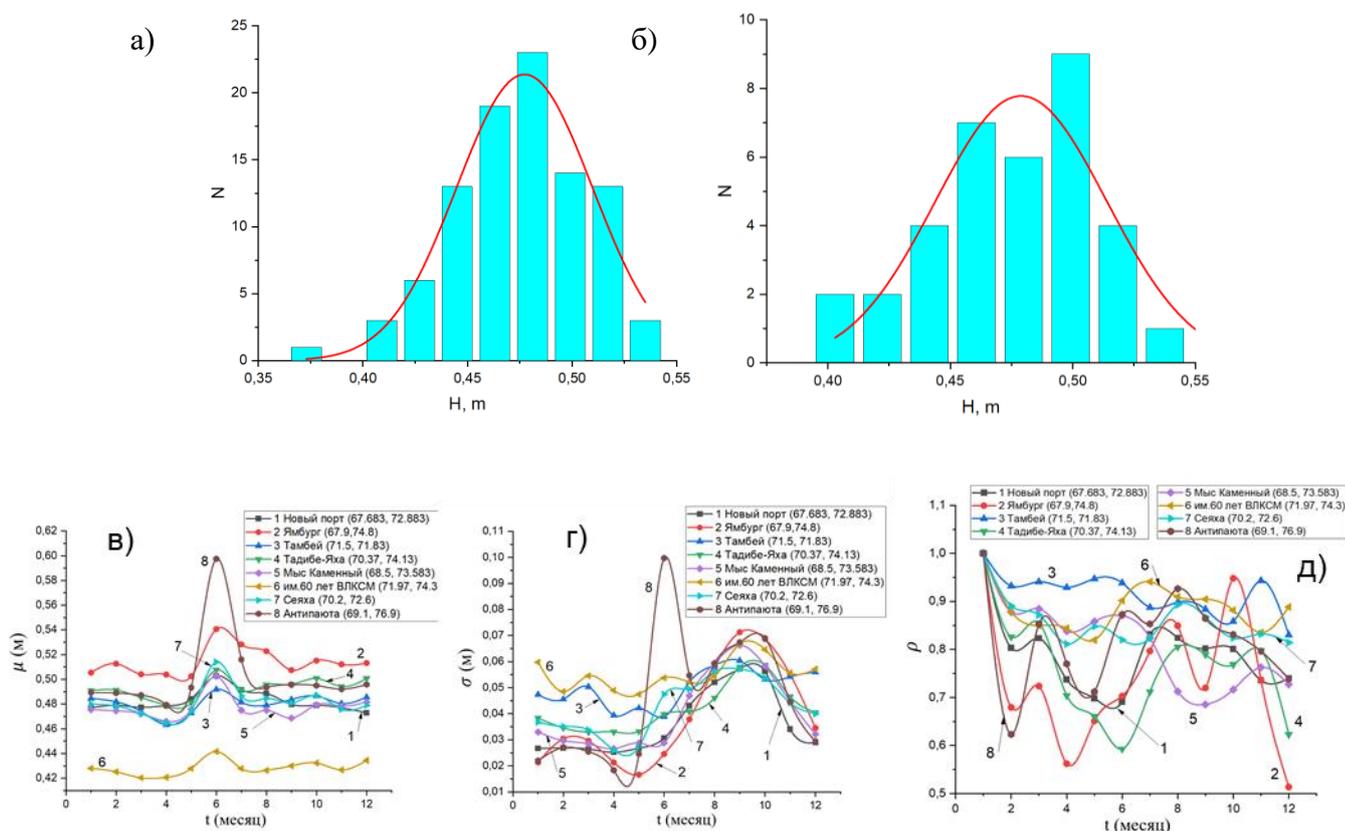


Рис. 11. Параметры статистической обработки значений уровня водной поверхности (уровня): а) статистика наблюдений по уровню за сутки; б) статистика наблюдений по уровню водной поверхности; в) среднее значение уровня в зависимости от времени для разных точек; г) среднеквадратичное отклонение уровня в зависимости от времени в разных точках; д) автокорреляционная функция $\rho(0, t)$ уровня в зависимости от времени в разных точках

На рис. 12 показаны значения риска выхода уровня воды за границы промежутков в зависимости от времени. В данном случае вероятное время выхода уровня воды за границы заданного промежутка определяется как среднее время, в течение которого уровень водной поверхности выйдет за заданную границу. Для случая, представленном на рисунке 12а) вероятное время выхода составляет 5,2 месяца.

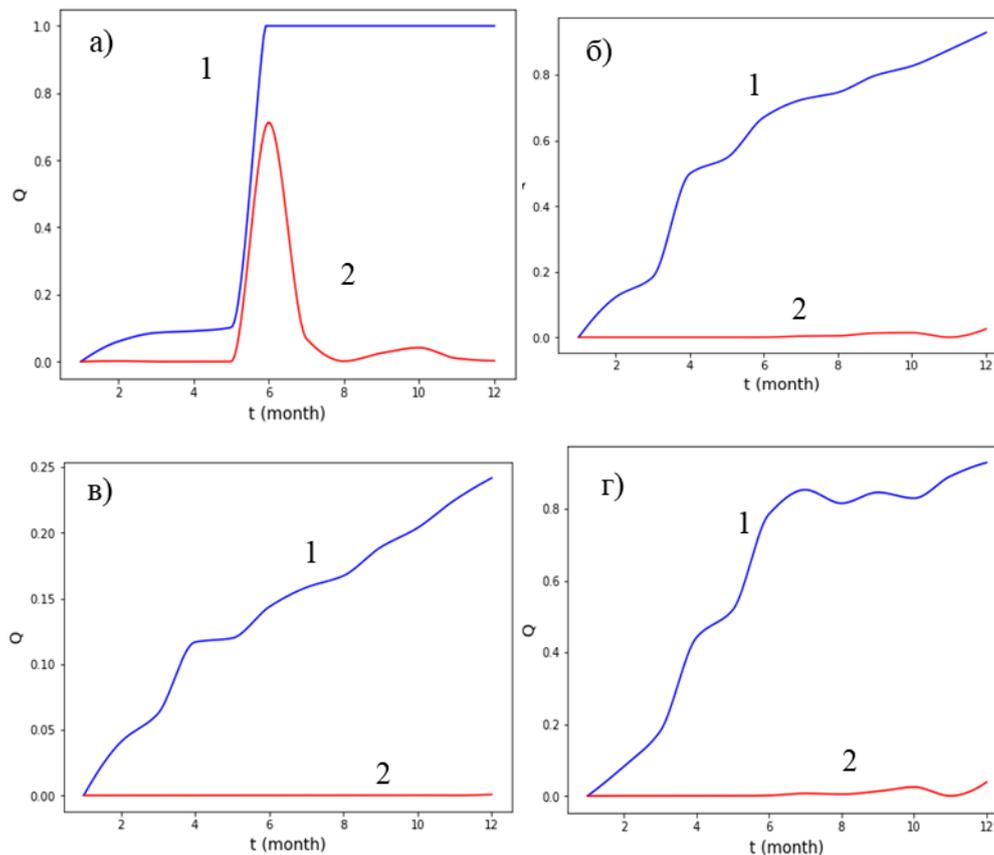


Рис. 12. Зависимость геориска выхода уровня воды за границы промежутка от времени t при заданном начальном условии x_0 для разных точек. Кривая 1 - верхняя граница оценки геориска $Q^*(t_f|x_b)$, кривая 2 – нижняя граница оценки геориска $Q_*(t_f|x_b)$. а) Точка Антипаюта, интервал $[0; 0,545]$, $x_b = 0,483$. б) Точка Тамбей, интервал $[0; 0,545]$, $x_b = 0,483$. в) Точка Тамбей, интервал $[0; 0,545]$, $x_b = 0,443$ г) Точка Тамбей, интервал $[0; 0,500]$, $x_b = 0,443$

В арктической зоне измерение параметров уровня водной поверхности затруднительно из-за сложных климатических условий. Поэтому количество данных недостаточно для точного прогнозирования рискованного состояния акваторий в арктической зоне. На рис. 13. представлена методика оценки волновых георисков, которые позволяют оценить риск во всей акватории и учитывают особенности долгосрочных и краткосрочных прогнозов.

Традиционные методы планирования, основанные на анализе ограниченного набора навигационных данных (прежде всего, батиметрия и краткосрочные метеопрогнозы), становятся недостаточными. Современные вызовы требуют интегрального подхода, учитывающего вероятностную природу многих опасных явлений и их взаимное влияние.

Предложен подход к геоконтроллингу транспортной логистики, основанный на двухэтапном цикле территориального анализа. На первом этапе формируется динамическая безопасная изобата, очерчивающая зону допустимого риска, связанного с уровнем воды. Второй этап заключается в комплексной (интегральной) оценке всех остальных видов рисков в пределах выделенной безопасной зоны. Практическая реализация данного метода осуществлена в рамках программно-информационного комплекса, структурно состоящего из двух основных модулей: «Оценка ГеоРисков» (вероятностная модель уровня воды) и «Интегральная оценка георисков» (нейросетевая интегральная оценка), предназначенная для планирования переходов в сложных акваториях Арктики, например, таких как Обская губа (Карское море).

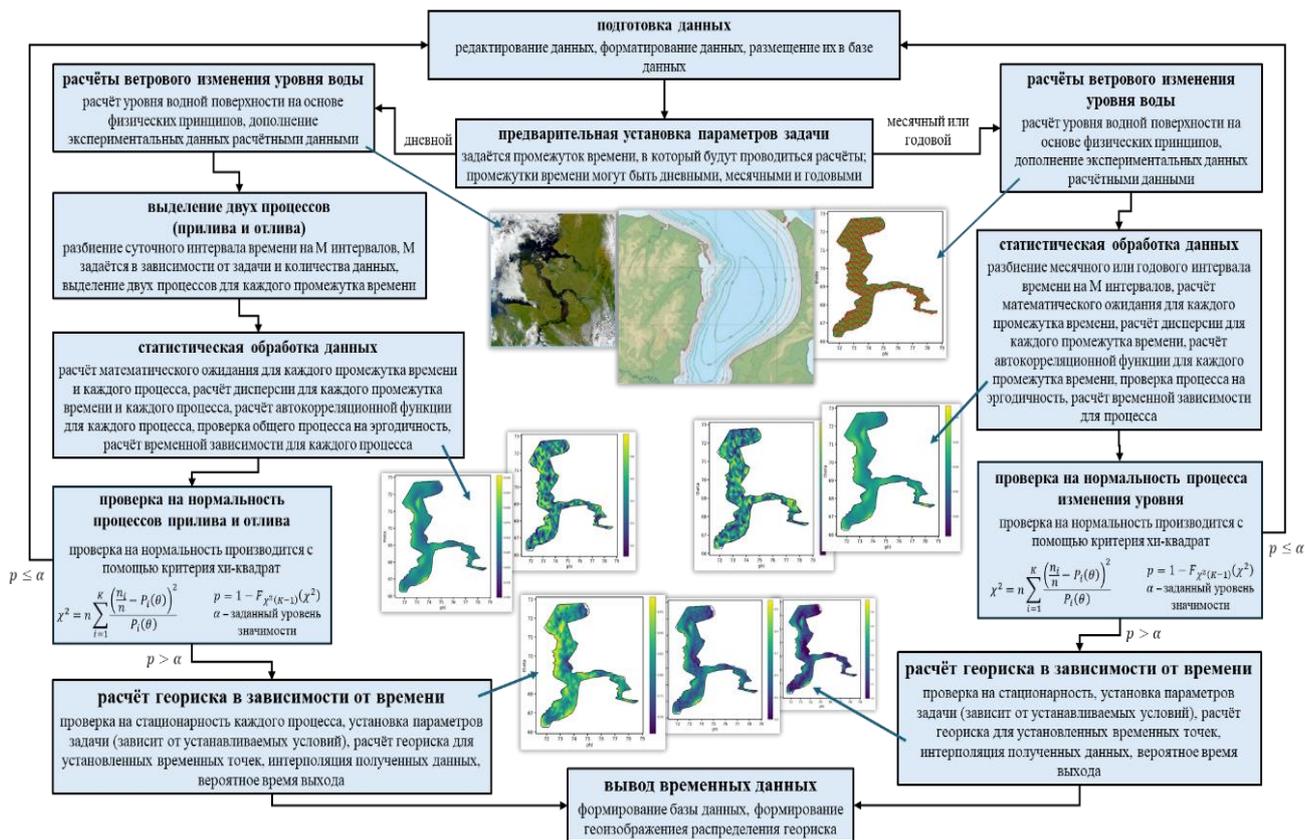


Рис. 13. Схема интегральной методике оценки георисков

Проведены расчёты распределения георисков для всей акватории Обской губы (рис. 14).

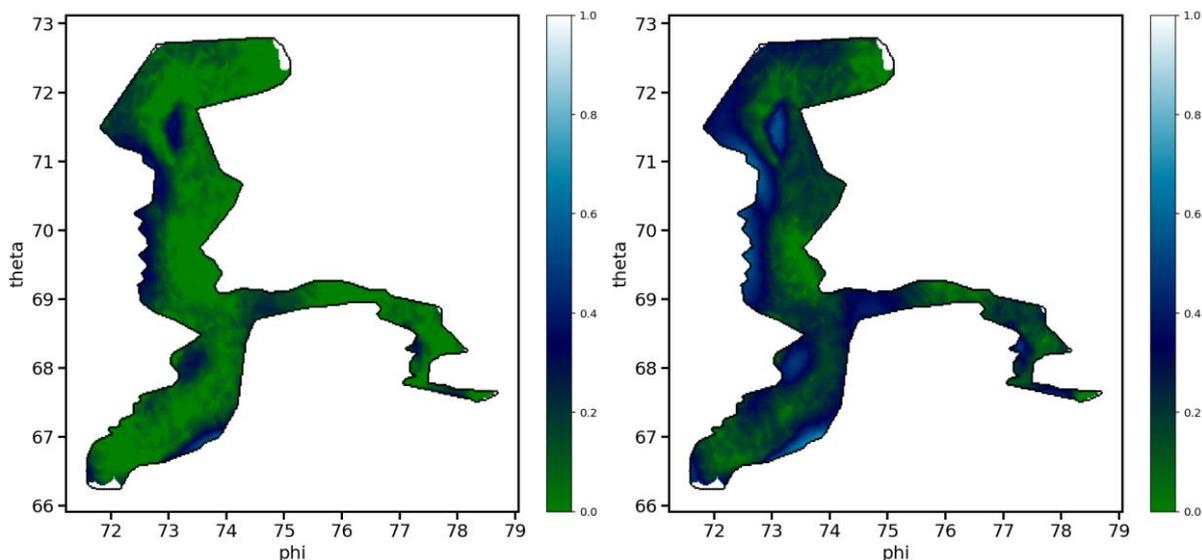


Рис. 14. Расчёты распределения георисков для всей акватории Обской губы: а) Распределение верхней границы оценки геориска $Q^*(t_f|x_b)$ выхода уровня за границы $[0; 0,53]$ м, для начального уровня $x_b = 0,443$ м и для временного промежутка $[0; 4]$ месяцев. б) Распределение верхней границы оценки геориска $Q^*(t_f|x_b)$ выхода уровня за границы $[0; 0,5]$ м, для начального уровня $x_b = 0,443$ м и для временного промежутка $[0; 6,5]$ месяцев

В модуле «Оценка ГеоРисков» проводится статистический анализ временных рядов уровня воды. Анализ выполняется для каждого узла регулярной сетки, покрывающей акваторию, с использованием массива исторических данных за многолетний период. Расчёты проводятся по следующим формулам:

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - m_i)^2}, r_i = \frac{\text{Cov}(X_i, X_{i+1})}{s_i \cdot s_{i+1}} \quad (13)$$

$$Q = 1 - \left[\Phi \left(\frac{b - m(t)}{s(t)} \right) - \Phi \left(\frac{a - m(t)}{s(t)} \right) \right].$$

Результатом данного этапа является карта рисков по изобатам, визуализирующая вероятность безопасного прохождения для судна с заданными параметрами (осадка, курс, скорость, тип) в зависимости от прогноза уровня моря (Рис. 15).

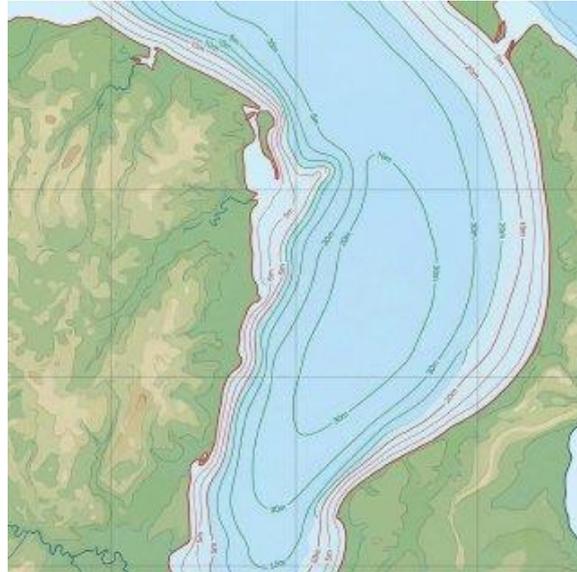


Рис. 15. Карта рисков по изобатам в зависимости от прогноза уровня моря и параметров судна

Модуль интегральной оценки георисков анализирует более 50 взаимосвязанных параметров в единую нейросетевую модель, что позволяет перейти от оценки одного фактора к комплексной интегральной оценке навигационной безопасности, учитывающей синергетические эффекты и компенсацию рисков.

Оценка вероятности возникновения событий, угрожающих безопасности судна на маршруте, может быть выполнена с помощью модели на основе рекуррентной нейронной сети (RNN). Ключевое преимущество данной архитектуры заключается в последовательной обработке информации: каждый нейронный блок сети анализирует данные о судне, соответствующие определённому этапу его перемещения по маршруту. Формализуем задачу оценки риска в терминах ИНС. Исходные геоданные задаются выражением:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= -\gamma_i x_i(t) + \sum_{j=1}^n (\omega_{ij}(t) g(x_j(t)) + u_i(t)); \quad i, j = \overline{1 \dots n} \\ \dot{x}_i(t) &= -\gamma_i x_i(t) + g_i(z_i(t)) + u_i(t); \quad i, j = \overline{1 \dots n} \\ z_i(t) &= \sum_{j=1}^n \omega_{ij}(t) x_j(t - h) \\ g_i(z_i(t)) &= (1 + \exp(-\lambda \sum_{j=1}^n \omega_{ij}(t) x_j(t - h)))^{-1} \\ \dot{x}_i(t) &= -\gamma_i x_i(t) + \left(1 + \exp(-\lambda \sum_{j=1}^n \omega_{ij}(t) x_j(t - h)) \right)^{-1} + u_i(t) \\ &\quad i, j = \overline{1 \dots n}, \end{aligned} \quad (14)$$

где: $x_i(t) = (N_1 \dots N_n, A_1 \dots A_n, R_1 \dots R_n, E_1 \dots E_n, S_1 \dots S_n)$ – вектор данных в определенный момент времени (значения нейрона), $\dot{x}_i(t)$ – вектор геоданных, преобразованный для оценки обстановки, $\omega_{ij}(t)$ – вектор приоритетов параметров в конкретный момент времени (веса связей

нейронов); $u_i(t)$ - вектор внешних воздействий (принудительного управления) в конкретный момент времени; $g_i(t)$ - функция активации нейрона (сигмоидального типа), $z_i(t)$ - сумма воздействия ансамблей (групп) нейронов, γ_i - затухание нейрона (специальный поправочный коэффициент).

Рассмотрена практическая задача построения маршрута для судна класса Arc6 в Обской губе в летне-осеннюю навигацию (рис.16). В модель были включены дополнительные факторы: экологические риски, зоны экстремальной погоды и учений.

Основные преимущества программной системы: логика двухэтапного подхода, интегральность, объективность и скорость, адаптивность, наглядность. Результаты апробации программного обеспечения, созданного на базе методики оперативной оценки обстановки РАС на акватории Обской губы, демонстрируют рост эффективности по сравнению с традиционными методами логистического анализа. В частности, по сравнению с существующими методиками зафиксировано увеличение скорости (оперативности) вычислений: для функционального подпространства системы рискованных морских арктических грузоперевозок рост эффективности составил 6%-10%; для операционного подпространства рост эффективности составил 9%-15%. Повысился показатель своевременности определения оптимального маршрута судна относительно текущих аналогов на 5%-9%.

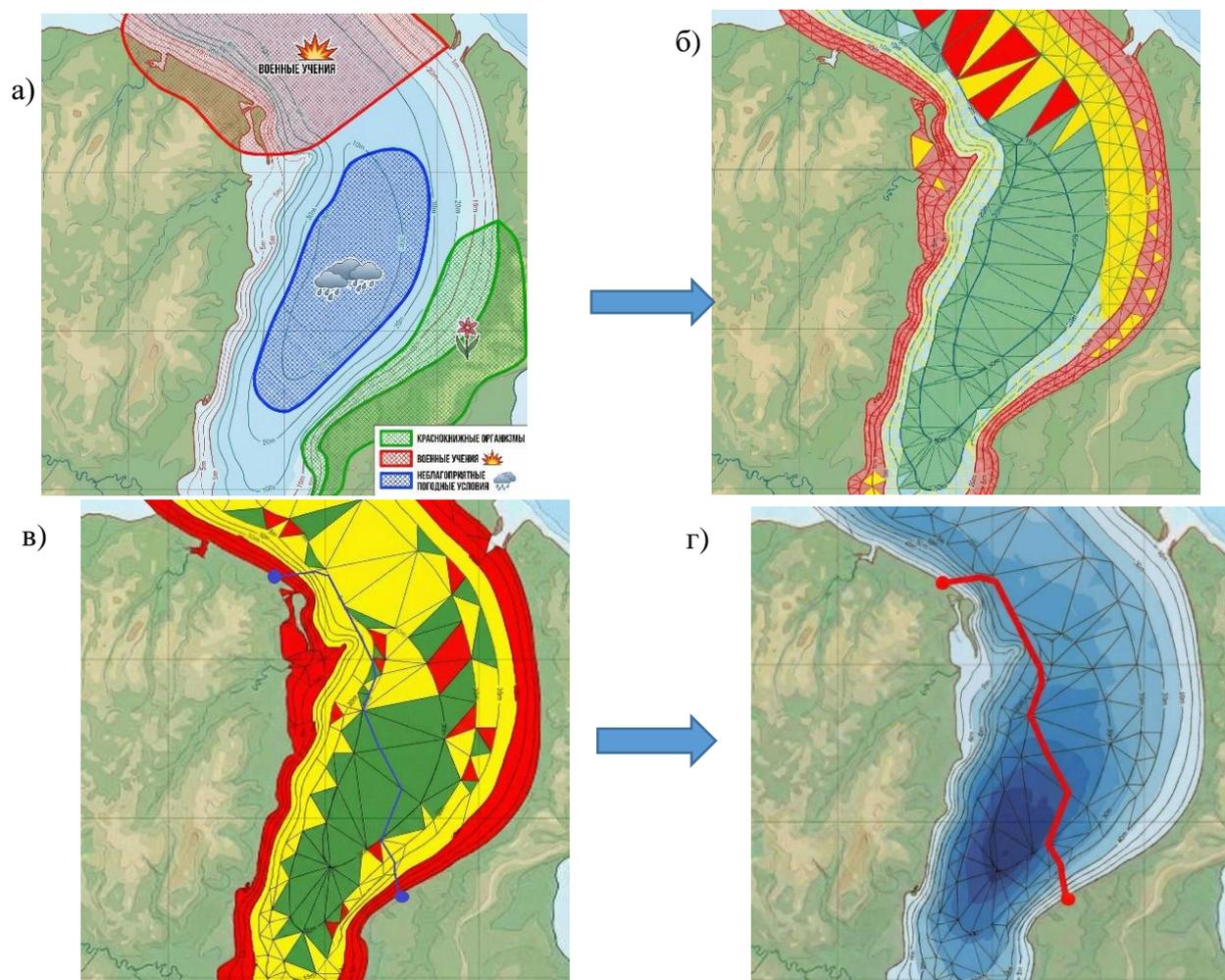


Рис. 16. Этапы построения обобщенно-безопасного (оптимального) маршрута: а) карта входных данных; б) оценочный картоид; в) интегральная карта оценочных рискованных треугольников, отражающая совокупное влияние гидрологических, метеорологических и ледовых параметров; г) отображение безопасного (оптимального) маршрута на карте.

Таким образом показано, разработанный геоинформационный модельно-методический аппарат позволяет преодолевать ограничения существующих методов прогнозирования состояния морской среды, обеспечивает требуемые долгосрочные прогнозы георисков уровня моря в арктической акватории, а также учитывают различные морские и ситуационные угрозы, влияющие на безопасность арктического судоходства.

Заключение

В результате проведенного диссертационного исследования получена совокупность научных результатов, обеспечивающих решение актуальной задачи повышения эффективности территориального анализа и оценки обстановки в территориальной системе РАС с учетом быстроменяющейся уровневой, ситуационной, навигационно-гидрографической и гидрометеорологической информации в интересах арктического судоходства, в том числе:

1. Геомодель системы «рискового арктического судоходства», которая отличается территориальной интерпретацией навигационно-гидрографических процессов в единой геосистеме РАС, что обеспечивает на базе оперативного гидрометеорологического прогнозирования более полное, адекватное и оперативное отображение реальной навигационно-ситуационной и рискованной геоситуации в стеснённых полярных водах в интересах обеспечения безопасной арктической навигации.

2. Геоинформационная методика оперативной оценки обстановки и выработки рекомендаций по организации функционирования системы РАС содержит процедуры глубокого территориального прогноза ГМ-обстановки, комплексной оценки ситуационной и рискованной составляющих элементов геоситуации в акватории, территориальным представлением геоконтроллинговых элементов системы арктической навигации, что обеспечивает повышение точности навигационных параметров, повышение оперативности выработки рекомендаций для арктического судоходства, картографическое представление компонентов территориальной логистической активности, выработку оптимальных рекомендаций.

3. Апробация разработанного на базе методики оперативной оценки обстановки в системе РАС специального программного обеспечения «ДестрРегК» показала по сравнению с традиционными методами логистического моделирования и анализа прирост скорости (оперативности): для функционального подпространства системы рискованных морских арктических грузоперевозок на 9%; для операционного подпространства системы рискованных морских арктических грузоперевозок на 13%. Значение показателя своевременности вычисления оптимального маршрута судна повысилось на 7% по сравнению с существующими показателями оперативности.

4. Разработанный в диссертации геоинформационный модельно-методический аппарат оценки георисков уровня моря и поддержки безопасного арктического судоходства может найти применение и в других территориальных приложениях, связанных с геоконтроллингом региональных природных, техногенных и социальных процессов и явлений.

5. Дальнейшие направления исследования представляются на путях последующей интеграции методов территориально-ориентированного ГИ-вероятностно-статистического анализа георисков с другими методами теории управления рисками, увеличением номенклатуры и детальной разработке параметров геообъектов РАС, описанием отношений оценочной упорядоченности пространства многофакторных рисков деструктивного региона.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации из рекомендованного Высшей аттестационной комиссией перечня

1. Приближенная модель прогнозирования георисков / Истомин Е.П., Истомин И.Е. // Информация и космос. – 2024. – № 3. – С. 117-121.

2. Оценка георисков территориальной активности в районах с сильно коррелированными ограничивающими факторами / Истомин И.Е., Мартын И.А., Биденко С.И. // Информация и космос. – 2024. – № 4. – С. 148-155.

3. Геоинформатика, геоинформационные технологии, геоинформационное управление / Истомин Е.П., Истомин И.Е., Михеев В.Л., Биденко С.И., Соколов А.Г. // Гидрометеорология и экология – 2025 – №78 – С.113-127.

4. Оценка георисков на основе волновой модели / Истомин Е.П., Истомин И.Е., Мартын И.А // Информация и космос – 2025 – №1 – С.151-155.

5. Оценка георисков территориальной активности в районах со слабо коррелированными ограничивающими факторами / Истомин Е.П., Истомин И.Е., Мартын И.А., Биденко С.И. // Геоинформатика – 2025. – № 1. – С. 50 - 56.

6. Методика оценки навигационной безопасности и регулирования судоходства в районах с множественными рисками / Истомин И.Е., Бородин Е.Л., Биденко С.И. // Эксплуатация морского транспорта. – 2026. - № 1. – С. 27 – 36.

7. Программная методика пространственного анализа деструктивного региона в процедурах геоинформационной поддержки безопасности территориальной логистики / Истомин И.Е., Храмов И.С., Биденко С.И.// Информация и космос. – 2026. – № 1. – С. 110 – 119.

Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

Истомин И.Е. Свидетельство ФСИС РФ от 25.09.2025 № 2025685683 о регистрации программы для ЭВМ «ДестрРегК» / Храмов И.С., Истомин И.Е.

Материалы докладов на конференциях

1. Методика оценки георисков на основе управляемых параметров / Истомин Е.П., Петров Я.А., Истомин И.Е. // ИНФОГЕО-2018. Стратегическое управление развитием территорий: сборник трудов V международной научно-практической конференции. – СПб.: РГГМУ, 2018 – С. 208–215.

2. Современные подходы к разработке ГИС / Истомин Е.П., Петров Я.А., Истомин И.Е. // ИНФОГЕО-2018. Стратегическое управление развитием территорий: сборник трудов V международной научно-практической конференции. – СПб.: РГГМУ, 2018 – С. 268-271.

3. Закономерности геоинформационного управления развитием сетевых энергетических систем / Жарикова М.А., Истомин Е.П., Михайлов В.А., Истомин И.Е., Соколов А.Г./ В сборнике: География, экология, туризм: новые горизонты исследований. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию создания факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ. В 3-х томах. Воронеж, 2024. С. 238-244.

4. Принципы геоинформационного управления развитием природно-технических систем / Жарикова М.А., Истомин Е.П., Михайлов В.А., Истомин И.Е., Соколов А.Г.// В сборнике: География, экология, туризм: новые горизонты исследований. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию создания факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ. В 3-х томах. Воронеж, 2024. С. 244-248.

5. Методика оценки георисков в морских акваториях /Биденко С.И., Истомин И.Е. // Сборник трудов Международная научно-практическая конференция ИНФОГЕО-2025 «Единое геоинформационное пространство для обеспечения устойчивого развития регионов: от сбора данных к интеграции», Санкт-Петербург, 2025. 5 с.

Соискатель



Истомин И.Е.