

УДК: 528.9:911.2

На правах рукописи

МИЛЯКОВ ДЕНИС ФЕДОРОВИЧ

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД ПОДДЕРЖКИ
РИСКОВОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ
АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГОМОМОРФНО-
ИМПЛИЦИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ КАТЕГОРИЙ**

Специальность 1.6.20 – Геоинформатика, картография (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант: **Биденко Сергей
Иванович**, доктор технических наук,
профессор, АО "НПО «Импульс»

Санкт-Петербург - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. АНАЛИЗ АРКТИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ РИСКА	24
1.1. Анализ физико-географических условий и хозяйственной активности в арктической зоне.....	27
1.2. Анализ систем и средств освещения обстановки в арктической зоне активности.....	44
1.3. Северный морской транспортный коридор	54
1.4. Рискологический подход в транспортной активности АЗРФ.....	56
1.5. Анализ рисков и классов конфликта	63
1.6. Геоинформационные системы на транспорте	70
1.7. Постановка задачи исследования	78
1.8. Выводы по первой главе	85
2. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЕОКОНТРОЛЛИНГОВОЙ ПОДДЕРЖКИ АТА В УСЛОВИЯХ РИСКА	88
2.1. Система понятий и определений геоинформационного моделирования.....	89
2.1. Геоконтроллинг и управление территориальной активностью.....	95
2.2. Объектно-ориентированный подход к моделированию ГО в категориях	111
2.3. Концептуальная модель геоинформационной поддержки АТА в условиях риска.....	132
2.4. Выводы по второй главе	167
3. ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ РИСКА.....	170
3.1. Принципы геомоделирования системы АТА	170
3.2. Модель геообъекта в системе категорий	172
3.3. Модели геопространств	177
3.4. Параметрическая модель георегиона	208
3.5. Подмодели в системе категорий	214
3.6. Моделирование системы рисков АТА	232

3.7. Выводы по третьей главе	248
4. МЕТОДОЛИГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕОКОНТРОЛЛИНГОВОЙ ПОДДЕРЖКИ РИСКОВОЙ АТА.....	251
4.1. Методы создания и использования геоинформации	251
4.2. Методика ведения оперативной информации	261
4.3. Базовая методика управления рисками в системе АТА	288
4.4. Методика геоинформационной поддержки управления в условиях риска	291
4.5. Выводы по четвертой главе.....	305
5. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МОДЕЛЬНО-МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА	307
5.1. Моделирования риско-логической ситуации с использованием ИНС и ИИ	308
5.2. Учет имплицитных факторов в модели поиска оптимального пути	323
5.3. Результаты машинного моделирования.....	325
5.4. Учет динамических параметров.....	331
5.5. Применение метода Монте-Карло для анализа на гомеоморфной поверхности риска.....	336
5.6. Применение анаморфирования для визуализации и организации категорий территориального управления	339
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	348
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	352

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЗРФ	Арктическая зона Российской Федерации
АИС	автоматическая идентификационная система (англ. AIS)
АСОД	автоматическая система обмена данными
АСУ	автоматизированная система управления
АФП	абстрактное функциональное пространство
БЭС	безэкипажное судовождение
ГИ	геоинформация, информация с географическим аспектом
ГИП	геоинформационное пространство
ГИС	геоинформационная система
ГИТ	геоинформационные технологии
ГКРЧ	Государственная комиссия по радиочастотам
ГМССБ	Глобальная морская система связи при бедствии
ГО	географический объект
ГР	георегион
ГФП	геофункциональное пространство
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ЗП	земная поверхность
ИИ	искусственного интеллекта
ИК	инфракрасный
ИНС	искусственная нейронная сеть
ЛПР	лицо принимающее решение
МППР	марковский процесс принятия решений
ОЗ	опасная зона
ООП	объектно-ориентированный подход
ОПУ	отношения пространственного упорядочения
ОСУ	отношения содержательного упорядочения
РСА	радиолокатор с синтезированной апертурой;
СМТК	Северный морской транспортный коридор
СППР	система поддержки принятия решений
СУДС	система управления движением судов
ТХА	территориальная хозяйственная активность
ЦММ	цифровая модель местности
ЭС	экспертная система
AIS	(англ. Automatic Identification System) то же, что АИС
GAN	(англ. Generative Adversarial Network) генеративно-сопоставительная сеть
RNN	рекуррентная нейронная сеть (тип архитектуры ИНС)
SAR	(англ. Synthetic Aperture Radar) радиолокационное наблюдение с применением радаров с синтезированной апертурой
TIN	(англ. Triangulated Irregular Network) триангуляционные нерегулярные сети

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Анаморфоза — это преобразование визуального образа из евклидовой метрики в новое представление, основанное на метрике изучаемого процесса по заданному показателю.

Атрибут — свойство, присущее объекту или явлению.

Валидация — проверка продукта на соответствие ожиданиям, требованиям рынка, заказчика.

Верификация — процедура проверки истинности.

Географический объект, ГО, — точка или область геопространства, имеющая определенное положение и протяженность относительно Земли, обладающая собственным содержательным пространством атрибутов.

Геопространство, ГП — это конкретное пространство предметов и явлений реального мира, представляющее физическое или евклидово пространство, содержащее в т. ч. и поверхность Земли, характеризующее собственное пространство предметов и явлений, и многомерное пространство признаков (характеристик) предметов и явлений реальной действительности. Т. е. это объединение физического пространства и пространства признаков.

Георегион, ГР — это терриориальная (пространственная) структура однородных ГО, связанных отношением пространственной упорядоченности.

Геосистема, ГС — это терриориальная (пространственная) структура разнородных ГО или ГР, связанных отношением содержательной упорядоченности.

Геоконтроллинг — это система мониторинга и управления пространственными данными, процессами и объектами с использованием геоинформационных технологий и автоматизированных средств анализа.

Гетерогенная информация — это разнородные данные, которые различаются по формату, структуре, семантике или источнику.

Гомеоморфизм — морфизм в категории топологических пространств.

Гомоморфизм — преобразования математических структур, которые сохраняют групповую структуру.

Датасет - набор данных, которые используются в различных видах анализа и машинного обучения

Декомпозиция — операция мышления, состоящая в разделении целого на части.

Изоморфизм — соотношение между объектами, выражающее общность их строения.

Картоид – это упрощённое картоподобное изображение географического пространства, при создании которого основные картографические правила не соблюдаются.

Квалиметрия - научная дисциплина, в рамках которой изучаются методология и проблематика комплексной, количественной оценки качества объектов любой природы.

Кибернетика — междисциплинарная наука, изучающая общие закономерности процессов получения, хранения, преобразования и передачи информации в сложных управляющих системах.

Конкретная категория в математике — категория, снабжённая строгим функтором в категорию множеств. Благодаря этому функтору можно оперировать с объектами такой категории образом, сходным с работой с множествами с дополнительной структурой, а морфизмы представлять как функции, сохраняющие дополнительную структуру.

Критерии эффективности – это показатель, по значению которого лицом, принимающим решения, оценивается общее качество и/или количество результатов целенаправленного действия, называемых эффективностью и раскрываемых через категорию цели действия [42].

Математическая морфология — теория и техника анализа и обработки геометрических структур, основанная на теории множеств, топологии и случайных функциях.

Математическая структура – формальное множество элементов, природа которых не определена с аксиоматическим определением отношений и взаимосвязей между ними.

Мономорфизм — это инъективное непрерывное отображение.

Непрерывное отображение — отображение из одного пространства в другое, при котором близкие точки области определения переходят в близкие точки области значений.

Полигональная сетка (меш) — это совокупность вершин, рёбер и граней, которые определяют форму многогранного объекта в трёхмерной компьютерной графике и объёмном моделировании.

Предикативный анализ — это подход к анализу данных, который использует исторические данные, статистические алгоритмы и методы машинного обучения для выявления закономерностей и построения прогнозов

Признак — внешнее или внутреннее свойство, по которому можно идентифицировать, классифицировать или отличать объект.

Риск — возможность появления непредвиденных внутренних или внешних событий, оказывающих негативное влияние на достижение поставленных целей (запланированных результатов).

Сплайн (Spline) – не имеющая видимого объёма трехмерная линия.

Теория гомологий — раздел математики, который изучает конструкции топологических инвариантов.

Топологическое пространство — множество, для элементов которого определено, какие из них близки друг к другу.

Хорология — это научное направление, изучающее пространственное распределение и локализацию географических объектов, явлений и процессов на земной поверхности.

Экспертные системы — это компьютерные системы, которые имитируют принятие решений человеком-экспертом в определенной предметной области. Они основаны на знаниях, правилах и логике.

Энтропия — мера вероятности пребывания системы в данном состоянии. Чем больше беспорядка, тем больше энтропия.

Эпиморфизм — сюръективное непрерывное отображение.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования Арктической территориальной активности (АТА) обусловлена не только её стратегической важностью для обеспечения национальной безопасности Российской Федерации, но и её ключевой ролью в контексте глобальных геополитических, экономических и экологических вызовов. Арктическая зона России представляет собой уникальный регион, который характеризуется значительными запасами природных ресурсов, что в условиях растущего мирового спроса на энергоресурсы и усиления конкуренции за контроль над арктическими территориями придает особую значимость проблемам территориального управления.

Особое значение имеет развитие Северного морского пути (СМП) как одного из ключевых транспортных коридоров между Азией и Европой. СМП представляет собой кратчайший морской маршрут, соединяющий Тихий и Атлантический океаны, что позволяет значительно сократить время и стоимость доставки грузов по сравнению с традиционными путями через Суэцкий канал. В условиях изменения климата и увеличения сроков судоходства в арктических водах, Северный морской путь становится всё более привлекательным для международной торговли. Его развитие способствует укреплению экономического потенциала России, повышению её роли в мировой логистике и созданию новых возможностей для сотрудничества с зарубежными партнёрами. Однако реализация этого потенциала требует решения сложных задач, связанных с обеспечением безопасности судоходства, развитием инфраструктуры, внедрением современных технологий и учётом разнообразных рисков.

Это положение подтверждается рядом нормативных документов, среди которых:

1. Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. (утверждены указом Президента РФ от 05.03.2020 №164).

2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г. (утверждена указом президента РФ от 26.10.2020 № 645).
3. Морская доктрина государства (утверждена указом президента РФ от 31.07.2022 № 512).
4. План развития Северного морского пути на период до 2035 г. (Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2022 N 2115-р).

Основы государственной политики Российской Федерации и Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) являются документами стратегического планирования в сфере обеспечения национальной безопасности Российской Федерации, формулирующими цели и задачи обеспечения национальных интересов, в всех сферах государственной деятельности.

Помимо социально-экономических и сложных климатических условий, к основным опасностям, вызовам и угрозам, формирующих риски для развития АЗРФ и обеспечения национальной безопасности, остаются: низкий уровень развития транспортной инфраструктуры, отставание сроков развития инфраструктуры СМП и высокий уровень профессионального риска под воздействием опасных производственных факторов.

Эффективность управления АТА сегодня определяется уровнем внедряемых инфокоммуникационных технологий. Характер управленческих задач и развитие технологий предъявляет ряд принципиально новых требований к инфокоммуникационным системам по обеспечению комплексного и системного подхода, видам, объемам, качеству передаваемой и обрабатываемой информации, доступности и безопасности информации.

Необходимость геопространственного представления разнородных данных транспортной активности АЗРФ обусловлена комплексом научных, методологических и практических задач, направленных на обеспечение эффективного сбалансированного управления и ускоренного развития региона. Геопространственные данные выступают ключевым инструментом

для интеграции многомерной информации о транспортных потоках, логистических маршрутах, состоянии инфраструктуры и экологических ограничений, что позволяет формировать целостное представление о динамике транспортной активности в условиях уникальных природно-климатических характеристик Арктики.

В современных условиях растущей роли СМП как глобальной транспортной артерии, геоинформационные системы (ГИС) становятся неотъемлемой частью стратегического планирования и оперативного управления транспортными процессами. Использование геопространственных моделей позволяет не только визуализировать текущие данные, но и проводить многофакторный анализ, прогнозировать изменения в транспортной инфраструктуре, оптимизировать маршруты движения судов, учитывать влияние климатических изменений и минимизировать экологические риски.

Кроме того, развитие геопространственного моделирования создаёт методологическую основу для выявления новых зависимостей между транспортной активностью и социально-экономическим развитием региона. Это особенно важно в контексте реализации государственных программ освоения Арктики, где требуется точное понимание взаимосвязей между транспортной доступностью и динамикой хозяйственной деятельности.

Арктическая зона характеризуется высоким рисковым потенциалом, который обуславливается экстремальностью климата, уязвимостью природной среды, масштабом и удаленностью арктических территорий, необходимостью решения задач комплексного обслуживания грузопотоков в сложных физико-географических условиях при наличии дефицита инфраструктурных ресурсов. На этом фоне автоматизированные системы получения, хранения, преобразования информации в сочетании с вычислительными возможностями, объективно определяют новые требования и подходы для обработки, представления и анализа разнородной многокатегорийной геопространственной информации, а применение

технологий искусственного интеллекта (ИИ) в геоинформационном анализе открывают новые возможности для повышения точности и оперативности принятия решений в управлении инфраструктурами АЗРФ.

В свою очередь, открытие новых возможностей в области получения значительных массивов информации усугубляет дисбаланс между технологиями её анализа, визуализации и прогнозирования в геоинформационных системах, с одной стороны, и когнитивными возможностями её восприятия субъектом управления — с другой.

Возрастание роли автоматизации в процессах геоинформационного управления АТА обостряет растущие **противоречия**, ключевое из которых заключается в значительном увеличении числа и усложнении внешних факторов, определяющих содержание реальных географических объектов (ГО) и систем (ГС) и ограниченностью моделей и методов, способных адекватно интерпретировать и отразить их многообразие.

Изложенное противоречие вызывается рядом частных противоречий:

- 1 Между потребностью в точных прогнозах и недостатком данных о динамике природных процессов.
- 2 Между ограниченностью существующих моделей ГО и ГС АТА, описывающие реальные объекты на основе значимых (эксплицитных) признаков и необходимостью учета имплицитной упорядоченности геоструктур в условиях динамично изменяющейся информации, ее неточности, неполноте, многомерности и разнородности.
- 3 Между объективно возрастающими требованиями к оперативности и качеству управленческих решений в условиях риска и когнитивными возможностями человека в процессе принятия управленческих решений.
- 4 Между возрастающей субъективной значимостью управленческих решений в человеко-машинных системах и объективным ростом масштабов их потенциальных последствий.

Актуальность работы состоит в необходимости преодоления приведенного противоречия, ввиду того, что при существенном общем

прогрессе в сфере кибернетики и компьютерных технологий, имеются некоторые пробелы в вопросах соответствия принятых моделей и методов анализа передовым инструментам информационных технологий, таких как искусственные нейронные сети (ИНС) и элементы искусственного интеллекта.

Территориальная активность АЗРФ имеет разнородную природу географически связанных событий, явлений, результатов человеческой деятельности, естественным образом увязанные в единую систему. Требуется новая концептуальная модель, способная обеспечить на основе геоинформационных методов поддержки управления (геоконтроллинга) рост уровня автоматизации процесса поддержки принимаемых решений для комплексного обслуживания грузопотоков регионального транспортного коридора АЗРФ.

Существующие модели территориальной активности, как правило, эффективно описывают реальные географические объекты на основе явных (эксплицитных) и значимых признаков, однако не учитывают имплицитную упорядоченность геоструктур в условиях динамических изменений информации, а также ее неопределенности, включая неточность, неполноту, многомерность и разнородность. Применяемые модели и методы часто оказываются неспособными адекватно учитывать всю полноту факторов, влияющих на ситуацию.

Возрастающие возможности представления рисковей АТА на основе гомоморфно-имплицитного упорядочения открывают перспективы для дальнейшего повышения уровня автоматизации процессов управления. Это достигается за счёт интеграции современных технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и анализа больших данных, которые позволяют автоматически адаптироваться к изменениям внешних условий и формировать оптимальные решения в реальном времени.

Выявлена **проблема**, заключающаяся в отсутствии адекватного модельно-методического аппарата, способного реализовать сквозную, непрерывную и многоуровневую технологию управления рисками на

территории, и требующая разработки соответствующих геоинформационной технологии.

Основным проявлением решаемой научной проблемы является ограниченная способность традиционных подходов к моделированию учитывать комплексные взаимосвязи между физико-географическими, инфраструктурными и социально-экономическими аспектами АТА, что особенно важно в таких стратегически важных регионах как АЗРФ. Это приводит к снижению качества прогнозов, увеличению рисков принятия ошибочных решений и, как следствие, неэффективности автоматизированных систем управления. В настоящее время используемые модели и методы часто не учитывают всю полноту факторов, влияющих на географическую ситуацию, либо оказываются недостаточно адаптивными для работы с быстро меняющимися условиями.

Объект исследования: арктическая территориальная активность, осуществляемая в условиях высокой динамики воздействия значительного числа рисков факторов.

Предмет исследования: модельно-методический аппарат геоинформационной поддержки территориальной активности, геоинформационные методы представления, анализа и контроля рисков АТА.

Цель исследования: разработка геоинформационной технологии поддержки рисков АТА на базе модельно-методического аппарата с использованием абстрактных категоризованных геоструктур, ориентированных для применения современного математического аппарата преобразования математических структур и прогнозного моделирования.

Для достижения поставленной цели в рамках настоящей работы решаются следующие **научно-технические задачи**:

1. Анализ предметной области применительно к АТА.
2. Разработка геоинформационных моделей представления геоструктур и геообъектов, рисков модели АТА, эффективно работающих при

динамично изменяющихся внешних условиях функционирования, неточности, неполноте, многомерности и разнородности мониторинговой информации.

3. Разработка концепции геоконтроллинговой поддержки АТА в условиях риска, реализующей возможности применения перспективных математических методов анализа и моделирования.

4. Разработка геоинформационных методов поддержки принимаемых решений в условиях риска, с использованием моделей территориальной активности, обеспечивающих дальнейшее повышение уровня автоматизации.

5. Разработка научно-технических предложений по применению элементов концептуальной модели для оперативной поддержки принятия решений.

Оперативно-техническое и технологическое управление территориальной и транспортной активностью в условиях риска характеризуется необходимостью реализации многих процессов в режиме, максимально приближенном к реальному времени. При этом следует учитывать разнородность объектов управления в категориях, многообразие воздействующих факторов, их пространственный размах, неопределенность, неполноту и нечеткость данных мониторинга, на основе которых принимаются управляющие решения.

Разработанный в диссертации, на основе синтеза теоретических подходов в геоинформатике и высшей алгебры модельно-методический аппарат, опирается на теоретическую базу геоинформационного моделирования, а также методы преобразования математических структур линейной алгебры и принципы теории категорий, являющейся, в свою очередь, контейнером более высокого уровня абстракции для описания реальности.

Вопросы разработки модельно-методического аппарата в геоинформационных технологиях, находящиеся на стыке таких дисциплин, как геоинформатика, системный анализ, теория множеств и теория принятия

решений, активно исследуются видными учеными. Их работы направлены на создание интегрированных подходов, позволяющих эффективно решать сложные задачи моделирования, анализа и управления территориальными системами в условиях многомерности данных и высокой неопределенности. Необходимо отметить труды таких ученых как: Берлянт А.М. [26,65,130,131], Тикунов В.С. [97,172], Истомин Е.П. [52,59,61,62,64,66,72,154,158], Соколов А.Г. [62,66,158], Попович В.В. [138], Кудж С.А. [73], Биденко С.И. [41, 45,48, 52,53, 54, 60, 66, 71, 117, 161], Шипилов В.В. [50], Вагизов М.Р. [127, 156, 158], Матвеев В.В. [108], Малинин В.Н., Доценко С.М. [170], Голубчик М.М. [160], Дэвид О'Салливан [171], Гудчайлд [173]. Значительный вклад в области математического моделирования внесли учёные: Колокольников В.Н [26], Матвиенко В.А. [29], в области формирования объектно-ориентированных моделей в геоинформационных системах Присяжнюк С.П. [68,110,158], в сфере процессного управления Бурлов В.Г. [12,39,43,101], в области искусственного интеллекта Душкин Р.В. [29].

Для решения поставленных задач в диссертации применялись методы теории нечетких множеств, гомологической алгебры, оперирующей с объектами алгебраической топологии, методы теории исследования операций, методы математической статистики и теории вероятностей, методы теории рисков и математического моделирования.

Высокий уровень абстракции предложенных математических структур при работе с геоструктурами позволяет масштабировать допустимые преобразования структур геообъектов внутри одной категорий, модифицируя отношения между геообъектами из разных категорий, что способствует выявлению ранее не очевидных закономерностей. Такой подход эффективно применяется в автоматизируемых системах с элементами искусственного интеллекта [58].

В данной постановке научная проблема формулируется впервые и ее решение достигается разработкой следующих **научных положений, выносимых на защиту:**

1. Объектно-ориентированный подход по отнесению географических объектов в категории и типы, который отличается наличием внутренней иерархии формализованных свойств, параметров, признаков и связей, что позволит в значительной мере унифицировать описание и методы преобразования структур конкретных геообъектов используя структуры объектов верхнего порядка по принципу наследования.

2. Концептуальная модель построения системы региональной территориальной активности, способной к применению математического аппарата теории категорий для преобразования пространственных структур, что обеспечивает гомоморфное отображение сложных территориальных взаимосвязей и позволяет повысить эффективность обработки многомерной геоинформации в условиях неопределённости. Ключевым преимуществом концепции является возможность имплицитного упорядочивания факторов за счёт категоризации пространственных отношений и применения объектно-ориентированного подхода, что создаёт теоретическую основу для построения адаптивных систем поддержки принятия управленческих решений в условиях множественных рисков.

3. Геоинформационные модели представления геоструктур и геообъектов, формализованные и структурированные, эффективно работающие при динамично изменяющихся внешних и внутренних параметрах, неточности, неполноте, многомерности и разнородности мониторинговой информации, что позволяет использовать геоинформационные методы поддержки управления АТА на основе интеграции разнородной информации (географической, экологической, социально-экономической и др.) в единую систему, сохраняющую структуру взаимосвязей и закономерностей географических объектов различных категорий.

4. Геоконтроллинговый метод регулирования рисков территориальной активности отличается интеграцией предиктивной аналитики, имплицитных факторов и адаптивного управления на основе

разнородных данных. Данный подход принципиально отличается от традиционного геомониторинга и позволяет повысить оперативность, эффективность и уровень автоматизации системы поддержки принятия решений, что в конечном итоге обеспечивает повышение прогностической способности территориальных систем управления и формирование обоснованных рекомендаций в режиме реального времени за счёт использования искусственных нейронных сетей (ИНС) и методов искусственного интеллекта (ИИ).

Интегрируя геопространственные данные с передовыми аналитическими инструментами, предложенные модельно-методический аппарат позволяет значительно повысить эффективность обработки и анализа сложных пространственных систем, выявлять закономерности, тенденции и взаимосвязи, которые в противном случае могли бы остаться скрытыми, в свою очередь, повышая способность прогнозировать развитие ситуации с учетом пространственного фактора и оперативно реагировать на возникающие проблемы.

Разработанные модели поддерживают параметрическую динамику объектов, определяющих прогнозирование геоситуации, оценку рисков и принятие обоснованных решений на основе предиктивной аналитики.

Научная новизна диссертации заключается в разработке совокупности теоретических положений:

Объектно-ориентированный подход к категоризации географических объектов отличается системностью, гибкостью и формализацией представления данных в моделях, позволяя выделить иерархические уровни абстракций, обеспечивая согласованное отображение сложных взаимосвязей между объектами и их свойствами в рамках единой концептуальной модели.

Научная новизна категоризации на основе объектно-ориентированного подхода заключается в переходе от пассивного, плоского и статического представления ГО к созданию активной, многомерной, динамической и семантически структурированной цифровой среды.

Концептуальная модель региональной АТА, реализует широкие возможности по применения гомоморфных преобразований многообразия факторов математическим аппаратом теорий линейной алгебры и теории категорий. Предлагаемая концептуальная модель отличается большим уровнем абстракции категорируемых географических объектов, что обеспечивает их более высокую универсальность, в том числе в морфологии пространственных структур. Концептуальная модель системы рисковой АТА отличается введением дополнительных понятий и определений предметной области представления и регулирования рисков, принципов обработки и анализа геоинформации, в том числе и на базе имплицитных морфизмов, что обеспечивает перспективы совершенствования технологий оперативного использования разнородной нечеткой геоинформации при автоматизации системы поддержки принимаемых решений в интересах эффективного регулирования АТА.

Предложенные геоинформационные модели представления геоструктур и геообъектов характеризуются универсальностью формуляров и расширяемостью форматов, обеспечивающей устойчивость моделей к неопределенностям мониторинговой информации от разнородных источников, что позволяет создавать адаптивные методики для решения сложных задач прогнозирования с учетом динамики развития пространственно-временных географических ситуаций.

Геоинформационные методы преобразования геоструктур обладают расширяемыми возможностями представления региональной АТА за счет реализации современного математического аппарата и отработанных вычислительных приемов, применяемых к абстрактным математическим структурам, что обеспечит дальнейшее повышение уровня автоматизации в системе поддержки принимаемых решения в рисковых условиях.

Совокупность представленных теоретических положений определяет модельно-методический аппарат как базис, обеспечивающий унифицированный подход к формированию модели региональной

территориальной активности, реализующей многофакторный анализ большого объема данных и качественный геоконтроллинг арктической территориальной активности в автоматизированных процедурах оперативной поддержки принятия решений.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в принципиальном вкладе автора в развитии методологических основ геоинформатики путем совершенствования объектно-ориентированных моделей представления геопространственных данных, обеспечивающих интеграцию статических и динамических характеристик геообъектов, формализацию их взаимосвязей с другими объектами и геоструктурами на основе пространственной и категорийной упорядоченности.

Объектно-ориентированный подход предлагает интуитивно понятную модель представления данных, где каждый объект описывается через набор атрибутов и методов, отражающих его природу, функциональность и место в общей системе. Методология категоризации призвана упростить работу со все возрастающим числом оперируемых факторов и открывает новые возможности для анализа, моделирования и прогнозирования пространственных явлений.

Изложенные положения направлены в развитие теории и технологии геоинформационного моделирования рисков территории территориальной активности на основе усовершенствованных моделей представления геообъектов и геоструктур, оптимизированных для повышения уровня автоматизации, в том числе с применением ИНС и ИИ в части анализа геоситуации и поддержки принимаемых решений.

Предложенный концептуальный подход расширяет теоретическую базу моделирования пространственных данных, обеспечивая более адекватное отражение сложных географических систем, создание методологической основы для выявления и анализа неочевидных зависимостей между геообъектами и геоструктурами, что представляет собой важный вклад в развитие современных концепций геоинформационного моделирования.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в разработке на базе теоретических исследований в области математических представлений гомеоморфизма пространственных структур, модельно-методического аппарата для повышения эффективного автоматизированного моделирования геоинформационной ситуации региональной территориальной активности АЗРФ с целью повышения качества принимаемых управленческих решений в условиях риска.

Практическая значимость определяется перспективами развития интеллектуальных автоматизированных систем поддержки принятия решений в области пространственного анализа. Разработанный модельно-методический аппарат демонстрирует высокую эффективность в реализации трёх ключевых функций: мониторинга обстановки, автоматизированной идентификации объектов и анализа пространственных ситуаций применением технологий искусственных нейронных сетей.

Апробация результатов. Основные результаты исследования докладывались, обсуждались и были одобрены на:

ежегодной конференции «Радионавигация и время» по направлению «Координатно-временное и навигационное обеспечение потребителей в Российской Федерации», АО «СЗРЦ Концерн ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, июнь 2023, ноябрь 2024 гг.;

научном совете по теории и процессам управления при отделении процессов управления РАН «Проблемы водного транспорта», ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, июнь 2023 года.

XIII Международная научно-практическая конференция Аэронет. Москва, февраль 2022 года;

56-ой и 57-ой Межведомственной военно-научной конференции на тему конфликтов будущего, Санкт-Петербург, декабрь 2021 и 2022 годов;

III научно-практической конференции Гидрографического общества «Гидрография: современное состояние, перспективы, инновации», Санкт-Петербург, ноябрь 2023 год;

всероссийской научно-практической конференции «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях», ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», Санкт-Петербург, апрель 2023 года;

XIV межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, май 2023 года;

V Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и подготовки специалистов» в Санкт-Петербурге РГО апрель 2024 год;

XVII международной научно-практической конференции ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», «Современные риски, проблемы, тенденции развития региональной экономики и экономического взаимодействия со странами Азии», Санкт-Петербург, апрель 2025 года;

XVI межвузовская научно-практическая конференция аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, май 2025 года;

32 международной конференции по интегрированным навигационным системам на тему: "Текущее состояние и перспективы развития навигации в Арктическом регионе РФ ", ЦНИИ Электроприбор, Санкт-Петербург, июнь 2025 года;

34-ой всероссийской конференции «Методы и технические средства обеспечения безопасности информации» (МиТСОБИ). Санкт-Петербургский политехнический университет, июнь 2025 года.

Результаты исследований были внедрены:

В учебный процесс ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О.Макарова, кафедры судоходства на внутренних водных путях (СнаВВП) факультета навигации и связи при изучении дисциплины «Безопасность судоходства на внутренних водных путях» и «Судовождение на внутренних водных путях» (акт от 07.07.2025 г.), в АО «МНС» при выполнении ОКР «Устройство выдачи картографической информации», в части внедрения объектно-ориентированного подхода к классификации географических объектов, что позволило повысить точность автоматизированной классификации объектов на 25-30% (акт от июля 2025 г.), в АО «ГНИНГИ» при составлении баз данных изученности физических полей окраинных море РФ, разработке объектно-ориентированного подхода к классификации объектов и определении основных направлений совершенствования баз данных гидрографических исследований, что сократило время введения и обработки данных на 15% (акт от 11.07.2025 г.), в АО «КБ НАВИС» в НИР «Пунктир» этап 4,5 и СЧ НИР «Развитие-ГЛОНАСС», в части внедрения принципов моделирования геоструктур и концепции имплицитного упорядочивания факторов на основе категоризации пространственных отношений, с оценкой возрастания точности прогнозирования внешней помеховой обстановки на 20% (акт от 20.07.2025 г.), в АО «Радар ММС» ;

Публикации. Основные научные положения, теоретические выводы и практические рекомендации, разработанные в рамках диссертационного исследования, нашли отражение в 28 научных публикациях, из которых 20 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных по перечню ВАК, две из которых входят в базу данных SCOPUS, две монографии, три доклада в значимых конференциях и одно свидетельство регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все основные результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Научные результаты, полученные автором в соавторстве, отражены в

источниках научно-технической информации. Научные результаты, реализованные в НИОКР, получены с коллективом разработчиков, в которых автор является ответственным исполнителем.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Основная часть работы содержит 367 страниц текста, 111 рисунков, 25 таблиц. В список литературы внесены 174 наименования.

Соответствие паспорту научной специальности: Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография»: 1, 2, 3, 6, 7, 11, 12, 19, 20, 21.

Благодарности. Выражаю благодарность своим коллегам по кафедре Информационных технологий и систем безопасности, коллегам Российского государственного гидрометеорологического университета за дискуссии и научную атмосферу работы. Отдельная благодарность научному консультанту профессору Биденко Сергею Ивановичу, а также соавторам научных публикаций, посвященных теме докторской диссертаций.

1. АНАЛИЗ АРКТИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ РИСКА

За полярным кругом располагается более 20% территории России. В настоящее время в районах арктической зоны добывается более 80 процентов горючего природного газа и 17 процентов нефти (включая газовый конденсат) в Российской Федерации, основная часть никеля, олова, платиноидов, золота и алмазов. Одну треть Северного Ледовитого океана занимает шельф арктических морей России.

В береговой зоне и на шельфе этих морей сосредоточены огромные запасы природных ресурсов (газ, нефть, цветные металлы). Нефтегазовый потенциал оценивается в объеме 85,1 трлн. куб. метра горючего природного газа, 17,3 млрд. тонн нефти. Российский Север – это стратегический резерв развития минерально-сырьевой базы России в XXI веке.

Арктическая зона Российской Федерации является важнейшим стратегическим регионом, объединяющим сухопутные территории РФ по географическому положению в единую экономическую зону, границы которой определены Указом Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. №296 "О сухопутных территориях арктической зоны Российской Федерации" [1]. Через Арктику проходят кратчайшие морские пути между рынками Северо-Западной Европы и Тихоокеанского региона.

Площадь сухопутных территорий АЗРФ составляет 5 млн.кв.км, или около 22 % территории России, с населением 2406,4 тыс. человек в 39 городах и 43 посёлка городского типа. Крупными городами являются Архангельск, Мурманск, четыре городских поселения относятся к большим (превышают по численности 100 тыс. чел.) Северодвинск, Норильск, Новый Уренгой и Ноябрьск [2]. Территория арктической зоны РФ приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 — Территория арктической зоны РФ

Северный морской путь (СМП), является важнейшей частью инфраструктуры АЗРФ, экономического комплекса Крайнего Севера и связующим звеном между европейской частью России и Дальним Востоком, который полностью расположен в территориальных водах и исключительной экономической зоне России, что особенно важно в условиях внешнего санкционного давления.

Значение СМП возрастает стремительно, план его развития до 2035 года был утверждён Правительством РФ в августе 2022 года, дополнен в апреле 2023 года и будет расширяться впредь. Один из разделов документа предусматривает строительство судов ледокольного флота, в том числе головного ледокола проекта «Лидер», а также создание аварийно-спасательного флота из 46 судов. Всего план насчитывает более 150 мероприятий, общий объём финансирования которых составляет почти 1,8 трлн рублей.

Стратегии развития АЗРФ и значение СМП как транспортного коридора мирового значения, используемого для перевозки национальных и международных грузов, будет возрастать и в результате климатических

изменений и развития круглогодичного судоходства на протяжении всей акватории. Особая роль СМП принадлежит также и в обеспечении национальной безопасности России.

Предполагаемый значительный рост территориальной активности в арктическом регионе и низкий уровень развития транспортной инфраструктуры требует, с первых шагов, внедрение современных, передовых и эффективных технологий управления, преимущественно с использованием автоматизированных управляющих систем (АСУ) на базе геоинформационных интеллектуальных моделей и методов в системах поддержки принятия решений (СППР). Бурное развитие безэкипажного судовождения (БЭС) с элементами искусственного интеллекта (ИИ) также внесет значительные требования к видам оборудования СМП и особенностям применения геоинформационных систем (ГИС) на транспорте.

В любом случае, развитие и применение перспективных технологий на транспорте в АЗРФ должно решать, помимо стратегических целей, обозначаемых в нормативных документах, задачи повышения безопасности мореплавания и охраны окружающей среды в Арктике [3,4,5].

Анализ АТА с использованием возможностей ГИС позволяет выделить несколько ключевых направлений, в которых автоматизация может существенно повысить эффективность управления и планирования. Эти направления охватывают социально-экономические [41,42,62,100], научно-исследовательские [12, 171], военные и экологические аспекты жизнедеятельности региона.

ГИС-анализ убедительно подтвердил свою значимость в развитии населённых пунктов и инфраструктуры выявляя прямую зависимость между пространственным планированием, эффективным распределением ресурсов, логистикой, экологией и устойчивым социально-экономическим ростом территорий.

ГИС активно применяются в транспортной логистике [169], автоматизации мониторинга и управлении маршрутами, особенно в

арктической зоне РФ, где геотехнологии играют ключевую роль в минимизации рисков, связанных с экстремальным климатом, изменением ледового покрова и навигационными угрозами.

Мониторинг природных ресурсов с использованием ГИС-технологии позволяет оптимизировать их использование, своевременно выявлять угрозы и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Инструменты автоматизации на базе ГИС позволяют исследователям визуализировать сложные данные, такие как гидрометеорологические показатели, движение ледников или изменения в атмосфере, что упрощает понимание глобальных процессов и способствует разработке научных прогнозов.

1.1. Анализ физико-географических условий и хозяйственной активности в арктической зоне

1.1.1. Физико-географические условия

В Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу, утвержденных Президентом Российской Федерации 18 сентября 2008 г. № Пр-1969, Арктическая зона Российской Федерации определяется как часть Арктики, в которую входят полностью или частично территории Республики Саха (Якутия), Мурманской и Архангельской областей, Красноярского края, Ненецкого, Ямало-Ненецкого и Чукотского автономных округов, определенные решением Государственной комиссии при Совете Министров СССР по делам Арктики от 22 апреля 1989 г., а также земли и острова, указанные в Постановлении Президиума Центрального Исполнительного Комитета СССР от 15 апреля 1926 г. «Об объявлении территорией СССР земель и островов, расположенных в Северном Ледовитом океане», и прилегающие к этим территориям, землям и островам внутренние морские воды, территориальное море, исключительная экономическая зона и континентальный шельф Российской Федерации, в пределах которых Россия

обладает суверенными правами и юрисдикцией в соответствии с международным правом.

АЗРФ характеризуется особыми физико-географическими условиями:

Климат: характеризуется арктическим климатом, который отличается низкими температурами и длительными зимами. Зимы суровые, с температурами ниже нуля, а летом территория может быть покрыта тундрой. Наблюдаемая тенденция глобального потепления в арктическом регионе по темпам опережает среднемировую более чем в 2 раза.

Ледяной покров: большая часть арктической зоны покрыта льдами и морскими льдами, что создает особые условия для жизни растений, животных и людей. Ледовые массивы приведены на рисунке 2.

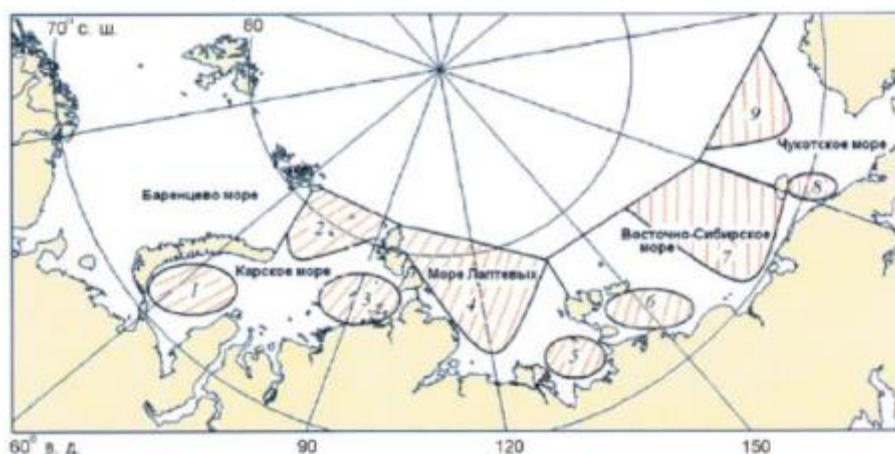


Рисунок 2 — Основные ледовые массивы АЗРФ: 1. Новоземельский; 2. Карский северный; 3. Североземельский; 4. Таймырский; 5. Янский; 6. Новосибирский; 7. Айонский; 8. Врангелевский; 9. Чукотский северный.

Ледовая обстановка Арктики - это динамичная система ледовых покровов на Северном Ледовитом океане и вокруг него. Несколько ключевых аспектов ледовой обстановки Арктики включают:

1) Ледовая обстановка в Арктике меняется в зависимости от сезона. Каждое лето происходит таяние льда, а затем его образование в зимний период. Существует тренд на уменьшение общей площади льда, повышение количества дрейфующих льдов и айсбергов из-за глобального изменения климата, что подтверждается анализом ледовой обстановки, приведенном на рисунках 3 и 4.



Рисунок 3 — Анализ ледовой обстановки на август 2013 года.

В 1980-х годах старый лёд составлял около 20% от всей площади криосферы Арктики. Сейчас это всего лишь 3%! Если раньше старый лёд был единым целым щитом, то сейчас он находится в виде отдельных оторванных кусков. Процентом 80 акватории СМП, по прогнозам ААНИИ, в ближайшие 30 лет очистится от льда и будет доступна круглогодичная навигация.

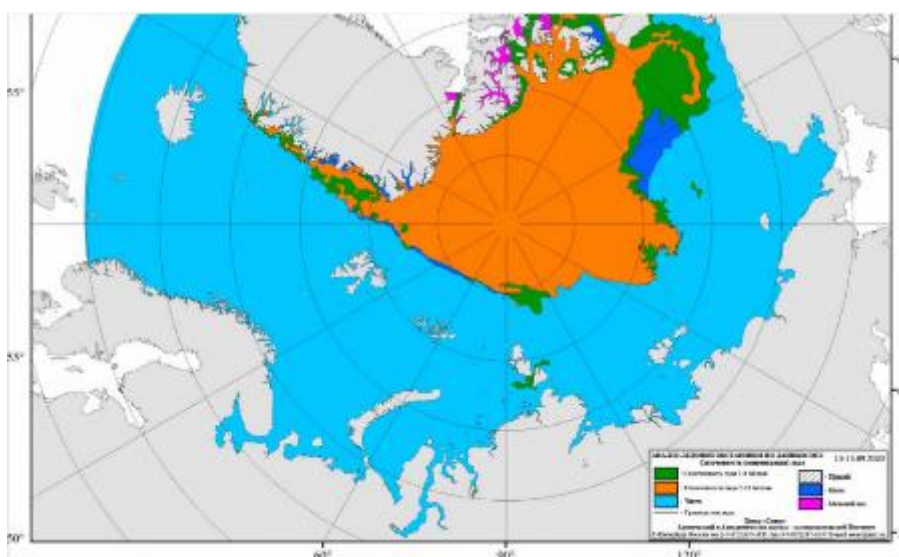


Рисунок 4 — Анализ ледовой обстановки на сентябрь 2020 года.

Публикуемые расчеты NASA, сообщают, что с вероятностью 73% осенью 2058 года Арктика впервые за последние 100 000 лет полностью

освободится от ледяного щита. Последующие 40 лет будут периодом с сезонным возникновением льда в холодную половину года.

2) Лед в Арктике подвержен дрейфу под воздействием ветров, течений (рисунок 5) и температурных колебаний, что приводит к постоянному изменению ледовых структур и формированию ледовых гряд, торосов, полей, стамух, айсбергов и т.п. опасных для судоходства даже в кажущейся безопасной дистанции от ледовых образований.

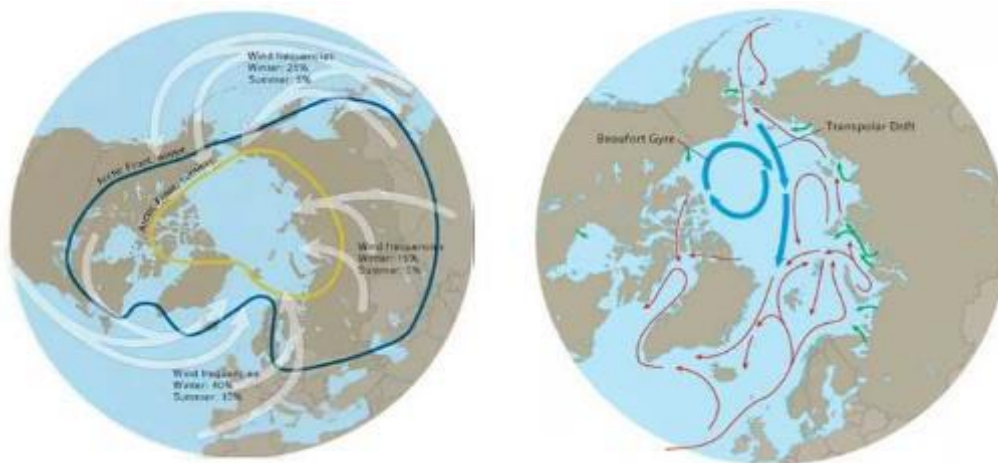


Рисунок 5 — Основные направления воздушных переносов (слева) и поверхностные морские течения (справа)

Действие штормовых ветров, волнения и течения является основной причиной локальных кратковременных подвижек ледового покрова. В течение ледового сезона образуются зоны прибрежного и дрейфующего льда. Границы зон непостоянны и изменяются с течением сезона. Вблизи берега образуется прибрежный лед. Время формирования льда зависит от климатических условий конкретного района и может меняться от декабря до января в восточной части Баренцева моря до ноября -- декабря в Карском море. Обычно зона припая распространяется до глубин 10 -- 12 м. За этой зоной припая расположены переходная зона и дрейфующий лед. Дрейфующий лед состоит из отдельных полей площадью 0.2 -- 4.0 км². Время от времени могут встречаться поля площадью свыше 1000 км². Сплоченность дрейфующего льда зимой и весной может существенно меняться и достигать 10/10 (т.е. морская поверхность полностью покрыта дрейфующим льдом).

3) Толщина льда является важным параметром, который в дальнейшем мы будем использовать для типизации объектов в категориях, соотнося их общие свойства по влиянию на другие географические объекты при моделировании.

Толщину льда принято разделять по возрасту:

- Ниласовый (толщина 5-15см)
- Молодой (толщина 15-30см)
- Однолетний (толщина 30-200см)
- Старый (толщина более 200 см).

Автоматизированный анализ оптических изображений позволяет дифференцировать типы морского льда по визуальным признакам: плотные белые области соответствуют многолетним льдам, тогда как прозрачные и тёмные участки указывают на молодые и тонкие льды. Так многолетние наблюдения демонстрируют не только сокращение площади арктического ледового покрова, но и его прогрессирующее истончение и уменьшение доли многолетних льдов.

4) Ледовая обстановка играет важную роль для осуществления транспортной и хозяйственной деятельности.

На рисунках 6 и 7 видно влияние ледовой обстановки припая на изменение транспортной логистики.



Рисунок 6 — Основные пути плавания по трассе СМП в летний период

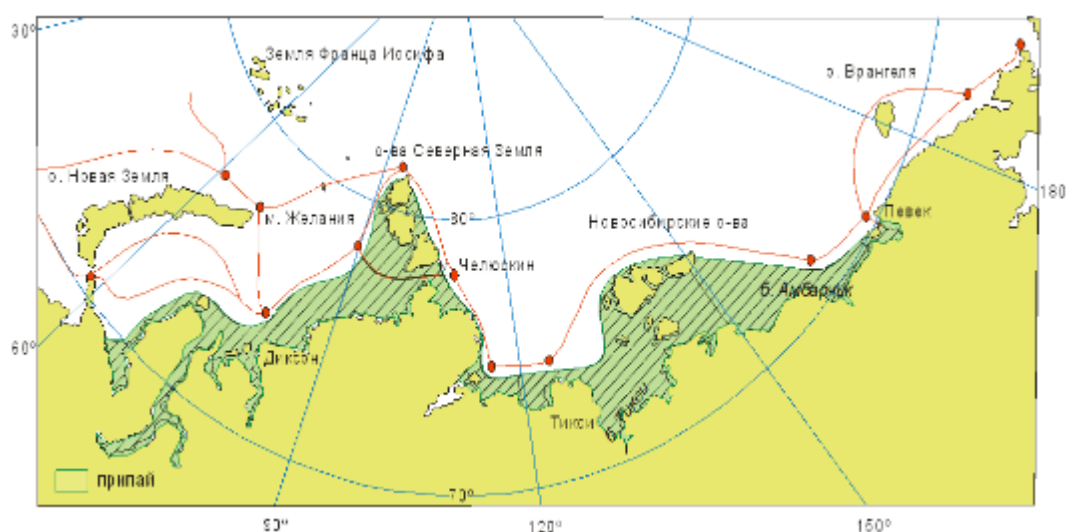


Рисунок 7 – Пути плавания по трассе СМП в зимний период

5) Смена ледовой обстановки в Арктике имеет международное значение, так как открывает новые морские пути и ресурсы для стран, конкурирующих за доступ к этим территориям. В целом, ледовая обстановка Арктики является важным аспектом изучения для понимания изменяющегося климата и его влияния на экосистему и мировую экономику.

6) Важность учета дрейфа льда в прибрежной зоне АЗРФ определяется малыми глубинами на традиционных маршрутах, так для прохождения крупнотоннажных судов требуется прокладка каналов и глубоководных высокоширотных маршрутов севернее Новосибирских островов. При этом ширина канала, необходимая для проводки через льды крупных танкеров

класса Panamax и Snesmax составляет 40 и 50 м соответственно. Действующие каналы и ледокольные суда могут прокладывать канал шириной 33–34 м. Таким образом дрейф ледового канала всего на 3-5 метров может привести к навигационной аварии или посадке на мель.

Мелководье арктических морей России, таких как море Лаптевых или Восточно-Сибирское море, создает серьезные проблемы для судоходства и разработки месторождений полезных ископаемых, поскольку ограничивает доступ крупнотоннажных судов и танкеров, требуя создания специализированных судов с меньшей осадкой или строительства дорогих каналов. Это, в свою очередь, увеличивает логистические затраты и снижает экономическую эффективность проектов освоения Арктики, что особенно критично в условиях роста экономического и геополитического значения АЗРФ (Таблица 1).

Таблица 1 — Распределение глубин арктических морей

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

Биоразнообразие: Арктика обладает уникальным биоразнообразием, адаптированным к суровым условиям. арктическая биосфера очень ранима, то есть она очень остро реагирует на любые вмешательства повреждающего воздействия. Помимо животного мира морская биосфера характеризуется огромным разнообразием промысловых рыб, ракообразных и моллюсков, что ожидаемо приведет к концентрации рыбопромысловой активности в моря АЗРФ и особо в море Лаптевых [6].

Население: на территории арктической зоны проживает небольшое количество людей, около 2,4 млн. человек, преимущественно в небольших поселках и городах. Средняя плотность — 0,63 человека на один квадратный километр. Низкая плотность населения, большая разрежённость береговой

инфраструктуры и труднодоступность побережья создают крайне суровые условия для размещения служб обеспечения безопасности судоходства.

Таким образом, физико-географические условия в арктической зоне России характеризуются особым климатом, подвижным ледяным покровом, уникальным биоразнообразием, редким и традиционным населением и иными уникальными особенностями, резко отличающимися привычные в Европейском понимании условия обеспечения транспортной активности. Рассмотренные физико-географические особенности усугубляются специфическими негативными факторы, такими как общая мелководность акватории СМП (таблица 4), большая изменчивость дна и береговой линии из-за интенсивных выносов речного грунта, недостаточное навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение акватории и прибрежной зоны.

В сложных условиях АЗРФ очевидно возрастание роли автоматизированных систем, призванных повысить качество принимаемых ответственными лицами решений.

1.1.2. Анализ состояния инфраструктуры

Возрастание стратегической роли АЗРФ и поддержка государством приоритетных проектов в арктической зоне, очевидно, станет стимулом развития всех видов инфраструктур, начиная от социальной и заканчивая инновационной. На начало 2022 года отраслевая структура АЗРФ в значительной части представлена добычей и переработкой полезных ископаемых (рисунок 8), транспортировкой грузов, геологоразведкой [7].

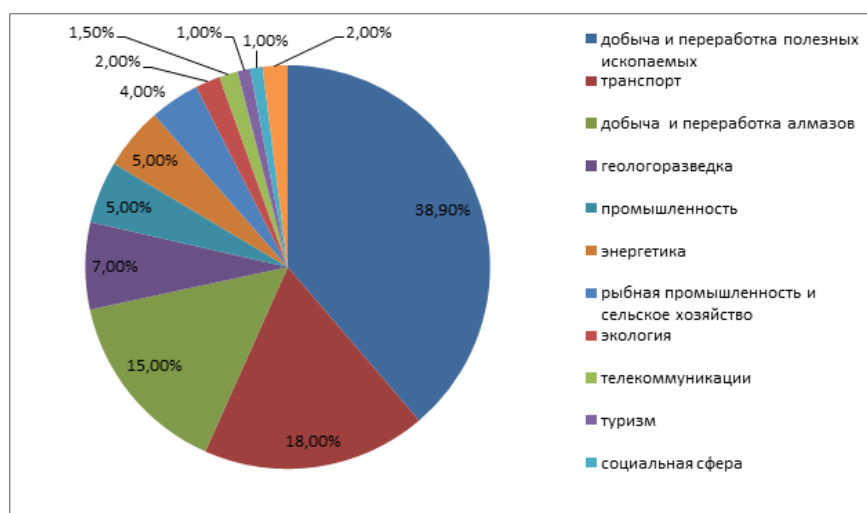


Рисунок 8 — Отраслевая структура проектов в АЗ РФ

Таким образом, более 65% деятельности в регионе опирается на транспортную инфраструктуру региона, значительная доля которой приходится на морскую и речную составляющие.

Транспортная инфраструктура АЗРФ в значительной части является производной от промышленной инфраструктуры, вместе с которой они составляют больше половины действующих проектов. Условно АЗРФ разделена на Восточную и западную части.

Морские порты: Всего Россия имеет 18 морских портов в арктической зоне. Важными портами в арктической зоне России являются Мурманск, Архангельск, Нарьян-Мар, Варандей, Сабетта, Диксон, Дудинка, Хатанга и другие. Порты Восточной Арктики: Тикси, Певек, Анадырь, Беринговский и другие (рисунок 9).

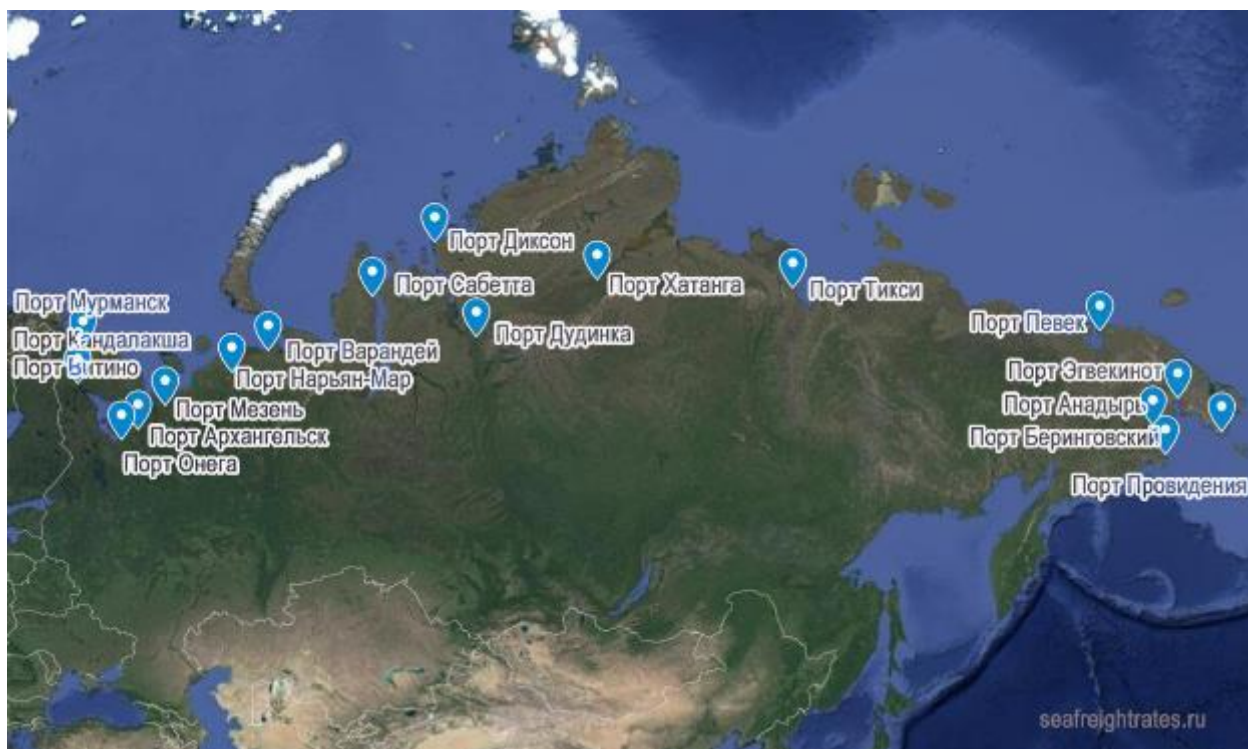


Рисунок 9 —Порты арктической зоны РФ.

Водный транспорт является самым оптимальным для доставки грузов и при каботажном плавании. Так, еще с 1930-х годов в рамках мобилизационной программы Главного управления Северного морского пути (Главсевморпуть), которое одновременно являлось и организатором, и исполнителем госпланов, направленных на научно-изыскательную и хозяйственную деятельность в Арктике, вдоль трассы СМП началось строительство арктических морских портов, полярных станций, наземных транспортных коммуникаций, военно-морских и авиационных оборонных баз; начала осуществляться подготовка полярников различной специализации; был проведен ряд экспедиций по научному, геологическому и гидрографическому изучению арктических морей и суши, в результате которых в Северном Ледовитом океане открыто несколько новых островов, а на материке обнаружены гигантские запасы полезных ископаемых. В свою очередь стремительное развитие промышленности, обеспечивало неуклонный рост грузоперевозок по СМП на протяжении всего советского периода (рисунок 10).

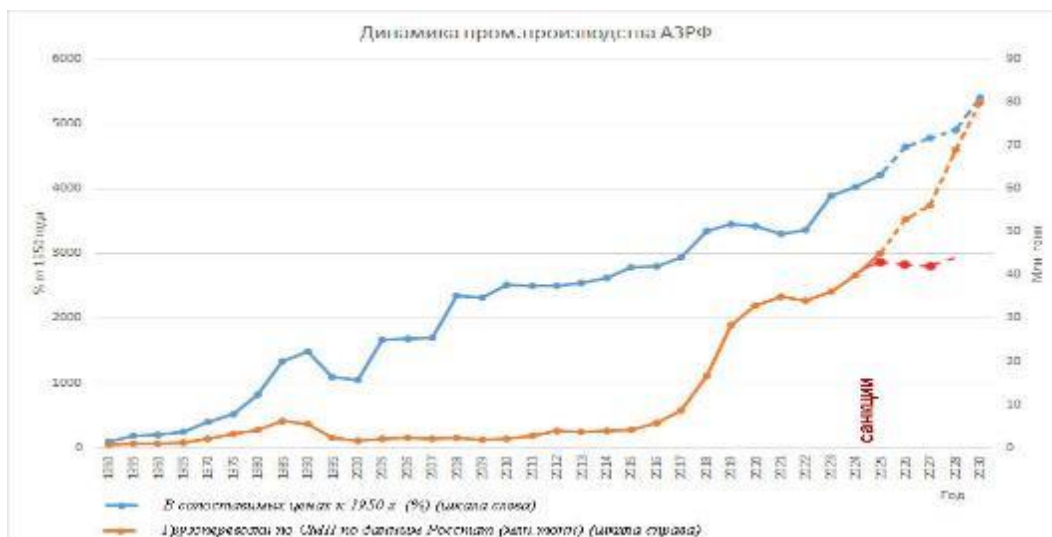


Рисунок 10 —Динамика промышленного производства АЗРФ и грузоперевозок по СМП

Объем перевозок грузов в акватории Северного морского пути вырос с 4 млн. тонн в 2014 году до 31,5 млн. тонн в 2019 году; [данные Росстата].

В сентябре 2025 президент России Владимир Путин на пленарном заседании юбилейного, десятого Восточного экономического форума обратил внимание на необходимость запустить по СМП контейнерную линию на регулярной круглогодичной основе, поставил задачу увеличить объем перевозок в 1,5 раза. К 2030 году правительство РФ ставит цель выйти на уровень более 80 млн тонн грузов (рисунок 11).



Рисунок 11 —Фактический (Росморречфлот) и прогнозный грузооборот СМП

При этом СМП сталкивается с рядом проблем. Несмотря на то, что объёмы перевозок по СМП бьют рекорды, очевидно, что планы развития требуют корректировок [8].

Железные дороги: в регионе существует железнодорожная инфраструктура, связывающая арктические города и поселки с более крупными центрами. Железнодорожное и автотранспортное сообщение развито в меньшей степени и ориентировано на доставку грузов и сырья в порты. Железнодорожная магистраль «Белкомур» реализуется для прямого соединения регионов Сибири и Урала, а в перспективе и Китая с предприятиями Северо-запада РФ. Больше половины железнодорожных магистралей проходят через тундру и тайгу в Арктике, обеспечивая своей инфраструктурой бассейны Сибирских рек Обь, Енисей, Лена, в меньшей степени Колыма.

Автомобильные дороги: сеть автомобильных дорог в арктической зоне России позволяет связывать различные населенные пункты и обеспечивать доступ к северным территориям. Однако функционирование транспорта в Арктике происходит под влиянием совокупности взаимосвязанных труднорегулируемых факторов, создающих существенные риски и ограничения его развития. Прежде всего к ним относятся экстремальность климата, уязвимость природной среды, масштабы и удаленность арктических территорий, ненадежность твердого покрытия, стоимость поддержания дорожной инфраструктуры. Влияние этих факторов определяет сезонный характер использования отдельных видов транспорта, удорожает строительство и эксплуатацию транспортной инфраструктуры, значительно увеличивает производственно-транспортные издержки, усложняя задачи логистики и обеспечения арктических территорий жизненно важной продукцией [9].

Воздушное сообщение. Имеющиеся в Арктике аэропорты преимущественно предназначены для малой авиации. Состояние этих объектов требует реконструкции, обновления навигационного оборудования. Ключевые аэропорты включают Мурманск, Архангельск, Нарьян-Мар. Существенно дороже, от 5 до 10 крат по сравнению с Европейской частью РФ сегодня обходятся услуги вертолетных операторов в зоне АЗРФ.

Специализированные объекты: в арктической зоне существуют многочисленные специализированные объекты, такие как атомные ледоколы, буровые платформы, военно-морские базы и полигоны, структуры аварийно-спасательного флота и МЧС. Таким образом, транспортная инфраструктура Арктической зоны России представляет собой совокупность различных видов транспорта, с различным уровнем активности и приоритетов, увязать логистическую активность которого на данном историческом этапе не представляется возможным. Отдельно необходимо отметить сложную геополитическую обстановку, вступление таких стран Арктического региона, как Норвегия и Финляндия в блок НАТО.

1.1.3. Логистические маршруты АЗРФ

Исторически главной транспортной артерией являлся Северный морской путь (СМП), который собственно и послужил каркасом для создания АЗРФ, связывая воедино такие крупные центры как Мурманск и Архангельск с малонаселенными территориями Якутии и Чукотки.

СМП проходит вдоль северных берегов России по морям Северного Ледовитого океана (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и Берингово), соединяет в единую транспортную систему европейские и дальневосточные порты РФ, а также устья судоходных сибирских рек. Длина СМП от пролива Карские Ворота (у архипелага Новая Земля) до бухты Провидения (в районе Берингова пролива) — 5,6 тыс. км. Маршрут через СМП почти в два раза короче других морских путей из Европы на Дальний Восток: так, от Санкт-Петербурга до Владивостока через Суэцкий канал — 23 200 км, а по СМП — 14 280 км (на 40% короче). Для наглядности сравнения, сведем основные показатели в виде таблицы (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные показатели транспортировки грузов через СМП и Суэцкий канал из Азия (порт Владивосток) в Европу (Роттердам)

Параметр	через Суэцкий канал	по СМП
Расстояние	~21 000 км	~14 000 км

Параметр	через Суэцкий канал	по СМП
Время в пути	~35–45 дней	~19–25 дней
Расходы на топливо	\$1 млн	\$700 тысяч

Продолжительность навигации по СМП составляет два-четыре месяца, однако использование ледоколов позволяет сделать ее круглогодичной.

В настоящее время наиболее активно используется для транспортировки грузов именно восточная часть СМП. По данным сервиса MarineTraffic [10] и VesselFinder по мониторингу активности судов в реальном времени на базе данных автоматической идентификационной системы (АИС) и спутниковых наблюдений, плотность трафика транспортных артерий в АЗРФ выглядит как приведено на рисунке 12.

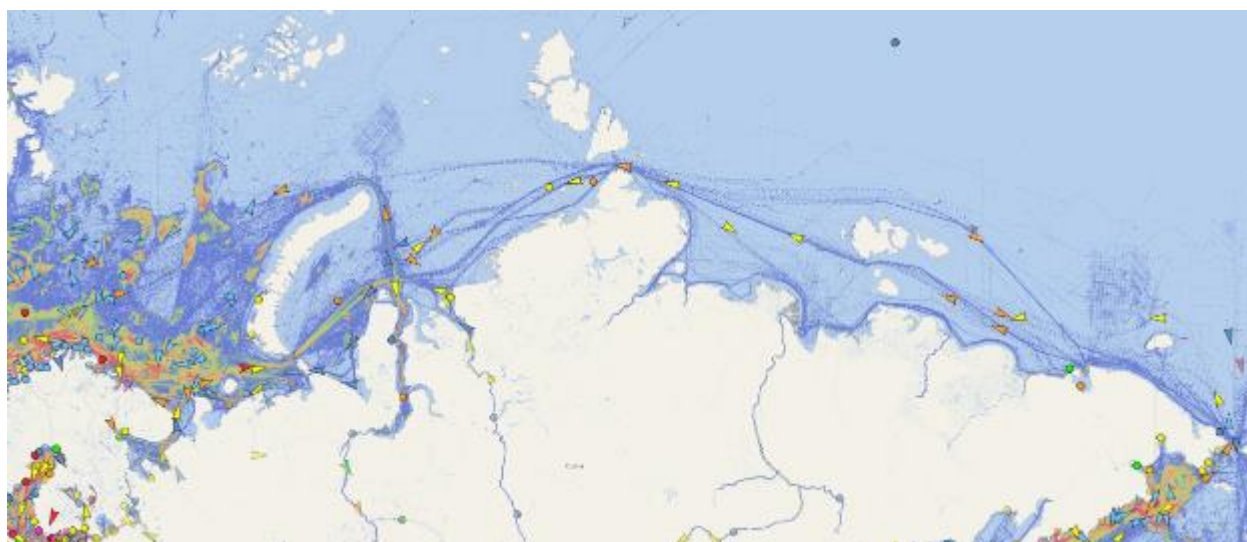


Рисунок 12 —Загрузка транспортных артерий АЗРФ

Красным цветом выделены сгущения трафика, соответствующие 800 проходов в год. Из рисунка можно сделать вывод о корреляции транспортной активности с портами перевалки углеводородов, месторождениями и производственными мощностями добывающей промышленности в районах Обской губы и порта Сабетта, а также активизации транспортного потока по СМП между востоком и западом.

СМП планируется развивать и использовать не только на внутренние потребности северных территорий, но и в качестве международной

транспортной магистрали. Предусмотрено выполнение группы проектов, в том числе приоритетного строительства и реконструкции объектов Мурманского транспортного узла, с оценочной стоимостью проектирования и строительства около 145 млрд. руб., портов Тикси, Сабетта (97 млрд.руб), Индига (120 млрд.руб), глубоководный район порта Архангельск (208 млрд. руб) [11]. К 2032 году планируется ввести в эксплуатацию семь новых атомных ледоколов проектов 22220 "Арктика" и 10510 "Лидер" [7].

Одновременно с этим в настоящее время международная логистика сталкивается с серьезными проблемами. На смену пандемии пришли санкционное давление, закрытие границ и вооруженные конфликты. Напряженная обстановка в Аденском заливе привела к резкому, до 50% от 2022 года, снижению пропуска торговых судов по южной морской транспортной магистрали через Суэцкий канал. Эти факторы привлекают внимание к СМП со стороны международных транспортных операторов [12]. В октябре 2025 года Китай начал пробные контейнерные перевозки по СМП, что вызывает необходимость обсуждения вопросов транспортной доступности СМП на международном уровне.

Система международной логистики пересматривается в направлениях ее модернизации, внедрения передовых инновационных технологий, а в случае стагнации мировой торговли и коренной оптимизации. Развитие экономики требует надежных логистических систем. Для повышения их эффективности необходимо использовать новейшие технологии, такие как искусственный интеллект, блокчейн, роботизация и другие, что способствует увеличению уровня прозрачности и скорости предоставления транспортных услуг, развитию инфраструктуры региона.

План развития инфраструктуры СМП на период до 2035 года, принятый правительством РФ в рамках нацпроектов, предусматривает выполнение мер по навигационно-гидрографическому, гидрометеорологическому и аварийно-спасательному обеспечению судоходства в акватории СМП; развитию морских портов и близлежащих аэропортов.

1.1.4. Информационная инфраструктура и связь

Приоритетными каналами связи для обеспечения информационного обмена в публичных информационных системах АЗРФ являются спутниковая связь, мобильные сети и радиосвязь в ближней морской зоне. Ситуацию с действующей в АЗРФ информационной инфраструктурой для надежной передачи большого количества информации можно назвать неудовлетворительной.

В настоящее время мобильной связью, эфирным и спутниковым телевидением обеспечено только 7% населённых пунктов арктической зоны, а радиовещание в отдельных населённых пунктах имеется только в FM-диапазоне [13]. Развитие и создание единой сети связи и высокоскоростной передачи данных также относится к приоритетным концепциям перспективного развития региона.

Текущее состояние со спутниковыми связными системами смело можно назвать турбулентным. До 2022 года на территории АЗРФ, с некоторыми условностями, работало четыре системы мобильной спутниковой связи: Iridium, Globalstar, Inmarsat и Thuraya, являющихся близкими аналогами друг другу.

В марте 2022 года американский международный спутниковый оператор Globalstar прекратил работу в России. Российские абоненты системы остались без связи, равно как и абоненты ряда близлежащих стран. Прекратило работу и совместное предприятие, созданное Globalstar совместно с «Ростелекомом». В сентябре 2023 года Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) отозвала выделенные для Globalstar частоты.

Персонализированная мобильная связь Iridium и Thuraya еще пока работают в России, но их популярность и доступность критически низкие из-за высоких тарифов, умеренной пропускной способности, ограничений по покрытию и зависимости от зарубежных операторов США и ОАЭ соответственно.

Inmarsat – британская компания спутниковой связи, формирующая набор сетей, предоставляющих различные услуги связи. Терминалы связи и широкополосного доступа в интернет Inmarsat являются де-факто стандартом связи на судах в АЗРФ. В 2020 году Iridium стал вторым, после Inmarsat, оператором Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ).

Российский целевой проект «Сфера» по развитию спутниковой группировки РФ, реализуемый Роскосмосом предусматривает развертывание сразу нескольких группировок космических аппаратов. Одна из них — «СКИФ», на базе 12 среднеорбитальных спутников на круговых полярных и геостационарных орбитах, каждый из которых по плану будет обладать пропускной способностью в 150 Гб в секунду. Другой проект – «Гонец» на 24 низкоорбитальных спутниках, за 20 лет работы полностью не развернут, уже полностью загружен и морально устарел. Полное развертывание системы сдвигается к 2027 году.

Пропал с информационного поля анонсированный в 2012 году проект трансконтинентальной телекоммуникационной трассы РОТАКС (Российская трансарктическая кабельная система) (рисунок 13). В полном объеме проект не завершен.



Рисунок 13 —Проект РОТАКС –Российская трансарктическая кабельная система

Космическая система ретрансляции на геостационарных спутниках «Луч-М» не полностью закрывает Арктический регион выше 77° северной

широты. В рамках создания высокоэллиптической космической системы «Арктика», второй гидрометеорологический спутник «Арктика-М» запущен в декабре 2023 года, а запуск спутников связи «Арктика-МС» даже не анонсирован.

Таким образом в ближайшие 5-7 лет рассчитывать на наличие высокоскоростных широкодоступных систем связи и передачи данных в АЗРФ не приходится. В связи с этим актуальность автоматизированных автономных систем навигации только возрастает, а с возрастанием автономности объектов транспортной инфраструктуры, ответственность за решения, принимаемые автоматизированными системами возрастает кратно.

1.2. Анализ систем и средств освещения обстановки в Арктической зоне активности

Наблюдение за морскими перевозками в Арктике осуществляется различными средствами и системами обеспечения безопасности и организации судоходства. Вот несколько средств, которые используются для наблюдения за морскими перевозками в Арктике:

1) Спутниковые системы мониторинга судов позволяют отслеживать положение и движение судов в реальном времени, обеспечивая контроль над морскими перевозками.

2) Автоматическая идентификационная система (АИС), система в судоходстве, служащая для идентификации судов, помимо основного берегового УКВ канала сбора данных с транспондеров судов имеет и спутниковый сегмент трансляции данных гражданского назначения (рисунок 14). На данный момент РФ только начала разворачивать собственные спутниковые средства получения данных АИС для мониторинга движения судов в мировом океане и в собственной акватории.

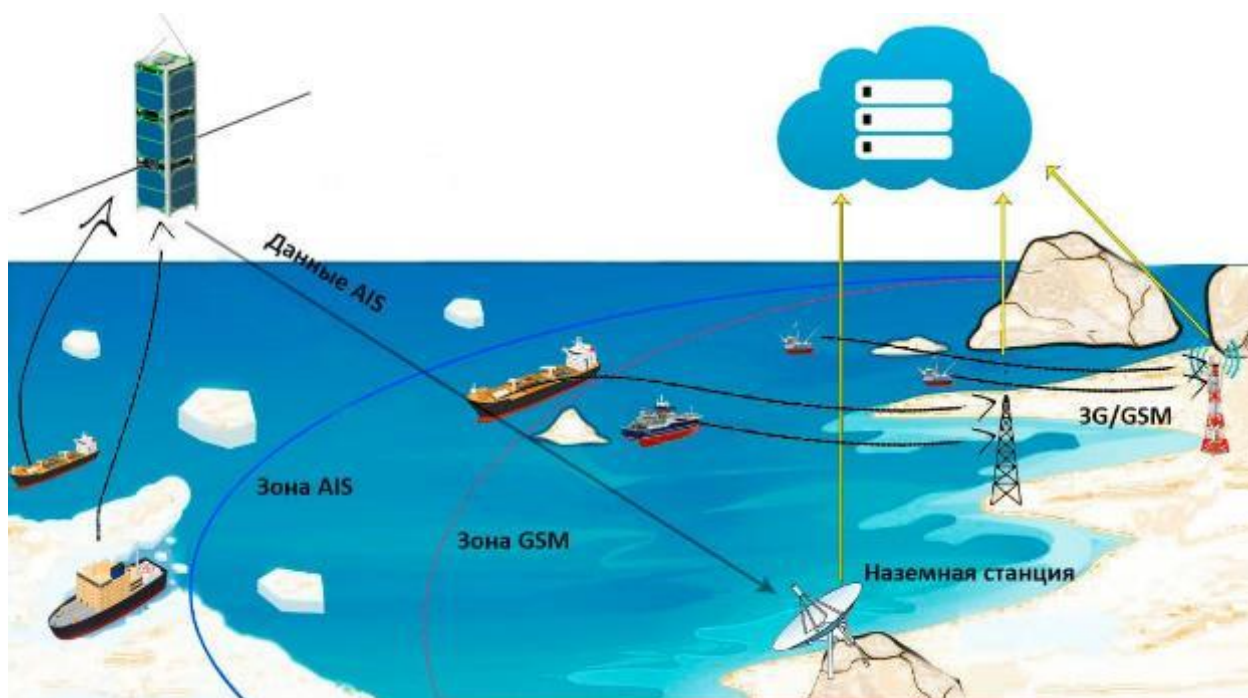


Рисунок 14 — Каналы обмена данными АИС

Дальнейшим развитием АИС с более активным задействованием спутникового сегмента является Автоматическая система обмена данными (АСОД), обеспечивающее в 32 раза большую полосу пропускания. Основными задачами АСОД является непрерывное информационное обеспечение вождения судов, вплоть до обеспечения безэкипажного судовождения, а также автоматическая передача требуемой морскими регламентами информации между судами и береговыми службами. Необходимость создания и внедрения АСОД возникла из-за того, что при одновременном нахождении в одном районе большого количества судов и повышения плотности их трафика надёжность и дальность действия АИС существенно снижается, а требуемая частота обновления сообщений перестаёт выдерживаться и становится всё более случайной.

2) Портовые системы управления движением судов (СУДС) и береговые АИС. СУДС предоставляют пользователям различную навигационную информацию, позволяют идентифицировать и сопровождать суда и другие навигационные объекты в прибрежных акваториях, а также планировать

судоходство в прибрежных водах, проводить анализ навигационной ситуации, и выдавать сигналы тревог по заданным критериям.

3) Авиационные средства, такие как самолеты, беспилотные летательные аппараты и аэростаты, могут быть задействованы для наблюдения за морскими перевозками с воздуха, обнаружения судов и обеспечения коммуникации и связи с судами. Однако неблагоприятные погодные условия и резкая смена метеоусловий в Арктической зоне ограничивают возможность их применения от 50 до 90% суточного времени в зависимости от сезона.

4) На берегу могут быть установлены оптические и радиолокационные системы контроля за морскими перевозками, обеспечивающие наблюдение за судами при входе и выходе из портов, а также вдоль маршрутов судоходства. Эти средства и системы наблюдения могут передавать данные по наземным каналам связи.

5) Спутниковое радиолокационное наблюдение (анг. *Synthetic Aperture Radar - SAR*). Технология радиолокационного зондирования Земли известны более 60 лет, но только в последнее десятилетие получили широкое развитие в различных зарубежных коммерческих бизнес-проектах.

Радар с синтетической апертурой - это способ получения данных с помощью математической обработки радиолокационного отражения от пассивного или активного "освещения" поверхности Земли.

Спутники SAR – это радарные спутники с синтезированной апертурой, которые могут предоставлять данные с чрезвычайно высоким разрешением и осуществлять мониторинг на большой территории, независимо от оптической видимости. Электромагнитные волны могут проникать сквозь облака, частично воду и лед, «видеть» под кроной деревьев и проникать в грунт. Полезность технологии неоспорима и в настоящее время тренд считается крайне восходящим, особенно в военных программах.

Технология SAR реализованы в: США (*Capella Space* – 36 спутников), Финляндия (*IceEye* - 18 спутников), Япония (проект *StriX*), Канада, Германия,

Китай (*GaoFen* – 3 спутника) и других. По открытым источникам, сегодня в России анонсированы как минимум два проекта SAR:

Первый: проект «Окулус» начат в 2021 году, Аэрокосмической корпорацией «Новый космос» - первая российская частная корпорация по аэрокосмической деятельности. Миссия проекта заключается в решении задачи всепогодного ледового и судового радиолокационного мониторинга льдов и судов СМП и АЗРФ. Орбитальная группировка малых спутников от 1 до 12 на высотах орбит 476км должны обеспечить оперативность данных до 3,4 часа с точностями от 20 до 2 метров. На создание "Окулуса" потребуется около четырех лет [16].

Второй: на Петербургском международном экономическом форуме 2024 года «Государственная транспортная лизинговая компания» (ГТЛК) и компания «СПУТНИКС» анонсировали соглашение о сотрудничестве в сфере развития российских технологий и сервисов на основе низко- и средне-орбитальных спутниковых группировок гражданского назначения.

6) Радиолокационные станции на судах и иных подвижных объектах. Этот, казалось бы, очевидный метод наблюдения за ближней морской зоной и ледовой обстановкой может получить новое качество с развитием технологий искусственных нейронных сетей (ИНС), успешно применяемых для распознаваний и классификации при цифровой обработке изображений.

1.2.1. Системы наблюдения за ледовой обстановкой

Для наблюдения за льдом в Арктике используются различные средства и технологии, специально разработанные для мониторинга ледовых обстановок. Дальнейшая автоматизация процесса сбора, систематизации, анализа и доставки потребителям информации о ледовой обстановке будет касаться следующих средств:

1) Спутниковые мониторинговые системы и комплексы, формирующие данные наблюдений за распределением льда, его толщиной, типами ледяных образований, а также для прогнозирования динамики ледового покрова.

2) Радиолокационные системы, установленные на спутниках, самолетах или наземных платформах, позволяют обнаруживать границы ледовых образований, определять толщину льда, анализировать его структуру и состояние.

3) Беспилотные летательные аппараты могут быть задействованы для проведения наземных и аэрофотосъемок льда, обнаружения ледяных айсбергов, оценки толщины и качества льда.

4) Специализированные суда и ледоколы с оборудованием для измерения параметров ледяных образований и наблюдения за льдом, прокладывания маршрутов и обеспечения безопасности судоходства.

5) Подводные дроны и аппараты могут применяться для изучения ледяной обстановки под поверхностью воды, а также для оценки толщины льда и его состояния. Эти средства и технологии позволяют профессионалам по мониторингу льда в Арктике получать данные о состоянии ледяного покрова, делать прогнозы, обеспечивать безопасность морской навигации и принимать решения на основе информации о ледяных условиях в этом уникальном регионе.

7) Специализированные мониторинговые системы контроля дрейфующих льдов на основе маяки и вмержающих буйев.

Разнообразие и вероятная избыточность информации о ледовой обстановке, получаемой от разнообразных источников потребует разработку мульти модальной системы обработки первичных результатов наблюдений, прежде чем формализованная информация будет помещена в ГИС.

1.2.2. Автоматизированные системы управления транспортом в зоне Арктической территориальной активности

Основным препятствием для внедрения автоматизированных систем управления транспортом в АЗРФ является отсутствие развитой береговой информационной инфраструктуры и широкополосных систем связи и передачи данных. Из 18 портов АЗРФ системами СУДС оборудованы только

три: порты Мурманск, Архангельск и Сабетта (декабрь 2017 года), что составляет около 4% от необходимого покрытия акватории СМП.

Как уже отмечалось, из ранее доступных в Арктическом регионе РФ систем связи: Гонец, Iridium, Inmarsat и Thuraya для организации доступной и стабильной передачи данных в реальном режиме времени не подходит ничего, в том числе британская сеть BGAN системы Inmarsat.

Тем не менее, в режиме неполного покрытия для мониторинга судоходства коммерческие компании используют различные сетевые терминалы системы Inmarsat, начиная с терминалов IsatM2M для передачи коротких текстовых сообщений и заканчивая терминалами широкополосного высокоскоростного доступа в интернет сети BGAN. В значительно меньшей степени используются трекеры, маяки и терминалы передачи данных системы Iridium, которая, кроме прочего, имеет ограничения по доступности. Терминалы обеих систем, совмещенные с протоколом GPRS в районе малочисленных портов могут использовать более удобную и дешевую мобильную.

На базе технических решений Inmarsat (Inmarsat C, Inmarsat FleetBroadband, Inmarsat FleetOne) в АЗРФ с 2004 года действует система мониторинга судов «Виктория» (СМС «Виктория»), предназначенная для отслеживания в автоматическом режиме местоположения судов, двустороннего обмена сообщениями с судами, приема сигнала бедствия со специально разработанного судового оборудования, предназначенного для установки на судах технического флота и рассылки циркулярных сообщений на группы судов. Разработкой, модернизацией и техническим сопровождением СМС «Виктория» занимается ФГУП «МОРСВЯЗЬСПУТНИК». Вид рабочего экрана СМС «Виктория» на удаленном терминале приведен на рисунке 15.



Рисунок 15 — Вид рабочего экрана СМС “Виктория”

Пользователями СМС “Виктория” являются компании-судовладельцы и госорганы, осуществляющие контроль, надзор и отвечающие за безопасность на море. СМС “Виктория” также может использоваться для обмена телеграммами с судами и для рассылки циркулярных сообщений на группы судов. Уровень автоматизации СМС «Виктория» низкий, а на применяемых технических решениях, тем более недружественных стран, построить современную систему управления не представляется возможным.

1.2.3. Использование геоинформационных систем в задачах освещения обстановки

По результатам анализа доступной информации использование ГИС в Арктической зоне ограничивается научно-исследовательскими и метеорологическими направлениями. Непосредственное применение ГИС в процессах управления какой-либо инфраструктурой не отмечено. Портовые СУДС являются наиболее близким приближением к ГИС, но не являются по сути таковыми.

В региональных и местных органах управления ГИС выполняет три важнейшие функции: создание цифровой карты местности, интегрированной с расширенной базой данных, превращение цифровой карты в электронную с возможностью визуализации, и предоставление интерфейса интерактивной работы с ней пользователя для принятия более обоснованных решений.

Активное использование геоинформационных систем (ГИС) отмечается в деятельности органов управления, занимающихся экологическим мониторингом, ликвидацией чрезвычайных ситуаций, управлением территориями и кадастровым учетом. Однако анализ открытых источников показывает, что примеры полноценного применения возможностей ГИС для проведения предикативного анализа практически отсутствуют.

Современные географические информационные системы позволяют создавать цифровые модели объектов и процессов, по своим возможностям намного превосходящие традиционные бумажные планы. База геоданных позволяет прописывать пространственные и функциональные связи между объектами, моделировать их поведение. Важно отметить возможность совмещения в трехмерной сцене геоинформации об объектах морского или речного порта с общей топографией, батиметрией и траекториями движения судов. Базы геоданных позволяют хранить комплексное представление любого объекта, который может играть роль имущественного элемента в учетной системе, объемной модели в системе трехмерной визуализации или элемента схемы в системе управления, обладая динамическими параметрами и невидимыми связями.

1.2.4. Анализ рисков транспортной логистики в зоне Арктической территориальной активности

Один из основных рисков для морского транспорта в АЗРФ - столкновение с льдом. Ледяные образования, создают опасность для судов, особенно в условиях ограниченной видимости или при плавании в темное время суток. Даже наличие прочного ледокольного корпуса не исключает

риска повреждения судна при столкновении с массивными ледяными образованиями. Наносы льда могут привести к изменению остойчивости судна, возникновению утечек, значительному повреждению корпуса судна. Столкновения с льдом могут привести к авариям, потере груза или даже человеческим жертвам. Для снижения этого риска необходимо использовать специализированные навигационные средства, спутниковые системы обнаружения льда, а также тесное сотрудничество между судоводителями и специалистами по мониторингу ледовых условий.

Вторым значимым риском для морского транспорта в Арктической зоне России является навигация в условиях аномальных погодных условиях. Бурные арктические ветры и погодные условия могут также усложнить навигацию и увеличить риск аварий, усугублять дрейф льда и образование опасных полыньёв. Воздействие штормового ветра и волн может принести судну крупные повреждения и трещины в обшивке, т.к. увеличиваются напряжения в корпусе судна и его отдельных элементах, особенно когда курс перпендикулярен фронту волны, а длина волны близка к длине судна.

Использование точных прогнозов погоды и состояния льда, а также применение специальных стратегий маршрутизации и планирования, поможет снизить риск навигации в аномальных погодных условиях. Кроме того, современные технологии, такие как спутниковая навигация и связь, дроны для мониторинга льда и автоматизированные системы управления судном, способствуют повышению безопасности морских перевозок в этом сложном регионе.

Третьим значительным риском для морского транспорта в Арктической зоне России является высокий рисковый фактор аварий из-за дефицита инфраструктуры служб спасения. В случае ЧП в удаленных и недоступных районах, задержка в оказании помощи и эвакуации может привести к серьезным последствиям для судна, экипажа и окружающей среды. Для снижения этого риска необходимо развивать инфраструктуру в арктическом регионе, включая строительство портов, ледоколов, баз для обслуживания

судов и обеспечения безопасности морской деятельности. Также важно улучшить координацию между службами спасения, обучить персонал и обеспечить доступ к современным средствам связи и спасательного оборудования.

Четвертым значительным риском для морского транспорта в арктической зоне России являются экологические риски и угрозы для морской среды. Рост судоходства в этом регионе может привести к увеличению вероятности нефтяных разливов, выбросов вредных веществ, а также повышенному давлению на уязвимую арктическую экосистему. По оценкам Росатома [24.12.2024 Владимир Панов, на заседании комиссии Государственного совета РФ по направлению "Северный морской путь и Арктика"] ущерб от разлива нефтепродуктов в акватории Северного морского пути превысит 100 млрд рублей уже спустя сутки, а спустя 72 часа ориентировочно составит 143 млрд рублей.

Для снижения экологических рисков необходимо внедрить строгие меры контроля за утилизацией отходов судов, внедрить технологии предотвращения загрязнения, развивать механизмы оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации, проводить обучение экипажей по действиям в случае экологических аварий и поддерживать близкое сотрудничество между странами для обеспечения безопасности морской среды в арктическом регионе.

Пятым аспектом для морского транспорта в арктической зоне России, в виду перспективного использования СМП в качестве транзитного коридора, является необходимость соблюдения международных норм и стандартов, включая конвенции МАРПОЛ-73/78, SOLAS, STCW, регулирующих безопасность мореплавания, защиту окружающей среды, а также трудовые стандарты для экипажей.

Перечисленные аспекты риска снижаются путем развития и внедрения инновационных геотехнологий в системах автоматизации процессов управления транспортной активностью в Арктике.

1.3.Северный морской транспортный коридор

Перевозка грузов по СМП на 30–40% быстрее, чем через Суэцкий канал и при прочих равных условиях может быть и на 15–30% дешевле. Однако сезонность, ледовая обстановка и дополнительные затраты (ледоколы, страхование) ограничивают его массовое использование. СМП особенно выгоден для крупных грузов и в летний период. С развитием инфраструктуры и технологий этот маршрут будет становиться все более конкурентоспособным.

Северный морской транспортный коридор (СМТК) имеет целью связать порты Северо-Западного и Дальневосточного федеральных округов для транзита экспортных грузов по СМП между Азией и Европой, объединив важные процедурные вопросы в единый логистический сервис.

Основное отличие СМП от СМТК заключается в том, что СМП - это акватория, а СМТК - логистическая система, решающая задачу комплексного обслуживания грузопотоков транспортного коридора, в сложных климатических и физико-географических условиях, с характерными региону дефицитами инфраструктурных ресурсов.

Решение этой задачи с начала 2024 года вошла в перечень поручений главы государства, которые даны Минтрансу, госкорпорации "Росатом" при участии региональных властей. Иллюстрация проекта СМТК «Росатома» приведена на рисунке 16.

Более 50 млрд рублей ежегодно с 2025 по 2027 планируют вкладывать в новый федеральный проект "Развитие Большого Северного морского пути". Проект охватит почти в 3 раза больше протяжённости текущей трассы. О планах развития Большого Северного морского пути летом 2024 года сообщил премьер-министр РФ Михаил Мишустин. От Калининграда до Сахалина Большой Северный морской путь охватит около 8 тыс. морских миль, что почти в три раза больше протяженности традиционного Севморпути. В расширенном маршруте станет возможным задействовать порты Архангельск,

Санкт-Петербург и Калининград, которые фактически находятся за пределами акватории СМП. Программа развития нового транспортного коридора включена в национальный проект «Эффективная транспортная система» [17].



Рисунок 16 —Иллюстрация проекта СМТК «Росатома»

Чтобы воплотить этот план в жизнь, предстоит обеспечить круглогодичное и безопасное судоходство по СМП, для чего необходимо усилить существующую атомную ледокольную группировку, железнодорожные подходы к северным портам, авиационное сообщение. Иными словами, предстоит создать систему мультимодальных логистических операций с единым регулятором. Поскольку речь идет о мультимодальных перевозках, когда груз перевозится разными видами транспорта, целесообразным видится логистика сопровождения грузового контейнера, а не судна, которое является лишь одним из средств доставки.

Таким образом миссию СМТК можно сформулировать как создание централизованной, доступной и удобной, безопасной и эффективной среды комплексных логистических услуг, объединяющую действующие и новые маршруты транспортной активности АЗРФ. Решение такого масштаба задач, при наличии очевидных рисков и отсутствии развитых (в сравнении с европейской частью) инфраструктур, должно опираться на передовые технологии и высокую автоматизацию процессов управления.

1.4.Рискологический подход в транспортной активности АЗРФ

Риск проявляется в различных формах практически во всех областях деятельности человека имеющей связь с окружающей средой [18]. Транспортная активность в АЗРФ протекает в сложной и хрупкой природной и социальной среде. При этом социум и природа оказывает на АТА (в зависимости от решаемых задач) как положительное, так и отрицательное воздействие [19, 20]. Таким образом, начиная и проводя какую-либо территориальную деятельность (активность), мы твердо должны понимать неотвратимость влияния внешней среды и других участников хозяйственного сценария на результаты осуществляемой операции [21].

1.4.1. Географические факторы риска

Географические факторы риска или геориски – это географические факторы, которые являются или могут стать источниками или причинами потерь, угроз, нарушения стабильности территории, препятствием достижению целей территориальной активности. Это возможные убытки в процессах транспортной активности, связанные с опасными факторами и явлениями окружающей географической реальности, в которой протекает та или иная территориальная хозяйственная деятельность. Геориск охватывает множество разнообразных, но взаимосвязанных областей активных исследований и практики, таких как геоопасность (ураганы, штормы, наводнения, землетрясения, оползни, лавины, цунами и т.д.), безопасность инженерных систем (плотин, зданий, морских сооружений, линий

жизнеобеспечения и т.д.), навигационный риск, экологический риск и многие другие смежные дисциплины.

С георисками связаны такие понятия, как геоопасность, элемент геориска, геотрога и др. (таблица 3).

Таблица 3 – Термины и определения георискологии

Термин	Определение
Геоопасность	Геофизические, геологические и экологические условия региона, связанные с геопроцессами во времени. Опасность определяется как вероятность возникновения опасного природного явления или процесса в тот или иной период времени.
Опасный геопроцесс	Любое изменение состояния приповерхностной части геосреды, обусловленное естественными причинами, которое может привести к негативным для человека, инфраструктуры и биосферы последствиям
Территориальный комплекс геоопасностей	Совокупность синергетически связанных и несвязанных между собой процессов установленного генезиса (типа, вида) с известными характеристиками интенсивности, повторяемости (частоты), площадей поражения и длительности воздействия, относительно одновременно проявляющихся или возможных на определенной территории
Интенсивность территориального процесса	Показатель природной опасности геосреды, прямо или косвенно характеризующий ее разрушительную силу
Источник геориска	Геоопасность или совокупность геоопасностей, которые поражают или могут поразить определенную территорию, объекты хозяйства и (или) население, находящиеся в их пределах
Объект геориска	Определенная территория вместе с расположенными в ее пределах объектами хозяйства и населением, подверженные негативным воздействиям одной или нескольких геоопасностей
Риск	Вероятностная мера опасности или совокупности опасностей, установленная для определенного объекта в виде возможных потерь за заданное время.
Геориск	Вероятностная мера геоопасности или совокупности геоопасностей, установленная для определенного объекта в виде возможных потерь за заданное время
Элемент или субъект геориска	Геообъекты (суда, инфраструктура, биосфера), которые в результате развития опасного геопроцесса могут пострадать
Уязвимость	Возможность геообъекта утрачивать способность к выполнению своих естественных или заданных функций в результате его поражения территориальной опасностью
Угроза	Природное явление, которое может в будущем причинить ущерб геообъекту и населению
Оценка риска	Процесс последовательно выполняемых действий по

	идентификации и прогнозированию опасности (опасностей), оценке уязвимости объекта для этой опасности (опасностей) и установлению возможных потерь объекта и его составляющих для всех случаев реализации опасности (опасностей) с определенной интенсивностью, повторяемостью (частотой) и длительностью воздействия за заданное время
--	--

Оценка георисков [52] осуществляется на основе данных многолетних наблюдений (если такие существуют) и результатов оперативного мониторинга ситуационного окружения, навигационной, гидрографической, метеорологической обстановки, и т.д. На базе полученных материалов строятся математические модели территориальных явлений, объектов и процессов. Выполняются следующие этапы работы:

- систематизация данных, выявление источников опасности;
- подбор расчетных методов;
- построение прогноза развития геопасностей;
- прогноз хозяйственных, экономических и социальных потерь за определенный промежуток времени.

Геориски показывают, с какой вероятностью может возникнуть природная или техногенная чрезвычайная ситуация. Выявление георисков позволяет обеспечить безопасность людей, хозяйственных объектов и окружающей среды, а также предупредить или уменьшить потери от вероятного воздействия неблагоприятных внешних факторов геосреды.

1.4.2. Оценка риска

Оценка рисков заключается в определении степени (величины) риска. Методические подходы в оценке рисков делятся на две группы: качественные и количественные. Качественный анализ носит описательный характер. Основная задача качественного анализа заключается в выявлении и идентификации всех возможных видов рисков для определения комплекса мероприятий по его предупреждению. Количественные методы призваны

описать и дать стоимостную или натуральную оценку всех возможных последствий гипотетической реализации выявленных рисков.

1.4.3. Риски в морской логистике

Морская транспортная логистика является примером типичной территориальной деятельности, осуществляемой в неблагоприятных условиях внешней и внутренней среды. Опасности и угрозы здесь содержат как сама окружающая среда (ураганы, штормы, мелководье, ледовые условия, ...), так и объекты, и процессы мореплавания (судно, экипаж, морская инфраструктура, и т.п.).

В таблице 4 приведены факторы географии АЗРФ, оказывающие на значимое влияние на морскую активность и ее безопасность в арктическом регионе. Этот регион является наиболее сложными и тяжелым для осуществления морской логистической деятельности.

Таблица 4 – Природные и хозяйственные факторы Арктической зоны, оказывающие влияние на территориальную арктическую активность

Территориальные факторы арктической зоны Российской Федерации	Вытекающие из специфических условий региона проблемные вопросы арктической территориально активности
Физико-географические условия: Большая пространственная протяженность Значительные запасы полезных ископаемых Низкие температуры Высокая влажность Длительная «полярная ночь» Ионизация атмосферы приполярной области, создающая значительные по пространственному распространению (500-1500 км) и времени (до 2-х часов) помехи (вплоть до полного прекращения) прохождению радиоволн Мелководность акватории морской арктической зоны Сильные ветры Низкая инсалация Ледовитость, тяжелые подвижные льды Недостаточная навигационная оборудованность Низкая изученность региона	Необходимость преодоления больших расстояний в условиях недостаточно эффективной связи, навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения Необходимость оперативной ледовой разведки, прогнозирования ледовой обстановки, планирования маршрутов перехода и ледовых проводок в условиях подвижных ледовых полей Наличие протяженных зон помех прохождению радиоволн Необходимость особого арктического исполнения аппаратной части технических средств и систем Необходимость наращивания группировки бортовых/базовых беспилотных комплексов и систем ледовой разведки и гидрографических обследований Необходимость производства периодических дноуглубительных работ Необходимость наращивания навигационно-гидрографического оборудования театра

Изменчивость рельефа дна вследствие мощных выносов грунта Сибирских северных рек Длительность восстановления нарушенных экосистем	Необходимость развертывания альтернативных спутниковым высокоточных навигационных систем Необходимость интеграции спутниковых и наземных навигационных систем Необходимость обмена информации об обстановке в ближней зоне судов Необходимость наращивания группировки бортовых беспилотных аппаратов – навигационных, гидрографических, разведывательных (воздушных, подводных) Необходимость систематических точных оперативных и долгосрочных метео- (ледовых) прогнозов Необходимость дополнения спутниковой связи и навигации наземными связными и радиотехническими системами Необходимость насыщения региона киберфизическими средствами и системами поддержки территориальной арктической активности Необходимость ледокольной поддержки навигации
Хозяйственно-географические условия: Неразвитость инфраструктуры: - транспортной - энергетической - селитебной - телекоммуникационной - связной - логистической - здравоохранения - НГГМО - спасательной Удаленность от экономически активных регионов России Демографические ограничения Высокая стоимость ресурсов и услуг (людских, биологических, энергетических, транспортных)	

Содержание данных таблицы подтверждает тезис, что рискованные факторы геосреды АЗРФ носят всеобщий глобальный характер, и требуются специальные целенаправленные усилия для оптимизации морской деятельности в условиях природно-хозяйственной среды арктической зоны.

Риски в транспортной логистике АТА с учетом развития СМТК можно разделить на следующие основные виды:

1. Риски навигационных аварий и происшествий (отказы, сбои приборов и оборудования, недостаточная оборудованность акватории, мелководье, сложные ледовые условия, слабая видимость, сложные метеоусловия);
2. Риски из-за опасного воздействия явлений внешней среды (штормы, ураганы, наводнения, колебания уровня моря и т.п.);
3. Технический риск - отказ и поломка транспортного средства;
4. Риски по вине персонала;
5. Коммерческий риск - срывы поставок, нарушение логистического плана, невыполнение обязательств сторон логистической цепочки;
6. Риски экологические, которые могут нанести ущерб окружающей среде;

7. Социальные риски (эпидемии, забастовки, военные действия);
8. Риски, обусловленные нарушением техники безопасности, пожарной, химической, радиационной безопасности;
9. Риски хищений;
10. Риск гражданской ответственности от нанесения ущерба третьим лицам.

Говоря об опасностях акватории АЗРФ, следует в первую очередь рассматривать негативные факторы физико-географических и инфраструктурных условий, которые формируют территориальное распределение навигационных, гидрографических, метеорологических, операционных и иных многочисленных арктических опасностей, обуславливающих наличие кратковременных и долговременных опасностей, угроз и рисков морских арктических предприятий [21,23,124].

Очевидно, что риск-образующие факторы имеют географическую привязку. В этом их ключевая особенность. Рассмотрение только количественных характеристик рисков, без их пространственной привязки, даст неполную картину; необходима "работа на местности" с учетом особенностей рассматриваемого региона. Оценки рисков и последующее установление закономерностей их вариаций могут служить эффективными инструментами в их предупреждении.

Обледенение судов в АЗРФ является важной (эксплицитной) характеристикой мореходности и влияет на представление модели судна и её изменчивости (морфизма) при анализе геоситуации и специальных прогнозных задач. В части касающейся обледенения судна, к примеру, могут быть использованы следующие критерии морфизма:

- 1) медленное обледенение, происходящее при любой скорости ветра или одном из явлений – атмосферных осадках, тумане, парении моря – и температуре воздуха от -1 до -3 °C, а также скорости ветра $0-9$ м/с ($32,4$ км/ч) и температуре воздуха ниже -3 °C;

2) быстрое обледенение, возникающее при скорости ветра 9–15 м/с (32,4–54 км/ч) и температуре воздуха от –3 до –8 °С;

3) очень быстрое обледенение, появляющееся при скорости ветра свыше 15 м/с (54 км/ч) и температуре воздуха ниже –3 °С, а также при скорости ветра 9–15 м/с (32,4–54 км/ч) и температуре воздуха ниже –8 °С.

Нижними пределами скорости ветра и волнения, при которых наблюдаются забрызгивание судна, а, следовательно, и обледенение, являются скорость ветра 5 м/с и волнение моря 2 балла [21].

Большинство случаев опасного обледенения (скорость обледенения 1,4 см/ч и более) наблюдается при сочетании скорости ветра более 15 м/с, температуре воздуха ниже –10 °С, волнении моря более 5 баллов [22,23].

Приведем критерии обледенения в таблице 5.

Таблица 5 –Критерии обледенения

Показатель	Степень обледенения					
	Нулевое	Медленное		Быстрое	Очень быстрое	
Температура воздуха, °С	выше –1	от –1 до –3	< –3	от –3 до –8	< –8	< –3
Скорость ветра, м/с	< 5	Любая	0–9	9–15	9–15	> 15
Волнение, баллы	< 2	-	-	-	-	5

Для оценки рисков обледенения исходя из указанной градации, определяются пять географических (территориальных) зон, характеризующих уровень риска обледенения: 1) зона нулевого обледенения; 2) зона медленного обледенения; 3) зона быстрого обледенения; 4) зона очень быстрого обледенения; 5) зона экстремального обледенения.

Использование пяти категорий позволяет обеспечить достаточно оперативный и в то же время достоверный анализ и применение соответствующего морфизма к модели судна при взаимодействии географического объекта типа судно с «аномальным» климатическим явлением.

Такой подход к моделированию изменчивых свойств объекта является приемлемым и перспективным для дальнейшего развития в рамках объектно-ориентированных методов категоризации и расчета рискологических параметров территориальной обстановки в геоконтроллинговых процедурах планирования и реализации решения.

1.5. Анализ рисков и классов конфликта

В системном понимании конфликт – это специфическая форма взаимодействия двух и более систем или компонентов одной системы в процессе устранения противоречий.

Конфликт – самоуправляемый процесс, который ведет к нарушению устойчивого функционирования системы и завершается либо ее возвратом в прежнее устойчивое состояние, либо образованием в ней нового устойчивого состояния, либо ее катастрофой и гибелью, что является источником риска.

Конфликт поддается моделированию, современное математическое моделирование конфликтов, помимо ключевых теорий — теории игр и исследования операций [24,26,125], опирается на широкий спектр формальных методов: теории сетей, методы нелинейной динамики, теории принятия решений, методы машинного обучения и анализа больших данных и т.д.

1.5.1. Конфликт между уровнем развития автоматизации и ролью лиц, принимающих решения

Наращение конфликта между уровнем развития автоматизации и ролью лиц, принимающих решения (ЛПР), — это одна из ключевых проблем современного технологического прогресса. Этот конфликт возникает из-за противоречия между возможностями автоматизированных систем и необходимостью сохранения человеческого контроля над критически важными процессами.

Предпосылками развития конфликта являются неизбежное развитие уровня автоматизации, появлением современных технологий, такие как

искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение, робототехника, позволяющие автоматизировать всё более сложные процессы и неоспоримым условием, что человек с его когнитивными возможностями и ограничениями остаётся ключевым звеном в принятии стратегических, этических и социально значимых решений.

Автоматизированные системы способны обрабатывать огромные объёмы данных, принимать решения на основе алгоритмов и выполнять задачи быстрее и точнее, чем человек. Однако только ЛПР несут ответственность за последствия принимаемых решений, что требует глубокого понимания контекста, ценностей и возможных рисков.

Основные аспекты рассматриваемого конфликта приведены в таблице 6:

Таблица 6 – Основные аспекты Конфликт между уровнем развития автоматизации и ролью лиц, принимающих решения

Аспект конфликта	Автоматизация	Роль ЛПР	Суть конфликта
Скорость принятия решений	АСУ принимают решения быстрее, точнее и с меньшими затратами ресурсов	ЛПР требуют времени для анализа и оценки	Автоматизация может опережать человека, что приводит к задержкам или ошибкам
Качество решений	Алгоритмы обрабатывают большие объёмы данных и находят сложные закономерности	Человек учитывает контекст, этику и нестандартные ситуации	Автоматизация может быть точной, но негибкой в сложных или уникальных случаях
Риски ошибок	Машины менее подвержены ошибкам, вызванным усталостью, стрессом или невнимательностью	Человеческий фактор остается критически важным, несмотря на развитие автоматизации	Люди способны генерировать новые идеи и находить нестандартные решения, что пока недоступно машинам
Ответственность	Ответственность за ошибки алгоритмов сложно определить	ЛПР несут юридическую и моральную ответственность за решения	Конфликт между автоматическим принятием решений и человеческой ответственностью
Доверие к технологиям	Алгоритмы могут быть непрозрачными (например, "чёрный ящик" нейронных сетей)	ЛПР нуждаются в прозрачности для доверия и контроля	Недостаток доверия к автоматизированным системам со стороны человека

Этические аспекты	Автоматизация может игнорировать моральные и социальные последствия решений	ЛПР учитывают этику, ценности и социальные последствия	Конфликт между технической эффективностью и моральной ответственностью
--------------------------	---	--	--

В современное, турбулентное время развития беспилотных (безэкипажных) технологий, перечисленные аспекты становятся все более очевидными. Так суда с автопилотом уже способны принимать решения на маршруте быстрее вахтенного капитана, но в случае аварии возникает вопрос: кто виноват — разработчик, владелец или алгоритм. Автономные дроны и системы вооружения могут принимать решения о поражении цели без участия человека, что вызывает этические и правовые споры.

Конфликт между автоматизацией и ролью ЛПР будет только усиливаться по мере развития технологий. Ключом к его разрешению является сбалансированный подход, который сочетает преимущества автоматизации с сохранением человеческого контроля и ответственности.

Конфликт между автоматизацией и человеческим фактором — это вызов, который требует комплексного подхода. Важно не противопоставлять технологии и людей, а искать способы их гармоничного взаимодействия. Автоматизация должна стать инструментом для улучшения качества жизни, повышения эффективности хозяйственной деятельности, а не источником социальных и экономических проблем.

1.5.1. Основные риски транспортной активности в Арктической зоне РФ

Анализ физико-географических условий региона, существующего состояния инфраструктур, логистической значимости региона в совокупности с факторами экологического и геополитического риска показывает необходимость дальнейшего совершенствования систем эффективного управления во всех сферах деятельности человека, тесно связанных между

собой, на основе внедрения все более совершенных методов, в том числе автоматизированного управления (таблица 7).

Таблица 7 – Риски и методы их анализа с применение ГИС

Категория рисков	Основные риски	Методы анализа
Природно-климатические	экстремальные температуры	моделирование влияния низких температур на состояние техники, топлива, мореходности и тп
	ледовые условия	совершенствование существующих методов ДЗЗ, с применением радиозондирования (РСА) со спутников
	полярная ночь и плохая видимость	сценарное моделирование применимости датчиков различной физической основы
	изменение климата	статистический анализ в ГИС (таяние льдов, хотя и открывает новые возможности для судоходства, также приводит к непредсказуемым изменениям ледовой обстановки и повышению рисков)
Технические	износ оборудования	статистический анализ частоты и причин аварий
	ремонтоспособность	оценка технической готовности
	недостаток специализированных судов	ГИС моделирование с учетом технических особенностей судов; не все транспортные средства приспособлены для работы в арктических условиях
Инфраструктурные	слаборазвитая инфраструктура	оценка сильных и слабых сторон, возможностей и угроз для транспортной системы в Арктике
	низкое качество инфраструктуры	ГИС-анализ (оценка инфраструктурных объектов)
Экологические	загрязнение окружающей среды	оценка экологического ущерба
	сложность ликвидации последствий аварий	сценарное моделирование и ГИС сопровождение аварий
Логистические	высокая стоимость транспортировки	логистические задачи с учетом особенностей АЗРФ
	зависимость от сезонности	качественный экспертный анализ
	зависимость от ледоколов	комплексирование ГИС + АСУ
	недостаток кадров	работа в Арктике требует специальной подготовки
Геополитические	конкуренция за ресурсы и маршруты	анализ международной обстановки
	санкции и ограничения	сценарное моделирование конфликтов

Человеческий фактор	ошибки экипажей и персонала	анализ аварийности по вине человека
	ограниченные возможности для эвакуации	оценка доступности спасательных служб комплексирование ГИС + АСУ

Как видно из данных в приведенной таблице, уже в настоящее время, важная часть рисков транспортной активности может быть предметом анализа, а, следовательно, и предметом выработки автоматизированных рекомендаций с использованием пространственных данных и применением геоинформационных технологий, используемых в ГИС.

Таким образом, развитие геоинформационных технологий в комплексе с совершенствованием кибернетической составляющей является одной из мер по снижению риска транспортной активности. Аналогичные рассуждения справедливы и для всех сфер деятельности АТА.

1.5.2. Риски валидации и формализации геоданных

Под валидацией данных инструментального наблюдения в данном контексте следует понимать меру соответствия того, насколько результаты инструментального наблюдения, анализа и классификации соответствуют реальности.

Дефицит, а равно избыточность данных инструментального наблюдения может затруднить принятие обоснованных управленческих решений. Недостаток данных может привести к неверному пониманию ситуации, потеря важной информации к возможным ошибочным выводам. Избыточность данных может стать причиной многозначности требующей дополнительной процедуры уравнивания результатов наблюдений.

Для принятия правильного решения важно оперировать максимально достоверным и достаточным набором данных, поэтому при дефиците информации необходимо активно использовать альтернативные источники информации, проводить анализ с имеющимися данными и при необходимости применять методы прогнозирования или экспертные оценки. При наличии

избыточной информации, например, при использовании датчиков, работающих на разных физических принципах, появляется необходимость в процедуре разрешения многозначности. Таки образом на практике получаемая информация одновременно может быть избыточной, противоречивой, неполной, нечеткой и не иметь достаточный уровень формализованности для использования в ГИС.

Под избыточной следует понимать информацию об одном и том же объекте, свойстве или событии, полученную из различных источников или датчиков, использующих различные физические принципы, например, данные от систем оптического и инфракрасного наблюдения. Такого рода системы датчиков называют мультимодальные. Непротиворечивая избыточная информация может обрабатываться методами аппроксимации и осреднения.

Противоречивой будем считать информацию, относящуюся к одному и тому же наблюдаемому параметру объекта, которые исключают друг друга в один и тот же момент времени или различаются вне допустимых пределов. Противоречивые данные требуют проведения процедуры исключения недостоверного источника, для чего должен существовать некий критерий оценки.

Достаточный уровень формализованности данных об объекте позволяет полноценно использовать их в моделях и методах геопространственного моделирования, применяемого в конкретной ГИС [27]. Достоверность информации определяется технологиями и техническими характеристиками датчиков источника входящей информации.

Нечеткой, является информация, которую необходимо отнести к некоторому параметрическому интервалу, но не конкретному значению.

Необходимо снизить риск возникновения конфликтов между валидацией данных инструментального наблюдения и формализацией ГО, что требует развития теоретических основ информационного обеспечения автоматизированных систем классификации и представления ГС.

1.5.3. Конфликт между возрастающим количеством информации и когнитивными возможностями человека

Конфликт между возрастающим количеством информации и когнитивными возможностями человека — это одна из ключевых проблем современного общества, связанная с информационной перегрузкой. Этот феномен возникает, когда объём информации, доступной человеку, превышает его способность её обрабатывать, анализировать и эффективно использовать.

Исследуемая проблема в сфере территориального управления обусловлена сложностью формализации структуры территориальных систем и процессов её функционирования. Существуют определенные положительные результаты решения проблемы на основе применения теории модулей, теории паттернов и других методов модульного моделирования. Однако значительное время оставалась теоретически не решенной и такая важная проблема, как формализация информационного взаимодействия модулей, которая, по сути, и определяет возможность построения адекватной динамической модели информационной системы и анализа её состояний. С точки зрения теории множеств существуют различные подходы к решению этого конфликта.

1) Разделение информации на структуры, категории, модули, паттерны и т.п. Создание структурированных систем хранения данных помогает управлять большим объемом информации, облегчает доступ к ней, а главное применение эффективных методов обработки, представления и преобразования информации в автоматических вычислительных системах.

2) Современные технологии, такие как искусственный интеллект, машинное обучение и автоматизация, могут помочь в обработке, фильтрации и анализе больших объемов информации, в том числе специфической для человеческого восприятия. Автоматизация рутинных задач освобождает когнитивные ресурсы для более важных задач.

3) Использование сетевых инструментов и распределенных систем обмена информацией улучшает эффективность обработки и использования разнородных данных, и как следствие качество принимаемых решений.

Эти варианты решения конфликта между растущим объемом информации и когнитивными возможностями человека основаны на принципах теории множеств и направлены на оптимизацию работы с информацией, обеспечивая более эффективное использование доступных ресурсов.

1.6. Геоинформационные системы на транспорте

Транспортная ГИС уже в обозримом будущем должна обеспечивать помимо традиционных сегодня функций по созданию цифровой карты местности, систематизированному хранению цифровой информации об объектах транспортной инфраструктуры и возможности визуализации, дополнительный функционал по работе в едином геоинформационном пространстве, территориально распределённых и информационно связанных базах пространственных данных, прогнозированию и моделированию развития динамических ситуаций, мониторингу состояния транспортной сети и его окружения, по повышению эффективности логистики и для принятия более обоснованных решений в обеспечении безопасности, в том числе, при чрезвычайных ситуациях.

Очевидно, что тренд дальнейшего развития транспортных ГИС будет обусловлен повышением уровня автоматизации этапов сбора и обработки первичной информации, анализа развития ситуации и процессов принятия решений. Автоматизация процессов сбора и обработки первичной информации опирается на техническое совершенствование систем наблюдения и интеллектуальной обработки результатов. Автоматизация анализа развития ситуации подразумевает качественный скачок от хранимых в ГИС статических данных и свойств географических объектов к их динамическим, многомерным параметрам, оценке вероятностного поведения

объектов с учетом описанных взаимосвязей на основе учета которых опирается логика принимаемых решений. Автоматизация процессов управления базируется на уже отработанных процедурах той или иной ситуации, однако возможность наступления нестандартной ситуации ставит перед перспективными ГИС задачу внедрения интеллектуальности и в этот сегмент, что уже доступно на базе развивающихся методов искусственного интеллекта (ИИ) [30].

При реализации описанного подхода в перспективных ГИС следует оперировать не просто многопараметрической базой данных геообъектов, а базой знаний о них.

Знания (в широком смысле) - совокупность осмысленных информационных структур, которые отражают свойства и взаимосвязи объектов реального или идеального мира и на которых основывается целесообразное поведение субъекта. Модель представления знаний — это способ задания знаний для хранения, удобного доступа и взаимодействия с ними, который подходит под задачу интеллектуальной системы.

Развитие геоинформационных систем, внедряемых на транспорте, уже прочно и впечатляюще успешно опирается на достижения в области искусственного интеллекта, которые базируются теориях:

- линейного программирования, динамического программирования, являющиеся базовыми и в теории категорий;
- метаэвристики, которые помогают находить оптимальные решения;
- машинного обучения, включая методы искусственного интеллекта, которые позволяют геоинформационным системам учиться на данных;
- системы экспертных знаний, которые включают логические правила для моделирования и прогнозирования;
- декларативных и процедурных знаниях [31,32].

Таки образом, следующий шаг в развитии транспортных ГИС видится в наполнении информационных систем инструментарием работы не только с данными географического аспекта в анализе, но экспертными системами с

элементами искусственного интеллекта, интегрированных в децентрализованных и распределённых сетях, формирующих рекомендации с использованием динамических моделей геоданных, объединяемых базой знаний и интеллектуальными методами в системе поддержки принятия решения. Не смотря на очевидный тренд повышения уровня автоматизации, принятие решений в вопросах транспортной безопасности должно оставаться за ЛПР.

Колоссальный объём информации и не структурированность данных от различных систем наблюдения, контроля и сигнализации при субъективном способе управления требует от ЛПР постоянного напряжения, значительного багажа знаний и навыков. Автоматизация систем обработки данных наблюдения, контроля и сигнализации, имеет целью снизить роль человеческого фактора и в своем развитии стремится к исключению человека не только из процесса сбора и анализа информации, но и ЛПР из процесса управления [29]. На данном этапе развития исключение ЛПР из процесса неприемлемо, поэтому современные управляющие системы обусловлены необходимостью визуализации информации и включением человека в информационные ресурсы, где на помощь ему приходят все более совершенные АСУ, а теперь и с элементами искусственного интеллекта.

1.6.1. Эволюция экспертных систем на транспорте

Закономерным шагом эволюции экспертных систем на транспорте является рост автоматизации в системах сбора, анализа, классификации и визуализации пространственных (географических) данных и связанной с ними информации, развитие ассистирующих подсистем поддержки принятия решений. Рассматривая ГИС как реплику экспертной системы, работающей в парадигме анализа пространственно-распределённых данных различной природы, необходимо отметить, что операции с математическими моделями

географических объектов она производит в едином геоинформационном пространстве.

Единое геоинформационное пространство представляет собой упорядоченную совокупность пространственных данных на акваторию и территорию Земли, на подводное, подземное и околоземное пространство, формируемых по единым принципам и правилам в единой системе координат, хранимых в территориально распределённых и информационно связанных базах пространственных данных, объединенных между собой и пользователями информационно-телекоммуникационными средствами, с возможностью доступа пользователей к данным в масштабе времени, близкого к реальному.

Очевиден следующий шаг развития системы, это превращение ГИС в кибернетическую систему, для чего ее необходимо дополнить рецепторами, воспринимающими сигналы из внешней среды для передачи их внутрь системы и эффекторами (исполнительными устройствами), а также входными и выходными каналами обмена сигналами с внешней средой. Однако на этом, очевидном этапе развития ГИС существует определенная эволюционная ступень: кибернетические системы предназначены решать штатные задачи, реализованные в их математических моделях принятыми методами, что для столь весомой системы, как ГИС видится недостаточным. Дальнейший путь развития ГИС видится в реализации интеллектуальных методов как на входных каналах обработки информации, так и на выходных каналах управления исполнительными механизмами.

Рассматривая ГИС как интеллектуальную систему, проблемы автоматизации управления можно сформулировать в, уже ставших традиционными, направлениях:

- проблема автоматизации входных информационных каналов, формализации данных о географических объектах для использования в едином геоинформационном пространстве ГИС;

- проблема моделирования и прогнозирования, требующая разработки расширенных и надежных моделей для предсказания поведения геосистем;
- проблема оптимизации, которая связана со сложностями сбора, хранения, обработки и эффективного управления огромными массивами разнородных пространственных данных;
- проблема автоматизированного управления, включающая эффективную обработку и анализ больших объемов данных, а также разработку интеллектуальных методов принятия управленческих решений, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям в реальном времени.

Наиболее полное описание моделей, методов и процессов управления объектами инфраструктуры (в частности, подвижных объектов) может быть построено на основе формально-аксиоматического метода. Его ключевое преимущество заключается в способности обеспечивать непротиворечивые выводы в рамках единой системы.

Аксиоматическая теория устанавливает отношения между элементами (геообъектами) и их свойствами, описывая любые множества объектов, удовлетворяющих ей. Аксиоматические теории часто формулируются как формализованные системы, содержащие точное описание логических средств вывода теорем из аксиом. Доказательство в такой теории представляет собой последовательность формул, каждая из которых либо является аксиомой, либо получается из предыдущих формул последовательностью строгих преобразований. В рамках формально аксиоматического метода на основе алгебраической операции, связанной со свойствами несущих множеств и методов декомпозиции, абстрагирования и агрегирования, осуществляется формализация системы вложенных иерархически устроенных моделей различной физической природы.

В основу настоящих диссертационных исследований положен методический подход аксиоматической теории категорий, позволяющий реализовать математический аппарат в преобразовании моделей

географических объектов как надстройку, контролирующую пространство, время и логику.

Теория категорий [33] занимает центральное место в современной математике [35,36], логике [37], успешно реализуется в информатике [38,165]. Терминология теории категорий близка терминам, используемым в геоинформатике. Общекатегорийные понятия и методы активно используются в языках функционального и объектно-ориентированного программирования. Коммутативные графы на основе морфизмов объектов теории категорий хорошо подходят для работы с объектами топологического пространства.

1.6.2. Синтез ГИС, экспертных систем и АСУ

Переход от традиционных методов управления к интеллектуальным системам, способным не только собирать и отображать данные, но и анализировать, прогнозировать и предлагать обоснованные решения, требует принципиально новых подходов. Ключевую роль в этом играет глубокая интеграция технологий, позволяющая объединить вычислительную мощь автоматизированных систем, пространственный контекст геоинформатики и логику экспертного анализа. Синтез (комплексирование или интегрирование) ГИС, экспертных систем и АСУ открывает возможности для создания комплексных систем поддержки принятия решений.

Комплексирование ГИС с экспертными системами представляет собой мощный симбиоз технологий, который объединяет возможности пространственного анализа и обработки данных с интеллектуальными методами принятия решений. Экспертные системы, основанные на знаниях и правилах, позволяют моделировать логику принятия решений экспертами в конкретной предметной области, что делает их ценным инструментом для анализа сложных и неоднозначных ситуаций.

Суть комплексирования заключается в том, что ГИС предоставляет экспертной системе пространственные данные, такие как картографическая информация, ДЗЗ, статистика и другие геопро пространственные материалы.

Экспертная система, в свою очередь, анализирует эти данные, применяя заложенные в нее правила и алгоритмы, и выдает рекомендации или решения, которые могут быть визуализированы и интерпретированы в рамках ГИС.

АСУ является источником актуальных данных и исполнительным механизмом. Она поставляет в систему реальные показатели данных мониторинга за системой и позволяет автоматически или в ручном режиме реализовывать управляющие воздействия от имени ЛПР, предложенные экспертной системой [134].

Опираясь на это умозаключение интегрированную систему можно представить в виде трёхуровневой архитектуры, где каждый уровень выполняет строго определённую функцию, обеспечивая переход от данных к решениям (рисунок 17).

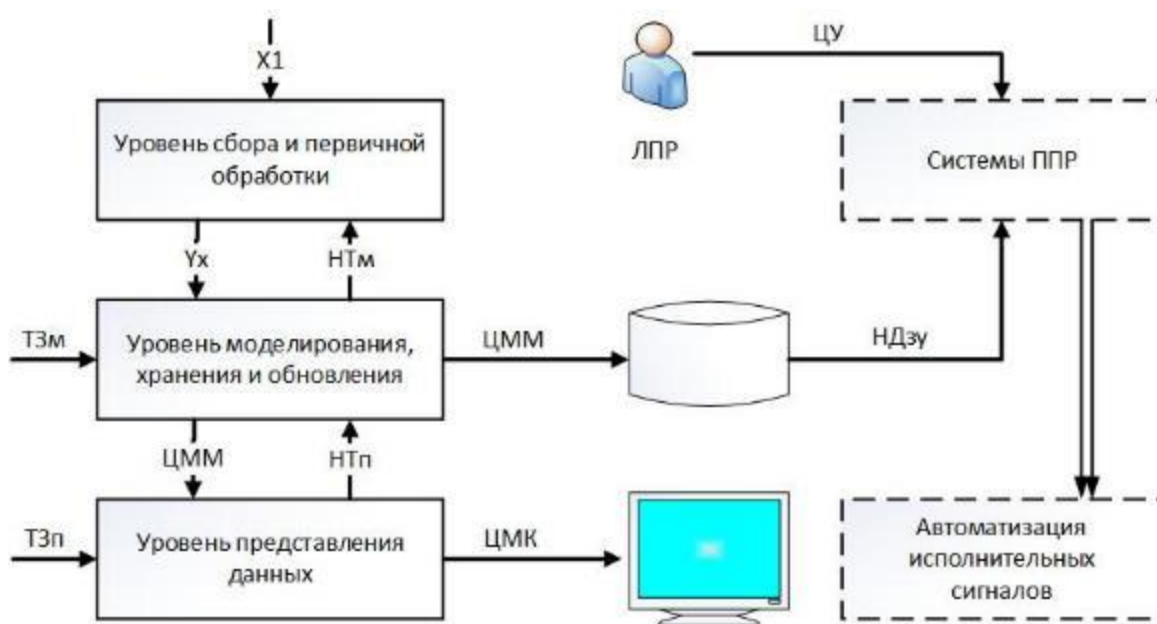


Рисунок 17 — Объединённая структура ГИС и АСУ

На первом системном уровне происходит сбор первичных данных, получаемых с помощью различных систем наблюдения, сенсоров, справочных систем, методов и технологий. В ходе первичной обработки эти данные унифицируются, создавая некоторое подмножество данных, которое частично хранится в виде архивов и полностью передаётся на второй уровень. X_1 - множество первичных данных, измеряемых или собираемых с помощью

различных технологий. Выходной поток: Y_X – множество унифицированных данных, получаемых после сбора и первичной обработки/

На втором системном уровне осуществляются анализ унифицированной информации, установление связей между объектами; устранение избыточности; проверка на целостность и непротиворечивость данных; формирование метаданных и пр. в соответствии с техническим заданием ТЗ_М на хранение, обновление и моделирование. Здесь содержатся необходимые данные для построения цифровой модели местности (ЦММ), которая хранится в базе данных в виде математических структур, категорий, формуляров объектов, совокупности графической, параметрической и символьной информации.

После обработки ЦММ передаётся на третий системный уровень, где в соответствии с техническим заданием ТЗ_П на представление данных преобразуется в цифровую модель карты, служащей основой представления информации ЛПР удобного восприятия.

Обозначенные на рисунке нормативные требования (НТ) к данным при моделировании НТ_М и представлении НТ_П информации обеспечивают единство протоколов и форматов данных, передаваемых между уровнями.

Данная схема применима не только к ГИС, но и к любой автоматизированной системе, поэтому встраивание АСУ в ГИС не вызывает системных трудностей. Интегрирование АСУ в ГИС может быть реализовано дополнением уровня системы поддержки принятия решений (экспертной системы) с реализованным интерфейсом для ЛПР при формировании целеуказания и санкционирования управляющих сигналов. Начальные данные для задач управления СППР получает из ресурсов ГИС.

Таким образом, тенденция комплексирования ГИС, экспертных систем и систем управления представляет собой эволюционный шаг от простой автоматизации к созданию «цифровых двойников» для управления территориями и объектами, где решения носят интеллектуальный, прогнозный и пространственно-обоснованный характер.

1.7. Постановка задачи исследования

В диссертационном исследовании рассматривается геоинформационный модельно-методический аппарат формализации сложных географических систем с широким классом объектов на основе теории категорий путем построения и развития полномасштабной моделирующей среды, учитывающей как статический и динамический характер геообъектов, так и морфологические преобразования пространственных объектов, что позволит создавать и развивать модельно-методический аппарат эффективного автоматизированного моделирования геоинформационной ситуации региональной территориальной активности в условиях риска, адаптированного для применения интеллектуальных методов мониторинга и анализа с целью повышения качества принимаемых управленческих решений.

Высокий уровень абстрагирования предоставляет теория категорий, которая оперирует с объектами любой природы и сущности, рассматривая закономерности отношений абстрактных объектов в составе категорий, исходя из аксиоматических постулатов, позволяющих рассматривать структуры и функциональные связи геообъектов без погружения в структурные особенности самих объектов. Такой подход, своеобразное абстрагирование при работе с абстракциями, позволяет отвлечься от обилия конкретных свойств множества геообъектов и сосредоточиться на закономерностях структур более высокого ранга, получая новое знание о них и возвращаясь на уровень объектов применять новые знания, получая новые результаты, которые до этих операций были бы не видны.

Диссертационное исследование опирается на предыдущую работу автора [40], дополненную и расширяемую умозаключениями теории категорий. В основе моделирования процесса управления в интересах той или иной системы (подсистемы) георегиона лежат зарекомендовавшие себя модели и методы, учитывающие факторы случайности, а также идеи

профессоров С.И. Биденко [41, 42] и В. Г. Бурлова [39,43,101], которые заключается в том, что выделяется структура геообъектов, выделяется действие и связываются между собой через предназначение целевой системы.

Работая с данными, относящимися к геоструктурам: геосистема, георегион, геообъект мы оперируем на топологическом пространстве, т.е. с множеством географически близких друг к другу объектов. Теория категорий опирается на гомологическую алгебру — ветвь алгебры, изучающая объекты, алгебраической топологии.

Таким образом, применение методов теории категорий не только не противоречит, но и органически дополняет теоретические основы структурированного анализа географической реальности [45]. Применение идеологии теории категорий в информатике и логике уже подтвердило свою жизнеспособность реализациями в языках функционального программирования, таких как Haskell, F#, Lisp, Scala, ставшими следующим шагом по смене парадигмы программирования от объектно-ориентированных языков (типа Python, PHP, Java) к искусственному интеллекту [29].

Для решения сформулированной научной проблемы необходимо решить следующие научно-технические задачи:

1. Провести анализ предметной области системы арктической территориальной активности, использование систем и средств освещения обстановки, опыт применения геоинформационных технологий в разрешении рисков, противоречий и конфликтов.

2. Разработать концептуальную модель системы региональной территориальной активности, реализующей возможности применения перспективных математических методов преобразований из теорий линейной алгебры и теории категорий.

3. Разработать геоинформационные модели представления геоструктур и геообъектов, модели территориальной активности, рисков, модели арктической территориальной активности, эффективно работающих при динамично изменяющихся внешних условиях функционирования,

неточности, неполноте, многомерности и разнородности мониторинговой информации.

4. Разработка геоинформационных методов поддержки принимаемых решений в условиях риска, с использованием моделей территориальной активности, обеспечивающих дальнейшее повышение уровня автоматизации.

5. Разработать научно-технические предложения по применению элементов концептуальной модели для оперативной поддержки принятия решений в условиях риска.

6. Оценить эффективность предлагаемых решений.

1.7.1. Формальная постановка задач исследования

С формальной точки зрения требуется разработать последовательность моделей, процедур и программ, осуществляющих следующие преобразующие отображения (рисунок 18).

1) априорной и оперативной информации хозяйственной, логистической, ледовой и другой геоинформации в динамическую модель (модель РВ- представления, РВ – реальное время) обстановки в системе системы АТА;

2) информационно наполненной модели обстановки в оценку обстановки в соответствии с решаемыми в АЗРФ задачами системы АТА;

3) оценки обстановки в множество предложений, представляющих рекомендации по регулированию АТА с учетом рисков финансово-экономических, транспортных, инфраструктурных и иных имплицитных ограничений.

построить последовательность отображений: f_1, f_2, f_3 :

$$f_1: S_{ATA} \rightarrow MS_{ATA},$$

где: S_{ATA} – данные об обстановке (оперативные данные ДЗЗ, априорная информация); MS_{ATA} – динамическая адаптивная территориальная ИНС-модель обстановки

$$f_2: MS_{ATA} \rightarrow SA,$$

где SA – ИНС-оценка обстановки

$$f_3: SA \rightarrow RVA,$$

где RVA – вырабатываемые с помощью ИНС-моделирования и др. формализмов территориального планирования рекомендации по специальным районам боевых действий и маршрутам плавания во льдах АЗРФ

Рисунок 18 — Формальная постановка задач исследования

Т.е., требуется построить ряд отображений f_1, f_2, f_3 таких, которые бы в т. ч. и с помощью аппарата геомоделирования и территориального анализа последовательно переводили (отображали) текущую обстановку АТА в геомодель обстановки, далее в оценку SA обстановки, и затем в рекомендации по территориальному управлению (рисунок 19).



Рисунок 19 — Графическая иллюстрация постановки задач исследования

Отображения f_1, f_2, f_3 строятся как комбинации соответствующих моделей представления и методик обработки исходных данных обстановки в АТА.

$$S_{ATA} \xrightarrow{f_1} MS_{ATA} \xrightarrow{f_2} SA \xrightarrow{f_3} RVA \quad (1.1)$$

где: S_{ATA} - оперативные данные об обстановке; MS_{ATA} - динамическая адаптивная территориальная модель обстановки; SA – оценка обстановки; RVA – рекомендации в систему управления или поддержки принятия решения.

Отображения f_1, f_2, f_3 строятся как комбинации соответствующих моделей представления и методик обработки исходных данных обстановки в АТА.

$$f = PR(MD, MT), \quad (1.2)$$

где: PR – множество процедур (алгоритмов) решения задач АТА. PR – последовательности методов и методик (MT) обработки ситуационной информации, формализованной с помощью моделей (MD) предметной области АТА.

$$PR = \{PR_k\}_{k=1 \div 3}; \quad (1.3)$$

MD – множество моделей представления ситуации предметной области,

$$MD = \{MD_i\}_{i=1 \dots n}; \quad (1.4)$$

MT – множество методов и методик обработки данных предметной области

$$MT = \{MT_j\}_{j=1 \dots m} \quad (1.5)$$

$$\forall k=1 \div 3 \ f_k = PR_k(\{MD_i\}, \{MT_j\}), i=1 \dots n, j=1 \dots m \quad (1.6)$$

Реализация задач данной постановки и призвана к разрешению модельно-методических противоречий предметной области геоинформационной поддержки управления АТА.

Решение поставленных задач обеспечивается следующей последовательностью исследований (рисунок 20).

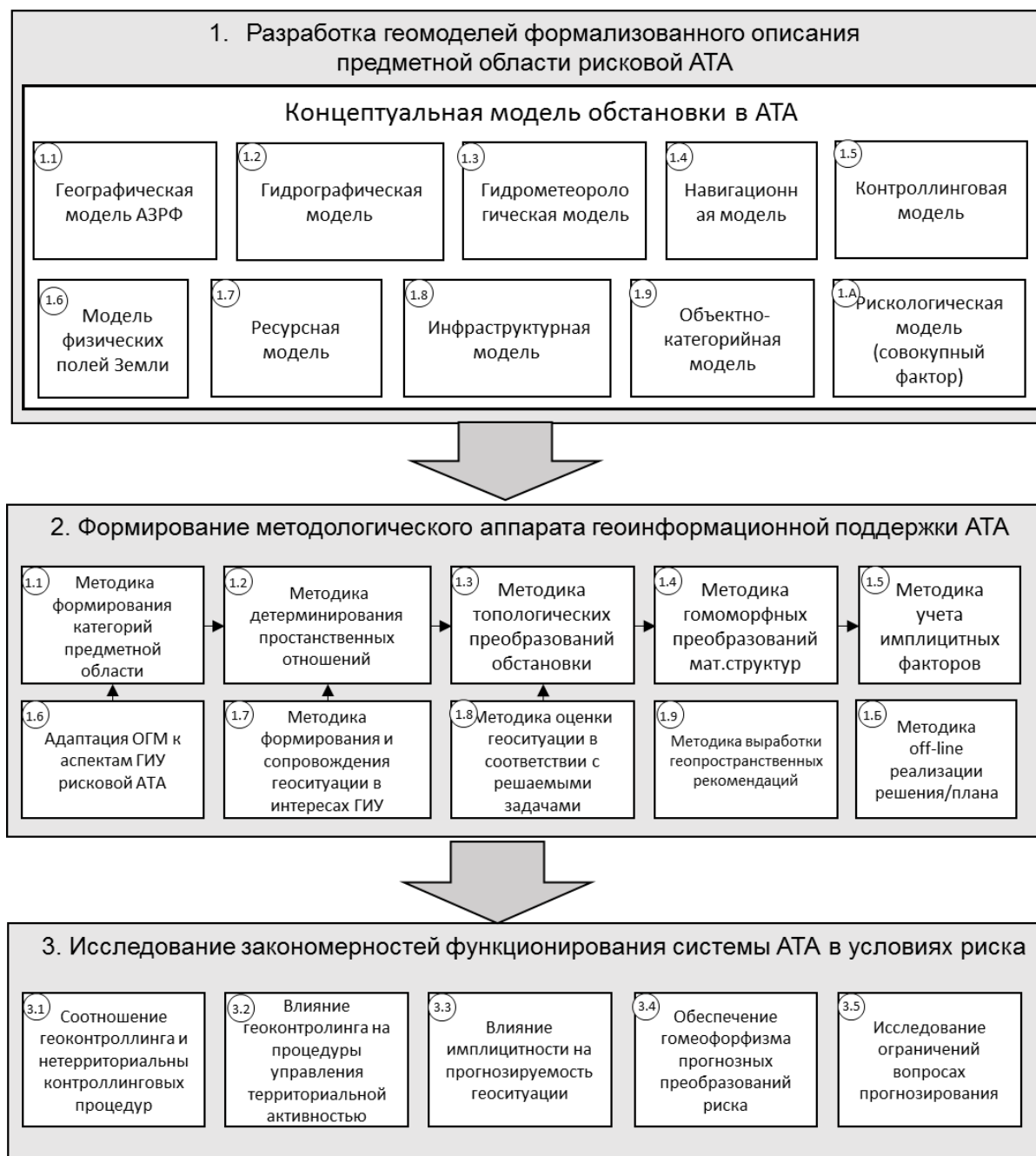


Рисунок 20 — Последовательность решения поставленной задачи исследования

Реализация предложенного порядка исследований предполагает достижение сформулированной в работе цели диссертации.

Установление приведенной связи позволяет нам получать условия существования классического процесса жизнедеятельности самой системы с некой критериальной эффективностью, которую обеспечивает подсистема управления с обратной связью (рисунок 21).

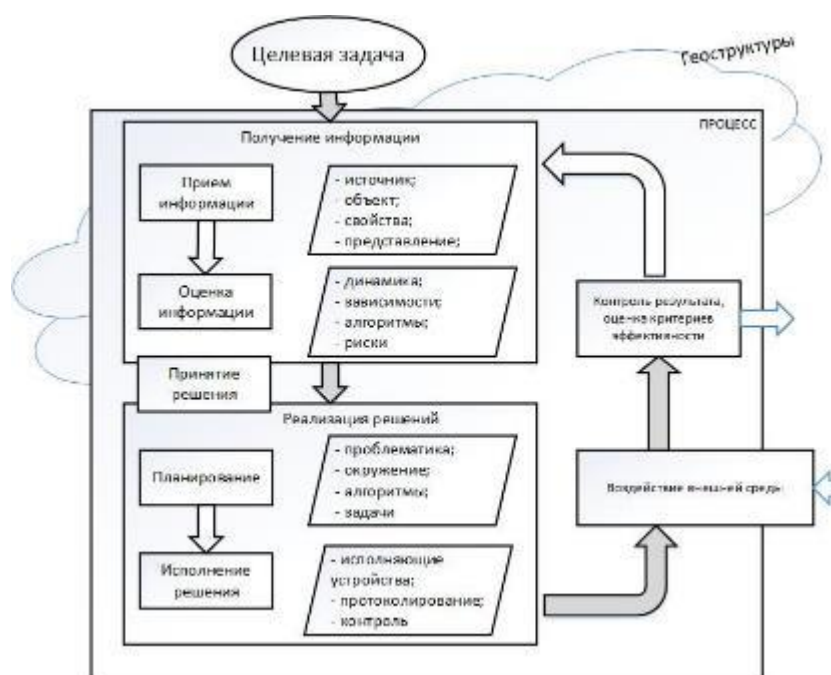


Рисунок 21 — Структурная модель процесса управления

Процессный подход дает возможность в условиях ограниченности средств и ресурсов достигать требуемых результатов с минимальными затратами [39]. Формализация реальных геоструктур в модели обеспечивает высокий уровень абстракции, обеспечивающий нам возможность работы с моделями реальных геообъектов, выделяя их значимые сущности и закономерности для поддержания процесса управления и условия его существования.

1.8. Выводы по первой главе

Анализ рисков для транспортной активности в АЗРФ является важной задачей, учитывая уникальные природные, климатические и логистические условия этого региона. Арктика играет ключевую роль в экономике России благодаря своим ресурсам (нефть, газ, минералы), а также развитию СМП. Однако транспортная активность в этом регионе сопряжена с множеством рисков, которые требуют тщательного анализа и управления.

В ходе исследований АТА, анализа условий, состояния совокупности инфраструктур АЗРФ, классов конфликтов и перспектив дальнейшего развития ГИС делается исключительный вывод о возрастании роли и

объективной потребности внедрения автоматизированных систем в процессы комплексного управления хозяйственной деятельности в Арктике. Такой вывод продиктован совокупностью тенденций ближайшего десятилетия в развитии инфраструктур Арктического региона, главными драйверами которых являются стратегическая роль транспортного коридора СМП, интенсификация добычи углеводородов, сложность развития транспортной активности из-за природных и социальных факторов, удаленность от промышленных центров, демографические ограничения, высокая стоимость ресурсов, уязвимость и хрупкость экосистем Арктики.

Анализ транспортной, портовой, связной, навигационной, энергетической и иных связанных социальных инфраструктур, обращает внимание на недостаточный уровень развития всех значимых для развития региона отраслей. Ключевыми проблемами интенсификации АТА становится низкая плотность населения и экологическая хрупкость окружающей среды, что кратно увеличивает и без того высокие логистические риски. Анализ применимости автоматизированных транспортных систем и достигнутый уровень развития ГИС определяют сформулированные в первой главе задачи, решаемые в диссертационном исследовании, основные научно-теоретические результаты которой с ростом уровня автоматизации управления транспортом призваны решить данную проблему.

На основе проведенного анализа проблем автоматизации управления, сделан вывод о том, что основой математического обеспечения перспективной транспортной ГИС должны быть синтетические интеллектуальные и кибернетические методы сбора, анализа, систематизации, обработки и представления информации, сочетающие в себе совокупность содержательных масштабируемых моделей, объединенных представлениями о категориях и современных кибернетических методов обработки больших объемов разнородной информации. Для обеспечения процесса управления важно разработать метод управления с доступом ЛПР к динамическим информационным ресурсам транспортной ГИС, который позволит

контролировать эффективность реализуемых воздействий исполнительной системы для достижения поставленной цели или обеспечения жизненного цикла процесса управления.

В главе изложены основы рискологического подхода в вопросах логистики и обеспечения безопасности региональной транспортной активности. Риск проявляется в различных формах практически во всех областях деятельности человека имеющей связь с окружающей средой [20]. Транспортная активность в АЗРФ протекает в сложной и хрупкой природной и социальной среде. При этом социум и природа оказывает на АТА (в зависимости от решаемых задач) как положительное, так и отрицательное воздействие [21]. Таким образом, начиная и проводя какую-либо территориальную деятельность (активность), мы твердо должны понимать неотвратимость влияния внешней среды и других участников хозяйственного сценария на результаты осуществляемой операции.

С точки зрения теории системности, риски рассматриваются как свойство, присущее любым видам целесообразной деятельности. Оно проявляется как вероятностная неопределенность реализации целевых функций, характер, содержание, направленность и условия достижения которых до конца не ясны субъекту, принимающему решения. И чем выше субъектная техногенная активность в георегионе, тем выше вероятность наступления рискованной ситуации в нем и чем выше уровень системности в какой-либо деятельности, тем весомее негативные (возможны и позитивные) последствия. В связи с сформулированным умозаключением качество принимаемых решений должно расти опережающим темпом возрастающих рисков в процессе хозяйственной деятельности в Арктике. Внедрение новых моделей и методов на базе современных теоретических изысканий в математике, кибернетике и управлении призвано обеспечить качественный рост принимаемых решений на благо окружающей среде и человека.

2. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЕОКОНТРОЛЛИНГОВОЙ ПОДДЕРЖКИ АТА В УСЛОВИЯХ РИСКА

Концептуальный подход базируется на применении фундаментальных идей, принципов или концепций в качестве основы для анализа, решения проблем и структурирования деятельности, что позволяет обеспечить целостность и логическую взаимосвязь между различными компонентами исследуемой системы. Концептуальный подход к моделированию геопространства, в том числе и пространственное моделирование Арктической территориальной активности (АТА), в качестве концептуального построения включает в себя три обязательных составляющих: 1) терминологию (система понятий и определений); 2) систему принципов создания и использования информации; 3) систему моделей и методов представления и преобразования геопространственной информации [48,49,50].

Концептуальная (содержательная) модель — это абстрактная модель, определяющая структуру моделируемой системы, свойства её элементов и причинно-следственные связи, присущие системе и существенные для достижения цели моделирования. Концептуальная модель транспортной активности безусловно является абстракцией сущностей реальной АТА, представляющая достижение определенного уровня абстрагирования на пути от предварительного описания сложной системы региона к его формальной модели. Вместо детального рассмотрения конкретных деталей, концептуальный подход сосредоточен на общих идеях, которые лежат в основе явления.

Различные научные направления от философии до кибернетики предлагают различные теоретические подходы к моделированию и исследованию сложных систем. Большинство теорий в той или иной формулировке используют базовые понятия, описывающие объекты, взаимосвязи и преобразования [44, 51]. В настоящем исследовании предлагается взять в основу разработки концептуальной модели положения

теории категорий, которая в общем случае строится на абстрактных сущностях, но лучшим образом оперирует топологическими структурами.

Концептуальная модель транспортной активности в представлении ГИС построенная на базе категорий, предоставляет возможность использовать мощные математические и программные методы работы с математическими структурами, применяя их к структурам географическим.

Конечной функцией моделирования является перенос полученных синтезированных сведений на моделируемую систему. Это позволяет описать, объяснить и спрогнозировать поведение реальной системы. Геоконтроллинговая поддержка АТА в условиях риска имеет целью на основе использования более глубоких знаний и расширяющихся технологических возможностях повысить оперативность и эффективность вырабатываемых рекомендаций в сфере управления территориальными объектами и структурами.

2.1. Система понятий и определений геоинформационного моделирования

Система понятий и определений содержит представленные в таблице 8 базовые и производные понятия [47, 48, 53, 95, 97]. К числу базовых относятся такие, как: «объект (экономический или производственный) на поверхности Земли», «пространство», «отношения на множестве объектов», «операции над объектами».

Таблица 8 – Система понятий геоинформационного моделирования

Базовые понятия	Производные понятия
Местность, поверхность Земли (ПЗ)	Геопространство (пространство территориальной активности - ПТА)
	Геообъект – ГО (функциональный геообъект)
Объект на ПЗ	Собственное пространство геообъекта (СПГО)
	Георегион (георегион функциональных действий)
Отношения пространственной упорядоченности (ОПУ)	Геосистема (функциональная геосистема, территориальная система активности)
	Пространственный процесс
Отношения содержательной упорядоченности (ОСУ)	Модели геоструктур
	Геоинформационные методы создания и использования ГИ

Операции над объектами (геообъектами)	Многомерное пространство признаков ГО (МПП)
--	---

Объект на поверхности Земли – это любой реальный или идеальный предмет, которому могут быть приписаны координаты относительно земной поверхности (ЗП).

Геообъект (ГО) – это область геопространства, имеющая определенное положение и протяженность относительно ЗП, обладающая собственным содержательным пространством, набором атрибутов и признаков.

Пространство – это логически мыслимая форма (структура), служащая средой, в которой существуют другие формы и конструкции.

Отношение – это форма связи между объектами, с помощью которых осуществляется структурирование и упорядочение пространства.

Операция – действие над объектом, в результате которого он изменяет свое положение в пространстве.

Геопространство (ГП) – это совокупность конкретного пространства предметов и явлений реального мира, представляющего физическое или евклидово пространство (включающее, в том числе, и поверхность Земли), характеризующего собственное пространство предметов и явлений, и многомерного пространства признаков (характеристик) предметов и явлений реальной действительности. Другими словами, геопространство – это объединение физического пространства (объекты и явления) и пространства признаков (содержательные свойства объектов и явлений).

Формально модель ГП GSp представляет собой множество пространственных объектов (геообъектов) с определенными на них отношениями (множество со структурой). Структура пространства задается отношениями и операциями над множеством геообъектов:

$$GSp = \langle GOb, Relat \rangle, \quad (2.1)$$

где: GOb – совокупность всех геообъектов; $Relat$ – отношения между ними.

Элементы ГП – это природные и социальные компоненты геосферы, их целостные сочетания со своими особенностями и характеристиками.

Многомерное пространство признаков (МПП) – множество содержательных признаков и параметров объектов, характеризующих их сущностные свойства (атрибуты или описание объектов – наименование, класс, вид, свойства, функции и другие количественные и качественные параметры и взаимосвязи).

Собственное пространство геообъекта (СПГО) – пространственные параметры ГО, характеризующие его положение в геопространстве (относительно земной поверхности) и пространственную конфигурацию (форму, протяженность).

В число характерных производных геопространственных понятий входят: «геообъект», «геопространство», «георегион», «геосистема», «система территориальной активности», «геоинформационная поддержка управления» и другие (рисунок 22).



Рисунок 22 — Структура основных геопространственных понятий и категорий

Для характеристики ГО вводятся понятия его собственного пространства и содержания. Основными параметрами ГО являются его собственное физическое пространство (положение, конфигурация, форма) и совокупность (пространство) его атрибутов (признаков).

С помощью отношений пространственной и содержательной упорядоченности геообъекты агрегируются или связываются в территориальные структуры (геоструктуры) георегионов и геосистем.

Георегион (ГР) – это территориальная (пространственная) структура однородных ГО, связанных отношением пространственной упорядоченности (плотность, распределение, ориентация, связность и др.).

Геосистема (ГС) – это территориальная (пространственная) структура разнородных ГО или ГР, связанных отношениями содержательной упорядоченности. Подобными отношениями могут быть, например, иерархические, организационные, функциональные и др.

Отношения содержательной упорядоченности – форма содержательной связи между объектами, с помощью которой осуществляется структурирование и упорядочение *многомерного подпространства признаков* (МПП) ГП. Отношения содержательной упорядоченности включают в себя следующие группы отношений: таксономические (класс, род, вид, тип); генетические (порождения, следования, предшествования, независимости, и др.); организационные (руководства, подчинения, взаимодействия, обеспечения); функциональные (перемещения, сближения, удаления, воздействия, слежения, преодоления).

Отношения пространственной упорядоченности – это форма пространственной связи между объектами ГП, с помощью которых осуществляется структурирование и упорядочение физического подпространства. Это различные отношения местоположения, удаленности (расстояние), граничности, включения, взаимного расположения и др.

Категория «геоинформационное управление» базируется на классических понятиях теории управления, таких как управляющий и управляемый объект, прямая и обратная связь, система управления, поддержка принятия решения и др. Особенность геоинформационной поддержки управления состоит в том, что всем известным категориям и понятиям теории управления дается единая пространственная (территориальная)

интерпретация. Ставится задача показать графически в геопространстве (на карте) все взаимосвязанные элементы и этапы управления – задачи, оценку обстановки, выработку решения, планирование, реализацию решения и т.д. Это обеспечивает наиболее адекватную связь управления с реальными процессами в географическом пространстве.

Категории геоинформационной поддержки управления, включая геообъекты, георегионы и геосистемы, образуют пространство функциональной активности, где их положение относительно ЗП, пространственные и содержательные характеристики, функциональная активность, взаимодействие и взаимное размещение описываются с учетом территориальных параметров. Пространство функциональной активности – это часть геопространства, в пределах которого реализуется целенаправленная деятельность функциональных геообъектов и геосистем.

Функция ГО – некоторое логически завершенное действие объекта, в результате которого изменяются его содержательные и территориальные отношения с другими объектами.

Пространственный (территориальный) процесс – связанное с перемещением и др. пространственными отношениями и операциями изменение территориальных параметров геоструктур.

Приведенная совокупность категорий и понятий ГП характеризуется следующими геосистемными аспектами.

1. Системообразующей категорией здесь выступает понятие пространства (территории) функциональной активности со складывающейся в нем конкретной геообстановкой, которое определяет территориальные связи и отношения между основными функциональными элементами (ГО, ГС, ГР) геопространства и объединяет их в особую общественно-природную среду, реализующую специфическую область социальной активности.

2. Элементами ГП являются пространственные функциональные подсистемы (категории):

- георегиональные представления, определяющие конфигурацию пространства функциональной активности по степени однородности содержательных параметров геообъектов, его структурирование по территориальному охвату и определенным географическим районам (регионам) на ПЗ;
- геосистемные представления, определяющие структурирование пространства функциональной активности по разнородности содержательных параметров геообъектов и георегионов, его территориальное детерминирование по функциональным связям и отношениям (взаимодействиям) геоструктур. Их характерная особенность – связность территории, относительно компактное размещение элементов ГС;
- геофункциональные представления, непосредственно определяющие территориальную активность в регионе;
- геокибернетические представления, определяющие состав, структуру и порядок использования территориальных структур и геопространственных интерпретаций категорий управления для решения задач контроля над территориальными объектами и системами, а также обстановки в целом;
- системная целостность пространства функциональной активности определяется принадлежностью ее элементов к геосреде (территории, ЗП) и обуславливается (характеризуется) тесным взаимодействием и взаимопроникновением ее социальных и природных компонентов.

Система принципов геопространственного моделирования и контроля [49,51,55], включает в себя основные подходы, связанные с контролем пространства транспортной активности и с созданием и использованием информации в интересах анализа и оценки территориальной обстановки.

В состав комплекса геомоделирования входят три группы формализмов:

- модели геопространств;
- модели геоструктур;
- модели и методы геоконтроллинга, т.е. представления категорий контроля и управления геосредой и геоинформацией.

Состав группы моделей геопространств определяется исходя из требований к форме представления и использования геоинформации со стороны управления (контроля) геосредой.

В геопространствах с помощью базовых геоструктур строятся модели категорий управления геосредой: обстановки, оценки, решения, плана, контроля исполнения и т.д. По составу эти модели строятся из ГО, ГР и ГС. По содержанию они включают в себя конкретное формализованное геоинформационное описание и наполнение понятий и процедур управления (уяснение задачи, оценка обстановки, выработка решения, планирование, реализация плана) [48,53,57]. Таким способом формируются пространственные и содержательные параметры категорий, этапов и процедур контроля. С помощью этих моделей осуществляется непосредственная геоинформационная поддержка процессов регулирования территориальных процессов и явлений.

2.1.Геоконтроллинг и управление территориальной активностью

Геоинформационная поддержка управления или автоматизированное управление с использованием геоинформации – система выраженных в пространственной (картографической) форме целевых установок, этапов, категорий, методик и технологий управления, направленная на определение и регулирование целесообразного функционирования объектов (систем) в геопространстве для достижения поставленных целей. Термин «Геоинформационная поддержка управления» в свою очередь связан с такими понятиями, как управление, задача, обстановка, решение, план, уровни управления и т.д.

Управление – разработка и пространственная интерпретация целесообразной стратегии и тактики функционирования территориальных структур, а также целенаправленное воздействие со стороны управляющей инстанции на подчиненные территориальные объекты для решения поставленных задач.

Задача – поставленная вышестоящей инстанцией и имеющая территориальное выражение (интерпретацию) целевая установка, которую необходимо реализовать управляемому функциональному ГО или ГС.

Обстановка – привязанная к определенному региону геосистема природных и антропогенных (социальных) факторов, их расположение, состояние и взаимосвязи, оказывающая влияние на функционирование субъектов территориальной активности.

Рекомендация – предписание на действия функциональных ГО при решении типовых задач в типовых условиях обстановки.

Решение – выраженный в территориальной форме обобщенный способ решения ГО поставленной задачи в конкретной геообстановке. Решение – это то, что нужно сделать геообъекту.

Контроль – в парадигме управления, это процесс систематического наблюдения, анализа и корректировки выполнения плановых мероприятий для обеспечения достижения поставленных целей.

Макро-уровень управления ГО – такая степень обобщения и абстрагирования геоситуации, при которой ГО рассматривается как точка функционального геопространства, которой приписывается все собственные атрибуты ГО, а также адресуются все управляющие воздействия. Подсистемы ГО, оказывающие влияние на геоситуацию, не выделяются.

Микро-уровень управления ГО – такая степень детализации и утрирования геоситуации, при которой ГО рассматривается как совокупность подсистем, имеющих собственное пространство и собственные атрибуты. Микро-уровень управления позволяет территориально и содержательно определять «вклад» (влияние) подсистем ГО на состояние системы территориальной активности.

Приведенная совокупность категории геоинформационного управления характеризуется геокибернетическим аспектом, соответствующим понятиям и категориям теории автоматизированного управления и развивает эти понятия на основе единого геоинформационного подхода к процессам управления.

Введенные понятия и определения создают основу аксиоматики геоинформационной поддержки управления и служат базой для разработки единых методических и теоретических подходов к обработке геоинформации в АСУ территориальными объектами и системами.

Территориальная хозяйственная активность (ТХА) – это пространственное размещение, функционирование и взаимодействие в определенном участке ЗП, акватории, воздушной среде, хозяйственных (социальных) территориальных структур и процессов [58,59]. Примеры ТХА – судоходство, строительство, добыча ресурсов, сельскохозяйственная деятельность и т.д.

Управление территориальной активностью или **геоконтроллинг** – это особая реализация приемов и методов классического управления (целенаправленное воздействие органов управления на «подчиненных» для достижения определенной цели) применительно к специфическим объектам – территориальным структурам [60,61,62].

Территориальность (или геопространственность) той или иной структуры или процесса определяется:

- его положением относительно поверхности Земли;
- его собственным пространством территориальным распределением;
- пространственными связями и отношениями с другими территориальными объектами или структурами;
- особенность ее функционирования в окружающей среде: перемещения и взаимовлияние.

Таким образом, геоконтроллинг – это система мониторинга и управления пространственными данными, процессами и объектами с использованием геоинформационных технологий и автоматизированных средств анализа обстановки.

Основными типичными территориальными структурами являются геообъекты (ГО), георегионы (ГР) и геосистемы (ГС) [27,53,63].

ГО – это пространственно, содержательно и функционально обособленные, содержательно однородные субъекты той или иной территориально-хозяйственной деятельности (судно, маяк, автомобиль, населённый пункт, льдина, циклон ...). То есть ГО – это отдельный (обособленный) организационно-технический объект (место, летательный аппарат, наземное транспортное средство, корабль и т.д.), функционирующий на определенном участке территории Земли или в пространстве, рассматриваемом относительно земной поверхности.

ГР представляет собой компактную совокупность ГО, связанных между собой однородными территориальными и содержательными отношениями. Примером ГР может служить засеянное поле, район лесопосадок, ледовый массив, антенное поле и т. д.

ГС – множество ГР и ГО, связанных различными территориальными и содержательными отношениями. Это, например, городская агломерация, промышленное предприятие, транспортная система, соединение кораблей в море, лесное хозяйство, сельскохозяйственная ферма и т. п.

Особенность приемов и методов геоконтроллинга или территориального управления состоит в пространственной интерпретации и представлении категорий и этапов классических элементов и процедур управления (задача, обстановка, оценка обстановки, решение, план, реализация решения, ...), их перманентном отображении относительно поверхности Земли (ПЗ), генерировании территориальных рекомендаций по локализации (аллокации) района действий подчиненных структур и способам решения стоящих задач.

Таким образом, геоконтроллинг или территориальное управление – это автоматизированное управление территориально распределенными пространственными объектами, системами и процессами.

Специфика территориального управления раскрывается через описание структуры территориальной активности, состава и содержания функционирования, составляющих его ГО [65, 154].

2.1.1. Понятия геоконтроллинга и его генезис

Более правильно говорить о геоконтроллинге, как «геоменеджмент», если иметь в виду взаимосвязь их бизнес-прототипов – понятий менеджмента и контроллинга. Менеджмент регулирует управленческую деятельность фирмы в целом, контроллинг же, как часть менеджмента (целого), отвечает в управленческой технологии только за организацию реализации принятого решения. Термин «геоконтроллинг» в своем генезисе связан с принятыми и устоявшимися управленческими категориями, приведенными в таблице 9.

Таблица 9 – Генезис понятия «геоконтроллинг» в среде других управленческих категорий

Управленческая категория (понятие)	Содержание понятия
Управление	Целенаправленной воздействие органа управления на подчиненные объекты для решения стоящих задач
АСУ	Комплекс (упорядоченная совокупность) аппаратных, программных, математических, информационных, лингвистических, телекоммуникационных, организационных средств автоматизированной поддержки функционирования органа управления при решении им задач управления подчиненными объектами
Менеджмент	Управление коммерческой организацией и ее бизнес-процессами
Маркетинг	Освещение и оценка обстановки в предметной области бизнеса предприятия
Контроллинг	Организация реализацией решений. Он включает в себя проверку соответствия фактических результатов деятельности запланированным показателям, выявление отклонений (невязка) и принятие оперативных решений для их устранения.
Геомоделирование	Формальное упрощенное передающее собственное содержание и пространство описание какого-либо территориально-пространственного объекта или процесса, передающее его основные свойства и качества с точки зрения предстоящего его исследования, анализа и применения
Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)	Наблюдение поверхности Земли наземными, авиационными и космическими средствами, оснащенными различными видами съемочной аппаратуры. Получение информации об объектах или явлениях без установления с ними физического контакта. Один из основных источников получения новой оперативной геоинформации
Геомониторинг местности (ГММ)	Система регулярного наблюдения за территорией, параметрами окружающей среды, местностью и

	расположенными на ней объектами, протекающими процессами, а также доведения информации до пользователей
Геоинформационная система (ГИС)	Автоматизированная система, предназначенная для ввода, хранения, обработки, преобразования, анализа и вывода геопространственной информации (ГПИ или информации, имеющей координатную привязку к поверхности Земли, геоинформации (ГИ))
Геоинформационная технология (ГИТ)	Последовательность выполняемых средствами ГИС операций, по вводу, извлечению, преобразованию, отображению ГИ, направленная на решение определенных задачи территориального анализа и планирования.
Управление территориальными объектами и системами ≡ Территориальное управление ≡ Территориальный контроллинг	По сути и содержанию: воздействие органа управления на имеющие территориальную природу подчиненные объекты и процессы, направленное на решение имеющих пространственное выражение задач. Особенности: специальное автоматизированное управление территориально распределенными пространственными объектами, системами и процессами с использованием средств (аппарата) автоматизации (АСУ, телекоммуникация, кибер-инструменты) и геоинформатики (ГИС, ГИТ, геомониторинги, ДЗЗ, пространственный анализ)
Геоинформационная поддержка управления	Специальное автоматизированное частичное или полное выполнение процедур территориального управления на базе пространственной интерпретации категорий и этапов управления с использованием аппарата (средств) автоматизации (АСУ, телекоммуникация, кибер-инструменты) и геоинформатики (ГИС, ГИТ, геомониторинги, ДЗЗ, пространственный анализ)
Геоинформационное управление	Некорректное использование понятия «Геоинформационная поддержка управления»,
Геомаркетинг	Специальные средства и методы пространственного анализа и оценки ТХА
Геоконтроллинг	Тоже, что и «Геоинформационная поддержка управления», синоним. Специальная автоматизированная поддержка управления ТХА (территориальными объектами, процессами и структурами) на базе аппарата геоинформатики (ГИС, ГИТ, геомониторинги, ДЗЗ, пространственный анализ) и кибернетики (АСУ, телекоммуникации, кибер-инструменты)

По своей содержательной сути геоконтроллинг – это краткий однословный синоним понятия «управление территориальными объектами и структурами» («территориальное управление»). Технологической основой для формирования понятия послужило появление аппарата геоинформатики,

развитие гео моделирования, пространственного анализа, ДЗЗ и территориальных мониторингов.

При управлении именно территориально распределенными объектами и системами органу управления потребовалась графическая информация об остановке - карта. Работа на карте при управлении ресурсами требовала большого объема трудозатратных длительных ручных операций.

Компьютерная автоматизация ручной картографии сама по себе привела к становлению геоинформационного метода создания и использования пространственной информации, а в области автоматизированного управления ГО и ГС – к появлению методов геоинформационной поддержки управления территориальными объектами и системами.

Территориальное управление – это специализированный элемент общего управления. АСУ и геоинформационная автоматизация – это всего лишь инструмент поддержки классического управления, позволяющий повысить оперативность, точность, обоснованность, непрерывность, безошибочность категорий и процессов управления. То есть, ни о каком самостоятельном «геоинформационном» (как и автоматизированном) управлении речи быть не может. Только геоинформационная поддержка классических процедур управления.

Доказательство от обратного: теряя те или иные средства автоматизации, до последнего дисплея включительно, орган управления все равно продолжит выполнение своих управленческих функций, вплоть до крайнего ручного телефона, сигнальщика или курьера.

Геоинформационные средства – это результат текущего современного технико-технологического уровня средств и инструментов, обеспечивающих управление в исторической цепочке: перо – карандаш – стило – шариковая ручка – дисплей – электронный картографический планшет.

Согласившись с легитимностью понятия «геоинформационная поддержка управления» (и смысловой порочностью или некорректностью выражения «геоинформационное управление»), оставалось, следуя с

традиционной логикой и практикой генерирования терминов, сформулировать название, состоящее из одного единственного слова. На роль такого понятия до последнего времени претендует термин «геоконтроллинг».

2.1.2. Структура территориального управления

Структура территориального контроллинга (рисунок 23) в целом мало отличается от канонической иерархической схемы управления от старшего к младшим, и определяется такими составляющими, как «уровни», «категории» и «этапы» управления, а также отношениями между ними (включает, содержит, входит, объединяет, и т.п.).



Рисунок 23 — Структура территориального управления

«Категории управления» - это базовые понятия (или «кирпичи», «блоки»), из которых строятся процедуры или технологии управления.

«Этапы управления» - базовые процедуры, из которых строятся отдельные технологические цепочки и технологии управления в целом.

«Технологии управления» - упорядоченная совокупность категорий, этапов и процедур управления, последовательное выполнение которых направлено на решение стоящих задач.

«Уровни управления» определяют степень обобщения, детализации и интеграции ГО, ГС и их элементов в системе ТХА (рисунок 24).

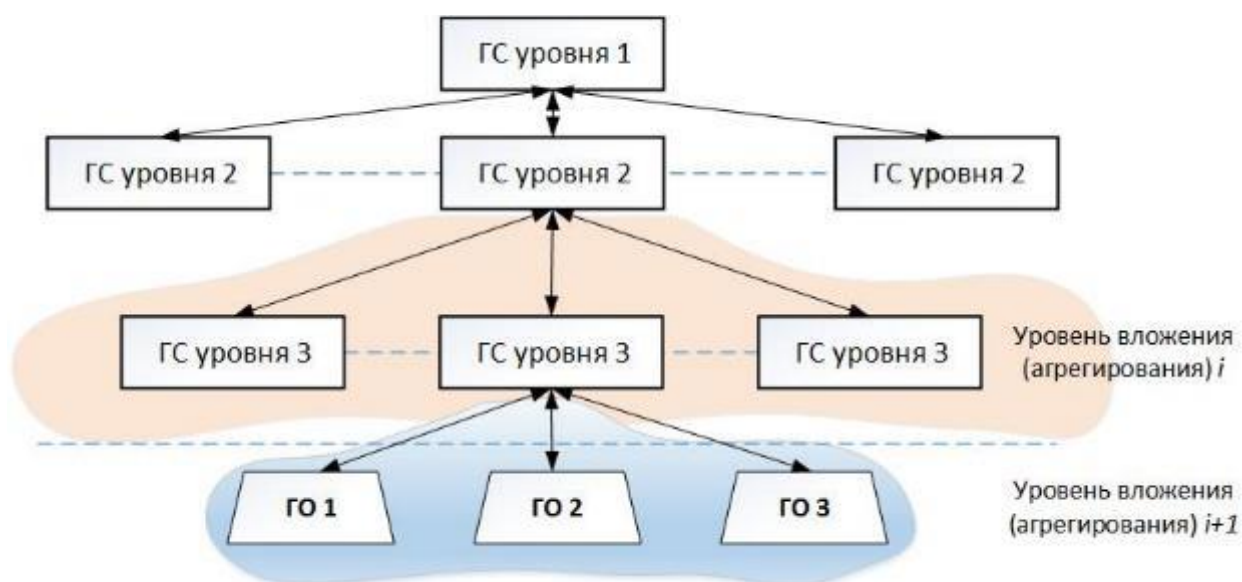


Рисунок 24 —Иллюстрация уровней агрегирования (вложения) объектов в иерархической системе

Рисунок показывает, что в обычной иерархической системе уровней агрегирования i столько же, сколько в ней различается уровней иерархии (уже внутри уровня иерархии может быть (i, k) , $k = 1, \dots, N$, $(i+1, l)$, $l = 1, \dots, M$ и т.д. агрегатных образований (вложений)).

В системе ТХА различаются два базовых уровня управления ГО – макро- и микроуровни (рисунок 25). В отличие от классических иерархических систем, структура территориального управления различает не все степени обобщения или уровни вложенности подсистем в соответствии с содержанием системы, а два базовых уровня территориального агрегирования, исходя из геопространственной идентичности ГО и ГС. Это макро- и микроуровни управления.



Рисунок 25 —Макро- и микроуровни управления ГО: КП – вышестоящий орган управления (командный пункт)

На макроуровне управления, с позиции вышестоящей инстанции (лица, принимающего решения), ГО рассматривается как обобщенная точка территории (геопространства), без обозначения его собственного пространства. На микроуровне управления собственное пространство ГО получает свое территориальное выражение (зоны визуального наблюдения, зоны физических полей, зоны досягаемости ресурсов) через состояние его функциональных подсистем.

Макроуровень реализует управление ГО, как обобщенным объектом (точкой пространства), которому как единому неразделяемому на функциональные подсистемы целому приписываются его собственные интегральные характеристики состояния (координаты, скорость, курс, собственное пространство и т.д.), действия (перемещение, маневрирование, выполнение специальных действий и др.), и который, как обобщенная точка функционального геопространства, является объектом управления для вышестоящего органа или ЛПР. Ему как единой точке адресуется командная информация «сверху».

Но сам ГО, являясь сложной организационно-технической системой, включает ряд составных частей и структурных подсистем, функционирование

которых в конечном итоге и обеспечивает решение поставленных перед конкретно им задач. Управление состоянием функциональных подсистем ГО как раз и составляет микроуровень управления.

Выделение двух уровней управления обусловливается необходимостью учета влияния состояния подсистем ГО на формирование окружающей территориальной обстановки, и, наоборот, учета состояния геосреды и территориальной обстановки на планирование действий (функций) структурных подразделений ГО.

Состояние составных частей и подсистем ГО (микроуровень) также выступает в качестве ресурсно-содержательного и территориального ограничителя при принятии решений вышестоящей инстанцией (на макроуровне управления).

2.1.3. Категории, этапы и процедуры территориального управления

К основным категориям теории управления [66,67] относятся: сущность и содержание управления, система управления, организация управления, формы и методы работы руководителя и органа управления, эффективность управления, управленческая деятельность, функции, средства, процессы, формы управления и т. д. Процедурными категориями управления являются понятия, непосредственно связанные с этапами и процессами управления, подчиненными «силами и средствами».

Состав территориального управления определяется его базовыми категориями (рисунок 26). Это такие понятия, как «Задача», «Обстановка», «Решение», «План», «Этап управления» и др.



Рисунок 26 — Базовые категории территориального управления

Сюда входят также и такие понятия (или акторы), как: «Оценка обстановки», «Планирование», «Команда (команды управления)», «Информация состояния (информация обратной связи)», «Невязка» и др.

«Задача» – это руководящий императив, это то, что конкретно по времени, месту и содержанию должен сделать исполнитель, реализуя свое функциональное назначение в социотехнической системе.

Задача формируется или инициируется основных формах:

1) как результат прямого регулирующего воздействия со стороны вышестоящей инстанции (в форме приказа или указания (распоряжения) «начальника»);

2) как следствие невязки между командами управления и информацией состояния, в результате авторегулирования самого «исполнителя» - его реакции на выявление рассогласования между плановой (командной) информацией и информацией состояния;

3) при обнаружении или идентификации ситуации «Опасность» («Угроза», «Нештатная ситуация», ...), которая чаще всего возникает в следствии резкого изменения обстановки;

4) в случае реализации многократно повторяющегося регламента функционирования ГО. Т.е. когда объект функционирует в соответствии с постоянно действующей инструкцией (наставлением, руководством).

Следует отметить, что ситуация «Опасность» может рассматриваться как частный случай ситуации «Невязка», вышедшей за допустимые пределы величины рассогласования между командами управления и информации состояния. Регулировать невязки в отношении ГО в существующей контроллинговой парадигме, без постановки новой задачи и принятия нового решения в отношении конкретного ГО может и вышестоящая инстанция выдачей соответствующих указаний другим ГО. Например, при чрезвычайной ситуации на судне, оказать содействие может судно поблизости.

Изменение обстановки вызывается (обуславливается):

- изменением внешней среды, ее опасными или нежелательными факторами (шторм, дрейф тяжелых ледовых полей, обнаружение опасных глубин);
- непредвиденным изменением внутренней среды (ошибки персонала, сбои, отказы технических средств);
- искусственным негативным воздействием.

Указанная «невязка», как правило, возникает при значимом изменении текущей обстановки, существенно влияющем на ход выполнения поставленной задачи (решения). При невозможности продолжения процесса исполнения текущей задачи, вышестоящей инстанцией ставится новая задача (принимается новое решение), соответствующее резко изменившейся обстановке.

Обстановка – это совокупность факторов и условий, в которых осуществляются подготовка и ведение морской (или любой другой) операции (рисунок 27).



Рисунок 27 — Структура категорий «Обстановка» применительно к предметной области Арктической территориальной активности (АТА)

Состав категорий «Обстановка» формируют три ее структурные компоненты:

- собственные ресурсы свои активы и средства, которые находятся в нашем распоряжении и могут быть использованы для решения возникающих, поставленных или профильных задач;
- противодействующие факторы силы, факторы, которые противодействуют нашей целевой деятельности;
- воздействие среды – окружающая среда – физико-географические и хозяйственно-географические условия в районе (регионе) операций и действий «своих сил».

Оценка обстановки – это анализ составляющих факторов обстановки по критерию: рассматриваемый фактор содействует (+) или препятствует (-) решению поставленной задачи.

Решение – это определенные руководителем замысел действий и способы его выполнения в конкретно сложившейся обстановке и временных ограничениях. Решение определяет в общих чертах кому что и в какие сроки делать, определяет обеспечение предстоящих действий.

План – это решение, детализированное и формализованное до стандартных, однозначно понимаемых функциональных процедур (команд).

Детализация (декомпозиция) решения до плана и команд служит для того, чтобы наряду с упрощением процесса его реализации, обеспечить территориальное представление категорий и этапов управления.

Информация состояния – реакция управляемого объекта на полученную команду, или просто данные о состоянии объекта управления.

Невязка – рассогласование между командами управления (что надо делать по плану) с информацией состояния (что фактически происходит).

В территориальном управлении наряду с категорией «задача» свое пространственное распространение имеют и все другие категории управления: «обстановка», «оценка обстановки», «решение», «план», «команда» и т.д.

2.1.4. Содержание территориального управления и геоконтроллинга

Содержание геоконтроллинга (геоинформационной поддержки управления) включает систему моделей, методов и процедур представления, обработки и анализа пространственной информации при решении задач контроллингового регулирования территориальной хозяйственной активности (рисунок 28).



Рисунок 28 —Содержание геоконтроллинга

Строго формально, территориальное управление (ТУ) – это регулирование в геопространстве [68] действий территориальных объектов и

систем (геосистем) для решения тех или иных задач, имеющих территориальное или пространственное выражение. Под территориальным объектом (ТО) или ГО понимается организационно-технический объект (территориальная единица (образование), летательный аппарат, наземное транспортное средство, корабль, судно и т.д.), функционирующий на определенном участке территории Земли или в пространстве, рассматриваемом относительно земной поверхности. Территориальная система (ТС) – это совокупность территориальных объектов и регионов (зон, ареалов), также располагающихся и функционирующих относительно поверхности Земли. Т.е. здесь два момента: просто управление и территориальные объекты, процессы и явления.

В мировоззренческом аспекте процесс управления определяется как последовательность мероприятий целенаправленного воздействия контрольного органа на объект регулирования для достижения определенных целей и решения стоящих задач [69].

Относительно территориальности. Оно имеет свои особенности, связанные со спецификой функционирования территориальных объектов и систем, которые требуют специальных подходов к построению систем поддержки принятия решений и неременного использования картографических и пространственных представлений процессов, категорий и этапов управления [70, 71, 72].

Так как сам ГО, объекты (факторы) противодействия функционируют в определенных районах (регионах, областях, зонах) геосреды, действуют и перемещаются в некотором географическом пространстве (воздушное пространство, земная поверхность, морская акватория), то информация об обстановке имеет координатную привязку к ЗП, поэтому по определению является геоинформацией (ГИ) или пространственной (территориальной) информацией. Следовательно, при рассмотрении содержания управления ГО необходимо учитывать и анализировать хорологические (или пространственные) аспекты территориальной активности. Важной

особенностью отображения хронологического характера оценки обстановки является необходимость представления объектов и результатов пространственного анализа геоситуации в картографической или другой пространственной форме - в виде территориальных зон, областей, ареалов, зон, рубежей относительно ЗП. Критические (опасные) факторы и параметры обстановки требуют своего территориального выделения на карте обстановки относительно «нейтральных» факторов.

Таким образом, управление ГО заключается в целенаправленном воздействии со стороны органа управления или лица, принимающего решения (ЛПР), на подчиненный объект с целью достижения поставленных задач, имеющих наряду с содержательным и территориальное выражение (интерпретацию).

2.2. Объектно-ориентированный подход к моделированию ГО в категориях

Объектно-ориентированный подход (ООП) представляет собой методологию, которая позволяет описывать и моделировать сложные системы через выделение в них отдельных ГО как сущностей, обладающих свойствами и поведением с географическим аспектом. В контексте ГО ООП позволяет структурировать данные о пространственных и атрибутивных характеристиках объектов, а также взаимодействия между ними. Это особенно важно для геоинформационных систем, где требуется объединять разнородные данные о пространстве, ситуации и процессах.

В идеологии ООП ГО рассматривается как самостоятельная сущность, которая имеет внутреннее пространство свойств (атрибуты) и классификационных признаков [173], обладает поведением: может изменять свои свойства, взаимодействовать с другими объектами или реагировать на внешние воздействия, может быть частью более сложной системы, образуя иерархии или сети объектов.

В рамках ООП географические объекты моделируются как экземпляры классов в составе категории, которые описывают их общие характеристики и правила взаимодействия, которые дополняются в зависимости от эксклюзивности. Содержание моделирования ГО в ООП включает:

- идентификацию ГО в рамках категории с раскрытием предустановленных в базе знаний шаблонов атрибутивных формуляров, семантических структур, типовых методов и индексов, обеспечивающих топологизацию связанных структур;
- классификацию объектов с учетом общие свойств и методов для всех объектов этого класса (типа) в категории;
- заполнение атрибутивных формуляров экземпляра класса, полученных из внешних систем мониторинга, разрешение неоднозначности данных и заполнение неизвестных атрибутов шаблонными значениями их идентифицируемого класса;
- привязка методов преобразования и отображения объекта в системе;
- установление отношений и зависимостей между ГО внутри категории и ГС;
- определение полиморфных методов экземпляра ГО (объекты могут реализовывать одинаковые методы по-разному);
- инкапсуляция данных и методов для экземпляра ГО в единое целое.

Преимущества ООП с реализацией категоричности ГО заключаются в возможности формализовать отношения между объектами используя предустановленные формуляры классов и типов, что обеспечивает более строгую математическую основу для моделирования сложных систем и их взаимодействий. Использование категорий позволяет абстрагировать структуры данных и операций, делая систему более универсальной и устойчивой к изменениям, а также облегчает гибкость использования кода за счет композиции морфизмов и функторов с сохранением целостности и согласованности преобразований. Категорный подход усиливает модульность и масштабируемость ООП, так как объекты и их преобразования могут быть описаны в терминах универсальных конструкций, таких как естественные

преобразования, что упрощает анализ, проектирование и интеграцию новых компонентов без нарушения существующей системы.

Моделирование АТА в целом, и транспортной активности в частности, с использованием ООП с применением теории категорий предлагает уникальный и абстрактный подход к анализу сложных систем. Теория категорий, как раздел математики, изучает структуры и отношения между объектами, что делает её мощным инструментом для описания взаимодействий в транспортных сетях. В этом контексте транспортные объекты, такие как маршруты, транспортные средства, портовая и социальная инфраструктура могут быть представлены как объекты категории, а процессы преобразования — как морфизмы. Это позволяет формализовать и анализировать сложные взаимосвязи в транспортной системе, включая синхронизацию расписаний, перераспределение потоков и интеграцию различных видов транспорта.

Одним из ключевых преимуществ использования теории категорий является её способность описывать иерархические и многоуровневые системы. Например, категории могут быть использованы для моделирования взаимодействия между локальными и глобальными транспортными сетями, такими как морской, воздушный и наземный транспорт, таможенное и навигационное регулирование на маршрутах. Это позволяет учитывать, как микроуровневые процессы (например, движение одного судна), так и макроуровневые (например, транспортные потоки в масштабах региона). Таким образом, теория категорий предоставляет универсальный язык для анализа и проектирования транспортных систем, способствуя их оптимизации и устойчивому развитию.

Теорию категорий рассматривают, как следующий уровень абстракции по отношению к абстрактной алгебре. Такой подход к работе с объектами и их преобразованиям призван выйти за рамки конкретных классов и математических структур объектов и найти всевозможные неочевидные факты

и зависимости между ними, которые мы не могли бы увидеть и изучить на более низком уровне.

Рост требований и усложнение моделируемых конструкций с объектами реального мира не только в целях познания, но и их практического использования для достижения эффективности желаемых преобразований, приводит нас к необходимости повышения уровня подводимой теоретической базы. С появлением программно-математического инструментария, реализующего идеологию работы со структурами объектов в понятиях теории категорий, принципы, изложенные в настоящем исследовании призваны ускорить внедрение этих инструментов в автоматизированные системы управления транспортом.

2.2.1. Понятия и базовые преобразования объектов в системе категорий при моделировании АТА

Категориями являются группы подобных объектов. Объекты одного класса всегда каким-то образом подобны и имеют характерные отличия от объектов другого класса. Например, в категорию дорог можно отнести автострады, шоссе или проселочные дороги, для морского транспорта, это маршруты, каналы, фарватеры, порты. К категории морского транспорта – танкеры, сухогрузы, ледоколы, буксиры и т.д. Значения категорий могут быть представлены в виде числового кода или текста. Текстовые значения часто приводятся в сокращенном виде с целью экономии места в таблице [73].

Дадим определение категории: **Категория** – это совокупность объектов и преобразований над ними с некоторыми ограничениями. Для обозначения категорий в тексте используются жирные заглавные буквы латинского алфавита. Так для категории **C** запишем такое определение

$$C = \langle Ob_C | Mor_C \rangle, \quad (2.3)$$

где Ob_C представляет собой класс объектов $A, B, C, \dots$ в категории **C**. Mor_C – есть множество морфизмов (стрелок), определяющих отображение (связь) между объектами класса.

Для отличия обозначения объектов от обозначения категорий, для последних используются заглавные буквы латинского алфавита жирного начертания. Элементы объектов обозначаются прописными буквами латинского алфавита.

Под классом объектов Ob_A понимается любая структура объектов, природа которых не имеет значения. Это могут быть математические, алгебраические, топологические, порядковые, технические, географические и любые другие структуры (таблица 9).

Таблица 10 – Пример определения категорий, объектов, морфизмов

Пример категорий	Объекты	Морфизмы
Категория множеств (обозначается <i>Set</i>)	Множества формуляров, как совокупность каких-либо (любых) объектов — элементов этого множества	Функции
Категория групп (обозначается <i>Grp</i>)	Группы аспектов, кольца зависимостей, поля параметров	Отображения, сохраняющие групповую структуру (гомоморфизмы).
Векторных пространств (обозначается <i>Vect</i>)	Вектора и скаляры поля	Линейные отображения
Категория модулей (обозначается <i>Mod</i>)	Абелевы категории	Гомоморфизмы
Топологических пространств (обозначается <i>Top</i>)	Структуры топопространства	Непрерывные отображения
Частично упорядоченных множеств	Структура весов параметров в методах	Отношения упорядоченности
Метрических пространств (обозначается <i>Met</i>)	Метрические пространства	Короткие отображения — не увеличивающие расстояния
Практические примеры		
Транспорт	Классы судов, самолетов ...	Классы свойств
Ледовые образования	Типы и виды льда, виды ледовых образований	Изменения свойств и форм
Иерархия	Родственники, соседи, и пр.	Отношения близости и подобия
Инфраструктура	Элементы инфраструктуры	
Геоструктуры	Геообъекты	Отображения, гомеоморфизмы

Непрерывное отображение — отображение из одного пространства в другое, при котором выполняется условие гомотопии, т.е. при котором

близкие точки области определения переходят в близкие точки области значений.

Категории могут включать в себя другие категории, но не сами себя. Сложные категории могут порождаться путем синтеза более простых категорий с добавлением новых классов морфизмов.

Морфи́змы (часто стрелки) – некая сущность (отображение), связывающая два объекта A и B . Если A и B — объекты категории C , то морфизм $f:A \rightarrow B$ представляет собой связь или преобразование, которое переводит объект A в объект B .

К морфизмам относятся и преобразования между элементами объектов, например, в отношении категории множеств, морфизмами являются функции, ставящие соответствие между двумя множествами, при котором каждому элементу одного множества соответствует единственный элемент другого множества. Для функции $y = x^2$ множеством A будут все возможные значения x , а множеством B , все возможные значения y . Морфизмом в данном примере является функция возведения в квадрат. Очевидно, что в множестве B отсутствуют отрицательные значения, а каждому значению из множества A соответствует один элемент множества B , но не наоборот. Такая связь записывается в виде

$$f: A \rightarrow B, \text{ или } A \xrightarrow{f} B, \quad (2.4)$$

Для любых объектов, принадлежащих одной категории множество морфизмов обозначается как Hom , понятийно определяющих исходное состояние, которое отображается в объекты, принадлежащие множеству Dom .

$\forall a, b \in Ob_C$ определено множество

$$Hom_C(a, b) = \{ f \mid f \in C, Dom(f) = a, Cod(f) = b \} \quad (2.5)$$

Множество морфизмов не может быть пустым, так как даже при отсутствии содержательных отношений у каждого элемента или объекта

категории существует тождественный морфизм по определению, который можно не показывать на диаграммах.

Для морфизмов определяются понятия область Dom и кообласть Cod , так что для объектов A и B из выражения 2, определено $Dom(f) \in A, Cod(f) \in B$.

Множество морфизмов также может быть представлено как категория.

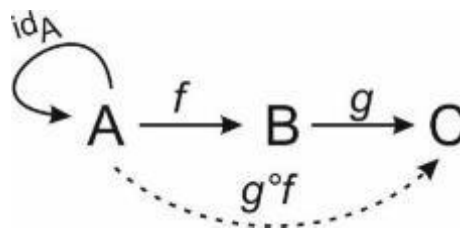
В аксиоматическом представлении для понятия категория определяются следующие **аксиомы** (правила или ограничения):

1. Определение **композиции**:

для пары морфизмов $f: A \rightarrow B, g: B \rightarrow C$ определена композиция

$$g \circ f: A \rightarrow C; \quad (2.6)$$

Заметим, что запись применяемых отображений принято читать справа налево, поддерживая последовательность преобразований. Приведенную композицию можно отобразить соответствующей диаграммой, представленной ниже



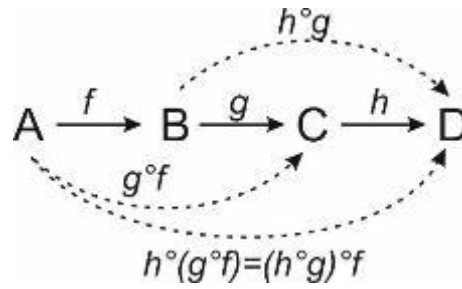
Одновременно справедливо правило для областей

$$cod(f) = dom(g) \in B.$$

2. Операция композиции **ассоциативна**:

$$(g \circ f) \circ h = g \circ (f \circ h); \quad (2.7)$$

т.е. выполнение композиций в категории не зависит от порядка выполнения операций, соответствующая диаграмма приведена ниже

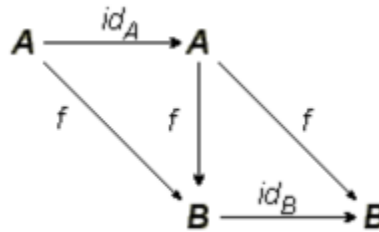


3. **Аксиома единицы.** Для каждого объекта существует тождественный морфизм id , действующий тривиально, так что:

$$\forall a \in Ob_C \exists id_a \mid id_a: a \rightarrow a, \quad (2.8)$$

и справедливы преобразования

$$f \circ id_A = f = id_B \circ f, \text{ и } id_a a = a \xrightarrow{f} b = id_b b$$



В отношении элементов объекта аксиому наличия единицы можно записать в виде морфизма $id_b: b \rightarrow b$.

Таким образом, в аксиоматическом представлении понятие категории определяется через систему аксиом, которые формализуют структуру и свойства объектов и морфизмов внутри категории:

- 1) наличие множества объектов Ob_C категории C ;
- 2) наличие множества морфизмов, таких, что

$$\forall A, B \in Ob_C \exists Hom_C(A, B);$$

- 3) существует композиция:

$$\forall f \in Hom_C(A, B), g \in Hom_C(B, C) \exists h = g \circ f \in Hom_C(A, C);$$

- 4) существует нейтральный морфизм:

$$\forall A \in Ob_C \exists id_A \in Hom_C(A, A);$$

5) нейтральный морфизм прозрачен в композиции:

$$id \circ f = f \circ id = f ;$$

6) обеспечена ассоциативность морфизмов:

$$f \circ (g \circ h) = (f \circ g) \circ h .$$

Морфизмы играют центральную роль в теории категорий, так как они позволяют описывать связи между объектами, формулировать универсальные свойства, изучать структуры через их взаимодействия, а не только через внутреннее устройство. Таким образом, морфизмы — это основной инструмент для построения и анализа категорий.

ГС и ГО можно представить в виде математических структур и их отображений. Алгебраическая топология обеспечивает отображения между топологическими пространствами и алгебраическими объектами, устанавливая связь между ГС и их моделями в ГИС.

Примитивным примером категории может служить категория «судно», куда логично включить различные классы судов.

Функтором называется морфизм категорий, который сохраняет структуру категорий. Функторы позволяют связывать разные категории и изучать их взаимосвязи. Они играют ключевую роль в теории категорий, так как обобщают понятие "отображения" на уровне объектов и морфизмов.

Например, если имеются категории C и B , то функтор $F: C \rightarrow B$ с областью C и кообластью B состоит из двух взаимосвязанных функций: функции объектов F , которая каждому объекту c из C сопоставляет объект $F(c)$ из B , и морфизм F , который каждому морфизму $f: a \rightarrow b$ из C сопоставляет морфизм $Ff: F(c) \rightarrow F(b)$ из B , причем

$$F(id_c) = id_{F(c)}, \quad F(g \circ f) = Fg \circ Ff, \quad (2.9)$$

что поясняется диаграммой (рисунок 29)

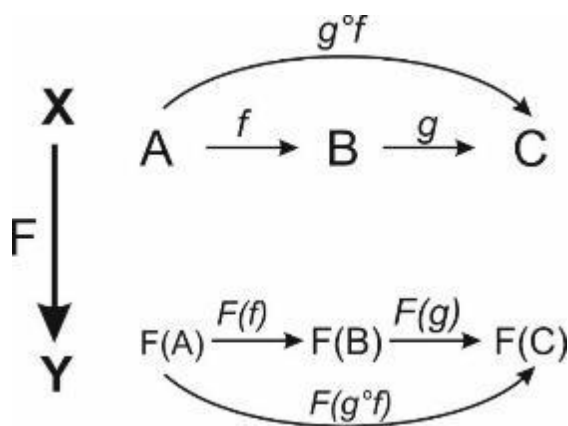


Рисунок 29 — Диаграммы морфизмов и функтора категорий X и Y

Последнее равенство должно выполняться всякий раз, когда композиция $g \circ f$ определена в C . Можно описать функтор, как категорию, пользуясь одними морфизмами: это функция F , которая морфизмам f из C сопоставляет морфизм Ff из B , переводят каждый элемент объекта C в элемент объекта B из B , а каждую пару (g, f) из C в пару (Fg, Ff) из B , причем $Fg \circ Ff = F(g \circ f)$.

В понятийном изложении можно привести пример преобразований между объектами в категориях «погода» и «суда». В зависимости от морфизма погодных явлений: «солнечно – ветер – ураган» функтор определяет морфизм поведения судна, скажем «полный ход – встать на якорь – эвакуация».

Функторы играют центральную роль в теории категорий, так как позволяют связывать разные категории и изучать их взаимосвязи, обобщают понятия гомоморфизмов, преобразований и отображений, являются основой для более сложных конструкций, таких как естественные преобразования. Функторы — это мощный инструмент для анализа и сравнения ГС.

2.2.2. Свойства морфизмов

При анализе преобразований моделируемых ГО, относящихся к одной категории, в рамках практической реализации предложенной теории, целесообразно использовать терминологию, принятую в теории категорий, а именно:

Гомоморфизм

Это отображение между двумя структурами (например, группами, графами, маршрутами), которое сохраняет их основные операции или свойства.

Например, реальный маршрут судна между точками поворота (или портами) и его план на карте. В обоих случаях структура и операции над элементами множеств сохраняются.

Изоморфизм.

Морфизм $f:A \rightarrow B$ называется изоморфизмом, если существует обратный морфизм $g:B \rightarrow A$, такой что: $g \circ f = id_A$ и $f \circ g = id_B$. Изоморфизм означает, что объекты A и B "эквивалентны" в рамках данной категории.

Например, тающая льдина сохраняет свою структуру, но не свойства.

Мономорфизм.

Морфизм $f:A \rightarrow B$, который является "инъективным" в смысле теории категорий, т.е. условие $f \circ g_1 = f \circ g_2$, влечет $g_1 = g_2$.

Например, при дооборудовании судна вооружением получается военный корабль. Если два типовых судна вооружить разными способами типовым оружием и полученные корабли будут одинаковыми, то оба способа довооружения судна следует считать мономорфизмами.

Эпиморфизм.

Морфизм $f:A \rightarrow B$, который является "сюръективным" в смысле теории категорий т.е. условие $h_1 \circ f = h_2 \circ f$, влечет $h_1 = h_2$.

Например, проект судна и его реальное многократное воплощение в конкретные суда.

Коммутативность.

Диаграмма называется коммутативной, если для любых объектов A и C любые две композиции из A в C дают тождественный результат и хотя бы одна из композиций содержит не меньше двух морфизмов (рисунок 30).

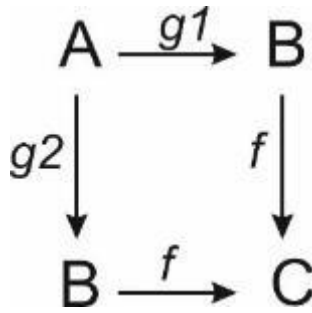


Рисунок 30 — Диаграмма к понятию коммутативности

Коммутативность приведенной диаграммы выражается равенством

$$f \circ g1 = A \rightarrow C = f \circ g2, \quad (2.10)$$

при этом $g1$ не равно $g2$.

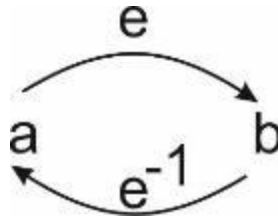
Обратимость.

Это свойство отображения (функции, преобразования), позволяющее однозначно восстановить исходный объект по его образу.

Морфизм $e: a \rightarrow b$ обратим в категории C , если существует такой морфизм $e^{-1}: b \rightarrow a$, для которого выполняется композиция

$$e \circ e^{-1} = id_b, e^{-1} \circ e = id_a. \quad (2.11)$$

И соответствующая диаграмма обратимости приведена ниже



Если морфизм e^{-1} существует, то он единственный и доказывается, что $(e_1 e_2)^{-1} = e_2^{-1} e_1^{-1}$, если операция определена и морфизм e_2 также обратим. Два объекта a и b изоморфны в категории C , если для них существует обратимый морфизм и тогда можно записать $a \cong b$. Изоморфизм в категориях подобен обратной функции в алгебре. В категории типа **Set** изоморфизмы – это биекции (рисунок 31).

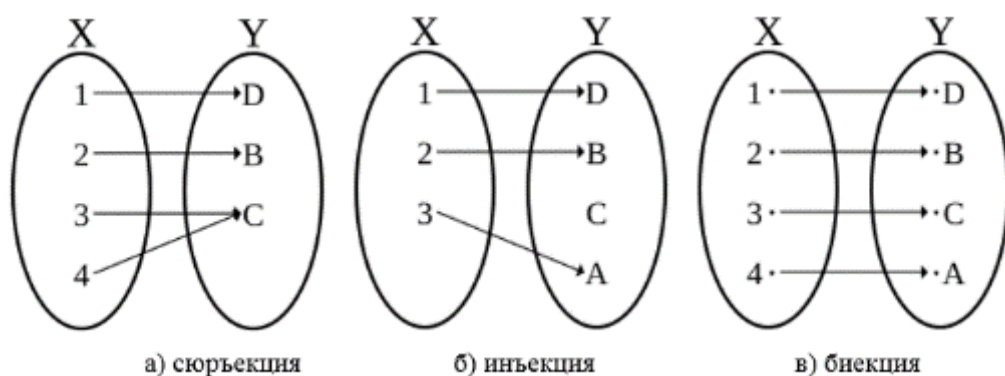
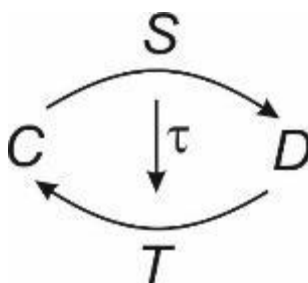


Рисунок 31 —Отношения множеств: сюръекция, инъекция, биекция

Биективные непрерывные преобразования многообразий (т.е. 3-х мерных поверхностей) определяют свойство гомеоморфизма в теории топологии, математические методы работы с которыми эффективны для применения в ГИС.

2.2.3. Естественные преобразования функторов

Естественным преобразованием функтора называются морфизмы между функторами. Рассмотрим категории $\mathcal{C}$ и $\mathcal{D}$ и два разных функтора S и T между ними:



Естественное преобразование $\tau : S \rightarrow T$ – это функция, которая каждому объекту c из $\mathcal{C}$ сопоставляет морфизм $\tau c : Sc \rightarrow Tc$ из $\mathcal{D}$ таким образом, что для каждого морфизма $f : c \rightarrow c'$ из $\mathcal{C}$ следующая диаграмма коммутативна:

$$\begin{array}{ccc}
 c & & Sc \xrightarrow{\tau c} Tc \\
 \downarrow f & & \downarrow Sf \quad \downarrow Tf \\
 c' & & Sc' \xrightarrow{\tau c'} Tc'.
 \end{array}$$

В этом случае мы говорим, что морфизм $c:Sc \rightarrow Tc$ естественен по c . Если считать, что функтор S создает в D изображение всех объектов и всех морфизмов категории C , то естественное преобразование τ – это совокупность всех морфизмов, отображающих или переводящих «картинку» S в картинку T , причем коммутативны всевозможные преобразования как на рисунке 32.

$$\begin{array}{ccccc}
 a & & Sa & \xrightarrow{\tau a} & Ta \\
 & \searrow f & \searrow Sf & & \searrow Tf \\
 & & Sb & \xrightarrow{\tau b} & Tb \\
 h \downarrow & & \swarrow Sg & & \swarrow Tg \\
 c & & Sc & \xrightarrow{\tau c} & Tc
 \end{array}$$

Рисунок 32 — Диаграмма естественных преобразований

Иными словами, функторы между двумя категориями сами образуют категорию, в которой объектами являются функторы, а морфизмами – естественные преобразования между ними.

Морфизмы τa , τb , τc называются компонентами естественного преобразования τ . Если каждая компонента естественного преобразования обратима в категории D , то τ называют естественной эквивалентностью или естественным изоморфизмом и в символической записи $\tau:S \cong T$. В этом случае обратные морфизмы $(\tau c)^{-1}$ в B являются компонентами естественного изоморфизма $\tau c^{-1}:T \rightarrow S$.

Примерами гомеоморфизмов являются подобия геометрических фигур и изометрии метрических пространств. Однако в общем случае они не обязаны

сохранять геометрические свойства. Так, квадрат и круг, кружка и бублик гомеоморфны.

Гомеоморфизм — это непрерывное взаимно однозначное обратимое отображение между двумя топологическими пространствами, т.е. это "топологический изоморфизм" — если два пространства гомеоморфны, то их можно непрерывно деформировать друг в друга без разрывов и склеек с сохранением топологических свойств (связность, компактность, размерность и т. д.). Аналогично для математических моделей существует термин гомоморфизм — это отображение между алгебраическими структурами, сохраняющее их операции.

2.2.4. Преобразования объектов одной категории

Произведением двух объектов A и B категории $\mathbf{K}$ является объект C вместе с морфизмами, принадлежащий категории $\mathbf{K}$, для которого существуют морфизмы $f_1: C \rightarrow A$ и $f_2: C \rightarrow B$, и верно следующее утверждение, что для любого объекта D категории $\mathbf{K}$ с определенной парой морфизмов: $g_1: D \rightarrow A$ и $g_2: D \rightarrow B$ существует единственный морфизм $m: D \rightarrow C$, для которого верно $g_1 = f_1 \circ m$ и $g_2 = f_2 \circ m$.

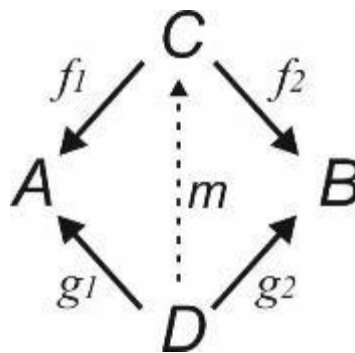


Рисунок 33 — Диаграмма произведения объектов одной категории

Иными словами, объект C является произведением объектов A и B , если для любого объекта D существует морфизм m , делающий приведенную на рисунке 33 диаграмму коммутативной.

Копроизведением двух объектов A и B категории $\mathbf{K}$ является объект C , принадлежащий категории $\mathbf{K}$, для которого существуют морфизмы $f_1: A \rightarrow C$ и $f_2: B \rightarrow C$, а для любого объекта D с морфизмами g_1 и g_2 , существует единственный морфизм $m: C \rightarrow D$, делающий приведенную ниже диаграмму (рисунок 34) коммутативной.

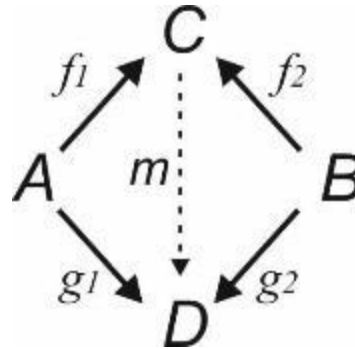


Рисунок 34 — Диаграмма копроизведения двойственной категории

Иными словами, копроизведение - это произведение в обратном направлении, для чего необходимо обратить все стрелки и переставить аргументы всех композиций. Понятия произведения и копроизведения дополняются понятием двойственной категории, которыми являются категории $\mathbf{C}$ в приведенных примерах.

2.2.5. Операции преобразования категорий

Из двух существующих категорий $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$ можно построить новую категорию $\mathbf{B} * \mathbf{C}$, которая называется их произведением. Ее объекты – это пары $\langle b, c \rangle$ объектов b из $\mathbf{B}$ и c из $\mathbf{C}$. Морфизмы в новой категории $\langle b, c \rangle \rightarrow \langle b', c' \rangle$ - это пары $\langle f, g \rangle$ морфизмов $f: b \rightarrow b'$ и $g: c \rightarrow c'$, а их композиция

$$\langle b, c \rangle \xrightarrow{\langle f, g \rangle} \langle b', c' \rangle \xrightarrow{\langle f', g' \rangle} \langle b'', c'' \rangle \quad (2.12)$$

Определяются в терминах композиции в категориях $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$ по формуле

$$(f', g') \circ (f, g) = (f' \circ f, g' \circ g) \quad (2.13)$$

Функторы

$$B \xleftarrow{P} B * C \xrightarrow{Q} C$$

определены на объектах и морфизмах формулами

$$P(f, g) = f, Q(f, g) = g \quad (2.14)$$

и называются проекциями произведения. Они обладают следующим свойством для каждой категории D и функторов

$$B \xleftarrow{R} D \xrightarrow{T} C \quad (2.15)$$

существует единственный функтор $F: D \rightarrow B * C$ такой, что $PF=R$, $QF=T$.

В силу этих условий можно наглядно представить функтор F штриховой стрелкой на диаграмме ниже (рисунок 35).

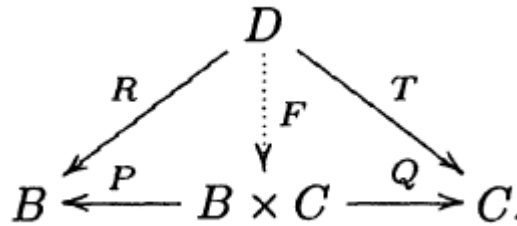


Рисунок 35 — Диаграмма 1 произведения категории

Это свойство произведения категорий означает, что проекция P и Q универсальны среди пар функторов, направленных в B и C . Оно совпадает со свойствами проекций (декартова) произведения двух множеств, групп или топологических пространств.

Для двух функторов $U: B \rightarrow B'$ и $V: C \rightarrow C'$ существует произведение $U * V: B * C \rightarrow B' * C'$, которое можно определить на объектах и морфизмах явным образом:

$$(U * V) \langle b, c \rangle = \langle Ub, Vc \rangle, (U * V) \langle f, g \rangle = \langle Uf, Vg \rangle \quad (2.16)$$

Этот функтор $U*V$ можно описать иначе, как единственный по аналогии с F на диаграмме 27, который делает коммутативной следующую (рисунок 36) диаграмму:

$$\begin{array}{ccccc}
 B & \xleftarrow{P} & B \times C & \xrightarrow{Q} & C \\
 U \downarrow & & \downarrow U \times V & & \downarrow V \\
 B' & \xleftarrow{P'} & B' \times C' & \xrightarrow{Q'} & C'
 \end{array}$$

Рисунок 36 — Диаграмма 2 произведения категории

Таким образом, произведение $(*)$ - это пара функций: каждой паре категорий B и C ставится в соответствие новая категория $B*C$, а каждой паре функторов U и V – новый функтор $U*V$. При этом операция $*$ сама является функтором.

Аналогично вышеизложенному, данное определение обобщается на многократные и бесконечные произведения.

Геоинформационные системы работают с географическими данными, которые описывают пространственное распределение объектов на Земле. Специфика геопространственных данных обуславливает использование в ГИС топологических пространств, которые позволяют эффективно моделировать динамические процессы с сохранением связи и отношений между пространственными объектами, определять связи между объектами (топологию территорий) и гарантировать их целостность. Топологические пространства обеспечивают возможность установления и поддержания консистентности (согласованности) данных, ускорения процессов обработки и пространственного анализа.

Топологическое пространство — множество, для элементов которого определено, какие из них близки друг к другу. В топологических пространствах не определены понятия расстояний, величин углов, площадей, объёмов, но возможно говорить о непрерывности, сходимости и связности.

Теория категорий предлагает эффективные математические инструменты преобразований топологических пространств.

Пусть дано множество X . Система T его подмножеств называется топологией на X , если выполнены следующие условия:

- объединение произвольного семейства множеств, принадлежащих T , принадлежит T ; то есть для любого индексированного множества A и семейства $U_a \in T, a \in A$, выполнено $\bigcup_{a \in A} U_a \in T$;
- пересечение конечного семейства множеств, принадлежащих T , принадлежит T ; то есть если $U_i \in T$ для $i = \{1, \dots, n\}$ то $\bigcap_{i=1}^n U_i \in T$;
- $X, \emptyset \in T$.

Категория топологических пространств **Top** в качестве объектов содержит все топологические пространства, а морфизмы — их непрерывные отображения. В качестве дополнительных структур на объекте $X \in Ob(T)$ могут быть, например, графы на X или прямые между двумя элементами.

Граф в теории множеств — математическая абстракция реальной системы любой природы, объекты которой обладают парными связями. Граф как математический объект есть совокупность двух множеств — множества самих объектов, называемого множеством вершин, и множества их парных связей, называемого множеством рёбер. Элемент множества рёбер есть пара элементов множества вершин.

Множество вершин прямого произведения двух графов G и H задаётся как произведение вершин графов сомножителей. Рёбрами будут соединены следующие пары вершин:

$(g, h)(g', h)$, где g и g' — соединённые ребром вершины графа G , а h — произвольная вершина графа H ;

$(g, h)(g, h')$, где g — произвольная вершина графа G , а h и h' — соединённые ребром вершины графа H .

Иначе говоря, множество рёбер произведения графов является объединением двух произведений: рёбер первого на вершины второго, и вершин первого на рёбра второго.

Гомоморфизм графов — это отображение между двумя графами, не нарушающее структуру. Более конкретно, это отображение между набором вершин двух графов, которое отображает смежные вершины в смежные.

Определим большие множества V и E , где V определяет множество «вершин», а E – множество «ребер» и отображений $s:E \rightarrow V$ начало ребра и $q:V \rightarrow E$ конец ребра.

Определим графы:

$$G = (V, E, s, q) \quad (2.17)$$

$$G' = (V', E', s', q')$$

Тогда пара функторов (отображений):

$$\begin{aligned} f_0: V &\rightarrow V', \\ f_1: E &\rightarrow E', \end{aligned} \quad (2.18)$$

Называется гомоморфизмом графов G и G' , если

$$\left. \begin{aligned} s'(f_1(e)) &= f_0(s(e)) \\ q'(f_1(e)) &= f_0(q(e)) \end{aligned} \right| \forall e \in E \quad (2.19)$$

Теория графов получила широкое применение в транспортной логистике. Транспортные сети просто представить в виде графов, где вершины представляют местоположения, а ребра – свойства маршрутов или связи между ними. Теория графов обеспечивает эффективный инструмент для анализа и оптимизации таких сетей. Алгоритмы, основанные на теории графов, помогают оптимизировать время и ресурсы при планировании маршрутов доставки, позволяют эффективно управлять потоками и оптимизировать транспортные процессы.

Гомеоморфизм топологических пространств играет ключевую роль в изучении и анализе их структур, а также находит практическое применение в различных областях, где требуется сохранение топологических свойств при отображениях. Это позволяет использовать теорию категорий для формализации процессов преобразований и анализа географических объектов и пространств, представляемых в виде математических структур.

2.2.6. Принцип применения категорий в ГИС

В рамках предложенного объектно-ориентированного подхода категории объединяют классы географических объектов (ГО) не только по их функциональному назначению, но и, что является ключевым отличием от традиционных методов моделирования, — по размерностям атрибутов, семантическим связям, форматам данных, топологическим структурам (определяющих пространственные отношения) и принципам их преобразования. Аналогичная концептуальная идеология на более детализированном уровне реализуется в рамках отдельного класса.

Это позволяет обеспечить согласованность между различными уровнями абстракции и повысить эффективность работы с данными, сохраняя при этом целостность и непротиворечивость модели.

Примеры категорий для реализации в ГИС:

- географические пространства с топологией (георегионы, геоструктуры, геосистемы);
- объекты транспорта по средам (автотранспорт, суда, подводные и т.п.);
- дороги по типам (автострады, шоссе, второстепенные местные дороги);
- виды ледовых образований;
- категории транспортной инфраструктуры;
- населённые пункты по численности населения, структуре промышленного производства, административному статусу;
- представители фауны и флоры.

Значения категорий можно представить, используя числовые коды или текстовый идентификатор. Применение категорий позволяет типизировать данные и упорядочивать описание для широкого набора разнородных объектов.

Таким образом, географические структуры и объекты можно представить в виде математических структур и их отображений [74]. Эффективную работу с математическими структурами, построенными на основе аксиоматических определения обеспечивает уже достаточно развитой математический и кибернетический аппарат различных теорий математических структур, объединяемый на более высоком уровне абстракции теорией категорий. Вместо того, чтобы говорить о топологии географических пространств мы переходим к преобразованиям математических структур. Функторы и морфизмы описывают, как объекты преобразуются и взаимодействуют между собой, сохраняя при этом структуру и свойства. Логические основы искусственного интеллекта опираются на теории множеств и преобразований над ними, что обеспечивает существенный шаг вперед для перспективных ГИС, реализующих современный математический аппарат.

2.3. Концептуальная модель геоинформационной поддержки АТА в условиях риска

С целью обеспечения геоинформационной поддержки АТА в условиях риска концептуальная модель системы региональной территориальной активности должна быть ориентирована на комплексный, адаптивный и информационно связанный подход, чтобы обеспечивать:

1. Интеграцию разнородных данных. Сбор, обработку и анализ пространственных данных из различных источников (спутниковые снимки, ДЗЗ, объектовые и региональные системы наблюдения, данные информационных агрегаторов и т.д.). Объединение информации о состоянии инфраструктуры, транспортных потоков, ледовой

обстановки, климатических условий и других факторов, влияющих на транспортную доступность, интеграцию с подсистемами ИНС.

2. Оперативный мониторинг и прогнозирование, обеспечивающий непрерывный мониторинг изменений в окружающей среде (например, ледовая обстановка, погодные условия, природные катаклизмы). Прогнозирование возможных рисков и их влияния на транспортные маршруты, включая моделирование альтернативных путей и временных задержек.
3. Адаптивность к учету динамических составляющих геообъектов и геоструктур, обеспечивая возможность оперативного перестроения геоситуации и актуализацию входных данных в систему ППР.
4. Учет рисков и уязвимостей, потенциальных угроз для транспортной активности (например, экологические риски, военные действия, экономические санкции, изменения инфраструктур).
5. Разработка механизмов минимизации последствий рисков, включая создание резервных маршрутов и использование альтернативных видов транспорта.
6. Геоинформационное моделирование и визуализацию геоситуации для анализа, планирования и обоснования выдаваемых рекомендаций в удобном для пользователей формате (карты, графики, интерактивные панели), что позволяет операторам быстро принимать решения.
7. Взаимодействие с системой ППР, предоставление аналитических инструментов для оценки эффективности различных рекомендаций, интеграции с подсистемами ИИ для автоматизации процессов анализа данных и выработки рекомендаций.
8. Обмен (и защита) данными с внешними информационными системами для синхронизации действий в условиях риска.

Состав и логическая структура концептуальной модели представляет собой математические структуры и описания ее основных компонентов – объектов в составе категорий, геоструктуры, а также зависимости отношений

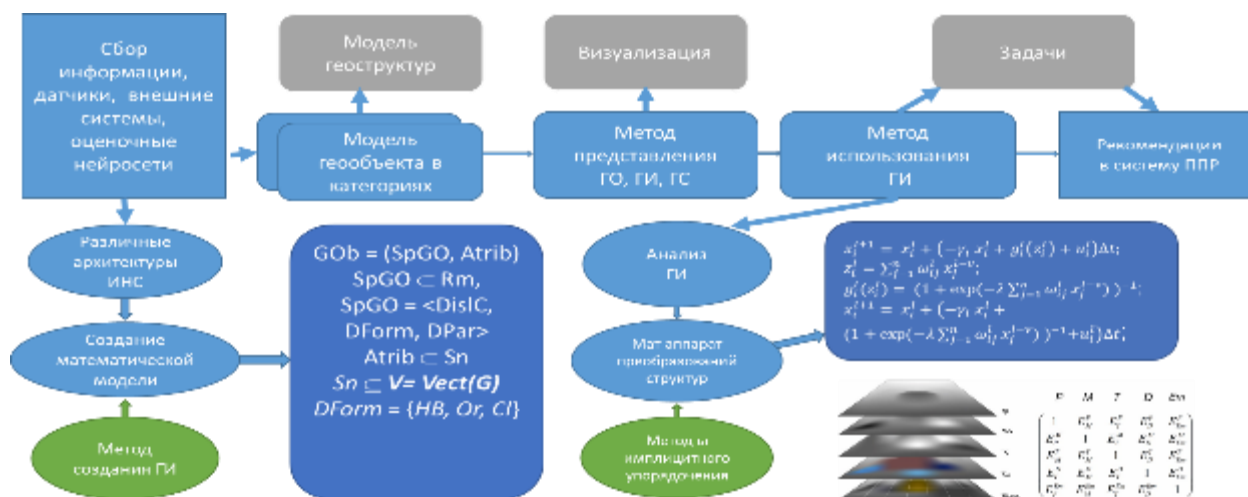
между ними [75]. Логическая структура концептуальной модели АТА с системой оперативной поддержки принятия решений с учетом применения концепта теории категорий теперь сводится к более простой и одновременно насыщенной схеме, изображенной на рисунке 37.



Рисунок 37 — Структура концептуальной модели АТА

Цель концептуального моделирования формируется как выявление факта наличия проблемы и её существа (концептуальный анализ), а также определение путей её решения на основе создания прообраза реальной системы (концептуальный синтез).

Анализ исходных данных для проведения моделирования основывается на всей совокупности знаний, представленных в существующих моделях географических объектов и геоструктур, формализованных через компоненту «Система Категорий». Также учитывается математический аппарат методов, относящихся к типовым задачам моделирования (рисунок 38).



36

Рисунок 38 — Концептуальная модель системы региональной территориальной активности

Компонент «Система Категорий» базируется на понятиях категории объектов различной физической сущности, категориях связанности, и зависимостей между ними, преобразования над которыми и анализ зависимостей возможен с применением математического аппарата, предоставляемого теорией категорий. В компоненте «Система Категорий» предлагается ввести понятие домен, определяющий среду, в которой будут рассматриваться объекты, геоструктуры и категории. В нашем случае доменами являются среда транспортной активности: надводная поверхность, подводная среда, воздушная и наземная среды.

Компонент «Система ППР» обеспечивает выработку управленческих рекомендаций в различных региональных инфраструктурах, обеспечивающих оперативное поддержание их устойчивого функционирования с заданным качеством в динамично изменяющихся условиях.

Категории в предлагаемой концептуальной модели определяются всеми сущностями, участвующими в моделировании геоситуации и обеспечении процессов управления (таблица 10).

Таблица 11 – Категории концептуальной модели АТА

Тип категории	Класс	Объекты (примеры)
---------------	-------	-------------------

Индекс геообъектов	Set	идентификаторы экземпляров геообъектов в ГИС
Категории ГО, ГС, связей, дочерних структур	Set	идентификаторы определяющие формуляры исходных данных и связей с использованием базовых структур
Свойства геообъектов	Vect	линейные размеры, вес, расход, прочность, температура и т.п.
Геоситуации	Top	модели геопространств
Гидрометео-обстановка (погода)	Top	циклон, течение, волнение, ветер, температура, топоструктуры явлений и ЧС, приливы, типы и виды льда, справочная информация
Логистика	Graf	маршруты, стоимости, пошлины, полигоны, частоты средств связи, расписания, ресурсы
Функторы домена	Matr	связи между категориями и дочерними структурами
Ресурсы	Graf	время , информация, связь, ресурсы, социум
Геопространство	Set	типы и пространственные модели

Множество объектов категории «лед» будут составлять все значимые для транспорта виды ледяных образований, например, припай (неподвижный лёд), плавучие льды, паковые дрейфующие льды, полынья и прочее его многообразие с совокупностью их свойств. Морфизмами между ледяными образованиями логично понимать операцию перехода ледяного образования от одной формы в другую, например, при определенной температуре воздуха и солености воды на поверхности моря возникают начальные виды льдов (ледяное сало, снежура, шуга) [76]. Примером функтора от категории «лед» в категорию «судно» могут служить результаты воздействия ледяных

образований на изменение свойств судов принадлежащих объектам категории «судно».

Компонент «Система ППР» представляет собой взаимоувязанную совокупность элементов, а также способов и методов, обеспечивающих учет взаимосвязи между элементами, тем самым отражая функциональную составляющую концептуальной модели и обеспечивающая выработку рекомендаций, обеспечивающих процесс управления (рисунок 39).

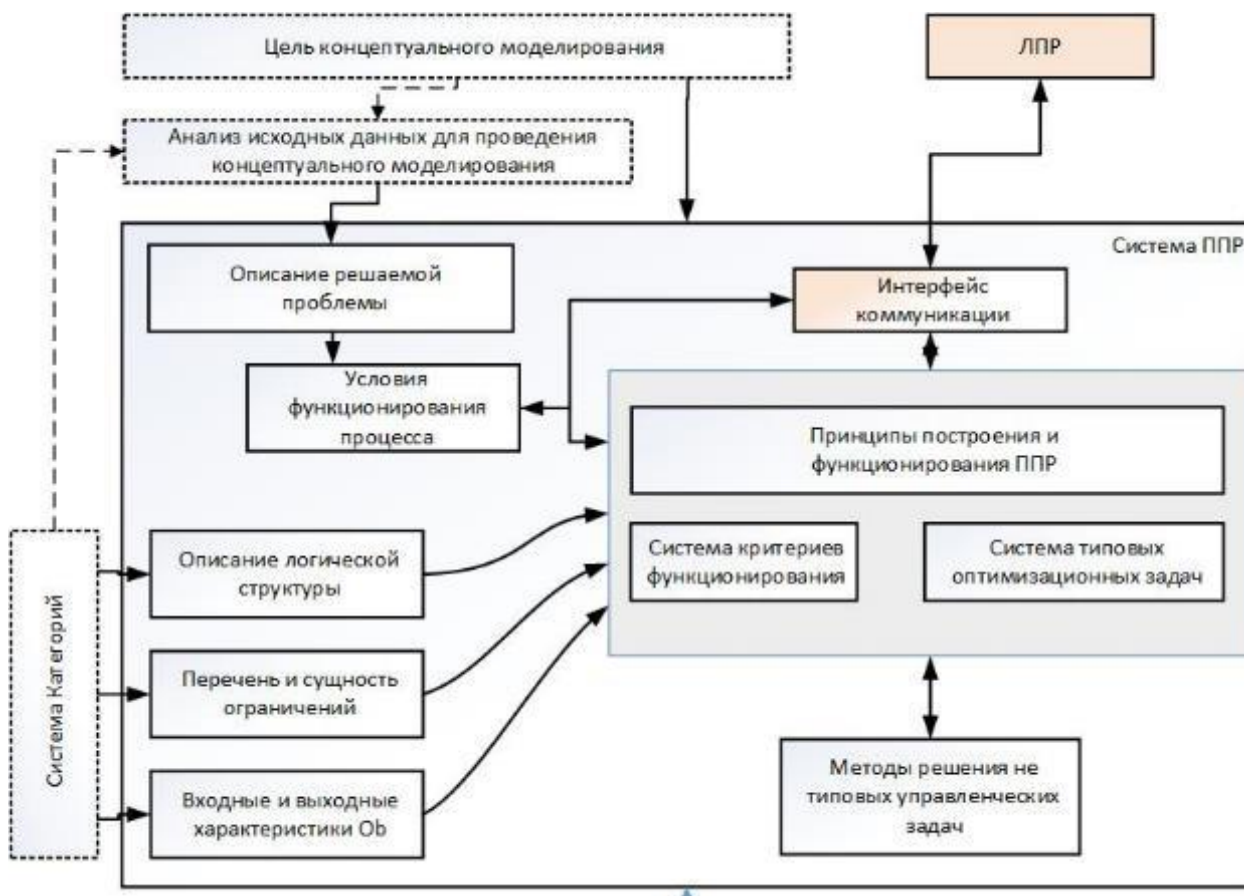


Рисунок 39 — Компонент «Система ППР»

Исходными данными для системы ППР являются

- цель концептуального моделирования на основе создания прообраза реальной системы (концептуальный синтез);
- описание проблемы, которое при концептуальном анализе считается основным его результатом, а при концептуальном синтезе – основными исходными данными;

- содержательная, частично или полностью цифровая информационная модель реального объекта.

Компонентами системы ППР являются [77, 78]:

- описание условий функционирования процесса, среды и её возможное воздействие на процесс;
- принципы построения и функционирования исследуемой системы;
- система критериев функционирования ППР;
- система оптимизационных задач функционирования оперативной ППР и элементов АСУ при разрешении типовых проблем;
- интерфейс коммуникации с лицом, принимающим решение;
- описание логической структуры исследуемой системы и её функциональных составляющих;
- перечень и сущность ограничений, накладываемых на показатели функционирования системы внешней средой и характером организации информационного процесса, протекающего в системе;
- описание существенных свойств, показателей и предъявляемых требований, а также состав входных и выходных характеристик;
- методы решения управленческих задач, не относящихся к типовым;
- описание функционирования исследуемой системы.

Важной и существенной системной характеристикой любой концептуальной модели является ее полнота, которая отражает состав и существенные характеристики моделируемого объекта. Как показано в работе [78], учет подобных свойств моделируемой системы и реализация приведенной выше порядка синтеза концептуальной модели, обеспечивает полноту синтезируемой концептуальной модели.

Предлагается следующая постановка задачи синтеза концептуальной модели ППР посредством АСУ на базе ГИС:

Исходные данные:

1. Объект управления – объекты транспортной активности в АЗРФ.

2. АСУ транспортной активности на базе ГИС, функционирующая на основе концептуальной модели.

Обозначена проблема, заключающаяся в необходимости разрешении противоречий между новыми теоретическими принципами обработки данных и существующими традиционными способами управления.

Необходимо:

1. Разработать концептуальную модель и систему моделей геоинформационных пространств;

2. Разработать методы, реализующие новые теоретические принципы в АСУ транспортной активности на базе ГИС;

3. Разработать архитектуру системы оперативной ППР управления АСУ, на основе которых можно разрешить указанную проблему.

Ограничения:

Модели и методы, должны представлять собой максимально возможный уровень информационной транспарентности реальной обстановке, единство математических структур и технологий работы с ними во взаимоувязанном комплексе оптимизационных задач системы оперативной ППР.

2.3.1. Система моделей АТА

Понятие системы формулируется как прикладное направление, применяемое при решении сложных слабоформализуемых проблем [79] в теории систем и системном анализе. К основным понятиям системного анализа также относятся элемент, структура, целостность, связь, иерархия, отношение система среда. Рассмотрим четыре важнейших свойства, которыми должна обладать система.

Целостность. Система — целостная совокупность элементов, т.е. целостное образование, в составе которого могут быть выделены целостные объекты (элементы). Система рассматривается как единое целое, состоящее из взаимодействующих частей.

Связность. У системы предполагается наличие существенных устойчивых связей (отношений) между элементами или/и их свойствами, превосходящих по силе связанности с элементами, не входящими в данную систему. С системных позиций значение имеют не любые, а лишь существенные связи, которые определяют интегративные свойства системы.

Связь можно определить, как канал, по которому обеспечивается обмен между элементами системы и окружающей средой. Основная особенность связи — преобразование некоторой величины или пространства без изменения их физической природы. Связь характеризует как строение, так и функциональную динамику элементов.

Основные характеристики связи:

- физическое наполнение (вещественные, энергетические, информационные, смешанные связи);
- направленность (прямые, обратные, нейтральные связи); мощность (система существует как целостное образование тогда, когда мощность (сила) существенных связей между элементами системы на интервале времени, не равном нулю, больше, чем мощность (сила) связи этих элементов с окружающей средой);
- роль в системе (связана с характером ее влияния на ход процессов).

Различают следующие связи: соединительные, ограничивающие, усиливающие (ослабляющие), селектирующие, запаздывающие (опережающие, мгновенные), преобразующие, положительные и отрицательные обратные связи, согласующие, координирующие и др.

Организация. Это свойство характеризует наличие у системы определенной организации. При формировании связей складывается определенная структура системы, свойства элементов трансформируются в функции, связанные с качеством системы [80].

Таким образом, понятие и свойства, определяющие систему, тождественны понятиям теории категорий и абстракциям математических структур. В этой связи справедливо, что теоремы и преобразования,

справедливые для категорий могут быть применены в отношении геообъектов и преобразований геоструктур.

Компонента «Система Категорий» (рисунок 37) можно формально записать в следующем общем виде:

$$\text{Sys } SK = \langle G, V, P, M, T, F, D, Em \rangle \Leftrightarrow Z, \quad (2.19)$$

где, **Sys SK** - обозначение системы категорий;

G – категория множеств индексов геообъектов георегиона, **G=Set**;

V – категория векторов состояния геообъектов **G**, **V= Vect(G)**;

P – категория геоситуации;

M - категория гидрометеорообстановки, **M=Top**;

T – категория логистика, **T= Graf**;

F – категория межкатегорийных связей, **F= Matr**;

D – категория ресурсов;

Em – категория данных карты подложки ГИС, **Em=Set**.

Z – категория оптимизационных задач.

Главным образом компонента «Система Категорий» является структурированным источником данных для оптимизационных задач, выполняемых в компоненте «Система ППР» и должна быть обеспечена автоматизированными системами наблюдения за изменениями внешней обстановки или каким-либо иным, например, экспертным, интерфейсом ввода данных. При наличии активной составляющей оптимизационных задач система категорий **Sys SK** будет служить отображением результата управляющих воздействий для критериальной [80] оценки эффективности принятых решений.

$$\delta Z(t_1) \in F(dt): SK(t_0) \rightarrow SK(t_1), \quad (2.20)$$

где, $\delta Z(t_1)$ - критерий оценки эффективности;

F(dt) – функтор система категорий;

SK(t) – состояние системы категорий на момент времени **t**.

Категория множеств индексов геообъектов георегиона – это конечное множество множеств индексов. Объектами этой категории являются множество индексов, идентифицирующие объекты других категорий.

$$G = \langle \{IDV\}, \{IP\}, \{IM\}, \{IT\}, \{IF\}, \{ID\}, \{IEm\} [IZ] \rangle \quad (2.21)$$

Например, для каждого из геообъектов в области анализируемого георегиона ставится в соответствие индекс-идентификатор, определяющий соответствующий этому геообъекту вектор состояния из категории векторов состояния. Размерность множества индекс-идентификаторов определяет количество всех геообъектов георегиона.

Морфизмами категории множеств индексов являются функции связности для категории оптимизационных задач. Данная категория может иметь пустой морфизм. Также, абсолютно справедливо свойство, что все эпиморфизмы в **Set** сюръективны, все мономорфизмы — инъективны, и все изоморфизмы — биекции.

Категория векторов состояния геообъектов – это расширяемая категория, объектами которой являются вектор состояния, он же набор значений свойств геообъектов. Например, для надводных судов: тип, класс, высота, длина, водоизмещение, скорость, осадка, запас топлива, средства связи, экипаж и многое другое. Вектор состояния описывается сигнатурой (9) и может быть пустым или неполным. Морфизмами вектора состояния для приведенного примера выступают операции, изменяющие какой-либо элемент, например: пополнение топлива, разгрузка/загрузка судна, выход из строя средств наблюдения и т.п. Различия в структуре векторов состояния определяются принадлежностью к различным множествам индексов.

$$\forall x \in G, \overrightarrow{\exists V(x)} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, \quad (2.22)$$

Категория геоситуации наполняется группой моделей геопространств, в которую входят модели геоинформационного пространства, геофункционального пространства и абстрактного функционального

пространства. Все модели геопространств построены на основе теоретико-множественного подхода с использованием метрических и топологических свойств геопространств. Морфизмы геопространств определяют отношения и операции над объектами. Объекты характеризуются собственным пространством и вектором состояния.

Категория гидро-метеообстановки содержит в себе модели топологических пространств и пространственных многообразий, описывающих такие природные явления в атмосфере и гидросфере как: течения, циклоны, волнение моря, ветер, давление, температурные фронт, влажность воздуха, облачность, осадки, видимость, туманы, грозы и т.п. Как правило, вся метеорологическая информация может быть описана с применением топоструктур и соответственно морфизмы между топологическими структурами являются их непрерывные отображения, при котором близкие точки области определения переходят в близкие точки области значений. Например, поверхностное проявление морского течения описывается плоским потоком с определенным направлением и интенсивностью в определенный момент времени на ограниченном участке поверхности.

Категория логистика – это множество взвешенных ориентированных графов по различным аргументам весовых функций, для решения задач удовлетворения ограничений. Вершинами графов могут выступать традиционные географически значимые объекты, определенные состояния геообъектов в процессе из целевого преобразования, неравномерности свойств географической структуры, временные окна в задачах расписаний и т.п. Морфизмами данной категории являются гомоморфизм графов, как отображение между двумя графами, не нарушающее структуру. Категория графов подробно изученная структура в теории графов и имеет эффективные методы математических реализаций для автоматизированных систем.

Категория межкатегорийных связей необходима для установления взвешенных или оценочных зависимостей между моделями из различных

категорий. Данная категория является множеством матриц функторов, весовые значения преобразований над объектами различных категорий случат мерой связанности при решении любых задач оптимизации над георегионом.

Категория ресурсов предоставляет исходную информацию для задач удовлетворения ограничений. Объектами этой категории являются собственно ресурсы, такие как, время, пропускные способности линий связи, топливо, ресурсы жизнеобеспечения, ресурсы социума. Структура ресурсных объектов опирается на графы, вершинами которых, как правило, выступают геообъекты. Морфизмами, соответственно, являются гомоморфизм графов.

Категория данных карты подложки ГИС содержит в себе извлекаемые из электронной карты подложки сведения, которые используются при решении оптимизационных задач в геоинформационном пространстве.

Рассмотренные выше категории представляют собой систему моделей (рисунок 40) более высокого уровня абстракции, чем любое из геоинформационных пространств.

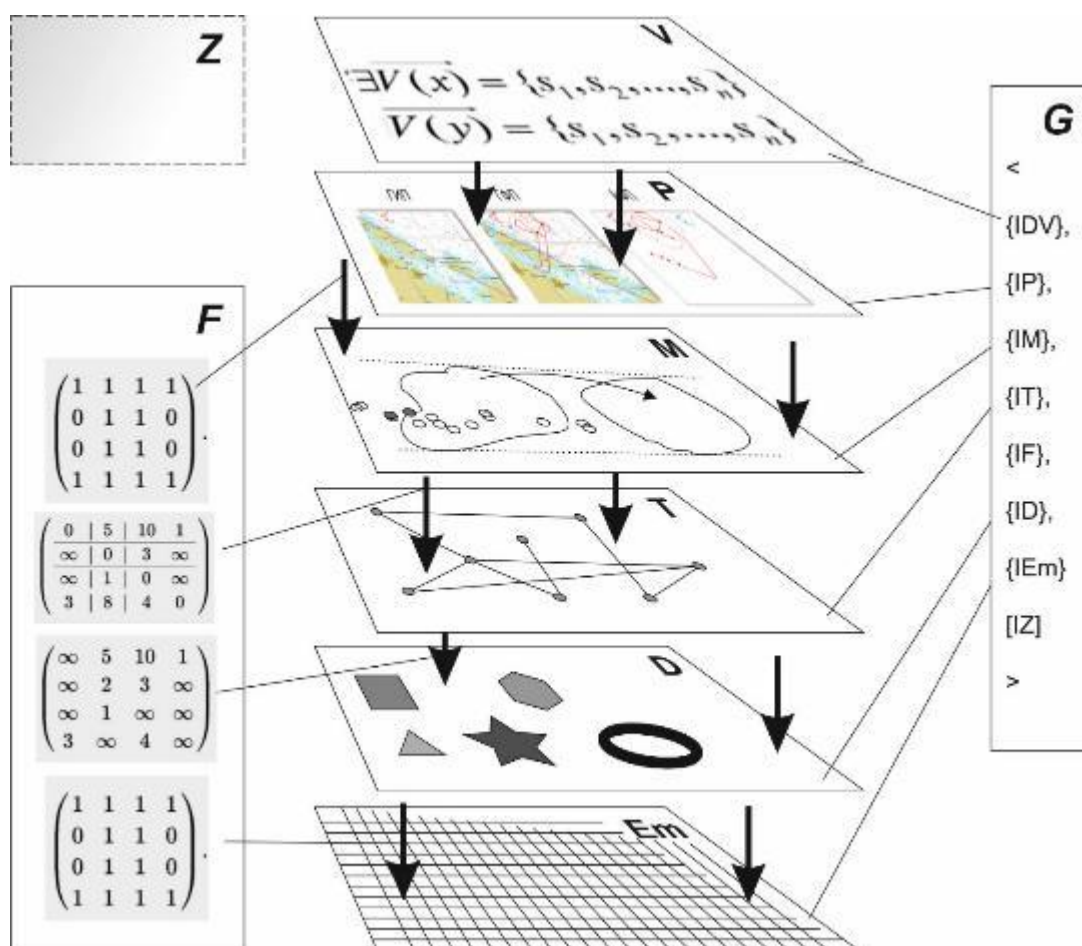


Рисунок 40 — Система категорированных моделей

Определение общих методов работы с категориями и объектами категорий обеспечивает единый ресурсный и методический подход к автоматизации решений большого круга задач, в том числе задач, которые еще предстоит сформулировать с появлением новых вызовов и рисков.

Конкретная категория в математике — категория, снабжённая строгим функтором в категорию множеств. Благодаря этому функтору можно оперировать с объектами такой категории подобно работе с множествами с дополнительной структурой, а морфизмы представлять, как функции, сохраняющие дополнительную структуру. Многие категории имеют очевидную интерпретацию конкретных категорий, например, категория объектов ледовых образований, категория топологических пространств, графов и собственно категория множеств. С другой стороны, к неконкретизируемым категориям относятся; например, преобразования

топологических пространств, то есть они не допускают строгого функтора в категорию множеств.

Идеологию объектов в категориях легко проиллюстрировать на примере ледовых образований: так открытая вода под действием отрицательной температуры в различных условиях (ветер, течения, осадки) проходит различные преобразования от ледяных игл, пластинок, снежур, сала и шуги до ниласового, молодого, белого, многолетнего льда [153], которые в свою очередь под действием внешних сил образуют многообразные формы дрейфующих и неподвижных ледяных образований.

$$\dots \rightarrow V_{t-1}^{ID} \xrightarrow{g_{m-1}} V_t^{ID} \xrightarrow{g_m} V_{t+1}^{ID} \rightarrow \dots, \quad (2.23)$$

Преобразования одной формы ледяных образований в другие естественен и сопровождается изменением не просто физических свойств, а и параметрами взаимодействия в отношениях с объектами других категорий, например, судна.

$$\dots \rightarrow F_{t-1}^V \xrightarrow{h_{m-1}} F_t^V \xrightarrow{h_m} F_{t+1}^V \rightarrow \dots, \quad (2.24)$$

где V_{t-1}^{ID} – вектор состояния объекта с индексом ID в момент времени $t-1$;

g_{m-1} – морфизм объекта от момента времени $t-1$;

F_{t-1}^V – параметры взаимодействия между объектами категорий;

h_{m-1} – морфизм изменения параметров взаимодействия между объектами категорий.

Таким образом, при наличии параметрической функций морфизмов для объектов внутри категорий под воздействием известных возмущений, в идеале существует функтор, связывающий объекты и их зависимости в различных категориях в процессе непрерывных преобразований.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \dots & \rightarrow & V_{t-1}^{ID} & \xrightarrow{g_{m-1}} & V_t^{ID} & \xrightarrow{g_m} & V_{t+1}^{ID} \rightarrow \dots \\
 & & \downarrow D_{t-1} & & \downarrow D_t & & \downarrow D_{t+1} \\
 \dots & \rightarrow & F_{t-1}^V & \xrightarrow{h_{m-1}} & F_t^V & \xrightarrow{h_m} & F_{t+1}^V \rightarrow \dots
 \end{array}$$

где D_{t-1} – функтор в момент времени $t-1$.

Аналогичные рассуждения справедливы для категорий объектов социума, логистики, гидрометеоусловий и т.п., тем самым получая возможность моделировать геоситуацию шире, привычного нам трехмерного пространства и времени.

2.3.2. Система методов концептуальной модели

Представленная в предыдущем разделе концептуальная модель АТА подразумевает высокий уровень абстракции представления объектов и процессов, свойств и преобразований, отображений преобразований и функциональных зависимостей между объектами любой природы. Опираясь на теорию категории концептуальная модель объединяет различные научные области и использует различные теоретико-множественные подходы в работе с соответствующими объектами. В концептуальной модели мы использовали отсылки к теории множеств, теории чисел, теории полей, теории графов, теории колец, системному анализу.

Очевидно, что и методы, применяемые для операции с объектами в той или иной категории, будут различные, а количество методов, как и типы задач, решаемых с применением ГИС имеет обширный характер и носит, по большей части, прикладной характер. Задачи, решаемые с применением ГИС оперируют объектами, имеющими географический аспект, таким образом и разрешаемые проблемы тесным образом связаны с территориальными структурами. В дальнейшем будут рассмотрены примеры, а на данном этапе, опираясь на основы системного анализа [82,164] определим общий подход к решению

рисковых задач, имеющих географический аспект. Структурно-логическая схема общего подхода к решению рискованных задач с применением географических структур представлена на рисунке 41.

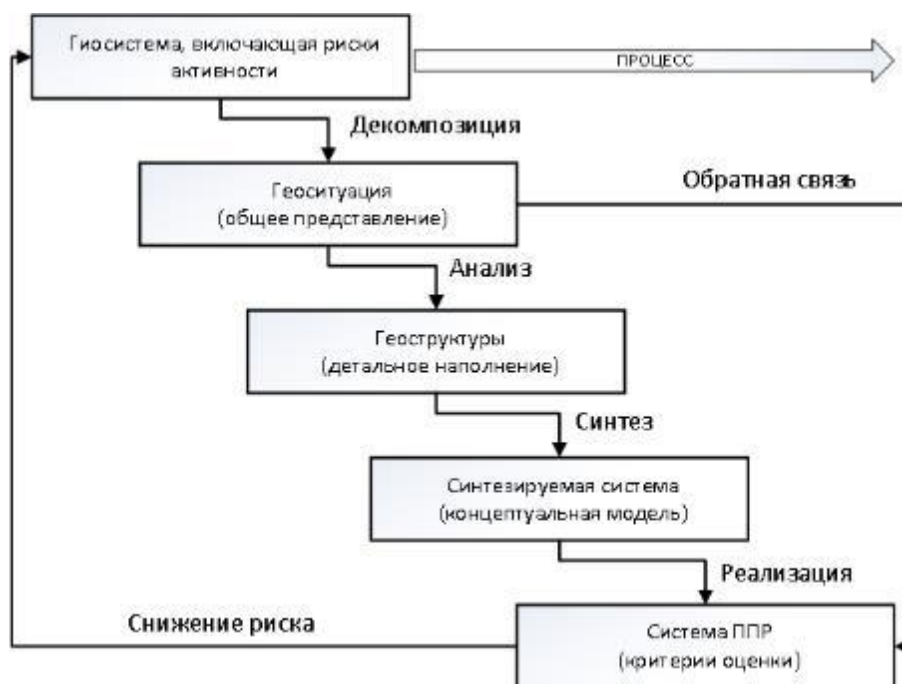


Рисунок 41 — Общий подход к решению рискованных задач с применением ГИС

Необходимость разрешения проблем обусловлена необходимостью устранения или снижения потенциального риска, который возникнет, если проблема не будет решена. Для решения проблемы проводится системное исследование (декомпозиция, анализ и синтез) системы, снимающее проблему. Реализация принимаемых решений по линии обратной связи позволяет провести оценку степени снятия проблемы и снижения уровня риска и принять следующее решение, обеспечивая жизненный цикл существования процесса.

На этапе декомпозиции, согласно предлагаемой концептуальной модели, основной задачей является наполнение соответствующих математических структур оцифрованными данными, обеспечивающими достаточную информативность оптимизационным задачам и проведению преобразований в категориях. К такого рода данными относятся не столько

наблюдаемые или изменяемые свойства геообъектов, сколько связи и отношения между ними.

Глубина декомпозиции ограничивается. Декомпозиция должна прекращаться, если необходимо изменить уровень абстракции — представить элемент как подсистему. Если при декомпозиции выясняется, что модель начинает описывать внутренний алгоритм функционирования элемента вместо закона его внешнего функционирования, то в этом случае необходима смена уровня абстракции в концептуальной модели или прерывание декомпозиции.

Пространственное распределение сущностей георегиона, различная природа отношений, а главное временная девиация свойств и связей между объектами относит концептуальную модель транспортной активности в сложным большим системам, в которых на этапе декомпозиции будет встречаться ряд проблем, связанных с неоднозначностью представления исходных данных. Данное обстоятельство приводит к необходимости анализа возникновения видов неточностей, неоднозначностей и неопределённости параметров при выработке управленческих решений [83, 84].

Классификация неопределённостей приведена на рисунке 42.

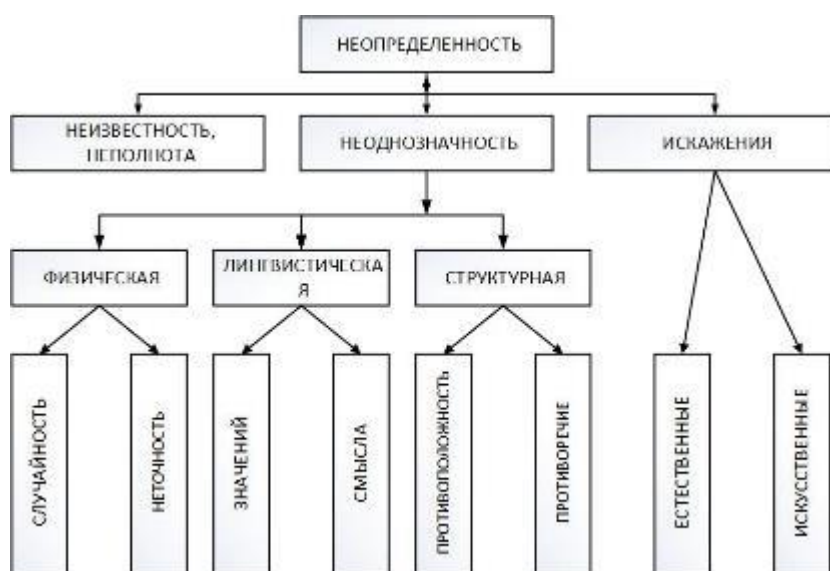


Рисунок 42 — Классификация неопределённостей

Неизвестность и неполнота являются соответственно совершенной и несовершенной формами отсутствия информации о предполагаемом объекте или событии. Эти неопределенности могут быть следствием неверно проведенной декомпозиции.

Случайность и неточность оперативной информации, возникающая ввиду физической погрешности измерительных сенсоров, возможных отказов, потерей данных или искажений в каналах связи, наличия временного запаздывания или разрыва при передаче данных измерений.

Противоположность и противоречия чаще всего являются следствием избыточности измерительных сенсоров. Данные неточности, в определенном смысле, носят позитивный характер, так как по результатам разрешения конфликта способны выявить недостоверный сенсор или изменить настройку приоритетов в системах автоматического распознавания.

Примером компенсации естественных искажений могут служить преобразования в анаморфированных пространствах. К искусственным искажениям следует отнести маскировку и дезинформацию, что более характерно в военном искусстве.

Наличие ЛПР в контуре управления системы ППР с использованием естественного языка, приводит к необходимости учета следующих трудностей представления знаний ЛПР [85]:

- ненадежность исходной информации, получаемой от ЛПР, неточность оценок, недоопределенность понятий и терминов, неуверенность ЛПР в своих заключениях;
- неоднозначность естественного языка (лингвистическая неопределенность) и языка представления правил в системах экспертного типа;
- процедура принятия решения базируется на неполной информации;
- неопределенность проявляется при агрегации правил и моделей, исходящих от разных источников знаний или от ЛПР различных уровней

управления (эти правила и модели могут быть противоречивыми, избыточными и т.п.).

Варианты действий ЛПР, при наличии неопределенностей в реальной системе, могут быть различными, например:

- ЛПР могут игнорировать существование неопределенности и использовать только хорошо определенные модели;
- ЛПР выбирает один, наиболее существенный, вид неопределенности и использует соответствующую теорию [86];
- ЛПР проводит дополнительные исследования системы или получает дополнительную информацию в ходе контроля или в ходе управления.

С развитием искусственных нейронных сетей, эффективность машинного распознавания значительно выросла [87, 88, 159, 162], однако проблемы в системах ППР не стало меньше. Особенностью автоматизации задач управления в реальном масштабе времени является недостаток вычислительных возможностей или несоответствие вычислительных ресурсов сложности задачи, что равносильно недостатку информации об исходных условиях решаемой задачи [89].

Перед рассмотрением возможных моделей и соответствующих им методов процесса управления реализуются методы **анализа** и **синтеза** компонентов концептуальной модели, в том числе подлежащих управлению.

Безусловно любой вид анализа начинается с получения исходных данных, а в нашем случае процедур извлечения знаний в виде совокупности информационных структур, которые отражают свойства и взаимосвязи объектов реального мира. Извлечение знаний для выделенного объекта или процесса в предметной области системы ППР заключается в определении и выборе соответствующих информационных структур и синтезе структур совокупности моделей, подлежащих управлению.

В зависимости от целей и задач проводимого анализа, организация подбора источников знаний, осуществляет оператор или ЛПР. При использовании расширяемых математических структур, предлагаемых в

концептуальной модели роль операторов может быть частично или полностью делегирована автоматизированным алгоритмам, так как расширение системы неодушевленных сенсоров с возможностью использования большего количества данных как определенных, так и неопределенных, компенсируется возможностями динамического расширения математических структур моделей геообъектов и геоситуации.

Вопрос определения количества источников знаний для каждой задачи решается, как правило, отдельно. Минимальное их число определяется возможностью покрыть все аспекты, подлежащие рассмотрению в аналитических задачах, т.е. источников знаний должно быть достаточно для того, чтобы в совокупности можно было бы учесть существенные свойства и получить соответствующие решения. В представленной концептуальной модели на базе категорий методы определения достаточности знаний об объекте или ситуации опираются не непосредственно на первичные источники информации (сенсоры), а абстрактные структуры цифровых данных категории *V*, каталогом которых выступает объект *IDV* категории индексов *G*.

Рассматривая методологию синтеза моделей геоструктур следует обратиться к классификации задач синтеза систем, предложенной А.Д. Цвиркуном [89], где рассматривается решение трех классов задач:

- синтез структуры при заданных функциях и алгоритмах;
- синтез функций и алгоритмов функционирования, поведения элементов системы;
- синтез структуры сложных систем, включающий как оптимизацию функционирования системы, так и распределение функций по узлам системы и выбор их состава.

Первый класс задач исследовался и получил важные общенаучные результаты в работах А.Д.Цвиркуна по созданию теории синтеза структур системы при заданных функциях и алгоритмах.

Наибольшую проработку получило второе направление. В этом направлении получили важные общенаучные результаты, Б.А. Резников, В.Н.Калинин [96;104] и др.

В работе В.Г. Бурлова [39] рассматривается круг проблем, примыкающих к третьему направлению синтеза систем – обеспечении условия существования процесса управления, но при этом рассматриваются задачи с расширенным множеством свойств (ресурсные и временные характеристики), ключевым из которых является объективный физический закон.

В работе Ю.Г. Ростовцева [91] рассмотрен ситуационный подход к решению задач синтеза системы на этапе предметно-практической деятельности. Проблема синтеза системы возникает из-за неопределенности знания. Автор предложил решать эту проблему на основе поиска условия замыкания. Разработал математическую модель процесса замыкания, которая есть суть отношения множества известных ситуаций и множества известных действий. Главная проблема - это построение собственно отношения - условия замыкания - для конкретной предметной области.

В.Г. Бурлов конкретизировал идеи ситуационного подхода Ростовцева Ю.Г. и получил условие замыкания для синтеза динамической системы, на основе разработанного им принципа сохранения потенциальной эффективности применения системы и осуществил синтез модели системы и способов ее применения в условиях конфликтных ситуаций.

Данные теоретические положения укладываются в предлагаемую концептуальную модель транспортной активности так как в ней используется подобный набор тот же уровень абстракции математических структур, как и рассматриваемые структуры сложных систем.

Процесс управления можно реализовывать либо в виде заранее определенной детерминированной оптимизирующей программы действий, определенной в структуре управляемой системы как процедура, либо в виде адаптивной системы, в которой реализуются принципы управления на основе

адаптивных обратных связей [92, 93]. Оба эти подхода к автоматизации процесса управления легко встраиваются в предлагаемую концептуальную модель. В первом случае оптимизирующая программа действий вызывается по соответствующему индексу категории Z . А во втором интеллектуальная управляющая подсистема более эффективно работает с абстрактными математическими структурами с применением методов из различных математических теорий, такие как: теория игр, теория исследования операций, теория вероятностей, теория графов, теории эффективности и т.п.

Высокий уровень абстракции предложенных математических структур при работе с геоструктурами позволяет масштабировать обоснованные преобразования структур из одних категорий на структуры других даже там, где это не принимается очевидным, при условии соблюдения аксиоматических свойств определенных в категории функторов IF . Такой подход уже эффективно применяется в автоматизируемых системах решения сложных проблем с элементами искусственного интеллекта [94].

Целесообразность применения интеллектуальных методов управления продиктована использованием иерархических систем управления с включением ЛПР (или коллектива ЛПР), особенно в необходимости оперативного управления при решении задачи в режиме времени, близком к реальному. Проблематикой в этом случае является рациональный выбор модели объекта управления и определение необходимого объема исходных данных для анализа и выбора управленческих решений. Большая размерность модели может привести к трудностям восприятия разнообразных факторов, а наличие ошибок и неопределенностей к критическим ошибкам управления. Следовательно, необходим поиск компромиссного решения в выборе моделей управляемого объекта и точностью получаемого решения. Выбор компромиссного решения зависит от иерархии уровня управления.

Ввиду большой сложности геоструктур АЗРФ как объекта управления, в котором протекающие физические и информационные процессы являются нелинейными, модели ее функционирования и управления обладают

большими размерностями и неопределенностями, а в цепях управления присутствуют ЛПП, для управления транспортной активностью целесообразно применять интеллектуальные методы.

2.3.3. Система поддержки принятия решений

Относительно компонента «Система ППР» (СППР) в общей теории систем – системологии, одной из основных классификаций систем является классификация по виду элементов, а именно:

- система типа «объект»;
- система типа «процесс», элементами которой являются операции и процедуры.

Поддержка принимаемых решений реже оперирует первым и относится к системам второго типа. Для термина «процесс» используются различные толкования, но в наиболее общем случае «процесс» означает, что что-то происходит, совершается, изменяется с течением времени. Такая трактовка подходит к естественным изменениям, таким процессам как движение естественных сред (атмосфера, вода, лед, земная кора), к процессу существования живого организма (жизненный цикл, активная деятельность) и к искусственным процессам, имеющим целью достижения желаемых изменений [97,102].

Целенаправленное изменение определенных объектов имеет для людей жизненную важность. Анализируя предметную область исследования был сделан акцент, что тренд дальнейшего развития транспортных ГИС будет обусловлен повышением уровня автоматизации этапов сбора, анализа и процессов принятия оптимальных решений в условиях случайности, так как одной из сторон процесса является внешняя среда, реакция со стороны которой не является строго прогнозируемой, т.е. обладает фактором случайности. В общем случае возникает необходимость моделирования последовательности преобразований системы при принятиях решений в

ситуациях, где результаты частично случайны и частично зависят от лица, принимающего решения.

К решению такого рода задач в общем случае обращена теория игр как раздел математики, в котором исследуются математические модели принятия решений в условиях конфликта сторон, каждая из которых стремится воздействовать на развитие конфликта в своих собственных интересах [12]. В более конкретных случаях моделирование ситуации выполняется с применением математических основ марковского процесса принятия решений [100,164]. Предлагаемая концептуальная модель уже имеет в своем составе все необходимые исходные данные и спецификации, а главное их представления, которые могут быть использованы в математике последовательного марковского процесса принятия решений (МППР) для полностью наблюдаемой среды.

Процесс представляет собой инструмент для постановки задачи обучения, где достижение цели осуществляется через взаимодействие и последовательное принятие решений. Окружающая среда представляет собой сторону, с которой взаимодействует геообъект. Геообъект, выступая в роли «агента» выбирает действия, в то время как среда реагирует на эти действия и предоставляет новые ситуации для агента. Логика последовательности принимаемых решений определяется максимальным значением выгоды или вознаграждения, генерируемых системой с течением времени путём выбора доступных действий (рисунок 43).

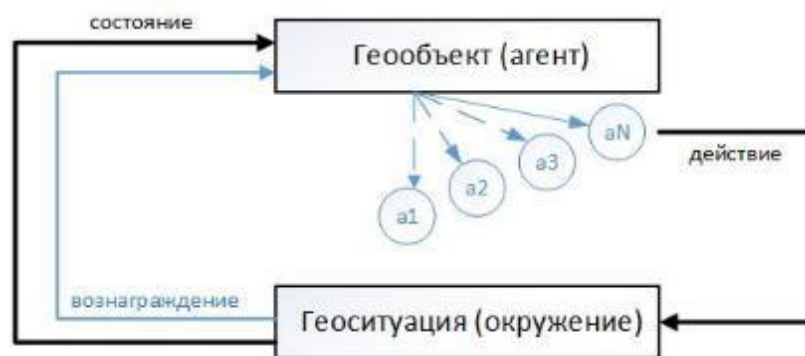


Рисунок 43 — Диаграмма марковского процесса с вознаграждением

Следует отметить, что учитываемые случайные явления подчиняются определенным статическим закономерностям, что позволяет использовать в процессе принятия решений эффективные математические методы теории случайных процессов и, в частности, теории марковских процессов.

В общем понимании процессы управления транспортной активностью в георегионе в условиях риска могут быть разделены (детерминированы) по времени, геообъектам или задачам, на некоторые упрощенные подпроцессы (процедуры, подзадачи, акты), которые в известной степени возможно рассматривать как самостоятельные.

Очевидно, что подпроцессы должны быть определенным образом связаны друг с другом и с родительским процессом. В частности, необходимо определить их порядок, передачу информации, условия начала и окончания выполнения. Теория категорий обеспечивает и математически строго описывает перечисленные преобразования [167], если есть возможность описать объекты реальных задач в виде математических структур, более того, исполнение совокупности процедур, в силу свойства эмерджентности, приведет к получению нового качества, к чему решение каждой отдельной процедура привести не может. Это означает, что сложный процесс решения задачи может рассматриваться как некоторая система подпроцессов (процедур), обладающая внутренней организацией, структурой, иерархией, управлением. Вся совокупность подпроцессов относится к классу систем типа

“процесс” и обладают единством технологий обращения с данными и методологией.

Случайный процесс называется *марковским*, если вероятность состояния в будущем зависит только от состояния в настоящем и не зависит от того, как и когда процесс оказался в этом состоянии.

Управление реальными процессами на основе МППР опирается на безусловное упрощение среды окружения, которое предполагает выделение наиболее важных (эксплицитных) факторов, определяющих, по мнению ЛПР существенное влияние на ход процесса. Таким образом, чем выше уровень упрощений (проще модель), иными словами - меньше количество учитываемых факторов в модели, тем хуже будет работать МППР.

Для большинства типичных задач в логистике анализ процессов удобно проводить на основе МППР с дискретными состояниями и дискретным временем. Дискретными состояниями будут являться пункты доставки и операции с перевозимым грузом. Для процессов управления судном в тяжелых климатических (ледовых, погодных и т.п.) условиях допустимым является МППР с непрерывным состоянием и непрерывным временем. В линейной алгебре существуют математические реализации решений для следующих основных видов марковских случайных процессов, применяя которые можно моделировать большинство процессов АТА:

- с дискретными состояниями и дискретным временем (цепь Маркова);
- с непрерывными состояниями и дискретным временем (марковские последовательности);
- с дискретными состояниями и непрерывным временем (непрерывная цепь Маркова);
- с непрерывным состоянием и непрерывным временем.

Чтобы определить марковский процесс принятия решений, нужно задать кортеж четырех категорий

$$(S, A, P(\cdot, \cdot), R(\cdot, \cdot)), \quad (2.25)$$

где: S - конечное множество состояний геообъекта (агента), A - конечное множество действий, доступных агенту из состояния s , принадлежащему S ,

$$P_a(s, s') = P(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a) \quad (2.26)$$

вероятность, что действие a в состоянии s во время t приведет в состояние s' ко времени $t+1$,

- $R_a(s, s')$ вознаграждение, получаемое после перехода в состояние s' из состояния s , при совершении действия a .

В рамках теории множеств кортежи можно ассоциировать с множествами из различного вида категорий. Интуитивно можно предположить, что преобразования геообъектов будет возможно извлечь из категории состояния объектов концептуальной модели АТА, а направления и возможные преобразования над ними описаны достаточным количеством морфизмов в этой категории. Совокупность значений состояния, выбранного действия и полученного вознаграждения определяют категорию истории:

$$h_t(s_i, a_i, r_i) \quad (2.27)$$

Все множество совокупностей истории процесса определяет ход его развития или стратегию $ST_t = f(h_t)$.

Цель процесса принятия решений по Маркову состоит в том, чтобы найти хорошую «стратегию» для лица, принимающего решения: функцию T , которая определяет действие $T(s)$, которое лицо, принимающее решения, выберет в состоянии s . Если процесс принятия решений по Маркову таким образом объединён со стратегией, это определяет действие для каждого состояния, и полученная комбинация ведёт себя как цепь Маркова (поскольку действие, выбранное в состоянии s , полностью определяется $T(s)$). Стратегия ST представляет функцию (в общем случае распределения вероятностей), сопоставляющую текущему состоянию наиболее ценное действие. При этом ценность действия определяется не следующим шагом истории, а суммой вознаграждений всей стратегии.

Марковский процесс переходов определяется двумя параметрами:

$$MP=\{S,P\}, \quad (2.28)$$

где S - множество состояний, P – динамическая модель, задающая вероятность перехода между состояниями в категории S . Динамическая модель записывается матрицей вероятностей последовательных переходов

$$P = \begin{vmatrix} p(s_1 | s_1) & p(s_2 | s_1) & \cdots & p(s_N | s_1) \\ p(s_1 | s_2) & p(s_2 | s_2) & \cdots & p(s_N | s_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p(s_1 | s_N) & \cdots & \cdots & p(s_N | s_N) \end{vmatrix} \quad (2.29)$$

Дополнение марковского процесса вознаграждением

$$MRP=\{S,P,R,\gamma\},$$

где: γ – коэффициент дисконтирования, R – модель вознаграждения, определяемая математическим ожиданием размера вознаграждения при условии перехода состояния в s'

$$R(s, s') = M(r | s = s') \quad (2.30)$$

Коэффициент дисконтирования γ , удовлетворяющий условию $0 \leq \gamma \leq 1$, который обычно близок к 1 (например, $\gamma=1/(1+r)$ для некоторой ставки дисконтирования r) определяет важность будущих вознаграждений по мере роста истории. Коэффициент дисконтирования, близкий к 1, заставляет агента отдавать приоритет долгосрочным вознаграждениям, в то время как коэффициент, близкий к 0, заставляет ЛПП сосредоточиться на немедленных действиях.

Суммарное вознаграждение агента от момента t до конца эпизода будет определяться суммой:

$$R(s_t, s_N) = r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots \quad (2.31)$$

Дальнейший шаг приводит в марковскому процессу принятия решений

$$MRP=\{S,P,R,\gamma,A\}, \quad (2.32)$$

где: A – конечное множество возможных действий агента.

Таким образом модель вознаграждений и динамическая модель вероятностей перехода в следующее состояние трансформируется выбором действия a из возможных в категории A .

$$\begin{aligned} R(s_t, s') &= M(r | s_t = s', a_t = a_i) \\ P(s_t = s' | s_t = s', a_t = a_i \in A) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Решить марковский процесс принятия решений означает найти стратегию T , максимизирующую "вознаграждение" (функцию ценности). Самая простая функция ценности - это математическое ожидание формального ряда

$$\max \left[\sum_{t=0}^N R_{a_t}(s_t, s_{t+1}) \right] \quad (2.34)$$

где $a_t = T(s)$ - стратегия, а математическое ожидание берётся в соответствии с динамической моделью P .

Алгоритм поиска решения состоит из двух этапов: (1) обновление значений V и (2) обновление стратегии T (2.35), которые повторяются в определенном порядке для всех состояний до тех пор, пока не перестанут происходить дальнейшие улучшения. Оба рекурсивно обновляют новую оценку оптимальной стратегии и значения состояния, используя более старую оценку этих значений.

$$\begin{aligned} V(s') &= \sum_{s'}^N P_T(s, s')(R_T(s, s') + \gamma V(s)) \\ T(s') &= \max \left[\sum_{s'}^N P_a(s, s')(R_a(s, s') + \gamma V(s)) \right] \end{aligned} \quad (2.35)$$

В марковских процессах принятия решений с дискретным временем решения принимаются через определённые промежутки времени. Однако в марковских процессах принятия решений с непрерывным временем решения могут приниматься в любой момент по выбору лица, принимающего решения. По сравнению с марковскими процессами принятия решений с дискретным

временем марковские процессы принятия решений с непрерывным временем могут лучше моделировать процесс принятия решений для системы с непрерывной динамикой, то есть динамика системы определяется обыкновенными дифференциальными уравнениями.

$$T(s') = \max \left[\int_0^{\infty} \gamma^t r(s(t), T(s(t))) dt \mid s_0 \right] \quad (2.36)$$

Разработаны различные методы итераций для снижения вычислительной нагрузки марковских процессов. Для конечных процессов существуют компактные алгоритмы поиска оптимальных стратегий с сложностью, полиномиальной по отношению к размеру представления задачи. Однако размер представления задачи часто экспоненциально зависит от количества переменных состояния и действий, что ограничивает методы точного решения задач компактным представлением.

Благодаря сравнительной простоте и наглядности математического аппарата, высокой достоверности и точности получаемых решений, особое внимание марковские процессы приобрели у специалистов, занимающихся исследованием операций и теорией принятия оптимальных решений.

Предположим, что в акватории СМП осуществляется добыча биоресурсов в районах: А, В и С. Предположим, что рыболовецкие суда в поисках биоресурсов идут в тот район, который на данный момент ближе. Статистически было определено, что после работы в районах:

- в А следующий поиск в 30 случаях осуществляется в А, в 30 случаях - в В и в 40 случаях - в С;
- в В следующий поиск в 40 случаях осуществляется в А, в 40 случаях - в В и в 20 случаях - в С;
- в С следующий поиск в 50 случаях осуществляется в А, в 30 случаях - в В и в 20 случаях - в С.

Таким образом, район следующего поиска определяется только предыдущим районом, что определяет цепь как марковскую.

Матрица вероятностей перехода будет выглядеть следующим образом:

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.3 & 0.3 & 0.4 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2.37)$$

Вероятность перехода указана на пересечении пункта отправления в строке в пункт прибытия в столбце.

Допустим, что период поиска биоресурсов и перемещение в следующий район занимает 3 суток. Тогда, в соответствии со статистическими данными, через 3 суток 30% сейнеров, находившихся в А, будут в А, 30% будут в В и 40% - в С.

Так как в следующий момент времени каждый сейнер обязательно будет в одном из районов, то сумма по строкам равна 1. И поскольку мы имеем дело с вероятностями, каждый элемент матрицы $0 < a_{ij} < 1$.

Теперь зададим простой вопрос: если сейнер стартует из С, какова вероятность того, что осуществив два поиска, он будет в В, т. е. как можно достичь В в 2 шага? Итак, существует несколько путей из С в В за 2 шага:

- 1) сначала из С в С и потом из С в В;
- 2) С- >В и В->В;
- 3) С->А и А->В.

По правилу умножения независимых событий, получим, что искомая вероятность равна:

$$P_{cb} = P(CA) * P(AB) + P(CB) * P(BB) + P(CC) * P(CB) \quad (2.38)$$

Подставляя числовые значения:

$$P_{cb} = 0.5 * 0.3 + 0.3 * 0.4 + 0.2 * 0.3 = 0.33$$

Полученный результат говорит о том, что если сейнер начал работу из С, то в 33 случаях из 100 он будет в В через два периода или 6 суток.

Приведенные вычисления просты, но при необходимости определить вероятность через 5 или 15 циклов и для большого числа сейнеров (других судов) - это может занять много времени.

Более простой способ вычисления подобных вероятностей для получения вероятности перехода из различных состояний за 2 шага, заключается в возведении матрицы переходов в квадрат:

$$P^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.41 & 0.33 & 0.26 \\ 0.38 & 0.34 & 0.28 \\ 0.37 & 0.33 & 0.3 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2.39)$$

Тогда элементы (3, 2) - это вероятность перехода из C в B за 2 шага, которая была получена выше другим способом. Заметим, что элементы в матрице P^2 также находятся в пределах от 0 до 1, и сумма по строкам равна 1.

Матрица переходных вероятностей в 7 степени будет выглядеть следующим образом:

$$P^7 = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.38888 & 0.33334 & 0.27778 \\ 0.38889 & 0.33334 & 0.27777 \\ 0.38889 & 0.33333 & 0.27777 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2.40)$$

Определенно элементы каждой строки с увеличением порядка матрицы переходов стремятся к некоторым числам. Это говорит о том, что после достаточно большого количества переходов уже не имеет значение в каком районе сейнер начал работу. Таким образом, в конце месяца приблизительно 38,9% будут в A , 33,3% будут в B и 27,8% будут в C .

Подобная сходимость гарантированно имеет место, если все элементы матрицы переходных вероятностей принадлежат интервалу (0, 1).

Марковская цепь изображается в виде графа переходов [164], вершины которого соответствуют состояниям цепи, а дуги — переходам между ними. Вес дуги, связывающей вершины равен вероятности перехода из одного состояния во другое (рисунок 44).

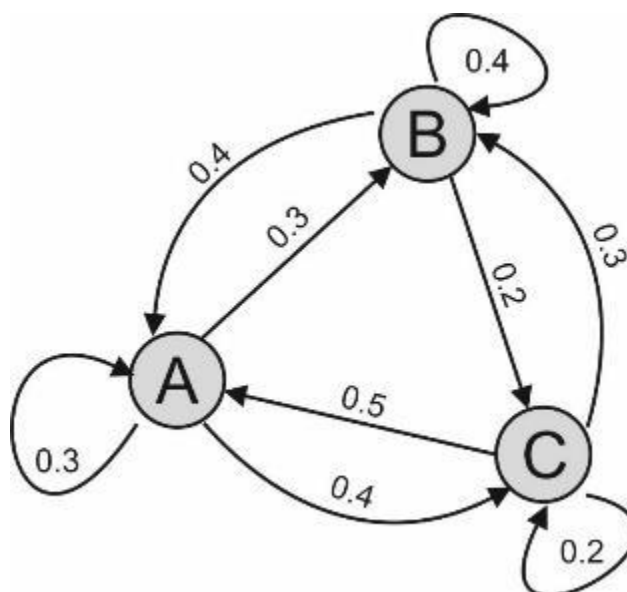


Рисунок 44 — Граф марковской цепи для примера с сейнерами

Формализм марковских процессов принятия решений является важной абстракцией задачи обучения [164]. Он позволяет утверждать, что независимо от деталей механизмов восприятия, памяти и управления, а также от цели, которую преследует агент, любая задача обучения целенаправленному поведению может быть сведена к трем сигналам, которыми агент обменивается с окружающей средой: сигнал, представляющий выбор действие агента, сигнал причины такого выбора (состояние среды), и сигнал, определяющий цель агента (вознаграждение). Этот формализм не всегда достаточен для описания всех задач обучения принятию решений, но он широко применяется и реализуется в АСУ.

Автоматизация систем поддержки принятия решений в зависимости от решаемых задач и критериального анализа рисков могут использовать различные теории и методы из разных областей знаний для анализа данных, моделирования ситуаций и предоставления рекомендаций. Практически исчерпывающий список теоретических подходов, применяемых в СППР, приведен в таблице 11.

Таблица 12 – Список теоретических подходов, применяемых в СППР

1. Теория принятия решений	
Нормативная теория принятия решений	Использует математические модели для выбора оптимального решения на основе критериев

	максимизации полезности или минимизации риска.
Описательная теория принятия решений	Изучает, как люди фактически принимают решения, учитывая когнитивные ограничения и поведенческие аспекты.
Теория полезности	Оценивает альтернативы на основе их ожидаемой полезности.
Теория игр	Анализирует стратегические взаимодействия между участниками, где решение одного влияет на результат другого.
2. Искусственный интеллект и машинное обучение [103]	
Экспертные системы	Используют базы знаний и правила для имитации принятия решений экспертами.
Машинное обучение	Алгоритмы классификации, регрессии, кластеризации и прогнозирования помогают анализировать данные и выявлять закономерности.
Нейронные сети и глубокое обучение	Используются для обработки сложных данных, таких как изображения, текст или временные ряды.
3. Математическое моделирование и оптимизация	
Линейное и нелинейное программирование	Методы оптимизации для поиска наилучшего решения в условиях ограничений.
Многокритериальная оптимизация	Используется, когда необходимо учитывать несколько противоречивых критериев.
Динамическое программирование	Применяется для задач, где решение разбивается на этапы.
4. Теория вероятностей и статистика	
Байесовские сети	Моделируют вероятностные зависимости между переменными.
Статистический анализ	Используется для анализа данных, проверки гипотез и прогнозирования.
Методы Монте-Карло	Применяются для моделирования сложных систем с учетом неопределенности.
5. Когнитивная психология и поведенческая экономика	
Теория ограниченной рациональности	Учитывает, что люди принимают решения в условиях ограниченной информации и когнитивных ресурсов.
Эвристики и когнитивные искажения	Изучают, как упрощенные правила и предубеждения влияют на принятие решений.
6. Теория систем и системный анализ	
Системный подход	Рассматривает проблему как часть сложной системы, учитывая взаимосвязи между элементами.
Анализ сценариев	Исследует возможные варианты развития событий и их последствия.
7. Теория нечетких множеств	
Нечеткая логика	Позволяет работать с неточными или неопределенными данными, что полезно в условиях неполной информации.
8. Теория управления и кибернетика	

Обратная связь и управление	Используется для корректировки решений на основе результатов предыдущих действий.
Адаптивные системы	Способны изменять свое поведение в зависимости от изменений в окружающей среде.
9. Теория риска	
Анализ рисков	Оценивает вероятность и последствия негативных событий.
Управление рисками	Разрабатывает стратегии для минимизации рисков.
10. Экономические теории	
Теория полезности и предпочтений	Используется для оценки выгод и затрат.
Теория равновесия	Применяется в задачах распределения ресурсов.
11. Социальные и организационные теории	
Теория организационного поведения	Учитывает влияние структуры организации и человеческого фактора на принятие решений.
Коллективное принятие решений	Изучает, как группы принимают решения.
12. Теория информации	
Обработка информации	Анализирует, как данные собираются, обрабатываются и интерпретируются.
Теория энтропии	Используется для оценки неопределенности в данных.

Эти теории и методы часто комбинируются в зависимости от конкретной задачи, что позволяет создавать гибкие и эффективные системы поддержки принятия решений.

2.4. Выводы по второй главе

В начале настоящей главы даны базовые понятия и определения геоинформационного моделирования, геоинформационной поддержки управления. Управление территориальной активностью или геоконтроллинг – представляет собой специфическую адаптацию методов и приемов классического управления, направленных на целенаправленное воздействие управляющих органов на подчиненные объекты для достижения определенных целей, с учетом особенностей объектов управления — обладать географическим аспектом и быть частью территориальных структур.

Далее рассмотрены основные понятия категорий, применяемых в концептуальной модели для оптимальной работы с геоинформационными объектами и пространствами. Приведены пояснения аксиоматического

представления категорий, морфизмов объектов, функторов категорий, естественных преобразований, определяющих закономерности гомеоморфизмов топологических пространств в теории категорий.

На основе преимуществ ООП с реализацией методов категорирования разработана концептуальная модель АТА в условиях риска, по итогам которой достигнуты следующие научно-технические результаты:

1. Разработана и обоснована логическая структура концептуальной модели АТА на основе синтеза теоретических умозаключений теории категорий в части геоинформационных методов представления объектов, гомоморфно-имплицитного упорядочения отношений между ними и оперативного анализа геоситуации с применением интеллектуальных систем.

2. Рассмотрены и проанализированы основные целевые свойства концептуальной модели АТА, эффективность ее структур для работы в условиях неопределенности исходных данных за счет формализованности категорируемых структур. Неоднозначности, неопределенности, недостаточность и избыточность первичной информации устраняются на этапе классификации ГО, как суть элемента реальной природы, путем назначения соответствующего формуляра с набором необходимых и достаточных параметров, атрибутов, свойств и связей из соответствующей БЗ.

3. Проведен анализ системных свойств основных категорий, обеспечивающих необходимую и достаточную полноту геоинформационных данных для методов оперативной поддержки принятия решений подсистемы управления.

4. Разработана взаимоувязанная совокупность категорированных формальных логических моделей геообъектов, геоструктур и геопространств, обеспечивающих доступ к данным продукционной модели база знаний, единство методик и процедур решения прикладных геоинформационных задач.

5. Подтверждается, на примере марковского процесса принятия решений, реализуемость на основе предлагаемой концептуальной модели

АТА эффективных математических методов работы с информацией и рост уровня автоматизации в системе поддержки принимаемых решений в условиях риска.

Необходимо отметить, что формирование цифровой среды многоаспектного геоинформационного моделирования географических регионов, как и единой геоинформационной киберсреды, целесообразно осуществлять в виде системы с распределенной сервисной архитектурой.

Предлагаемая концептуальная модель АТА позволяет поднять условный порядок абстракции в анализе транспортной активности АЗРФ на основе систем более высокого уровня, позволяющих синтезировать и оперативно вносить изменения в исходные модели частных задач исследования на основе единства абстрактных математических структур теории категорий.

Предлагаемый подход основан на применении принципов теории категорий, что позволяет повысить уровень абстракции и работать с математическими структурами в контексте гомологических и гомеоморфных преобразований n -мерных многообразий. К таким многообразиям относятся модели реальных объектов и пространств, обладающих географической спецификой и характеризующихся динамикой в пространстве и времени. Эволюция географических характеристик объектов, а также развитие взаимосвязей между ними, могут быть формализованы с помощью естественных преобразований соответствующих математических структур.

3. ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ РИСКА

Теоретические подходы к формальному представлению территориальной активности включают различные методы и модели, которые позволяют анализировать, описывать и прогнозировать пространственные процессы с учетом взаимодействия объектов, их составляющих. Эти подходы широко используются в географии, урбанистике, региональной экономике, экологии, военном деле и других дисциплинах.

Главным образом теоретические подходы опираются на модели и методы пространственного анализа, где основным инструментом, на сегодняшний день, являются географические информационные системы, в свою очередь опирающиеся на геостатистическую информацию для анализа пространственных данных, изучения зависимостей и визуализации.

Дальнейшее развитие ГИС неизбежно идет по различным направлениям совершенствования инструмента пространственного моделирования и анализа реальности, способные учитывать динамику пространственных данных и главное – учитывать связи, определяющие взаимное влияние ГО и геоструктур друг на друга и результат анализа. Какое именно из направлений получит главный отклик сейчас сказать сложно, но использование базы данных и базы знаний об окружающей действительности с географическим аспектом и пространственным анализом безусловно будет основой для дальнейшей автоматизации СППР в различных областях деятельности человека на Земле, и безусловно для анализа и прогнозирования региональной территориальной активности.

3.1. Принципы геомоделирования системы АТА

В процессе моделировании географических систем и геообъектов возникают существенные трудности, связанные с неизбежностью того факта, что модель представляет собой упрощение реальной системы, способная

объяснить, в лучшем случае, лишь ее некоторую часть. Другая сложность заключается в выборе правильного способа построения модели, который с одной стороны, был бы как можно проще, с другой — позволял лучше интерпретировать полученные результаты. География изучает территориальные природные и социально-экономические системы, относящиеся к сложным системам с позиций кибернетики [160].

Основные сложности геомоделирования возникают из-за большого объема и неоднородности исходных данных для моделей. Кроме того, математика исторически развивалась в рамках хозяйственных, затем физических и технических задач.

Геосистемы нельзя понять, изучая лишь отдельные элементы. Их сложность определяется множеством компонентов, их взаимосвязями и взаимодействием с внешней средой. Территориальные системы особенно сложны из-за огромного числа элементов и разнообразия связей (природа, инфраструктура, население и др.).

Математическое моделирование применимо к объектам любой сложности, что особенно ценно для изучения сложных систем, где другие методы недостаточны. Однако его успешность зависит от уровня географических и математических знаний, доступных данных и вычислительных возможностей. Некоторые проблемы остаются неформализуемыми, ограничивая эффективность моделирования.

Длительное время главной трудностью практического применения математического моделирования в географии было наполнение разработанных моделей конкретной и качественной информацией. Точность и полнота первичной информации, реальные возможности её сбора и обработки во многом определяют выбор типов прикладных моделей.

Как известно, любой предмет обладает практически бесконечным количеством свойств [26], составляющих в целом его качество. Но из этого бесконечного количества для характеристики качества предмета необходимо выделить лишь те свойства, которые в данный момент представляют интерес

с точки зрения удовлетворения предъявляемым требованиям. Однако в этом заложено и противоречие, что для сложных систем ограничение в выборе свойств может привести к неправильным результатам [83].

С другой стороны, моделирование территориальных систем предъявляет повышенные требования к данным: информация должна быть многоплановой, учитывать пространственно-временные изменения, динамику процессов и интегрировать разнородные источники в зависимости от целей исследования. Вследствие этого желательно реализовать постоянное автоматизированное, лучше автоматическое, наблюдение за ГО и геоситуацией, чтобы иметь устойчивый поток актуальных данных.

Поскольку наблюдения за географическими процессами и обработка эмпирических данных обычно занимают довольно много времени, то при построении математических моделей ГИС должна предоставлять возможность корректировать исходную информацию как в атрибутах моделей ГО, так и методах моделирования.

Предлагаемая концептуальная модель АТА позволяет подняться на уровень анализа транспортной активности АЗРФ на основе сложной совокупности конкретных систем и методов, решающих частные задачи, к системе более высокого уровня, позволяющей синтезировать и оперативно вносить изменения в исходные модели частных задач исследования на основе единства абстрактных структур в системе категорий.

3.2. Модель геообъекта в системе категорий

Основная проблема модели любого ГО заключается в многообразии зависимостей, определяющие его влияние на исследуемый процесс в совокупности с существующим окружением. Линейное перечисление параметров и аспектов в структурах типа база данных конкретного ГО не эффективно и будет стремиться к бесконечности, что неприемлемо.

Структурирование параметров и аспектов через категоризацию объектов и явлений — это ключевой подход в управлении данными, особенно

в базах знаний и сложных системах анализа. Отнесение реального объекта к категории ГО в иерархии ГИС определяет ряд типовых параметров, образующих формуляр, которые будут заполнены данными по мере идентификации реального объекта в процессе мониторинга внешней среды. Категория в свою очередь является родителем для формуляров нижестоящих в иерархии структур.

Предлагаемый подход дает следующие преимущества:

- качественная интерпретация данных, например, в категории «Тип льда» параметры «толщина», «плотность», «сезонность» позволяют точно определить, какой лед опасен для судов какого класса. Система понимает, что «паковый лёд толщиной 1.5 м» — это не просто число, а объект с конкретными свойствами, требующий определенных решений;
- способность к автоматизации логического вывода, так категория «Судно» включает параметры «ледовый класс», «грузоподъемность», «скорость». Если в базе знаний задано правило: «Если толщина льда больше 1 м, то требуется судно класса Arc5+», система автоматически предложит подходящие суда для маршрута через паковый лёд;
- интеграция разнородных данных различных категории, «Лед», «Судно», «Погода», «Логистика» связаны через общие параметры, например, «температура», которая принадлежит категории «Погода», влияет на устойчивость льда и ограничивает типы используемых на маршруте судов. Таким образом, можно строить комплексные модели, например, прогнозировать логистические риски в Арктике с учетом ледовой обстановки и метеоданных для конкретного маршрута;
- стандартизация понятий, которые определяются в родительских категориях и только в них, что исключает разночтения и упрощает коммуникацию между людьми и системами, данные становятся интероперабельными;
- ускоренный поиск и анализ;
- поддержка прогнозирования и сценарного моделирования, например: в категориях «Лёд» и «Погода» по динамическим параметрам «скорость

- таяния», «площадь покрытия» можно предсказать, когда участок Северного морского пути станет доступен для судов заданного ледового класса;
- управление знаниями, а не данными: введением новых правил в базу знаний важнее реализовать превентивное устранение рисков, а не реактивный разбор чрезвычайных ситуаций.

Важно, чтобы в записи были не только данные, но и логические связи (рисунок 45). Связь между видом льда и рекомендованным классом судна, погодными условиями и морфизмами ледовых образований, логистикой и нормативными актами и т.п. можно добавлять в виде правил в базу знаний. Однако, руководствуясь принципом структурированности данных, целесообразно отнести иерархические отношения причинно-следственных связей в отдельную категорию. Представить эти связи в структурированном виде возможно, использовать онтологии, где связи являются отдельными сущностями, формализованными в отдельные таблицы/графы, которые описывают отношения.

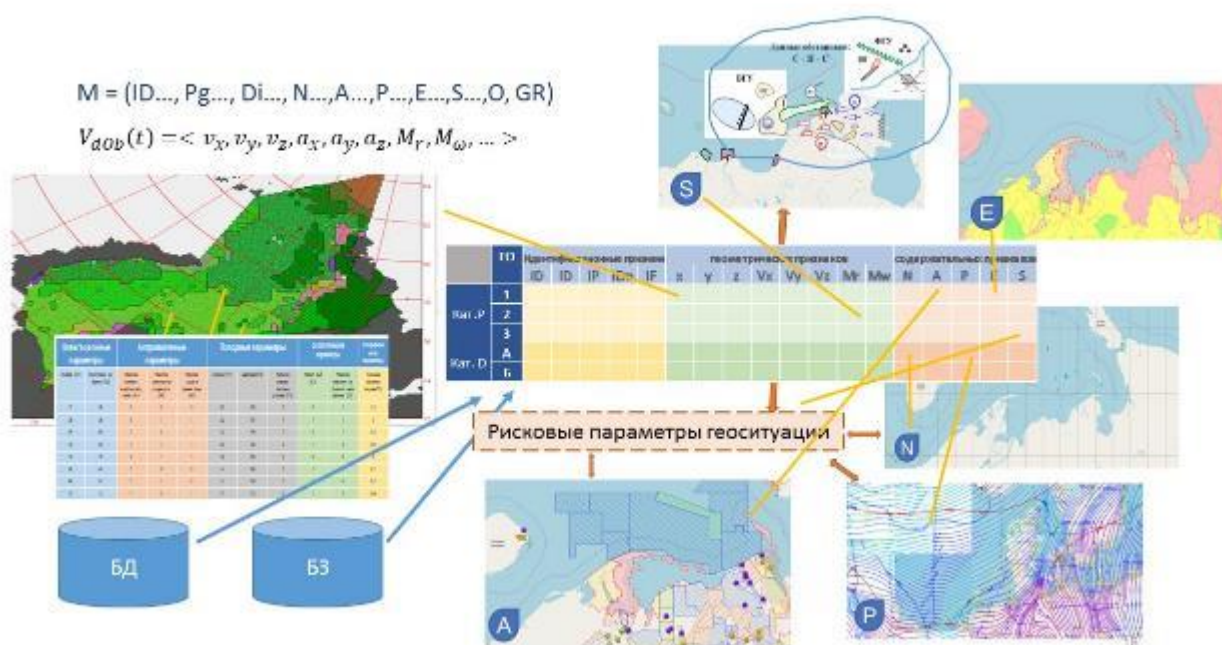


Рисунок 45 — Формализация структур геообъекта в категориях

Также стоит учесть, что связи могут быть разного типа: причинно-следственные, иерархические, ассоциативные и т.д. Например, "толщина льда

влияет на выбор судна" – это причинно-следственная связь. "Судно класса Arc7 может преодолевать лед толщиной до 2м" – это правило.

Для разных аспектов взаимодействия между категориями задаются разные типы отношений (таблица 13).

Таблица 13 - Типы отношений

Тип связи	Пример	Формализация
Иерархическая	"Указатель на иерархию в классе морского льда — Паковый лёд —толщина более 1,5 м"	триплеты «класс — объект —свойство»
Функциональная	"Лед толщиной 1.5 м требует судна класса Arc5"	правило
Причинно-следственная	"Айсберг → повышает риск аварии"	рисковая модель ограничений
Пространственная	"Ледовая зона X пересекается с маршрутом Y"	геоструктура региона

Возможность использовать правила логического вывода для автоматизации решений на основе этих связей в АСУ достаточно надежно реализуется на основании представлений их в виде триплетов «Тип объекта – связь – объект категории», правил, свойства объектов для чего достаточно определить отдельный классов связей в соответствующей категории.

Приведем пример простой структуры вложенности типов, видов и других элементов категории в категориях "лед" и "судно", их возможные параметры и взаимосвязи.

Таблица 14 - Вложенности категории «Лед»

Уровень	Название элемента	Описание	Пример параметров/атрибутов
Категория	Лед	Общая категория для всех типов льда.	родительский формуляр «лед»
Тип	Морской лёд	Лёд, формирующийся в морях и океанах.	Происхождение: море, Сезон: зимний/летний
Вид	Паковый лёд	Многолетний плотный лёд, покрывающий большие площади.	Толщина: 1.5–3 м, Плотность: высокая
Подвид	Многолетний паковый лёд	Лёд, сохраняющийся более 2 лет.	Возраст: >2 лет, Риск для судов: критический
Экземпляр объекта	Паковый лёд в море Лаптевых	Конкретный объект льда с географической привязкой.	Координаты: 75°N, 125°E, Дата наблюдения: 2023

Таблица 15 - Вложенности категории «Судно»

Уровень	Название элемента	Описание	Пример параметров/атрибутов
Категория	Судно	Общая категория для всех типов судов.	— формуляр «судно»
Тип	Грузовое судно	Судно, предназначенное для перевозки грузов.	Назначение: грузоперевозки
Вид	Танкер	Судно для транспортировки жидкостей (нефть, газ).	Грузоподъемность: 100 000 т, Тип груза: СПГ
Подвид	Газовоз ледового класса Arc7	Танкер, усиленный для плавания в льду.	Ледовый класс: Arc7, Толщина льда: до 2.1 м
Экземпляр	«Кристоф де Маржери»	Конкретное судно с уникальными характеристиками.	Судовладелец: Sovcomflot, Год постройки: 2017

Таблица 16 – Связи между категориями «Лед» и «Судно»

Категория 1	Связь	Категория 2	Правило/Пример
Лед (Паковый)	→ требует →	Судно (Arc7)	Если толщина льда > 1.5 м → требуется судно класса Arc7
Судно (Танкер)	→ пересекает →	Лед (НИЛАС)	Танкер Arc7 может двигаться в ниласовом льду толщиной до 0.3 м без сопровождения
Лед (Айсберг)	→ вызывает риск →	Судно (любое)	Айсберги повышают риск аварии на 40% для всех классов судов

Важно убедиться, что структура логична и соответствует данным, нет пропущенных уровней или избыточности. Также нужно учесть, что в некоторых случаях уровни могут быть разными. Например, для категории "судно" может быть больше уровней в зависимости от классификации (тип → класс → подкласс → модель). Нужно сохранить гибкость структуры, что достигается применением идентификаторов в категории ID.

Таблица 17 – Примеры связей категории «Лед» и «Судно» с другими категориями в контексте логистики

Категория 1	Связь	Категория 2	Пример	Тип связи
Лед (Паковый)	→ влияет на →	Маршрут	«Паковый лёд толщиной 2 м блокирует маршрут через пролив Вилькицкого».	Пространственно-логическая
Лед (Айсберг)	→ повышает →	Риск аварии	«Наличие айсбергов увеличивает риск столкновения на 25%».	Причинно-следственная
Судно (Arc7)	→ требует →	Экипаж	«Судно класса Arc7 требует наличия сертифицированных»	Регуляторная

Категория 1	Связь	Категория 2	Пример	Тип связи
			ледовых лоцманов».	
Лед (Ниласовый)	→ зависит от →	Погода	«Ниласовый лёд образуется при температуре ниже – 5°C».	Климатическая
Судно (Танкер)	→ перевозит →	Груз	«Танкер Arc7 перевозит сжиженный газ из порта Сабетта».	Функциональная
Лед (Морской)	→ локализован в →	Регион	«Морской лёд в Карском море достигает максимальной толщины в марте».	Географическая
Судно (Ледокол)	→ сопровождает →	Конвой	«Ледокол «Арктика» сопровождает караван из 5 грузовых судов».	Операционная
Лед (Торосы)	→ ограничивает →	Скорость судна	«Торосы снижают скорость судов до 3 узлов».	Физическая
Судно (Круизное)	→ избегает →	Лед (Айсберг)	«Круизные лайнеры меняют маршруты при обнаружении айсбергов».	Стратегическая
Лед (Стамуха)	→ взаимодействует →	Фауна	«Стамухи (нагромождения льда) являются средой обитания тюленей».	Экологическая

Таки образом мы формируем в ГИС геообъект сначала в образе пустого экземпляра объекта в соответствующей категории, затем по мере наполнения данных заполняется формуляр объекта в БД и БЗ конкретизируя связи экземпляра, к которому уже применимы морфизмы и межкатегорийные функторы, позволяющие системе включать объект в моделях при решении различных задач.

3.3. Модели геопространств

Опираясь на теоретико-множественный подход с использованием метрических и топологических свойств объектов, отношений и операций, формируются группы моделей геопространств, в которую входят модели геоинформационного пространства, геофункционального пространства,

анаморфированного геопространства и абстрактного функционального пространства. Для каждой из приведенные моделей геопространств доступно информационное пространство из предложенных категорий. Рассмотрим моделей геопространств подробнее.

3.3.1. Модель геоинформационного пространства

Геоинформационное пространство (ГИП) обеспечивает представление расположения объектов пространства и их структурных связей. То есть, геоинформационное пространство непосредственно определяет пространственную форму для данных обстановки и категорий управления. При построении геоинформационного пространства используются традиционные подходы геоинформатики при описании собственного пространства объектов. Геоинформационное пространство фиксирует и передает расположение и связи геообъектов. Оно отображает пространство и содержание объектов обстановки в регионе и служит для представления структуры и состояния территориальной системы функциональной активности, анализа связей и отношений между элементами геоситуации в фиксированный момент времени.

Формально модель ГИП (*GISp*) представляет собой множество геообъектов со структурой. Структура пространства задается отношениями и операциями над множеством геообъектов:

$$\begin{aligned} GISp &= (GOB, Rat, Op), \\ GOB &\subset (Rm, Sn), m = 2 \div 3, n \gg m, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где: *GOB* – геообъекты; *Rat* – отношения; *Op* – операции; *Rm* – физическое (евклидово) пространство; *Sn* – многомерное пространство признаков; *n*, *m* – размерность пространства.

$$OSpGO: GOB \rightarrow Rm, \quad (3.2)$$

где *OSpGO* – собственное пространство геообъекта (ГО), характеризующее его геометрическую протяженность, конфигурацию, форму и ориентацию ГО в

пространстве. $OSpGO$ задает пределы распространения содержания ГО в геопространстве.

Земная поверхность по определению принадлежит ГИП, то есть

$$ЗП \subset Rm, \quad (3.3)$$

где ЗП – земная поверхность.

Все геообъекты ГИП связаны с ЗП:

$$\forall GOB \subset GISp \exists Pr: GOB \rightarrow ЗП, \quad (3.4)$$

где Pr – некоторое отображение (проекция) ГО на земную поверхность.

Объекты геопространства включают природные, антропогенные и социальные элементы геосферы с их уникальными свойствами и взаимосвязями. ГО в пространстве задается следующими параметрами:

- обязательная пространственная привязка ГО к ЗП через координатную систему;
- атрибутами (собственным многомерным подпространством признаков), описывающим сущностные тематические, временные, пространственные и непространственные свойства объекта (наименование, значение глубины, высоты, длины, объема, скорости, цвет, состав и др.). Именно атрибуты ГО оцениваются и сравниваются с помощью различных шкал "измерений" (отношений, интервалов, номиналов и т.д.);
- геометрией, определяющей их форму, протяжённость, размерность, границы и ориентацию в пространстве;
- динамическими параметрами, к которым относятся как изменение положения, так и изменение формы и параметрических свойств, например, плотность, температура, прозрачность и т.д.

Взаимодействие геообъектов в значительной мере определяется их взаимным расположением, которое задаётся абсолютными и относительными координатами в конкретной системе отсчёта.

В общем случае форма может быть отнесена к пространственным атрибутам (собственному пространству) ГО. Но здесь она выделяется в самостоятельную категорию для упрощения территориального выражения многомерного подпространства признаков ГО в ограниченном 2 ÷ 3-х мерном физическом подпространстве геосреды.

В случае Rm , где $m = 2$ ГИП отображается в территорию:

$$T: GISp \rightarrow (R^2, S_n) \quad (3.5)$$

где: T – территория; m – размерность физического пространства.

Геообъекты (рисунок 46) характеризуются собственным пространством и атрибутами (содержательными характеристиками):

$$GOB = (SpGO, Atrib) \quad (3.6)$$

где: $SpGO$ – собственное пространство ГО; $Atrib$ – содержательные характеристики ГО.

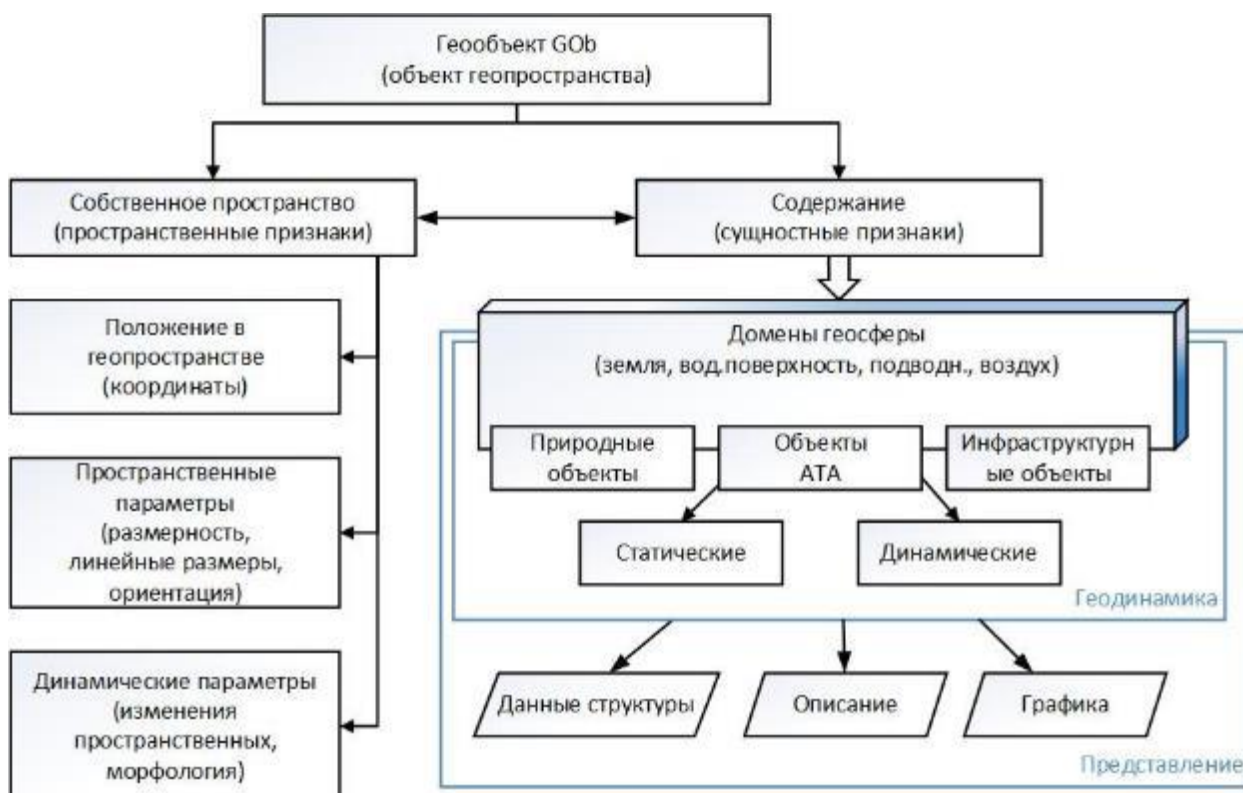


Рисунок 46 — Структура геообъекта

$$SpGO \subset R_m, \quad SpGO = \langle DislC, DForm, DPar \rangle \quad (3.7)$$

где: $DislC$ – координаты центроида ГО; $DForm$ – пространственные линейные параметры ГО; $DPar$ – динамические параметры центроида и скорости изменения пространственных параметров.

Координаты центроида определяются как геометрический центр фигуры в n -мерном евклидовом пространстве, что представляет собой среднее арифметическое координат положения всех точек фигуры. Для 2-х мерного пространства это:

$$DislC = \left(\begin{cases} a_c = \frac{\sum_1^n a_n \vec{x}}{n} \\ b_c = \frac{\sum_1^n b_n \vec{y}}{n} \mid n \geq 1, m \geq 2 \\ \dots \end{cases} \right)^m, \quad (3.8)$$

где n -число вершин или пределов параметрической модели ГО; m -размерность евклидового пространства **Rm** ; a, b – координаты вершин; x, y – попарно ортогональные вектора единичной нормы.

Форма ГО задается географическими границами (контуром), а также количественными характеристиками этого пространства – ориентация, длина, ширина, характер границы и т.д.:

$$DForm = \{ HB, Or, Cl \} \quad (3.9)$$

где: HB – вектора пространственных измерений объекта в m -мерном пространстве; Or – ориентация или оператор перехода; Cl – целостность объекта.

Целостность ГО определяет единство его структурных элементов и устойчивость внутренних связей, обеспечивающие сохранение ключевых свойств при внешних воздействиях.

Содержательные параметры ГО принадлежат многомерному пространству признаков ($Atrib \subset S_n$) и характеризуют сущностные параметры собственного пространства. Многомерное пространство признаков S_n

является подмножеством признаков категории векторов состояния геообъектов V , выбор которых определяется исходя из индекса.

$$S_n \subseteq V = Vect(G) \quad (3.10)$$

С помощью отношений структурируют геопространство, позволяя проводить геомеологические преобразования. Они формируют каркас для операций, выявляющих взаимосвязи объектов и обеспечивающих непрерывные преобразования.

3.3.2. Отношения между объектами геопространств

В геопространстве между объектами выделяются отношения объективные и субъективные. Группу объективных составляют отношения пространственной и содержательной упорядоченности. Субъективными являются различные оценочные отношения (таблица 12).

Таблица 18 – Отношения над объектами пространств

Отношения						
Объективные					Субъективные – оценки	
Пространственного упорядочения (ОПУ)		Содержательного упорядочения (ОСУ)				
Базовые	Производные	Таксономические	Организационные	Функциональные	Пространства	Содержания
Местоположение	Не соприкасаться	Класс	Руководства	перемещения	Оценка геосистем	Оценка влияния содержания объектов на параметры их собственного пространства
Удаленность	Не находиться в, на	Род	Подчинения	использования		
Досыгаемость	Находиться над, под	Вид	Разрешения	применения		
Граничность	Находиться снаружи	Генетические	Запрещения	воздействия		
Соприкосновение	Быть напротив	Порождения	Согласования	слежения	Оценка собственного пространства объектов, явлений	
Совмещение	Находиться выше	Следования	Утверждения	наблюдения		
Контактирование	Быть около	Независимости	Взаимодействия	уклонения		
Включение	Находиться слева,..., в	Одномоментности	Таксономическое	преодоления		
Изолированность	Быть элементом в ряду	Предшествования	Обеспечения	противодействия		

Отношения пространственной упорядоченности являются определяющими для геопространства. Они обуславливают территориальную структуру физического подпространства для выражения содержания

геообъектов и геообразований и служат основой пространственного анализа геоситуации.

$$Rat = \{RSp, Pr\} \quad (3.11)$$

где: RSp – отношения пространственной упорядоченности; Pr – отношения (предикаты) содержательной упорядоченности.

Отношения содержательной упорядоченности в концептуальной модели определяются множеством двухмерных пространств признаков, и играют подчиненную по отношению к территории роль и служат для тематической характеристики горизонтальной составляющей геопространства.

Объекты геопространства связаны множеством содержательных отношений, которые (на данном этапе) достаточно задать параметрической тройкой (A, B, P) , где P – подмножество декартова произведения множеств объектов A и B , $P \subset A \times B$.

Между объектами пространства выделяются следующие виды содержательных связей: таксономические, организационные, функциональные. В свою очередь виды связей могут иметь синергетические подпараметры: сильные или слабые; устойчивые или неустойчивые; статические или динамические; закономерные или случайные; положительные или отрицательные; прямые или обратные; непосредственные или опосредованные; постоянные или временные; природные или социальные; организационные или технические; внутренние или внешние; четкие или размытые смешанные и др.

Связи локализации (местоположения, взаимного размещения) между ГО являются источниками взаимных ограничений, налагаемых ими на размещение друг друга. Чем жестче такое ограничение, тем большее значение придается соответствующей связи. Отрицательное значение связи указывает на взаимное территориальное «отталкивание» объектов, а положительное – на их «гравитацию». Жесткость налагаемых на размещение ГО ограничений и соответствующие значения связей локализации непосредственно

несоизмеримы. Может быть выполнена только их оценка путем исчисления колебаний в эффективности функционирования одного объекта при изменении пунктов локализации другого.

Различаются непосредственные связи локализации по обмену результатами некоторой активности или деятельности и опосредованные связи, возникающие вследствие взаимодействия ГО с другими социальными или природными образованиями.

К числу базовых отношений пространственной упорядоченности (ОПУ) относятся отношения расстояния, местоположения, территориального распределения, граничности, включения и др. Например, условие изолированности α , геообъектов A_i, A_j будет записывать таким образом:

$$(A_i \alpha A_j) \Leftrightarrow A_i \cap A_j = \emptyset.$$

Отношение σ – контактирование ГО:

$$(A_i \sigma A_j) \Leftrightarrow [(A_i \cap A_j) = p],$$

где p – поверхность в R^3 или линия в R^2 .

Отношение β – ГО соприкасаются по поверхностям (линиям, точкам):

$$(A_i \beta A_j) \Leftrightarrow (A_i \cap A_j \neq \emptyset) \& (V(A_i \cap A_j) = 0),$$

где V – объем (площадь).

Отношение γ – совместимость (ГО имеют общую часть):

$$(A_i \gamma A_j) \Leftrightarrow \{[(A_i \cap A_j) \neq \emptyset] \& [V(A_i \cap A_j) \neq 0]\}.$$

Отношение η – вмещение (A_i вмещает A_j):

$$(A_i \eta A_j) \Leftrightarrow \{\exists p: [(p \subset A_i) \& (p \not\subset A_j) \& (A_j \subset Dp)]\},$$

где Dp – область, ограниченная поверхностью p .

Расстояние наиболее часто применяется для характеристики метрических свойств геопространства, хотя, как любое евклидово пространство, оно допускает множественность метрических отношений.

Метрика в форме расстояния на ЗП:

$$\rho_{Spheroid} = S_{\Gamma} = \frac{M_{cp} \cdot \Delta\varphi}{\cos A_{cp}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\lambda^2}{24} \cdot (2 + \sin^2 \varphi_{cp}) \right)^{-1}, \quad (3.12)$$

где: S_{Γ} - длина геодезической линии; $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$; $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$; φ, λ - географические широта и долгота; A_{cp} – среднее значение азимута, выбранное по средней широте $\varphi_{cp} = (\varphi_2 - \varphi_1)/2$; M_{cp} – среднее значение главного меридианного радиуса кривизны земного эллипсоида (сфероида) [97].

Это расстояние удовлетворяет аксиомам метрики. Но никакая метрика вне конкретной задачи не имеет приоритета. Одна из методических проблем метрического ГП – разработка содержательной географической интерпретации для разных формальных метрик. Наиболее общей для метрического пространства является метрика Минковского:

$$Dik = \left[\sum_t (x_{jt} - x_{kt})^p \right]^{1/p}, \quad (3.13)$$

где: x_{jt}, x_{kt} - t -я координата j -го и k -го объектов; p – константа Минковского, является наиболее универсальной для геопространства.

При $p = 2$ получается евклидова метрика, при $p = 1$ – метрика city-blok или манхэттенское расстояние (движение без диагоналей в двумерном случае). При p стремящемся к бесконечности получается метрика доминирования:

$$d_{ik} = \max_t |x_{jt} - x_{kt}| \quad (3.14)$$

Евклидова метрика хорошо аппроксимирует расстояние в пространстве, где действует совокупность «равноценных» признаков, которые проявляются взаимосвязано, совокупно.

Метрика доминирования подходит для пространств, в которых явно доминирует (или по каким-либо условиям элиминирована) одна размерность.

Взвешенное евклидово расстояние:

$$d_{ij} = \left[\sum_{s=1}^m w^{(s)} (x_i^{(s)} - x_j^{(s)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \sum_{s=1}^m w^{(s)} = 1 \quad (3.15)$$

позволяет ранжировать и учитывать значения тех или иных содержательных параметров МПП.

Для многих частных метрик еще не установлена их содержательная трактовка и не определена возможность их использования в пространственных приложениях (анализе исследованиях), но их введение в систему ГИС с применением категорий концептуальной модели может быть значительно упрощен, так как архитектура такой ГИС не требует существенных изменений структуры данных.

Для многомерных метрических пространств главной проблемой является свертка размерности пространства (в первую очередь многомерного пространства содержания) при условии максимального сохранения его информативности (целостности модельных представлений). Идея подхода – в некоторой группировке (факторизации) метрических (содержательных) признаков по характеру их вариации или другим статистическим (содержательным) параметрам. Группировка может осуществляться методами факторного и компонентного анализа. Полученные группы признаков (факторы, главные компоненты) в обобщенном виде характеризуют структуру метрического пространства, которая ни в коей мере не увязана с топологией данного геопространства. Модели работают с точностью «до перемешивания», т.е. безотносительно к позиционным (пространственным) свойствам исследуемых ГО.

Условно метрическое (квазиметрическое) геопространство – оно образовано множеством ГО, для которых определены не метрические (строковые) отношения. Наиболее общей условной «метрикой» для анализа в таком случае служит обобщенное расстояние Хэмминга, которое определяется как число мест, несовпадающих признаков для ГО a и b категории G

$$\rho(a,b)=\sum_{i=1}^m(a_i-b_i), a_i-b_i=\begin{cases} 0, a_i=b_i \\ 1, a_i\neq b_i \end{cases} \quad (3.16)$$

Эта мера является наиболее общей и универсальной, используется для количественных и качественных признаков + для дискретной топологии ГП.

Для получения относительных оценок «расстояния» достаточно значение ρ сопоставить с максимально возможным (для данной пары объектов).

Отношения территориальной упорядоченности характеризуются следующими моментами.

А. Характер взаимодействия ГО в значительной мере зависит от их пространственного взаимоположения, взаимоотношения. Пространственные связи во многих приложениях отождествляются понятием расстояния (удаленности). Расстояние указывает:

- на степень распространения территориального явления – размеры, площадь, ориентация и др.;
- на силу связи между территориальными явлениями - среднее расстояние между ГО, расстояние ближайшего соседства, плотность или концентрация объектов. Чем ближе объекты находятся друг к другу, тем интенсивнее их пространственное взаимодействие, обусловливаемое в первую очередь взаимным перемещением.

Расстояние является базовой категорией, через которую во многом определяются другие пространственные отношения – граничность, удаленность, взаимодействие и др.

Б. Пространственные связи сопряжены с перемещением по территории, которое определяет взаимодействие, циркуляцию, кругооборот, потоки и другие динамические процессы в регионе. Расстояние и связанная с ним конфигурация явлений на ЗП, с одной стороны определяет движение на территории (в пространстве) с точки зрения удаленности объектов и наличия в регионе препятствий их перемещению. А с другой стороны, движение по

территории путем переноса материи меняет конфигурацию объектов на ЗП, т.е. расстояние, приводит к понятию функционального расстояния.

То есть, движение определяет конфигурацию объектов на ЗП, а конфигурация определяет движение по территории.

К группе содержательных относятся и причинно-следственные связи между объектами; организационные, определяющие функционально-содержательную иерархию геообъектов; функциональные, характеризующие смысловую активность и взаимодействие объектов в регионе; смешанные и др.

Метрические и топологические отношения пространственной и содержательной упорядоченности позволяют выделять основные геоструктуры ГП – георегионы и геосистемы на базе топологических территориальных структур, взаимного размещения точек, смежности, разнокачественных ареалов и др. (рисунок 47).



Рисунок 47 —Содержательная упорядоченность геопространства

Операция на множестве ГО – частный случай отношения. Операции позволяют определять объекты и связи между объектами (группы операций определения ГО, определения пространственных связей, определения содержательных связей и т.д.), а также преобразовывать объекты таким образом, чтобы они осуществляли переход из одного пространства в другое (операции трансформирования, анаморфирования, абстрагирования, генерализации, определения динамики и др.).

Если отношения определяют связи объектов внутри одного пространства, то геоинформационные операции обеспечивают изменение свойств объектов, их отображение в другие пространства. Например, к операциям, позволяющим осуществлять переход между геопространствами, относятся: абстрагирования собственного пространства геообъектов; обобщения многомерного пространства содержательных признаков геообъектов; выравнивания территориальной плотности распределения объектов (анаморфирования); определения системной динамики геообъектов и другие.

Отношения между рассматриваемыми геопространствами проиллюстрированы рисунком 48.

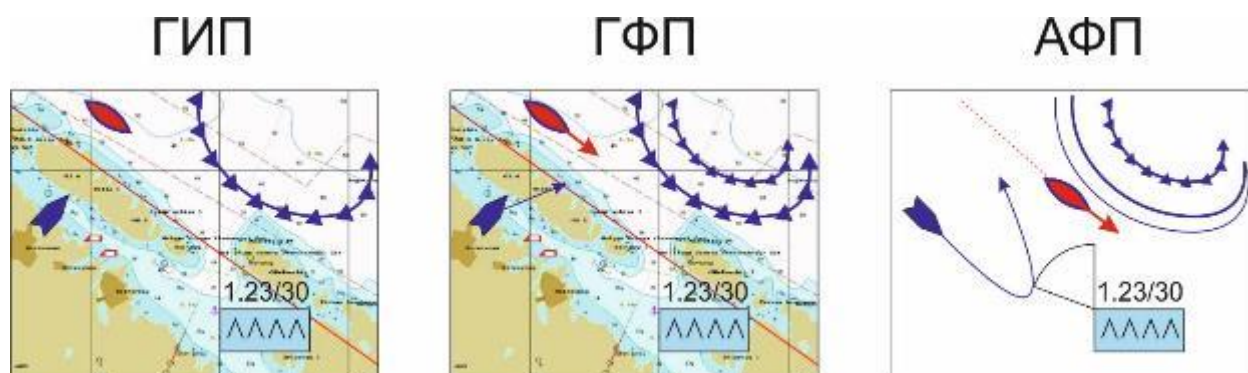


Рисунок 48 — Отношения между геопространствами

Геоинформационное пространство (ГИП) фиксирует и передает расположение и связи геообъектов. Оно отображает пространство и содержание объектов обстановки в регионе и служит для представления структуры и состояния территориальной системы функциональной активности, анализа связей и отношений между элементами геоситуации в фиксированный момент времени.

Но реальная территориальная обстановка является динамической системой и требует адекватного представления меняющихся во времени и пространстве процессов и явлений. Для отображения динамики и развития территориальных систем функциональной активности служит

геофункциональное пространство, опирающееся на категорию геоситуации концептуальной модели АТА.

3.3.3. Модель геофункционального пространства

Геофункциональное пространство (ГФП) или пространство функциональной активности – это геопространство, в котором действуют территориально определенные функциональные объекты. Управление этими объектами связано с анализом их территориальной и содержательной динамики и прогнозированием развития геоситуации. Это пространство является:

- геопространством, отображающим положение территориальных объектов относительно ЗП, их конфигурацию и содержание;
- пространством, отображающим динамику функциональных территориальных объектов и геоситуации;
- пространством, в котором наряду с другими метриками вводится метрика в форме функционального расстояния на ЗП.

Геофункциональное пространство за счет геоинформационных операций определения пространственной и содержательной динамики объектов обстановки обеспечивает отображение динамики ситуации. ГФП обеспечивает преодоление несоответствия между динамическим характером обстановки и его статичным отображением в геоинформационном пространстве.

Геофункциональное пространство включает:

$$GFSp = (GOb, Rat, Op, T), \quad (3.17)$$

где: *Gob* – геообъекты; *Rat* – отношения пространственной и содержательной упорядоченности (ОПУ и ОСУ); *Op* – операции (функции, действия); *T* – время.

Время – это новый по отношению к ГИП параметр, который входит в характеристику всех элементов геофункционального пространства – собственного пространства геообъектов, многомерного пространства

признаков ГО, отношениям. Именно время сообщает операции качество функции или действия.

Операции над объектами ГФП – это:

- преобразования ГО, осуществляющие перемещение объектов в пространстве (по территории) с течением времени;
- преобразования ГО, отображающие взаимодействие ГО с другими объектами обстановки;
- отображения геоситуации в множество параметров функционирования системы территориальной активности (определение параметров функционирования ГО – определение динамики геообъектов, действий ТО).

Отображение системной динамики осуществляется методами:

- физического моделирования перемещения антропогенных и природных ГО по законам линейной алгебры в соотношениях скорости, времени и положения $S = V \cdot t$, где: S – расстояние; V – скорость; t – время;
- аналитического, диффузионного, гравитационного и др. моделирования природных и социальных процессов.

$$Op = (Movm, Func, DA), \quad (3.18)$$

где: $Movm$ – операции перемещения; $Func$ – операции функционирования; DA – операции определения системной динамики объектов и процессов.

$$Movm = \{(\varphi_i, \lambda_i), K_i, V_i, H_i, \Delta K_i, \Delta V_i, \Delta H_i, t_i\} \quad (3.19)$$

где: (φ_i, λ_i) – координаты ГО; K_i, V_i, H_i – курс, скорость, высота (глубина) ГО; $\Delta K_i, \Delta V_i, \Delta H_i$ – дискретность изменения параметров движения ТО.

$$Func = \{UArm, t\}, \quad (3.20)$$

где: $UArm$ – параметры применения функциональных средств ТО.

$$UArm = \langle Arm, Par_{UArm}, Range \rangle, \quad (3.21)$$

где: Arm – множество видов и типов функциональных средств ГО; Par_{UArm} – параметры использования и действия функциональных средств ГО; $Range$ – зона влияния функциональных средств ГО.

Приведенные параметры функционирования ГО описывают его пространственную активность на макро-уровне представления, как обобщенной функциональной точки. Функции макро-уровня представления ГО являются обобщением соответствующих последовательностей его действий на микро-уровне представления.

В контексте теории категорий, операции над объектами есть суть морфизмов сохраняющих структуру. Если рассматривать судно как объект в транспортной системе, то морфизмы могут описывать различные процессы или преобразования, связанные с его функционированием.

- морфизм перемещения, описывает перемещение судна из одной точки (порта, причала) в другую;
- морфизм загрузки/разгрузки описывает процесс загрузки или разгрузки груза на судно;
- морфизм технического обслуживания описывает процесс технического обслуживания, ремонта и иного восстановления ресурсов судна;
- морфизм изменения состояния описывает изменение состояния судна, например, переход из состояния "в пути" в состояние "на стоянке".

Морфизмы позволяют формализовать и анализировать различные аспекты функционирования судна в рамках теории категорий. Они могут быть использованы для построения сложных моделей транспортных систем, где судно взаимодействует с портами, грузами, доками и другими объектами. Такой подход обеспечивает глубокое понимание структуры и динамики транспортных процессов, что способствует их оптимизации и управлению.

Следует отметить, что во всех представлениях территориальной активности ГФП фигурирует категория расстояния. Для малых значений в трех-мерном декартовом пространстве расстояние это разница между радиус-векторами двух точек:

$$\vec{a} = (x_1, y_1, z_1),$$

$$\vec{b} = (x_2, y_2, z_2),$$

$$d_{ab} = |\vec{b} - \vec{a}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3.22)$$

где a, b - радиус-вектора точек; d_{ab} – искомое расстояние между точками в декартовом пространстве.

Если для целей визуализации производится транспонирование ГФП в двух-мерную проекцию, например, плоскость карты, метрики которой является частью (совпадает по двум осям) с метрикой ГФП, то расстояния между точками проекции преобразовываются упрощенно путем исключения исчезающей координаты. В случаях, когда перемещение осуществляется по определенной поверхности при моделировании перемещения или функционирования ГО по локальной территории, искажения будут несущественными.

Однако в общем случае, при моделировании функциональной активности на ЗП или около нее использовать геодезические расстояния, что более соответствует реальному перемещению ГО, для чего рекомендуется пользоваться полноценными преобразованиями пространств с применением единого математического аппарата ко всем преобразованиям.

В различных практиках и в определенных условиях в географических науках используют множество различных систем координат, но наибольшее распространение при практическом использовании получили трёхмерные полярные и прямоугольные системы [98]. Довольно часто в ГИС приходится оперировать обеими системами, поэтому в качестве примера рассмотрим основные соотношения между этими системами координат (рисунок 49).

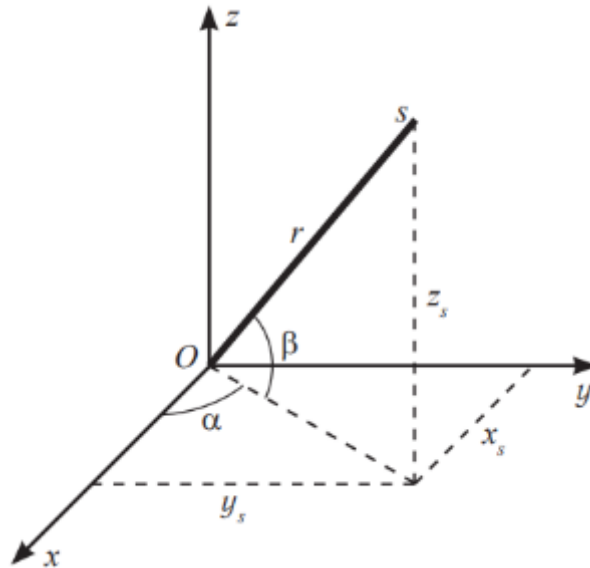


Рисунок 49 — Прямоугольные x_s, y_s, z_s и полярные r, α, β координаты точки s

Положение точки s в прямоугольной (декартовой) системе координат задаётся её проекциями x_s, y_s, z_s на соответствующие оси. Положение той же точки можно задать полярными координатами: r — модулем радиус-вектора точки s ; α — углом между осью Ox и проекцией радиус-вектора на основную плоскость; β — углом между основной плоскостью и радиус-вектором. Углы α и β в различных координатных системах имеют свои названия. Переход от полярных координат к прямоугольным координатам осуществляется по формулам

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}, \quad (3.23)$$

где l, m, n — направляющие косинусы радиус-вектора.

Обратный переход от прямоугольных координат к полярным координатам можно выполнить по формулам, вытекающим из прямого преобразования (3.24).

$$\begin{aligned}
\alpha &= \operatorname{arctg} \frac{y}{x} = \operatorname{arctg} \frac{m}{l}; \\
\beta &= \operatorname{arctg} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \operatorname{arctg} \frac{n}{\sqrt{l^2 + m^2}}; \\
r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Другой часто встречающейся задачей на эллипсоиде ЗП является расчет динамических параметров или преобразование координат посредством вращений. Пусть заданы координаты произвольного вектора $\vec{r}$ в системе координат $Ox_1y_1z_1$. Требуется преобразовать эти координаты в систему координат $Ox_2y_2z_2$, оси которой развёрнуты относительно первой системы, а начала систем координат совпадают. Разложение вектора по ортонормированным базисам в каждой из рассматриваемых систем координат можно представить в виде (3.25)

$$x_2 \vec{i}_2 + y_2 \vec{j}_2 + z_2 \vec{k}_2 = \vec{r} = x_1 \vec{i}_1 + y_1 \vec{j}_1 + z_1 \vec{k}_1, \tag{3.25}$$

или в матричной форме

$$\begin{pmatrix} \vec{i}_2 & \vec{j}_2 & \vec{k}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{i}_1 & \vec{j}_1 & \vec{k}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix},$$

учитывая, что произведение вектор столбца и вектор строки

$$\begin{pmatrix} \vec{i}_2 & \vec{j}_2 & \vec{k}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{j}_1 \\ \vec{k}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{3.26}$$

предыдущее выражение можно преобразовать к виду (3.27):

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{i}_2 \\ \vec{j}_2 \\ \vec{k}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i}_1 & \vec{j}_1 & \vec{k}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{i}_2 \vec{i}_1 & \vec{i}_2 \vec{j}_1 & \vec{i}_2 \vec{k}_1 \\ \vec{j}_2 \vec{i}_1 & \vec{j}_2 \vec{j}_1 & \vec{j}_2 \vec{k}_1 \\ \vec{k}_2 \vec{i}_1 & \vec{k}_2 \vec{j}_1 & \vec{k}_2 \vec{k}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, \tag{3.27}$$

или

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix},$$

где a_{ij} – параметры преобразования или направляющие косинусы оператора перехода.

Из выражения (3.23) и (3.27) следует, что для осуществления преобразования, нужно располагать девятью направляющими косинусами, которые получаются из независимых трех поворотов относительно осей x, y, z [98].

При повороте вокруг оси абсцисс ($i=1$) матрица вращения имеет вид

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (3.28)$$

При повороте вокруг оси ординат ($i=2$) матрица вращения имеет вид

$$R_2 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (3.29)$$

При повороте вокруг оси аппликат ($i=3$) матрица вращения имеет вид

$$R_3 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

Такого рода морфизмы ГО эффективно реализуются на базе предложенных моделей и математики линейных преобразований.

Движения евклидова пространства — это преобразования пространства на само себя, сохраняющие метрику (также называются изометриями пространства на само себя). Пример движения — параллельный перенос на вектор v , переводящий точку p в точку $p+v$. Нетрудно увидеть, что любое движение является композицией параллельного переноса и преобразования, сохраняющего неподвижной одну точку. Выбрав неподвижную точку за

начало координат, любое такое движение можно рассматривать как ортогональное преобразование. Ортогональные преобразования n -мерного евклидова пространства образуют группу. Выбрав в пространстве ортонормированный базис, эту группу можно представить как группу матриц размерности $n \times n$.

Перемещение на ПЗ определяется следующими моментами:

- происхождением (началом перемещения);
- местом назначения (окончанием перемещения);
- движущей силой – фактором, источником перемещения (прикладываемое усилие, разность потенциалов, организационное воздействие и т.д.);
- силами "трения", препятствующими перемещению по ЗП.

Способность ГО перемещаться по кратчайшей прямой на реальной Земле ограничивается различными препятствиями, барьерами, преградами и сопротивлениями. Для учета увеличения геодезического расстояния при перемещении в реальных условиях для ГФП вводится функциональное расстояние ρ_f . Оно определяется следующим образом:

строится маршрут обхода абсолютных препятствий двухградиентным методом [104]:

$$Root = \{(x_i, y_i)\}, i = 1, \dots, n, \quad (3.31)$$

где: (x_i, y_i) - точки маршрута, n - количество участков маршрута;

2) определяется ρ_{Γ_i} (геодезическая метрика) для каждого участка маршрута;

3) для маршрута Root определяется функциональное расстояние

$$\rho_f = f(\text{Res}(S)) \quad (3.32)$$

где $\text{Res}(S)$ – ресурс (время, энергия, стоимость и т.д.):

$$\rho_f = \sum_{i=1}^n \rho_{\Gamma_i} \cdot \frac{\rho_{fr}}{\rho} \quad (3.33)$$

где: ρ_{fr} – ресурсная длина участка; ρ – ресурсная длина участка без препятствий; n – количество участков маршрута.

С помощью функционального расстояния пространственные процессы в ГФП:

$$SPr = \langle S, F, Root, Movm \rangle \quad (3.34)$$

где: S, F – начало, конец перемещения; $Root$ – маршруты перемещения ГО или направления распространения территориальных процессов получают представление, более приближенное к реальному.

Использование ГФП позволяет повышать активность ГИ в АСУ за счет динамического прогнозирования развития геоситуации и ее оценок.

Использование функциональной метрики позволяет учитывать неоднородность пространства к перемещению, но ведет к усложнению территориального анализа и выполнения расчетов. Для преодоления этого противоречия могут быть предприняты меры к построению изотропного пространства относительно препятствий (сопротивлений, импедансов) и других параметров территории. Одним из таких подходов является выравнивание плотности распределения территориального параметра или анаморфирования. Преобразование (операция) анаморфирования переводит геопространство в изотропную поверхность (или объем), теряющую изоморфное соответствие географической оболочке Земли, но обеспечивающее равноправность всех направлений исследования по установленному параметру.

3.3.4. Модель абстрактного функционального пространства

Абстрактное функциональное пространство (АФП) отличается тем, что его объекты не имеют географической привязки к земной поверхности. Это достигается с помощью операций над объектами ГИП, к которым относятся морфизмы содержательного обобщения, упрощение контура, переносы,

развороты, масштабирование и пр. В общем случае переход в АФП *AbstrS* (рисунок 48) обозначается:

$$\begin{aligned} \text{AbstrSp} &= (\text{Obj}, \text{Rat}), \text{Obj} \subset \text{R2}, \text{Obj} \not\subset \text{ЗП} (\text{ЗП} \not\subset \text{AbstrSp}), \\ \{\text{Refli}\}, i &= 1, \dots, n: \{ \text{GOb} \} \rightarrow \{ \text{Obj} \}, \\ \text{GOb} &\subset \text{ЗП}, \text{Obj} \not\subset \text{ЗП} \end{aligned} \quad (3.35)$$

где: $\{\text{Refli}\}, i = 1, \dots, n$ – геоинформационные операции $\Leftrightarrow$ {абстрагирование R_m , обобщение S_n } $\Leftrightarrow$ {генерализация; развороты; параллельные переносы; изменение (понижение) размерности пространства (ГО); символизация; обобщение; схематизация; проекционные преобразования}, ЗП – земная поверхность, *Obj* - объекты АФП; *GOb* - геообъекты.

Переход в АФП связан с потерей геодезического подобия отображаемой геоситуации с реальной Землей, но сохраняет топологическое подобие ситуаций, подразумевающее одинаковый порядок расположения и следования объектов АФП и ГИП.

Значение АФП для активности ГИП состоит в том, что географическая информация, абстрагированная от собственной географической конкретики, дает возможность получения первых приближений решения через связь с множеством нетерриториальных абстрактных рекомендаций.

Разработанный комплекс моделей геопространств отличается направленностью на адекватное потребностям управления территориального отображения многомерного пространства содержания объектов обстановки, что обеспечивает активность ГИ на этапах управления. Модели геопространств обеспечивают:

- адекватное отображение геоситуации (объекты, явления, их территориальные взаимосвязи) в целом, ее пространственно-временного изменения, а также собственного пространства и содержания ГО в отдельности;

- расширение СПГО для территориального выражения содержательных характеристик геообъектов;
- территориальное выделение особенностей, параметров и факторов геоситуации в зависимости от существа решаемых задач и этапов управления;
- перераспределение (изменение) метрических и топологических свойств ГП, исходя из потребностей территориального анализа и этапов управления.

Как было отмечено ГО, это ключевые элементы геопространства, объединяющие природные и социальные компоненты. Обычно они входят в состав более крупных геосистем и георегионов. Пространственные и содержательные связи между ними формируют базовые структуры для анализа территориальных систем, отношений пространственной и содержательной упорядоченности.

На основе введенных отношений пространственной упорядоченности, применяемых к различным топологическим пространственным структурам, определяются два основных вида территориальных структур геопространства – георегион и геосистема (рисунок 47). Георегион структурирует ГП, агрегируя содержательно однородные объекты с помощью отношений пространственной упорядоченности. Геосистема структурирует ГП, объединяя объекты и регионы ГП по отношениям содержательной упорядоченности.

Георегион (ГР) представляет совокупность территории и расположенных на ней геообъектов. Структура георегиона определяется ОПУ – отношением территориального распределения объектов по поверхности Земли. Выделение категории георегиона в самостоятельную структуру (элемент) геопространства обуславливается действием закона единства географической среды, который устанавливает обязательную взаимосвязь объектов на ЗП в силу их общей принадлежности территории. Наличие обязательной взаимосвязи территориальных объектов определяет их пространственную упорядоченность на ЗП [48].

Георегион выступает в двух пространственных ипостасях:

- как составная часть пространства (территории) функциональной активности;
- как системообразующая категория для геообъектов по отношению их пространственного распределения в регионе.

В этом качестве георегион объединяет и упорядочивает однородные ГО в соответствии с их пространственным распределением (размещением) по территории:

$$GReg = (GOB, Ratdistr) \quad (3.36)$$

где Rat_{distr} – отношение пространственного распределения (размещения) однородных объектов по территории, задаваемое на множестве геообъектов GOB .

Георегион является территориальной топологической структурой взаимного размещения точек или элементов на земной поверхности. Георегион объединяет объекты с помощью отношений пространственной упорядоченности – территориального распределения и размещения.

$$GReg = (GOB, RatGR), GOB \subset (R^2, S(k)), S(k) \subset S_n \quad (3.37)$$

где: $S^{(k)}$ – подпространство признаков класса (типа) GOB , Rat_{GR} – ОПУ.

Дискретное представление ГР - структура взаимного размещения точек P_i геопространства:

$$GReg = \{P_i, i = 1, \dots, n\},$$

или граф соседства (одного порядка):

$$G = \langle V, U \rangle \in RatGR \quad (3.38)$$

где: V – вершины (геообъекты); U – ребра графа; Rat_{GR} – ОПУ (отношения пространственного упорядочения).

Континуальное представление ГР - семейство изолиний I_i :

$$GReg = \{I_i, i = 1, \dots, n\} \quad (3.39)$$

Георегион определяет район или ареал территориальной локализации распространения явления относительно ЗП может быть представлен в виде территориальной топологической структуры (рисунок 50).

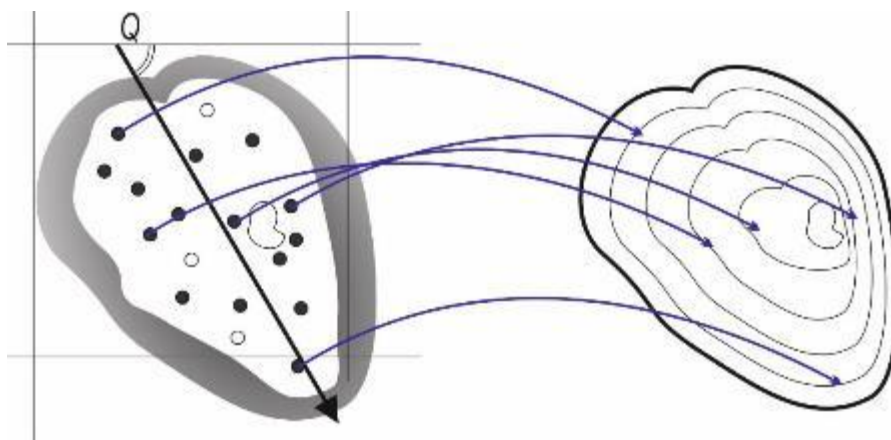


Рисунок 50 — Представление георегиона в виде территориальной топологической структуры взаимного размещения точек (слева) и территориальной топологической структуры скалярных полей (изолиний)

Георегион характеризуется такими метрическими и топологическими параметрами $GReg | Par$, как площадь, ориентация, линейные размеры, извилистость контура, плотность, изотропность, величина ближайшего соседства, целостность и так далее:

$$GReg | Par = \{(H, B, Nr, Orient, Den, Length, Sq, V, Curv), (Cl, MD, Sm, NND)\} \quad (3.35)$$

где: метрические характеристики: H, B , - длина и ширина георегиона; Nr - ; $Orient$ - ориентация; Den - плотность ГО в георегионе; $Length$ - длина контура; Sq - площадь ГР; V – объемная характеристика георегиона (для трехмерного анализа); $Curv$ - извилистость контура; топологические характеристики: Cl , - целостность; MD – среднее расстояние между ГО; Sm - смежность; NND – расстояние ближайшего соседства.

$$Orient = tgQ, \quad (3.36)$$

где Q - угол наклона главной оси георегиона (рисунок 50).

$$Den = n / Sq, \quad (3.37)$$

где: n- количество объектов в ГР.

$$Length = \sum_{i=1}^n d_i, \quad (3.38)$$

где: для плоскости:

$$d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (3.39)$$

где: x_i, y_i – координаты ГО на плоскости;

для сфероиды:

$$d_i = S_{\Gamma}((\varphi_i + 1, \lambda_i + 1), (\varphi_i, \lambda_i)), \quad (3.40)$$

где S_{Γ} – длина геодезической линии на земном сфероиде между точками на ЗП $(\varphi_{i+1}, \lambda_{i+1})$ и (φ_i, λ_i) .

Извилистость контура обычно выражается через отношение длины кривой (контура) к длине прямой, соединяющей начало и конец участка контура:

$$Curv = Length / D12 \quad (3.41)$$

где для сфероиды:

$$D12 = S_{\Gamma}((\varphi_1, \lambda_1), (\varphi_2, \lambda_2)) \quad (3.42)$$

или для плоскости:

$$D12 = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (3.43)$$

По-другому извилистость контура определяется через соотношение длины контура ГР и его площади:

$$Curv = Length / Sq \quad (3.44)$$

Целостность ГР выражается через соотношение площади ГР и площади "дырок" в ГР:

$$Cl = \Sigma SHole / Sq \quad (3.45)$$

где $\Sigma SHole$ – суммарная площадь "дыр" в ГР.

Пространственные распределения являются интегральной характеристикой:

- размещения объектов по территории;
- удаленности между ГО (концентрация или рассеянность)
- соединенности или бессвязности объектов в пределах заключающего их пространства;
- связи геообъектов с общим размером занимаемой ими области.

Основными типами пространственных распределений являются:

- а) регулярное (равномерное) распределение;
- б) случайное распределение;
- а) сгруппированное распределение: высокой плотности; разреженное.

По отношению связи (зависимости) с другими объектами геораспределения могут быть:

- одиночными (несвязанными с другими объектами или явлениями);
- пространственно коррелированными.

Простейшей мерой точечного распределения является плотность точек. Это – мера компактности точек.

Для реального мира равномерное распределение не характерно. Это нечто искусственное, антропогенное. Цель моделирования равномерности (неравномерности) распределения – выявление неравномерности, далее - выявление причин, источников этой неравномерности.

Для проверки равномерности распределения ГФП может быть использован относительно простой статистический показатель χ^2 (хи-квадрат):

$$\chi^2 = \sum_i [(Q - E) / E] \quad (3.46)$$

где: Q – наблюдаемое число объектов в i-том квадрате ГР; E - ожидаемое число объектов в i-том квадрате ГР; i – число квадратов в ГР. Чем больше значение χ^2 , тем ниже равномерность распределения объектов в ГР.

Кроме плотности характеристик территориального распределения являются расположение, формы распределений, создаваемые группами регионов, которые могут объяснить причины соответствующих расположений, а также концентрация ГО [105].

Концентрация объектов имеет ведущее значение для характеристики ГР, концентрации потенциала его функциональности или явления. Наращивание концентрации может осуществляться:

- увеличением количества функциональных объектов в ГР;
- уменьшением пространственной протяженности ГР.

Из анализа пространственной концентрации следует ряд закономерностей для концентрации:

- площадь георегиона находится в определенной связи с его формой (очертанием);
- при увеличении площади георегиона упрощаются его геометрические формы (очертание);
- концентрация связана с перемещением по территории;
- площадь есть выражение динамического равновесия системы территориальной активности.

Георегиональные исследования показывают оригинальность и важность категории ГР для понимания процессов территориальной активности и целесообразность использования в геоструктурных представлениях категорий и процессов управления в АСУ.

Если георегион определяет первичное структурирование территории по распределению однородных ГО на ЗП, то геосистема упорядочивает пространство (функц активности), агрегируя содержательно разнородные элементы ГП.

Геосистема агрегирует ГО и ГР по отношениям содержательной упорядоченности (рисунок 22). Геосистема представляет территориальную топологическую структуру разнокачественных ареалов. Геосистема наряду с параметрами содержательных связей характеризуется взаимным

расположением, встречаемостью, формой границ, значимостью и другими территориальными показателями составляющих ее ареалов.

Общность структуры разнокачественных ареалов состоит в их топологической инвариантности геометрическим параметрам элементов ГС. При определенных соотношениях геометрических размеров ареала он универсальным образом отображает базовые геометрические примитивы пространства:

$$l/s \rightarrow 0 \Rightarrow (\bullet), \quad l/s > \varepsilon \Rightarrow Area, \quad l \gg s \Rightarrow Line \quad (3.47)$$

где: l – «высота»; s – «ширина» ареала; $(\bullet)$ – точка; $\varepsilon > 0$ – константа; $Area$ – ареал (покрытие, регион); $Line$ – линия.

Геосистема включает два основных понятия:

- родовое понятие "система", т.е. совокупность элементов, находящихся в отношениях связи и образующих определенную содержательную целостность, единство элементов и отношений;
- видовое понятие территориальности, собственно географическую сторону определения – указание на признак региональности (пространственности).

Эти качества выражаются указанием:

- на отношение содержательной упорядоченности, организованность элементов системы;
- на принадлежность к ПЗ, географической оболочки Земли.

Формально (в терминах родового понятия системы) геосистема (GS) [82] определяется как множество пространственных элементов (m), объединенных содержательным системообразующим отношением (R):

$$GS = [R \{m\}] \text{ п.} \quad (3.48)$$

В терминах геоструктур ГС определяется как:

$$GS = (Obj, RSC), \quad Obj = \{ GOb, GRg \}, \quad (3.49)$$

где: GOb , - геообъект; GRg – георегион; RSC – отношения содержательной упорядоченности в ГП.

Территориальное моделирование геосистем включает не только выявление статистических связей между объектами, но и создание синтетических карт [95] для анализа пространственных структур, анализ которых позволяет выявлять территориальные образования:

- с сильными (возможно, системообразующими) или слабыми (второстепенными) связями;
- прямыми или опосредованными зависимостями;
- оценивать знак (прямые или обратные) связей;
- показывать их пространственное варьирование.

Описания связей объектов в территориальных системах выполняется с использованием агрегативных, корреляционных, информационных моделей взаимосвязей ГО [105] и других региональных моделей [106,107]:

- для дифференцирования территории и последующего агрегирования объектов в классы и виды служат модели классификации;
- информационные модели применяются для определения существенности взаимосвязи между геоявлениями;
- для выявления множественных связей используются корреляционные модели [82,108].

На содержательно-географическом уровне геосистема определяется как пространственно организованное взаимодействие природных и социальных компонентов, формирующее целостные территориальные структуры территориальной активности.

Геосистема — пространственно организованное взаимодействие природных и социальных компонентов, формирующее целостные территориальные структуры (георегионы, районы).

Комплекс геоструктурных моделей отличается базированием на единую систему топологических структур геопространства, что обеспечивает общность тематических геопредставлений территориальной активности, а также взаимосвязь топологических и метрических свойств геопространств.

Совокупность геообъектов, георегионов и геосистем обеспечивает единое структурное представление оперативно-тактической ситуации в ГИП.

Модели ГО позволяют адекватно описывать и отображать: положение и конфигурацию точечных, линейных и площадных объектов; структуру сложных объектов – центроидов, сетей, графов. Выполнять многочисленные пространственные преобразования: переносы (сдвиги); развороты; масштабирование; буферизацию; построение окрестностей; отбор и обобщение ГИ; упрощение конфигурации (формы) объектов и др.

Модели ГР корректно отображают: положение, конфигурацию и поверхность районов функционирования ТО; потенциальные взаимодействия между ГО в регионе; плотность территориального распределения содержательных параметров ГО; определение динамики пространственных процессов; позволяют проводить структурирование однородных и неоднородных районов по территории и т.д.

Модели ГС позволяют: выявлять и описывать связи и отношения между ГО и ГР; формализовывать структуру территориальных систем; оценивать влияние региональных факторов геоситуации и т.п.

Введенные отношения и операции, геопространства, территориальные структуры позволяют формировать модели представления в виде математических структур (цифровых двойников). Все эти модели по своему составу являются структурами с конкретным содержательным наполнением, соответствующим этапам процессов управления.

3.4. Параметрическая модель георегиона

Отметим основные отличия параметрической модели, описывающей ГР. По определению модель ГР определяется входящими в него геообъектами, однако следует понимать, что в числе ГО подразумеваются такие объекты, которые формально не являются географическими, однако имеют географический аспект, позволяющий выполнить привязку к географической

карте. Примером такого объекта является биологический вид географическим аспектам которого является ареал обитания.

Актуальность создания многоаспектной модели описания региона подтверждается сменой парадигмы к представлению географической информации и растущим числом исследований в этой области [108, 109]. Сменой парадигмы является следствием изменения подхода к представлению географической информации от авторских изысканий к обработке больших данных, полученных со спутников, дронов, камер и прочих источников. Таким образом, при разработке нового инструмента необходимо опираться на сильные стороны обоих подходов.

Модель ГР в первом приближении может быть представлена как совокупность географических аспектов, часть которых можно определить по топографическим справочникам, часть идентифицировать путём изучения характеристик районов, другие периодическим наблюдением за динамикой контролируемых параметров. По результатам анализа вышеуказанных источников формируются значимые географические аспекты региона, отражающие положение, местность, демографию, гидрографию, флору и фауну, климат и антропогенные объекты.

Предлагаемая параметрическая модель ГР отражает описание региона на основе гетерогенной информации, включающей в себя как структурированные (геометрию региона, количественные данные), так и слабо структурированные данные (текстовое описание), при этом часть данных может быть получена в автоматическом или полуавтоматическом режиме из ГИС и других информационных систем. Важно отметить, что данная модель сама по себе не является геоинформационной системой или цифровым двойником географического объекта, не заменяет, а дополняет их. Выступая в роли надстройки над другими информационными системами, она позволяет аккумулировать гетерогенную информацию в интерактивном режиме, объединяя достоинства точности и оперативности информации, получаемой с существующих информационных систем, и глубину проработки,

выполняемую человеком-аналитиком. Согласно методу многоаспектного моделирования [109], множество аспектов A представлено в виде объединения:

$$A \equiv \bigcup_{i_a=1}^{n_a} a_{i_a}, \quad (3.50)$$

где a_{i_a} – аспект моделируемого объекта.

Множество аспектов (3.50) представляются семейством моделей M :

$$M \equiv \bigcup_{i_m=1}^{n_m} m_{i_m}, \quad (3.51)$$

где m_{i_m} - модель, соответствующая аспекту.

Множество связей аспект-модель AM задается соотношением

$$AM \equiv \left\langle \bigcup_{i_a=1}^{n_a} a_{i_a}, \bigcup_{i_m=1}^{n_m} m_{i_m}, \bigcup_i^{n_{am}} am_i \mid i > 0, \exists m_i \right\rangle, \quad (3.52)$$

где am_i - связь аспект-модель для каждого из аспектов.

Многоаспектная модель исследуемого географического региона объединяющая формализуемые (структурированные) и неформализуемые (слабо структурируемые) знания имеет следующую структуру:

$$M_{Reg} \equiv \langle V_{Reg}, Em_{Reg}, \{M_i\}, [Z], P(G_i) \rangle, \quad (3.53)$$

где: V_{Reg} - гетерогенная информация (вектор состояния) исследуемого региона, представленная с помощью методологии многоаспектного моделирования;

Em_{Reg} - параметры региона, привязанные к карте подложке и представленные с помощью формализма параметрических многоаспектных моделей;

$\{M_i\}$ - множество многоаспектных геоинформационных моделей объектов;

$[Z]$ - совокупность управляющих воздействий оптимизационных задач;

$P(G_i)$ - модель геоситуации, обеспечивающая интеграцию геоинформационного пространства ГО ГО региона.

Так как исследуемый георегион существует не изолированно, необходимо описать его отношения (рисунок 51) и связи с родительским, родственным и соседними регионами, а также указать географические районы, входящие в его состав.

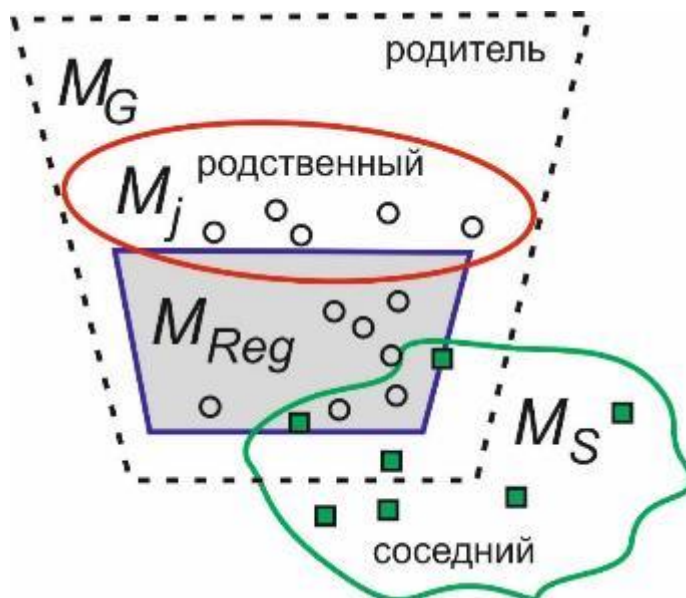


Рисунок 51 — Отношения между регионами

Родительский регион передает свою структуру и родительские признаки по логике наследования, иными словами при наличии родительского региона описание исследуемого региона является подмножеством или нормальной подгруппой родительского региона:

$$M_{Reg} \subseteq M_G,$$

где M_G – модель родительского региона.

Родственным является георегион, имеющий того же родителя, что и исследуемый регион, но определяемый отличительной моделью:

$$M_{Reg} \neq M_j \subseteq M_G, \quad (3.54)$$

где M_j – модель родственного региона.

Родственный регион может иметь пересечение в категории Еm параметров, привязанных к карте подложке с исследуемым, но строго не может включать его объекты категории G, и, следовательно, использовать их

вектора состояния из категории V. Модели геоситуаций родственных регионов также не пересекаются, но отображения и преобразования родительского региона действуют на родственные регионы тождественно.

Соседним регионом является регион, чья модель не имеет общего родителя, но параметры Em двух регионов имеют общие границы или пересекаются с исследуемым, т.е.:

$$Em_{Reg} \cap Em_S \geq 0, \quad (3.55)$$

где Em_S - параметры географического аспекта соседнего региона.

Такое представление взаимосвязей между георегионами призвано упростить реализацию отображений, преобразований и модификацию функторов категорий за счет единства методов для родственных георегионов и гомоморфизма соседних. Так тождественное преобразование родственных регионов не влияет на преобразование соседних (рисунок 52).

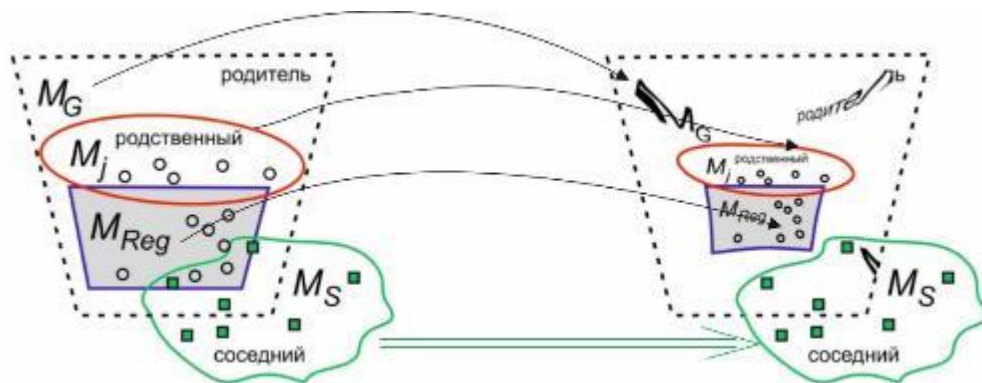


Рисунок 52 — Тождественное преобразование родственных регионов

Приведем пример: рыболовные суда, занимающиеся промыслом и торговые суда, следующие по маршруту в акватории СМП относятся к разным категориям и родственным георегионам, не имеют общих объектов (судов), но имеют общие категориальные признаки, такие как скорость, водоизмещение, мореходность и пр. Категория полигонов для учений ВМФ относится к соседнему георегиону, находится также в акватории СМП, но не имеет категориальных признаков судна. Рассмотрим сюжет с метеорологической

аномалии, которая вызывает преобразования для георегиона, однако она влияет только на категории судов, модифицируя соответствующие георегионы. Георегион для категории полигонов остается без подобных преобразования.

Гетерогенная информация в случае географического региона по определению состоит из метрической и семантической информации:

$$V_{Reg} \equiv \langle Em_R, Sem_R \rangle, \quad (3.56)$$

где Em – метрическая информация, определяющая географический аспект; Sem – семантическая информация о географическом регионе.

Следует отметить, что многоаспектная модель подразумевает возможность ее расширения путем добавления моделей, представляющих аспекты, если это требуется для решения оперативной задачи. Соответствующие реализации математического аппарата и интерфейса ГИС должны обеспечивать добавления доступных аспектов по методу эластичного взаимодействия на базе предустановленных моделей.

Динамические параметры и модели также являются составляющими гетерогенная информации и могут быть как уникальными, так и наследованными от родительских структур.

Предложенная многоаспектная модель описания георегиона должна быть положена в основу программного обеспечения, представляющего собой геоинформационную базу знаний, которая должна прийти на замену аналитическим отчетам. Рассмотренный подход призван повысить глубину и точность анализа окружающей действительности с использование автоматизированных систем, а равно повысить обоснованность и оперативность принимаемых решений задач управления. Выступая в роли высокоуровневой надстройки над справочными информационными системами, она позволяет на базе многоаспектных моделей выполнять синтез гетерогенной информации, сочетая результаты работы специалиста-аналитика и автоматического получения и анализа данных из геоинформационных

систем, различного типа датчиков, спутников ДЗЗ, дронов и других технических источников с различной физической природы.

3.5. Подмодели в системе категорий

Модели и подмодели в системе категорий представляют собой иерархическую структуру, которая позволяет организовать и систематизировать знания, данные или процессы для более эффективного анализа, прогнозирования и принятия решений. В контексте систем категорий (например, в науке, управлении, информационных системах) модели и подмодели играют ключевую роль в упрощении сложных систем и выделении их ключевых аспектов.

Применение структурирования моделей и подмоделей в системе категорий обеспечивает структурирование знаний, декомпозицию сложных систем, повысить уровень абстракции и обобщение. Преимуществом использования подмоделей является упрощение сложности, гибкость концептуальной модели (подмодели могут быть легко модифицированы или заменены), масштабируемость (модели могут быть расширены за счет добавления новых подмоделей) и вариативность, что позволяют изучать поведение системы в различных сценариях.

Модели и подмодели в системе категорий позволяют структурировать сложные системы, выделяя их ключевые компоненты и взаимосвязи. Они являются мощным инструментом для анализа, прогнозирования и принятия решений в различных областях. Однако их эффективность зависит от корректности построения, качества данных и учета ограничений.

3.5.1. Подмодель региональных физико-географических условий

Математическое моделирование физико-географических условий лежит в основе изучения географических (территориальных) систем и заключается в создании логико-математических конструкций, отображающих количественные отношения реальных объектов [110, 111]. Математико-

географическое моделирование — это процесс создания и анализа логико-математических последовательностей (символов, формул, уравнений), описывающих состояние геосистем. Оно опирается на формулы, уравнения и методы различных теории: вероятности, системного анализа, множеств, математической физики, корреляционного анализа и др. [160].

Моделирование территориальных систем уже сформировалось как самостоятельная ветвь исследований. В теоретических основах моделирования геосистем П.Хаггет и Р.Дж. Чорли выделяют шесть функций, выполняемых моделями. Из этой совокупности функции моделей, для наполнения подмодели физико-географических условий выделим только три:

- собирательную, как функция определения необходимой информации, её сбор и систематизация;
- логическую, как функция выявления механизма развития конкретного явления;
- систематизирующую [112, 160].

Теоретический фундамент предложенной концептуальной модели АТА позволяет в перспективе развития ГИС предоставить инструментарий моделирования на более высоком уровне абстракции, скажем, предоставить возможность создания новых локальных моделей и встраивать ее в структуру уже существующих взаимодействующих моделей в структуре ГИС. Для реализации таких возможностей используется связанность категории векторов состояния V , категория множеств индексов геообъектов G и категория геоситуации P .

Объекты, относящиеся к физико-географическим условиям, являющиеся частью существующих в логическом пространстве электронных карт используются в рамках возможностей, предоставляемых для ГИС этими электронными картами по извлечению свойств ГО и геоструктур. Объем и качество данных о ГО, содержащихся в электронных картах может быть различным, но мы будем исходить из того, что современные нормативные требования [113] к картам предусматривают трехмерность и расширенную

содержательность признаков для каждого кодированного цифрового объекта. Важно, что выделение сведений о ГО из множества данных электронных карт осуществляется с использованием кодовых идентификаторов, прототип которых должен быть транспонирован в категорию множеств индексов геообъектов G для ГИС. Таким образом, связь между данными электронных карт и категориями концептуальной модели достаточно просто устанавливается зависимостями как:

$$TID_{ЭК} \subseteq G \mid ID_{ЭК} \cap G = TID_{ЭК} \ \& \ S_{ЭК}^i \notin V, \quad (3.57)$$

где $TID_{ЭК}$ – множество транспонированных индексов электронных карт; G – категория множеств индексов геообъектов; $ID_{ЭК}$ – подмножество индексов в категории G ; $S_{ЭК}$ – свойства признаков ГО из электронных карт; V – категория векторов состояния.

Получение в моделях ГИС данных свойств признаков конкретного ГО с электронных карт осуществляется посредством обращения через интерфейс карт с транспонированным индексом. Наполнение вектора состояний в категории V средствами ГИС при этом не требуется (рисунок 53).

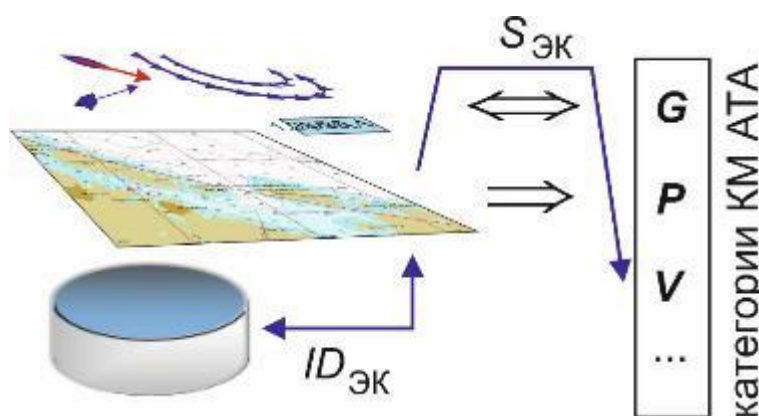


Рисунок 53 — Получение в ГИС данных ГО с электронных карт

Следует обратить внимание, что логическую функцию модели реализует категория геопространств и геоситуации P , которая визуализируется над электронными картами как отдельный уровень представления, поэтому на рисунке связь обозначена как двухсторонняя. Внесение изменений в

электронные карты подложки, как правило, не доступно со стороны пользовательских ГИС, поэтому связь односторонняя.

Систематизирующая функция концептуальной модели географического региона заключается в организации и структурировании информации об этом регионе. Данная модель помогает конструировать взаимосвязи между различными элементами геосистемы, выделить ключевые характеристики и особенности региона АТА, а также облегчают анализ данных и принятие решений в задачах транспортной активности.

Как уже говорилось выше и будет показано далее, собирательную функцию, т.е. процесс сбора, идентификации и классификации объектов окружающей среды, с высоким показателем эффективности и достоверности способны выполнять автоматизированные и информационные системы. Это умозаключение справедливо для всех географически привязанных объектов живой и неживой природы, которые могут быть классифицированы человеком.

Согласно концептуальной модели механизм оперативного ввода данных о новом ГО можно автоматизировать с верификацией оператором результата классификации или без таковой и практически одинаков для всех типов ГО. Если автоматизированная система наблюдения способна произвести классификацию нового ГО, то для конечного множества возможных результатов существует группа предустановленных признаков, формируемая из формулярных свойств распознанного объекта и подгруппы оперативно заполняемых признаков, зависящих от вида, к которому отнесен новый ГО.

При добавления нового классифицированного ГО выполняется ряд операций (3.58):

$$Set(G)++ \Rightarrow \left[\begin{array}{l} ID_{n+1} = G++ \\ Vect(G) + \vee \{ \Phi n_{\text{бид}}, \Phi n_{\text{он}}, \Phi_{\text{динам}} \}_{ID} \\ ID_{n+1} \in P_n \\ \Phi n_{ID} \rightarrow Matr(F_n) \end{array} \right. , \quad (3.58)$$

где ID_{n+1} – новый индекс, формируемый для нового ГО в категории G ; P_n – категория геопространства, в которую включается новый ГО; Φ_n – предустановленное множество свойств признаков в виде формуляров; F – категория межкатегорийных связей.

В случае с ГО, относимых к физико-географическим условиям гидрометеобстановки помимо категории геоситуации P , аналогичное включение придется сделать для категории M отвечающей за гидрометеобстановку.

Очевидно, что заполнение всех формуляров свойств признаков для нового объекта будет невозможно, но для учета нового объекта и работы с ним в совокупности задач ГИС данное обстоятельство не является критичным. При введении нового ГО в систему должен устанавливаться период «наполняемости», во время которого множество свойств признаков нового ГО может изменяться процессами с более низкими приоритетами. Если в системе предусмотрена верификация результатов идентификации операторов, то после ее проведения период «наполняемости» завершается и внесение изменений в формуляры процессами с низкими приоритетами должно быть ограничено, а новый ГО включается в цепочку задач и процессов ГИС.

Математические модели физико-географических условий, таких как рельеф, климат, гидрологические, гидрометеорологические процессы и другие природные явления позволяют анализировать, прогнозировать и понимать сложные взаимодействия в природных системах, базируясь на разных принципах актуализации, например:

- динамические, для прогнозирования развития геосистемы под влиянием различных факторов;
- физико-статистические, рассматривающие систему как совокупность взаимодействующих элементов со случайными свойствами;
- распознавание образов, применяемой для автоматизации идентификации объектов и процессов в геосистемах;

- анализ временных рядов, для прогноза периодических процессов по известному спектру частот исследуемых событий.

Математико-географическое моделирование выявляет свойства, пространственно-временные закономерности и варианты взаимодействия территориальных систем при разной антропогенной нагрузке.

3.5.2. Учет имплицитных факторов в подмодели территориально-хозяйственной активности

Математико-географические модели пригодны для исследования разных сторон народного хозяйства и все подсистемы территориально-хозяйственной активности влияют друг на друга, в той или иной степени.

Концептуальная модель АТА позволяет установить и учитывать вероятностные зависимости между содержательными подмоделями, построенными на базе категорий через операции функторов между категориями. Корреляционные матрицы, связывающих свойства объектов из разных категорий, сведены в категорию ***Matr(F)*** межкатегорийных связей.

$$F = \langle F_M^P, F_T^P, F_D^P, F_{Em}^P \rangle, \quad (3.59)$$

где $F_M^P, F_T^P, F_D^P, F_{Em}^P$ - корреляционные матрицы между категориями ***P*** и ***M***, ***P*** и ***T***, и т.д.

Визуализация геоситуации, геообъектов, их свойств и динамики процессов в ГИС осуществляется с применением информационных слоев над картографической основой, где данные о ГО хранятся в форме записей параметров и координат. Картографической основой в ГИС, как правило, выступает электронная карта с заданной системой координат, масштабом и типом проекции. При изменении параметров картографической основы, данные информационных слоев преобразуются операторами перехода в заданную новую систему координат, чем обеспечивается географическая привязка проецируемых ГО информационных слоев. анализируемая

информация. применением информационных слоев с сохранением координатной привязки

Каждый слой несет информацию об объектах своего назначения, которую можно представить в виде матрицы плотностей распределения целевого параметра (одного или нескольких). Размерность матрицы плотностей распределения целевого параметра при этом рекомендуется принимать в кратных значениях единичного вектора координатной сетки картографической основы.

$$\begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{m1} & I_{m2} & \dots & I_{mn} \end{bmatrix}, \quad (3.60)$$

где I_{mn} – усредненный целевой параметр слоя или вектор параметров для выбранной ячейки географической сетки координат.

Визуализацию распределения плотностей параметров в двухмерном представлении выполняют различными методами, например, плотностью окраски областей градиентом, цветовой гаммой, в виде изолиний значения параметра (рисунок 54а, 54б) и т.п. В случае визуализации матрицы распределения плотностей параметров можно использовать дополнительную сетку, значения параметра которой визуализируются высотой над плоскостью соответствующего уровня (рисунок 54в).

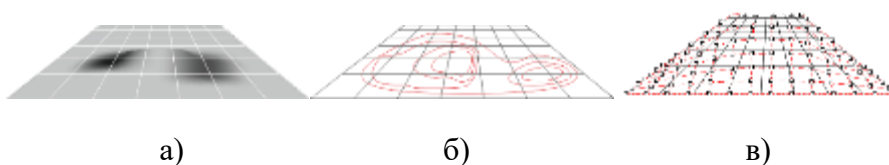


Рисунок 54 — Визуализация плотностей параметров слоя

Целевой параметр ячейки слоя характеризует некоторый значимый для результирующей функции аргумент, который может быть выражен в абстрактных или достаточно конкретных значениях. Не важно в каких величинах выражается целевой параметр, важно правильно его использовать

при моделировании ситуации. Целевой параметр может быть представлен вектор-строкой $I_{mn}=\{I1_{mn}, \dots I k_{mn}\}$, иными словами, массивом параметров, выбор конкретного типа параметра при этом определяется методологией операций в задачах моделирования [114].

Простым абстрактным территориально связанным целевым параметром I_{mn} для транспортного слоя в категории **P** и соответствующей ячейке может являться, к примеру, индекс плотности объектов транспортной инфраструктуры, определяемый в относительных значениях от 0 – полного отсутствия объектов, до 100 – максимально возможная плотность объектов георегиона. Аналогичным образом формируются целевые параметры для остальных информационных слоев категории **P**.

Степень влияния и характер зависимости между слоями при различных размерностях целевых параметров нелинейная и наилучшим образом описывается функцией эластичности.

В этом случае для выбранной пары слоев корреляционную функцию $G(T)$ целевых параметров для любого элемента матриц $(M_P, M_M, M_T, M_D, M_{Em})$ на момент времени T можно записать упрощенно функциями (3.61):

$$\begin{cases} G_M^P(T) = \langle M_P[I_{mn}(T)] M_M[I_{mn}(T)] \rangle = E_M^P \\ G_T^P(T) = \langle M_P[I_{mn}(T)] M_T[I_{mn}(T)] \rangle = E_T^P \\ G_D^P(T) = \langle M_P[I_{mn}(T)] M_D[I_{mn}(T)] \rangle = E_D^P \\ \dots \end{cases}, \quad (3.61)$$

где $M_P[I_{mn}(T)]$ - значение целевого параметра ячейки I_{mn} слоя из категории **P** в момент времени T ; E – функция эластичности, определяемая отношением:

$$E_M^P = \frac{\Delta M_P[I_{mn}](\text{проценты})}{\Delta M_M[I_{mn}](\text{проценты})} = \frac{\Delta M_P[I_{mn}]}{M_P[I_{mn}]} \cdot \frac{\Delta M_M[I_{mn}]}{M_M[I_{mn}]} = \frac{\Delta M_P[I_{mn}]}{\Delta M_M[I_{mn}]} \cdot \frac{M_M[I_{mn}]}{M_P[I_{mn}]}, \quad (3.62)$$

где $\Delta M_M[I_{mn}]$ - величина изменения целевого параметра слоя категории **M**, $M_M[I_{mn}]$ - абсолютное значение целевого параметра ячейки mn слоя категории **M**.

Качественная характеристика степени влияния слоев друг на друга в данном случае описывается достаточно просто: если модуль эластичности $|E_M^P| = 0$ то изменение параметра в слое из категории **P** никак не влияет на параметр слоя из категории **M**, если $1 > |E_M^P| < \infty$ то изменение параметра в слое категории **P** влияет на параметр слоя категории **M**, отрицательная эластичность меняет направление влияния.

Иллюстрация вариантов зависимостей между двумя слоями приведена на рисунке 55.

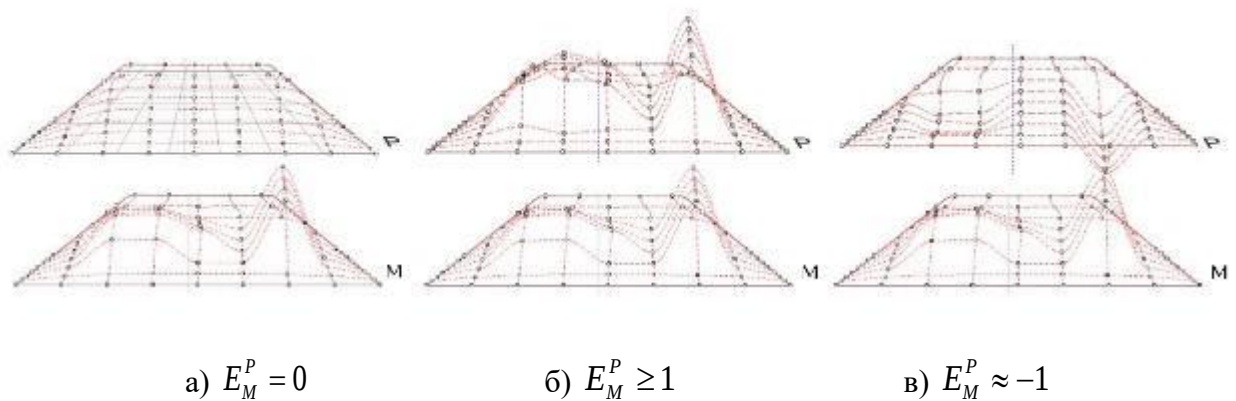


Рисунок 55 — Иллюстрация зависимости между слоями для различных эластичностей

Замечательным свойством такого способа представления зависимости слоев является то обстоятельство, что если корреляционную функцию описывать степенной функцией, то ее значение легко записывается как значение степени аргумента, что удобно для хранения и реализации в ГИС, действительно:

$$E_x^y = \frac{dy}{y} : \frac{dx}{x} = \frac{dy}{dx} * \frac{x}{y} = y'(x) \frac{x}{y}, \quad (3.63)$$

для $y = x^n$ примет вид

$$E_x^y = nx^{n-1} \frac{x}{x^n} = n. \quad (3.64)$$

Таким образом, зависимость между слоями можно описать достаточно простой для восприятия формой в виде матрицы значений эластичности (рисунок 56).

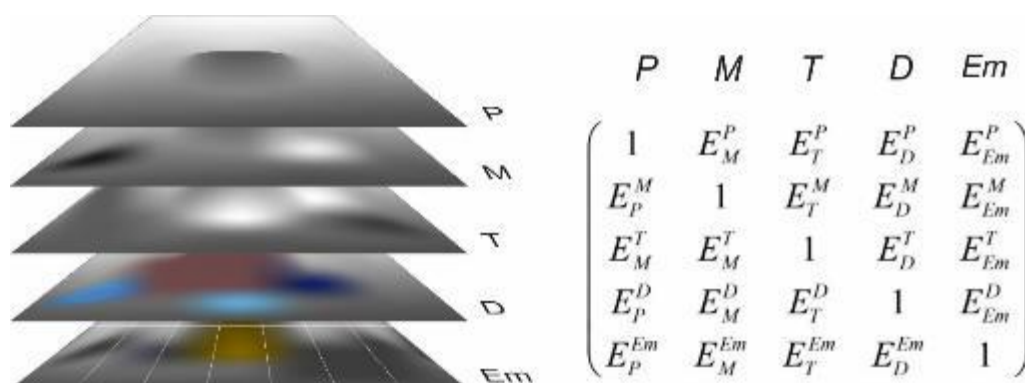


Рисунок 56 — Матрица значений эластичности зависимостей

Значения эластичностей E могут быть представлены не функциями, а действительными числами, при этом элементы типа $E_P^M = E_M^{P-1}$ есть обратные матрицы, при условии, что детерминант исходной не равен нулю.

Синтез математико-географической модели транспортной активности может включать имплицитное окружение из смежных подсистем и отраслей, но неправильно полагать, что чем больше фактов учитывает модель, тем она лучше «работает» и даёт лучшие результаты. При моделировании транспортных систем избыточная сложность снижает эффективность исследования. Критерий — разумный баланс между детализацией и затратами. При возрастании сложности модели прирост затрат может превысить прирост эффекта синтеза.

В рассматриваемой подмодели территориальной активности при решении задач где не требуется учет имплицитных данных в виду их незначительности или на основании принятого оператором решения, «отключение» связанности осуществляется либо простым обнулением корреляционной матрицы эластичности, либо импликацией функции связанности по условию «если А то Б».

Приведем практический пример. Поставлена логистическая задача как можно «дешевле» перевезти танкером груз из пункта А в пункт Г. Понятно,

что тесно связанный слой электронной карты является физическим пространством для построения маршрутного графа, где ребрами графа являются расстояния S между пунктами на ЗП (рисунок 57).



Рисунок 57 — Физический граф логистической задачи

Из логистической категории T выделяется логистический граф, учитывающий удельную стоимость перевозки груза и особенности транспортной инфраструктуры. Сформулируем условия, что удельные стоимости перевозки груза до пункта Г, выраженные в тонна/милю в 2 раза выше, чем до пункта В, а в пункте А стоимость ожидания и перегрузки значительно больше, чем в пункте В и т.п.

Строим логистический граф по сформулированным условиям задачи. Вид полученного взвешенного ориентированного мультиграфа приведен на рисунке 58.

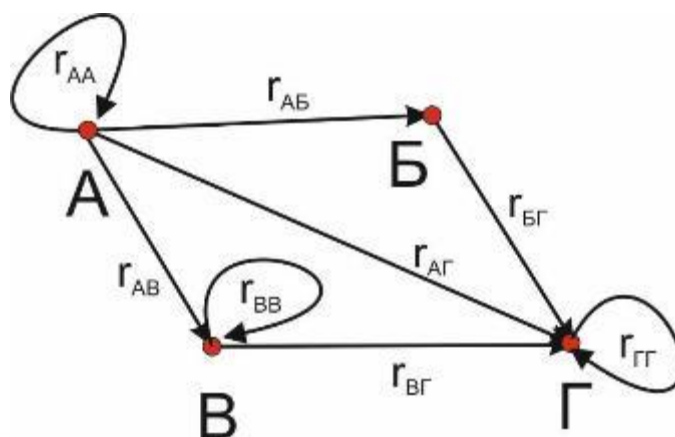


Рисунок 58 — Граф логистической задачи

Весами в полученном графе выступают стоимости транспортировки груза по доступным направлениям и стоимости ожиданий/перегрузки в портах, где это предусматривается маршрутным заданием. Матрица значений весов будет выглядеть как приведено ниже:

$$\begin{matrix} A \\ B \\ B \\ \Gamma \end{matrix} \begin{pmatrix} r_{AA} & r_{AB} & r_{AB} & r_{A\Gamma} \\ 0 & 0 & r_{BB} & r_{B\Gamma} \\ 0 & 0 & r_{BA} & r_{B\Gamma} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3.65)$$

Вместе с матрицей эластичности фактора риска, матрица значений весов стоимости транспортировки образуют композицию, которую необходимо решить для получения результата по поиску оптимального маршрута с учетом обоих факторов.

Разрешение приведенной задачи с применением теории графов и поиска оптимальных решений не вызывает трудностей, досконально отработаны на математическом аппарате и реализованы в популярных программных средах и языках.

Следует понимать, что ситуационный анализ должен и будет учитывать изменение значений целевых признаков, как во времени, так и в пространстве, поэтому элементы матриц значений эластичности также подвержены морфизму.

Таким образом, логика работы ГИС с данными как в слоях кластера, так и совокупностью кластеров будет заключается в том, чтобы алгоритмически

находить и рекомендовать оператору и лицу, принимающему решения, оптимальную последовательность действий по обеспечению процесса управления контролируемыми событиями, путем разрешения противоречия между затратами на выполнение серии итераций и максимально достигаемой эффективностью на пути решения целевой задачи.

Эффективность модели транспортной активности определяется не её сложностью, а разумным балансом между детализацией, ресурсными затратами и полезностью результатов.

3.5.3. Использование ИНС в моделировании геопространств

Искусственные нейронные сети успешно применяются в распознавании изображений. При этом природа самого изображения не имеет значения, тем самым использование ИНС в нашем случае полностью согласуется с идеологией повышения уровня абстракции концептуальной модели АТА.

Для понимания механизма встраивания ИНС в концептуальную модель необходимо сказать несколько слов о принципах ее работы в процессе распознавания изображения. В наиболее эффективной реализации ИНС распознает изображения через несколько этапов обработки и анализа данных используя входные данные на входном слое, где изображение разбивается на небольшие участки, до нескольких пикселей, каждый из которых будет входным нейроном. С помощью сверток на последующих слоях, подвыборки (разбиения на фрагменты) и функций активации сигналы передаются с одного уровня на другой. В ходе этого процесса сотни тысяч нейронов с миллионами весовых параметров сравнивают полученные сигналы с данными, полученными при обучении и на выходе получаем наиболее вероятный результат из числа заложенных при обучении [29,115].

Рассмотрим упрощенный пример работы сверточной ИНС (рисунок 59). Будем считать, что изображение видимого объекта предварительно раскладывается по картам каналов RGB (красный, зеленый, голубой). Схемы цветового деления изображений бывают разные и RGB взят как наиболее

простой в понимании. Каждая из карт подается на вход сверточной ИНС. Входные данные каждого конкретного значения пикселя нормализуются в диапазон от 0 до 1, по формуле (3.66):

$$f(p, \min, \max) = \left[\frac{p - \min}{\max - \min} \right], \quad (3.66)$$

где f – функция нормализации; p – значение пикселя в диапазоне от $\min=0$ до $\max=255$.

Согласно приведенной функции нормализации для пикселей со значением 127 и менее входные нейроны примут значения 0, т.е. не будут активированы.

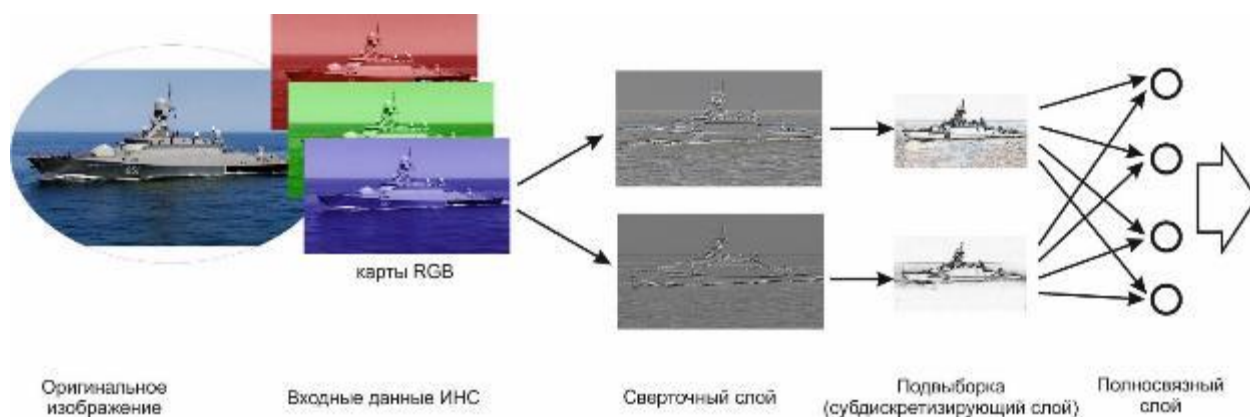


Рисунок 59 — Механизм работы свертойчной ИНС

Сверточный слой представляет из себя набор карт признаков, в обиходе это обычные матрицы. Карта признаков формируется из входного для нее слоя сети применением операции свертки с использованием синаптического ядра (в разных источниках его называют по-разному: сканирующее ядро или фильтр).

Изначально значения каждой карты сверточного слоя равны 0. Значения весов ядер задаются постоянными на все время операции. Ядро «скользит» по входной карте и производит операцию свертки. Описывающая операцию формула приведена ниже:

$$(F * G)[m, n] = \sum_{k, l} F[m - k, n - l] * G[k, l], \quad (3.67)$$

где F – входная матрица изображения; G – ядро свертки.

Неформально эту операцию можно описать следующим образом — окном размера ядра G проходим с заданным шагом (обычно равным 1) все изображение F , на каждом шаге поэлементно умножаем содержимое окна на ядро G , результат суммируется и записывается в матрицу результата (карту признаков).

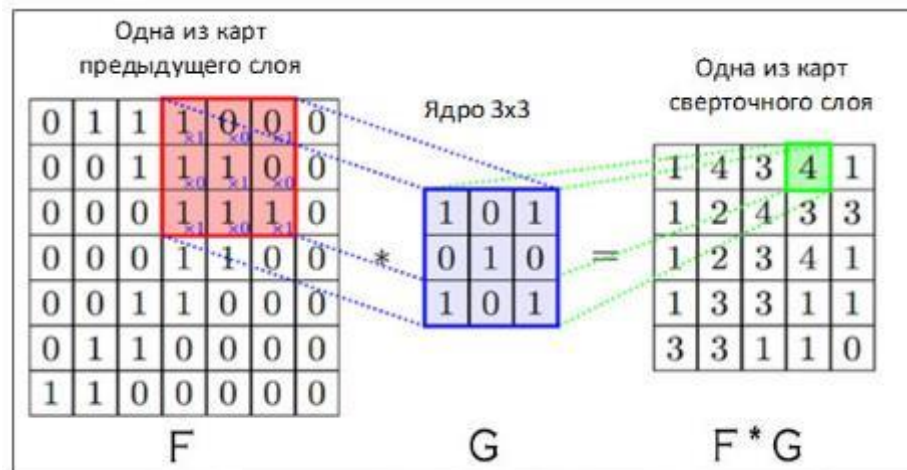


Рисунок 60 — Операция свертки и получение значений карты признаков

Субдискретизирующий слой или подвыборка выполняет функцию уменьшения размерности (обычно в несколько раз). Это можно делать разными способами, но зачастую используется метод выбора максимального элемента (max-pooling) – вся карта признаков разделяется на ячейки, из которых выбираются максимальные по значению и заносятся в соответствующую ячейку матрицы субдискретизирующего слоя (рисунок 61).

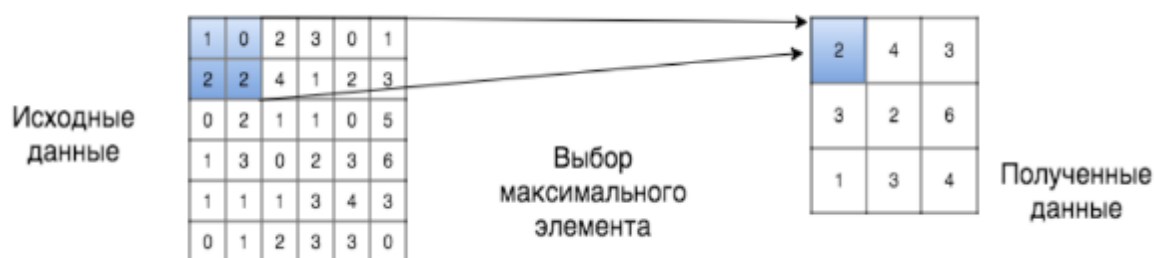


Рисунок 61 — Формирование субдискретизирующего слоя методом выбора максимального элемента

Подвыборочный слой дает: увеличение скорости вычислений (минимум в 2 раза), за счет уменьшения размерности карт предыдущего слоя, фильтрацию мелких ненужных деталей, поиск признаков более высокого уровня (для следующего сверточного слоя).

Последние слои – слои обычного многослойного персептрона, которые отвечают за финальную классификацию объекта, принцип работы которого был рассмотрен выше. Стоит обратить внимание, что исходные данные могут быть представлены как результат нормализующей функции, на выходе которой будут не только 0 или 1, но значение из определенного диапазона, а ядро свертки также подбирается исходя из вероятностей наилучшего результата распознавания с учетом особенностей работы ИНС с нечеткими данными [116].

Рассмотрев пример механизма работы сверточной ИНС, можно констатировать тот факт, что свёрточные ИНС используют математический аппарат линейной алгебры, теории групп, теории категорий (абстракция преобразований, инвариантность к деформациям), обеспечивая устойчивость процесса распознавания к масштабированию, поворотам и другим искажениям исходного изображения. Эффективность таких сетей подтверждается их успешным применением в системах распознавания сложных объектов.

Если допустить, что оптическое наблюдение и использование ИНС для распознавания, обеспечивает ближнюю зону безопасности подвижного объекта (морского транспортного средства), то за пределами прямой

видимости необходима информационная поддержка из вне или на иных физических принципах. Применение ИНС не ограничивает нас в этом. Аналогично разобранному примеру можно идентифицировать объекты, видимые в радио диапазоне, инфракрасном (ИК), акустическом и ином поле, технические методы регистрации которых обеспечивают детерминированный анализ.

Анализ данных от детерминированных полей и пространств наилучшим образом реализуется с использованием математического аппарата различных теорий множеств линейной алгебры. Пример математического аппарата автоматического распознавания целей на радиолокационных изображениях от радаров с синтезированной апертурой рассмотрен в главе 4.

Очевидно, что наиболее эффективным решением по отношению машинного времени к качеству распознавания, будет использование специализированных, а не универсальной ИНС, работающих с данными одного типа. Практическими реализациями подтверждается, что для обработки быстро меняющейся гидрометеорологической и навигационной обстановке в ближней морской зоне наиболее оптимально использование ИНС на основе многослойного перцептрона с несколькими скрытыми слоями, представляющий собой рекуррентную нейронную сеть [117].

Изображения одного и того же объекта в оптическом, инфракрасном или радио диапазонах также целесообразно отнести к реализациям на отдельных ИНС со свойственным им набором обучающих датасетов. Таким образом, в задачах классификации и идентификации визуальных данных рекомендуемое число ИНС будет определяться из соображений детерминированного подхода по числу видов объектов и физических принципов датчиков. Из рекомендуемого числа следует исключить ИНС, эффективность которых значительно ниже альтернативных для подобных объектов, например, нет смысла в ИНС для распознавания и идентификации ледовых образований в ИК диапазоне (ИНС 31 на рисунке 62) и т.п. Декомпозиция ИНС по задачам и

исключение мало результативных методов позволит освободить производительность системы для более эффективных методов распознавания.

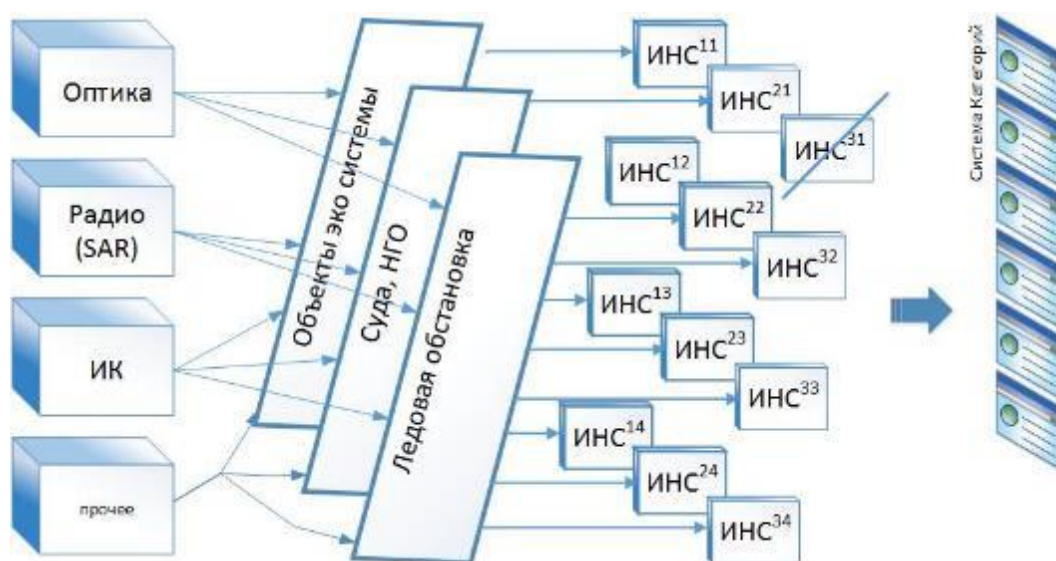


Рисунок 62 — Совокупность ИНС для задач распознавания

Перечень задач, которые эффективно решаются с применением нейронных сетей в распознавании изображений:

- анализа больших массивов динамических геопространственных данных (ветер, течения, ледовая обстановка, осадки и др.);
- идентификация и классификация географических категорированных (выделяемых в одну категорию) объектов;
- распознавание морфологических особенностей объектов (например, стадий формирования ледового покрова: шуга, молодой лед, торосы, стамухи и т.п.);
- семантическое определение границ объектов (позволяет оставлять только границы объектов на картинке);
- семантическая сегментация (позволяет разделять изображение на различные отдельные объекты);
- выделение нормалей к поверхности (позволяет преобразовывать двумерные картинки в трёхмерные изображения);
- выделение объектов внимания (позволяет определять то, на что обратил бы внимание человек на данном изображении).

Анализ и оценка территориальной ситуации осуществляются во многих научных исследованиях и практических приложениях, таких как геологические изыскания, гидрометеорологические прогнозы, районная планировка, навигация и др. Наиболее сложным процесс оценки обстановки является там, где условия окружающей среды изменяются достаточно быстро (гидрометеорология, мультимодальные транспортные перевозки, военная активность и др.) [118].

Актуальным направлением является внедрение искусственного интеллекта в системы территориального анализа и управления. ИНС, являющиеся характерным представителем систем искусственного интеллекта, широко используются во многих научных и технических приложениях (сложные динамические системы, системы диагностики, классификационные системы), но только начинают свой путь в системах территориального анализа, моделирования геоситуаций и управления географическими объектами. Аппарат искусственных нейронных сетей содержит значительный аналитический потенциал по классификации и оценке больших массивов высоко динамических данных.

3.6. Моделирование системы рисков АТА

Состав модели обстановки в системе АТА определяется множеством территориально-содержательных параметров, значимых для решения базовых функциональных задач территориальной системы. Например, для системы арктических морских грузоперевозок это задачи навигационно-гидрографического обеспечения, обеспечения экологической и транспортно-логистической безопасности, снижения рисков арктической морской активности.

В любом случае в модель входят факторы неопределенности окружающей среды, топография и гидрография региона (акватории), инфраструктура, экология, гидрометеорологические условия, в которых протекает та или иная территориальная активность, а также параметры и

элементы содержательной нагрузки социальной деятельности. Деятельность, связанная с преодолением неопределенности в ситуации неизбежного выбора, при наличии возможности количественно и качественно оценить вероятность достижения предполагаемого результата, определяет суть понятия риска, что в свою очередь, влияет на принятие решений.

3.6.1. Обобщенная рискологическая модель

Проявление риска в различных сферах деятельности человека повлекло за собой многочисленные его трактовки. В теории рисков понятие риск определяется как аспект неопределённости и возможность проявления ситуаций, которые не имеют однозначного результата. Современные процессы управления протекают в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной природы. Поэтому возрастающее значение приобретают не только вопросы повышения уровня автоматизации сбора, обработки и анализа информации, но и научные знания о процессах обработки информации и общие принципы принятия решений в условиях неполной информации, развитие которых составляет предмет теоретических основ информатики.

Проблема оценки и управления риском в общем виде есть комплексная проблема теоретических основ информатики, которая относится к таким научным направлениям исследований, как разработка и анализ моделей информационных процессов, разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа и прогнозирования данных, разработка методов распознавания объектов и ситуаций [119].

Для предупреждения и снижения негативных последствий рисков на водном транспорте применяют организационные, технические, аналитические, правовые и иные меры. В данном исследовании рассматриваются риски, оцениваемые и управляемые через концептуальную модель АТА с использованием ГИС-ориентированной экспертной системы. Даже в этом ограниченном формате спектр учитываемых рисков остается

крайне широким (рисунок 63), что подтверждает необходимость применения информационных методов и технологий работы с большими данными.



Рисунок 63 — Классификация рисков на основе концептуальной модели АТА

Разрешение конкретных категорий рисков в приведенной классификации занимают соответствующие теории, реализация которых возможна на достаточности данных, используемых в концептуальной модели АТА.

Объективные риски не поддаются контролю со стороны человека. К природным и экологическим, например, относятся плохие погодные условия, стихийного бедствия. Примером технических рисков являются выход из строя транспорта, износ оборудования, пожар на судне и т.п. В категорию политических рисков следует отнести введение законодательных ограничений, закрытия границы, осуществление военных действий, неисполнением обязательств контрагентами и т.п.

Субъективные форс-мажоры касаются человеческого фактора. Халатность персонала может быть причиной чрезвычайных ситуаций от выхода из строя технических средств до навигационных аварий. Ошибочные решения ЛПР могут служить причиной как самого риска, так и его усугубления. К социальным рискам отнесем вероятность негативных влияний

на транспортную активность в результате общественных действий, преступных действий, критическое снижение качества или количества человеческих ресурсов.

Приведенные области возникновения рисков имеют различную природу и требуют методы управления, принципиально отличающиеся в реализации решений по снижению негативного воздействия, управления и автоматизации (таблица 13).

Таблица 19 – Области возникновения рисков

Область риска	Методы снижения	АСУ
Природно-экологические	Проведение комплекса мероприятий по улучшению состояния водных путей, портовых акваторий	Разработка алгоритма функционирования системы реагирования на транспорте
Технические	Улучшение конструктивных особенностей судов	Применение вероятностных методов анализа безопасности Создание программного обеспечения системы реагирования
Политические	Определение комплексного критерия эффективности	Логистика
Гносеологические	Повышение ответственности персонала и организации труда	Внедрение автоматизированных систем технического контроля и систем контроля деятельности операторов
Ошибочные решения ЛПР	Повышение профессиональной подготовки судоводителя	Совершенствование алгоритмов системы ППР
Социальные	Методический подход формализованной оценки безопасности	Построение модели функционирования системы социального реагирования
Экономические	Государственное управление	нет*

Таким образом, актуальной задачей теоретической информатики, является создание математической теории управления риском, включающую модели оценки, методы оптимизации решений и анализ эффективности сложных систем в условиях неопределенности. Большой вклад в решение подобного рода задач внесли Ю.Б. Гермейер [81], А.Ф. Кононенко и их единомышленники.

Ситуация риска возникает при работе системы в условиях случайных воздействий или неполных данных, ведущих к неоднозначным результатам принимаемых решений. Устойчивость системы достигается минимизацией возможных потерь от таких решений [120].

Большинство работ, использующих понятие «управление риском» относятся к финансово-экономической сфере деятельности [121,122]. При допустимом уровне абстрагирования базовые основы теории рисков успешно трансформируются и переносятся в другие области деятельности человека, транспортная логистика – одна из них.

Общих концептуальных моделей управления риском до сих пор не разработано. В связи с этим поясним, что под общей моделью управления риском, понимается не общая модель управления вообще, а ее конкретизация применительно к частным задачам управления риском определенной природы. При решении задач учета и классификации рисков вне зависимости от их природы (экономические, технические, экологические и т.д.), представляется целесообразным использование методов распознавания ситуаций, что доступно применением технологий ИНС и ИИ в составе экспертных систем. Однако актуальной проблемой теоретической информатики, остается разработка математической теории, описывающей широкий класс процессов управления риском и включающей общие модели оценки и управления риском и методы решения комплекса математических задач нахождения оптимальных решений с точки зрения эффективности и риска функционирования сложных систем в условиях неполной информации.

Общая модель управления риском задается оператором

$$\xi(P(x, c, y, \{IDV\}), R(x, c, y, \{IDV\})), \quad (3.68)$$

где: x - состояние системы или процесса в абстрактном пространстве, c – управляющее воздействие, y - неконтролируемые внешние факторы, $\{IDV\}$ – множество векторов состояния объектов рискованной модели.

Оператор $\xi()$ задает критерий оптимальности управления, балансируя оценки эффективности $P(x, c, y, IDV)$ и риска $R(x, c, y, IDV)$ пространства S_j^0 , определяемые как множество последовательных состояний системы, не выходящих за рамки своего пространства.

Переменные x, c, y моделей $P(\bullet)$ и $R(\bullet)$ являются, в общем случае, взаимосвязанными величинами. На выбор управления c оказывает влияние состояние x , в котором находится система, а также внешние факторы y , для описания которых используется информационная компонента из $\{IDV\}$.

Управление

$$c_0 : (x_0, y_0) \rightarrow (x_1, y_1),$$

для любых значений x и y должно удовлетворять ограничению (3.69)

$$\forall c_i : (x_i, y_i) \in S_j, \quad (3.69)$$

т.е. любое состояние системы не выходит за рамки своего пространства.

При этом закон управления $c(\bullet, \bullet)$ принадлежит некоторому классу функций Z категории оптимизационных задач, определяемому ЛПР согласно имеющейся информации из S .

Состояние x системы, в свою очередь, определяется выбираемым управлением и зависит от воздействия на систему внешних факторов, т.е. является некоторой функцией управления и значений внешних факторов:

$$x_i = f(c_{i-1}, y_{i-1}) \quad (3.70)$$

Приведенный подход поддерживает динамическую модель управления системой.

При случайном характере внешних факторов y с известной статистикой, компонента IDV_y должна включать описание их распределения. Если внешние факторы y неопределенные и информация о них представляет собой только описание области возможных значений, то информационная компонента IDV_y

представляется в виде частично упорядоченного множества с выполнением условия вида $y \in IDV_y$.

Если в системе осуществляется обмен информацией между подсистемами, то информационная компонента системы включает схемы обмена данными между подсистемами и процедуры их обработки, поддерживая потенциально децентрализованное управление, зависящее от поступающей информации.

Например, пусть получена оценка значения внешнего фактора y_t , тогда оценку эффективности, как выходное значение подмодели $P(x_{t-1}, c, y_t, IDV)$ можно представить в виде (3.71)

$$Z(c_t) = \langle P(x_{t-1}, c, y_t) \mid \forall c, x_t = f(c, y_t) \rangle, \quad (3.71)$$

где x_{t-1} и x_t – предыдущее и последующие состояния системы.

Модель оценки риска $R(x_t, c, y_t, IDV)$ включает определение области равновесия системы S при любых значениях неконтролируемых факторов и множества допустимых управлений, обеспечивающих равновесие. В случае воздействия на систему неопределенных неконтролируемых факторов, множества допустимых управлений C имеет вид:

$$C = \{c_t : (x_{t-1}, y_t) \rightarrow (x_t, y_t) \mid c(\bullet, \bullet) \in S_j, \exists x_t = f(c_{t-1}, y_t), \forall y \in Y\}. \quad (3.72)$$

Модель оценки риска $R(x_t, c, y, IDV)$ определяет допустимые управления C , которые могут быть связаны с оценкой эффективности $P(x, c, y, IDV)$, а оператор оценки оптимальности отображает их в подмножество оптимальных управлений:

$$\xi(t) : (P(x, C, Y, \{IDV\}), R(x_t, C, Y, \{IDV\})) \rightarrow S_j \quad (3.73)$$

Модель (3.73) конкретизируется для систем, функционирующих в условиях случайного или неопределенного воздействия внешней среды, внутрисистемной неопределенности, связанной с различной

информированностью подсистем, принятия управляющих решений в условиях неточности исходных данных.

Таким образом, предложенная концептуальная модель АТА, опирающаяся на модели линейной алгебры теории категорий составляет научно обоснованную основу для формализации и структуризации частных задач управления рисками различной области проявления и методическую базу для разработки методов управления, нацеленных на снижение вероятности негативного влияния риска.

3.6.2. Геомоделирование рисковой логистики

Модель категории логистики является, в некотором роде, контейнером для описания состояния логистической системы в географическом регионе, тесно связанной со всеми другими объектами в иных категориях. Модели транспортной активности как самостоятельной категории основаны на пространственно-содержательных свойствах транспортно-логистической структуры и её взаимодействии с внешней средой. В модель категории логистики следует относить помимо среды и подвижных объектов транспортной системы, объекты наземной транспортной инфраструктуры и вносимые ими ограничения. Категория логистики, как и другие элементы концептуальной модели, динамична и зависит от природных и антропогенных факторов, влияющих на решение её задач.

Основными составляющими системы АТА являются объекты транспорта: водного, наземного, авиационного, а также инфраструктура и система управления с вносимыми ее ограничениями. К основным составляющим внешней среды относятся ледовая, навигационно-гидрографическая и гидрометеорологическая ситуация. Влияние имплицитных факторов, таких как факторы и ресурсы социума, может быть значительным, но рассматривать их в модели мы не будем, а общий метод их учета будет описан в следующей главе. Неотъемлемыми составляющими элементами транспортно-логистической обстановки в систему АТА

включаются факторы, характеризующие неопределенности, опасности, угрозы и риски транспортных операций, как правило, в форме негативного потенциала воздействия природной среды.

На основании сказанного геомоделирование в категории логистики, главным образом, оперирует параметрами общей модели обстановки в георегионе, содержащей описание геосреды (цифровая карта, цифровая модель местности), множеством объектов транспортно-логистической обстановки, включая инфраструктурные: порты, маршруты, системы управления, службы обеспечения и т.п., и отношениями между ними в аспекте пространственной и содержательной упорядоченности. Упрощенная модель обстановки системы АТА представляет собой множество составляющих территориальную ситуацию инфраструктурных, географических, хозяйственных, транспортных геообъектов с определенными на них отношениями.

$$MT = (G_{IP}, F), G_{IP} \subseteq [IDP, IDV], \quad (3.74)$$

где G_{IP} – геообъекты; F – категория связей (отношений) между объектами; IDP – категория геоситуации; IDV – категория векторов состояния объектов.

Индекс из категории IP адресует геообъект G , о котором по данным вектора состояния из категории V доступна информация о собственном пространстве (пространственная конфигурация) и собственном многомерном пространстве признаков (описательные параметры, атрибуты, свойства и характеристики) объекта, которые проецируются в пространства:

$$\begin{aligned} IDP : G_{IP} &\rightarrow S_j^n \\ IDV : G_{IP} &\rightarrow R^n \mid n \geq 2 \end{aligned} \quad (3.75)$$

где S_j^n – функциональное пространство (геоситуация), R^n – физическое евклидово пространство порядка n .

Содержательные параметры геообъектов принадлежат многомерному функциональному пространству и характеризуют сущностные

характеристики его собственного пространства. С помощью явных и неявных отношений осуществляется структурирование (упорядочение) геопространства. Посредством определённых в модели отношений множество геообъектов становится геопространством, иными словами множеством со структурой, воспринимаемое как целое. В геопространстве между объектами выделяются отношения объективные (реальные) и идеальные (субъективные) (таблица 20).

Таблица 20 – Отношения объектов в геоситуации

Объективные (реальные) отношения					Идеальные (субъективные) отношения - оценки	
Пространственного упорядочения (ОПУ)		Содержательного упорядочения (ОСУ)				
Базовые	Производные	Таксономические	Организационные	Функциональные	Оценка пространства	Оценка содержания
Местоположение	Не соприкасаться	Класс	Руководства	Перемещения	Объектов СВОИХ сил	Объектов своих сил
Удаленность	Не находиться в, на	Род	Подчинения	Использования		
Критерий близости	Находиться между (за, после, перед) объектами А,Б	Вид	Разрешения	Применения	Объектов противника	Объектов противника
Граничность	Находиться снаружи	Генетические	Запрещения	Воздействия		
Соприкосновение	Быть напротив	Порождения	Согласования	Слежения	Явлений, объектов среды	Явлений, объектов среды
Совмещение	Находиться выше (ниже)	Следования	Утверждения	Наблюдения	Оценка влияния параметров собственного пространства ГО на параметры их содержания	Оценка влияния содержания ГО на параметры их собственного пространства
Контактирование	Соотношение	Независимости	Взаимодействия	Уклонения		
Включение	Находиться слева,..., в	Одномоментности	Таксономические	Преодоления		
		Предшествования	Обеспечения	Противодействия		

В состав модели транспортной активности входят подмодели составляющих ее элементов – рекомендованные маршруты, средства навигации, распределение вспомогательных транспортных средств, рискологические факторы, контроллинговая составляющая (решаемые задачи с их приоритетами, решение, план, оценка эффективности). Содержание модели общей обстановки в регионе (рисунок 64), в т.ч. и транспортно-логистической ситуации, представляет собой совокупность фактических значений векторов параметров и оценок составляющих факторов обстановки,

а также графического отображения территорий (акватории), параметров и соответствующих оценок. Например, для модели АТА это:

$$M_{ATA} = \left\langle \{V_{j1}^1, \dots, V_{j1}^s\}, \{V_{j2}^1, \dots, V_{j2}^N\}, \{V_{j3}^1, \dots, V_{j3}^P\}, \{V_{j4}^1, \dots, V_{j4}^T\}, \{V_{j5}^1, \dots, V_{j5}^R\} \right\rangle, \quad (3.76)$$

где $j1, \dots, j5$ – индексы геопространств, $\{V\}$ – множество векторов исходных данных, соответствующие наборам входных параметров обстановки для каждого из геопространств АЗРФ, V – вектора исходных данных и результаты пространственного анализа, промежуточных и окончательных вычислений:

- S – описывающих фактическое положение судов, параметры транспортных потоков на СМП;
- N – данные (параметры) гидрометеорологической и навигационно-гидрографические обстановки;
- P – инфраструктура, транспортно-логистическая составляющая;
- T – контроллинговые данные по решаемым задачам и установленным для них приоритетам;
- R – рискологические аспекты, рассчитанные параметры и вектора исходных данных по угрозам и рискам в акватории АЗРФ;

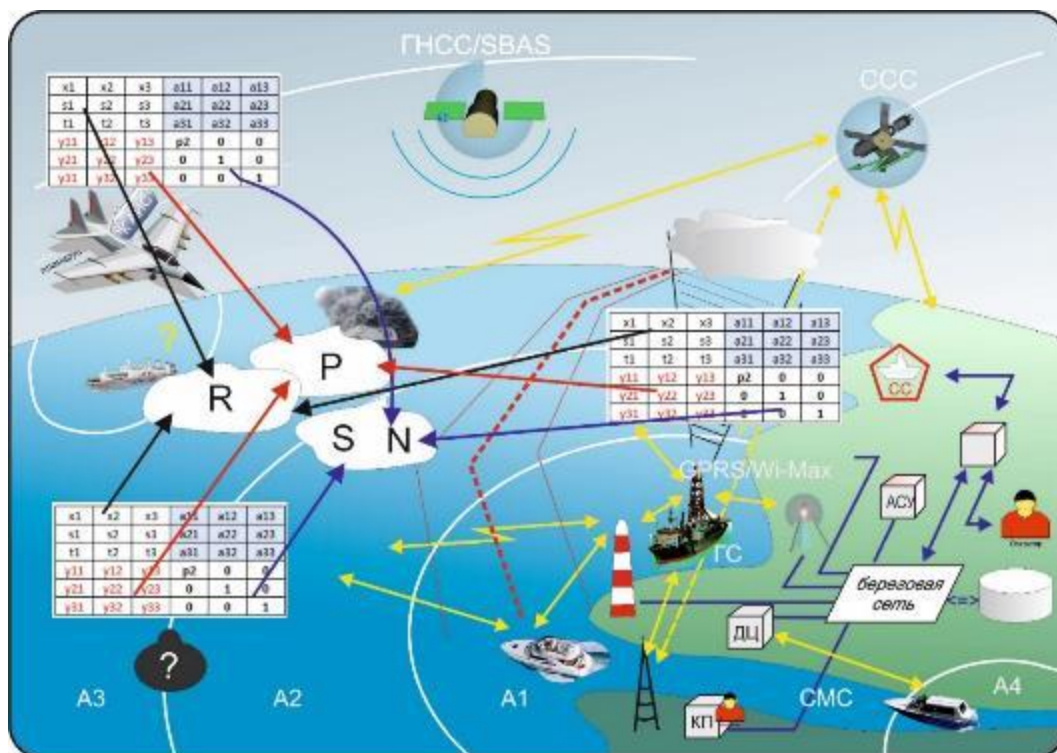


Рисунок 64 — Общая модель обстановки в регионе

Транспортно-логистическая составляющая P общей модели обстановки в регионе включает непосредственно данные о береговой транспортной инфраструктуре, рекомендованных арктических путях и транспортных потоках, которую можно выделить в отдельную подмодель, если динамика составляющих ее параметров значительно меньше, чем других параметров общей модели обстановки АТА. Аналогичным рассуждения справедливы в отношении рискологических аспектов R .

Параметры составляющих любых подмоделей, выделяемых из общей, задаются аналитически или параметрически, отображаются на специальных картах и в цифровых массивах геопространственной информации. Источниками данных для информационного наполнения подмоделей высокой динамики являются [123]:

- оперативные данные, полученные при решении задачи освещения обстановки;
- данные, получаемые от систем территориального ситуационного мониторинга;

- материалы ранее выполненных исследований;
- данные по результатам расчетов и моделирования;
- полученные из оповещений и альтернативных источников.

Рискологические аспекты модели обстановки АТА связываются с тремя базовыми концепциями риска [124] – риск как мера неопределенности, как следствие опасности или угрозы, как мера возможности. Для морских арктических грузоперевозок приемлемы первые две концепции, связанные с категориями «неопределенность», «опасность», «угроза».

Неопределенность – это недостаточность сведений об условиях, в которых будет протекать деятельность, низкая степень предсказуемости, предвидения этих условий. Неопределенность определяется недостаточностью данных об обстановке и низким качеством имеемой информации.

Опасность – это некий объект или явление, несущий в себе потенциальную возможность нанесения ущерба, выражаемую вероятностью. Опасность – необъективная категория, она проявляется как содержательное отношение между объектами или с внешней средой. Содержательность отношения можно проиллюстрировать таким примером: подъем грунта в виде банки является объектом навигационной опасности для плавания подводных судов, и в то же время выступает как район добычи биоресурсов.

Термин «риск» характеризует вероятность того, что каждая отдельно взятая опасность способна нанести ущерб или привести к возникновению нежелательных последствий. В ходе процесса оценки риска желательно распознать все виды опасностей, а также их факторы, механизмы, которые их причиняют, вероятность риска.

Угроза – это возможная опасность, реализованная по параметру «близость» как имеющая возможность контакта. Угрозы (риски) навигационной ситуации (ледовая обстановка, глубины, течения, ветер) в геопространственном отношении характеризуются содержательными параметрами опасных зон и их географическими параметрами собственного

пространства. Так непосредственно зона опасности Sp формируется, распределяется и изменяется в регионе (геопространстве) в зависимости от:

$$Sp = f_D(C, Cnt, V, CP, F_{EI}, t), \quad (3.77)$$

где: C – координаты опасной зоны; Cnt – граница (контур) опасной зоны; V – параметры перемещения опасной зоны; CP – содержательные параметры опасности; F_{EI} – факторы влияния окружающей среды; t – время.

Сложнее и динамичнее формируется и изменяется n -мерная топология и содержание рискованной зоны $RSpV$ территориальной системы «судно – опасная зона» (рисунок 65). Параметры зоны $RSpV$ зависят не только от физической природы и физико-географических условий региона, но и от их взаимного расположения, а также от содержательно-пространственных характеристик судна – его ледового класса, осадки, укомплектованности, наличия и обученности экипажа, состояния технических средств и систем освещения обстановки, относительных скорости, курса, расстояния:

$$\begin{aligned} RSpV &= f_R((P_V, W_V), (P_T, W_T)) \\ RSpV &\cong f(Sp, D_O, K_O, V_O, F_{EI}, H, CV, CP, t), \end{aligned} \quad (3.78)$$

где: P_V – вероятность инцидента с судном; W_V – оцениваемый ущерб от инцидента; P_T – вероятность осуществления угрозы; W_T – оцениваемый ущерб (негативные последствия) от реализации угрозы; D_O – расстояние между судном и центром опасной зоны; K_O, V_O – курс и скорость линии относительного движения; H – содержательные параметры (состояние) судна; CV – ресурсно-«стоимостные» параметры корабля; CP – «стоимостные» параметры нарушаемого процесса.

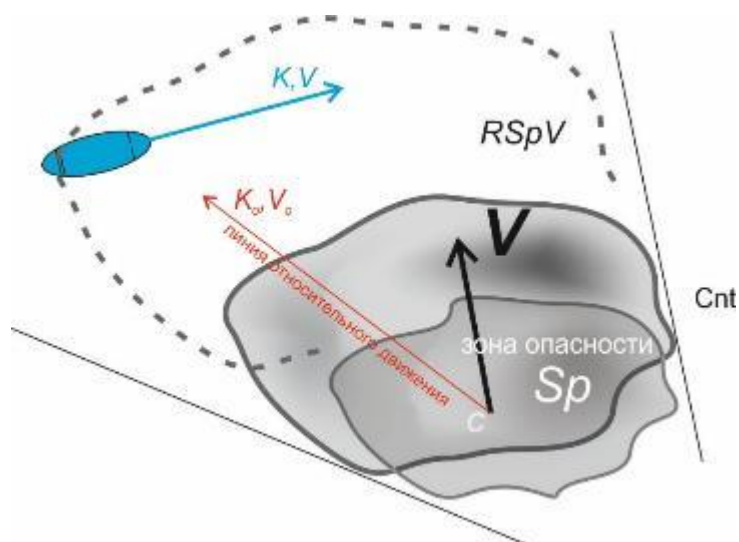


Рисунок 65 — Пространственно-содержательные параметры «относительной» RSpV
рисковой (опасной) зоны

Прогнозирование морских рисков при оценке остановки в системе рисковой АТА напрямую связано с прогнозированием ледовой, навигационно-гидрографической и гидрометеорологической обстановки. Процесс прогнозирования риска опирается на методы преобразований пространств на основании данных оперативного наблюдения, динамики пространственно-содержательных параметров, в том числе по внешним данным мониторинга от служб обеспечения флота на некоторую глубину в будущем. Методы прогнозирования гидрометеорологической обстановки – отдельный вопрос соответствующей отрасли. Отметим только тот факт, что чем больше глубина прогнозирования, тем меньше вероятность достоверности прогноза.

Модель категории логистики как контейнер, безусловно содержит в себе данные для решения классических транспортных задач логистики. Категория логистика содержит данные для построения множества взвешенных ориентированных графов по различным аргументам весовых функций, для решения логистических задач, удовлетворяющих некоторым ограничениям. На данных вложенных в категории логистики решаются задачи построения транспортной сети, например, в нахождении оптимального по одному или группе показателей, в построении кольцевого маршрута минимальной протяжённости (гамильтонов цикл минимальной длины), важность которого

для организации снабжения удаленных районов АЗРФ на зимний период трудно переоценить. Это связано с тем, что доставка груза должна осуществиться в пункты назначения (потребителям) за один рейс, с возвратом в начальный пункт отправления. При этом учитываются ограничения по вместимости, очередности, грузоподъемности, доступности транспортной сети, согласованность сетей разнородного транспорта.

Задача согласованности сетей разнородного транспорта подразумевает уравнивание целевых показателей, таких как объем, грузопоток, сроки, с учетом не целевых данных, например, размер грузовой единицы, сроки нормативных процедур, технологии перегрузки, таким образом, чтобы минимизировать выпадающие издержки. Решение такой задачи подразумевает использование методов теории графов по отображению между двумя графами, с сохранением структур. Отображение между набором вершин двух графов, которое отображает смежные вершины в смежные есть суть гомоморфизма графов, теоретическими закономерностями симметрии в которых занимается раздел математики теории групп [125,126], теории множеств и в совокупности теория категорий.

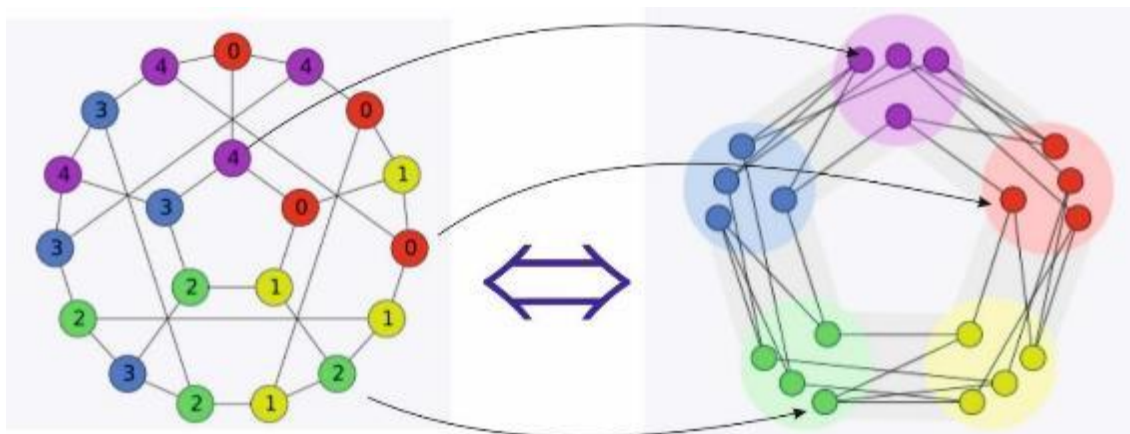


Рисунок 66 — Гомоморфизм графов разнородных сетей

Рисунок 66 иллюстрирует гомоморфизм графов, левый из которых, например, отображает пространственное расположение транспортных узлов, а правый их логическую компоновку по принадлежности к виду (цвету).

Морфизмами данной категории являются гомоморфизм графов, как отображение между графами, не нарушающее их структуру.

Построение транспортной сети начинается с выбора вершин графа. В товарных перевозках такую роль выполняют логистические центры, склады, пункты нахождения грузов.

Оценка (вес) каждого ребра сети определяется в зависимости от цели исследования, мерой достижения которой служит некоторый критерий эффективности. Но в основном в качестве веса выбирают критерий минимального времени, затраченного на движение. Дуги обладают весом, заданным, например, критерием пропускной способности или затратами.

Для решения логистических задач с реализацией методов теории графов успешно используются десятки программных продуктов, таких как «1С:TMS Логистика», «Махотра», «Умная логистика», «Киберлог», и т.п. Реализация подобных программных модулей в состав ГИС сама по себе не вызывает трудностей. Основная проблема лежит в выборе оптимальных для частных условий применения алгоритмов. Точные методы решения задач маршрутизации, которые могут быть разбиты на 3 большие группы: методы прямого поиска в дереве, динамическое программирование и целочисленное линейное программирование, в целом, затратные, переполнены деталями и главное - малоприменимы в слабо формализованных условиях АТА.

Рассмотренная система предлагаемых моделей и методов обеспечивает реализацию и классических алгоритмов, типа нахождения кратчайших маршрутов Дейкстры, алгоритма муравьиных колоний [127], классических эвристических алгоритмов Кларка–Райта и Соломона, двухфазных алгоритмов Фишера–Джекумера и пр. алгоритмов эволюционного моделирования с использованием искусственного интеллекта [128].

Для задач маршрутизации транспорта известно большое количество методов и подходов, направленных на получение как точных оптимальных решений, так и решений, которые дают неплохие приближения к оптимальному. Точные методы на сегодняшний день представляют в большей

степени теоретический интерес, так как время, требуемое ими на получение решения, достаточно велико, что органичивает их внедрение в информационные системы.

Эвристические алгоритмы достаточно просты, однако чаще всего ограничиваются нахождением хорошего решения лишь в относительно небольшой области, в то время как метаэвристики направлены на то, чтобы преодолеть этот недостаток и максимально расширить пространство поиска, где может быть найдено лучшее решение.

Одними из наиболее перспективных метаэвристических алгоритмов для задач маршрутизации транспорта считаются методы эволюционного моделирования и роевого интеллекта [129].

3.7. Выводы по третьей главе

В данном разделе на основании изложенных принципов геомоделирования системы АТА подробно рассмотрены группы моделей геопространств, группы подмоделей параметрической многоаспектной модели георегиона, обобщенная рискологическая модель и получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана модель геообъекта, формализуемая на основе категоризируемых структур в концептуальной модели АТА. Разработанная модель геообъекта получила способность к трансформации как абстрактный математический объект, с применением аппарата математических преобразований линейной алгебры и теории категорий.

2. Дополнена модель геоинформационного пространства, отличающаяся топологическим переходом наполняемых его структур от географически конкретного представления территориальной ситуации к пространственно-абстрактному представлению, что позволяет формировать наборы исходных геоданных для работы с применением ИНС.

3. Усовершенствована модель геофункционального пространства, которая позволяет моделировать ситуации на основе гомеоморфных

преобразований. Данные преобразования сохраняют топологические свойства и содержательную динамику географических объектов, даже когда они отображаются в анаморфированном виде.

4. Модель геофункционального пространства оптимизирована для анализа и обработки динамических данных, что делает ее более удобной в ситуациях, когда необходимо срочное принятие решений.

5. Предлагаемая параметрическая модель географического региона отражает описание региона на основе гетерогенной информации, включающей в себя как структурированные, так и слабо структурированные данные, при этом часть данных может быть получена в автоматическом или полуавтоматическом режиме от датчиков объекта или внешних информационных систем.

6. Разработан математический аппарат, позволяющий при использовании концептуальной модели АТА на базе категорий учитывать влияние имплицитных факторов, роль которых в процессе выработки рекомендаций в системе принятия решений может оказаться существенной.

7. Группа моделей адаптирована для использования ИНС и ИИ в автоматизированных системах распознавания обстановки, идентификации и классификации объектов.

8. Подробно представлена обобщенная рискологическая модель обстановки, обеспечивающая геомоделирование территориальных транспортных систем в динамике сущностно-содержательных свойств и их собственных пространственных характеристик с возможностью анализа гомоморфизмов геоситуации.

Имплицитные (малозначащие) факторы, как правило, не определяют ход решения целевых задач в системе ППР и их учет остается за ЛПР. Однако в совокупности причин роль имплицитных факторов может быть существенной. Включение в параметрическую модель имплицитных факторов осуществляется именно через корреляционные матрицы категорий, на простом принципе функции эластичности (рисунок 67).

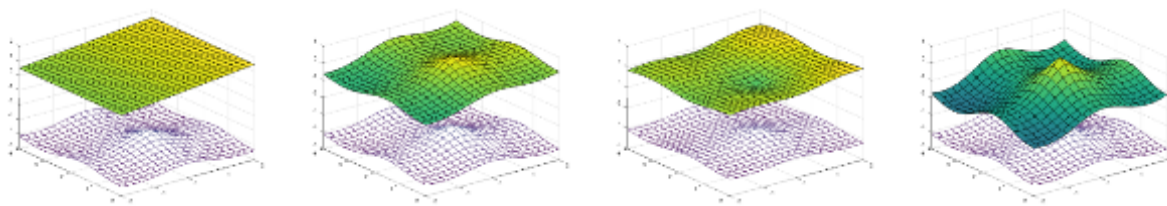


Рисунок 67 —Иллюстрация корреляции имплицитных параметров на основе функции эластичности

В задачах распознавания, классификации и идентификации визуальных данных рекомендуется использовать совокупность небольших, специализированных и обученных ИНС набор которых будет определяться из соображений детерминированного подхода к числу классов объектов и их представлений от физических датчиков (рисунок 62).

Имея возможность получения в автоматическом режиме данные наблюдений, возможность распознавания и классификации ГО, концептуальная модель АТА наполняется данными, на основании которых система ППР способна в реальном времени решать целевые задачи по геоинформационному анализу и выработке рекомендации снижения риска.

Геомоделирование территориальных транспортных систем отражает их содержательные и пространственные свойства в динамике, включая риск-параметры логистических процессов на всех этапах управления перевозками.

Категоризация как метод структурирования преобразует разрозненные данные в систему взаимосвязанных знаний, где каждый элемент (объект, параметр или связь) становится функциональной частью аналитического процесса. Такой подход принципиально важен для действующих систем, где ключевую роль играет не просто хранение информации, а её осмысленное применение для принятия решений.

На практике эти категориальные связи формируют комплексную аналитическую среду, например - подбор судна для арктического плавания от ледового класса до требований к экипажу.

4. МЕТОДОЛИНГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕОКОНТРОЛЛИНГОВОЙ ПОДДЕРЖКИ РИСКОВОЙ АТА

4.1. Методы создания и использования геоинформации

Методической основой геоинформационного управления служит общий метод создания и использования информации с географическим аспектом – геоинформации (ГИ). Общий геоинформационный метод служит для организации сквозной интегральной обработки геоинформации в АСУ и полнофункционального пространственного анализа (рисунок 68). Суть метода состоит в автоматизации ручных технологий создания и использования картографической (геопространственной) информации, переходе от ручного составления карт специалистом-картографом к геоинформационной технологии работы с информацией и изображениями, содержащими географический аспект.



Рисунок 68 — Структура общего геоинформационного метода отображения и использования ГИ: ДЗЗ – данные зондирования Земли; ОперИ – оперативная информация; АИ – априорная информация; ОИ – описательная информация

Геоинформационный метод отображения – это цифровая трансформация традиционного картографического метода исследования в

современную цифровую картографию [130], геомониторинги, автоматизированный пространственный анализ и т.д.

Предпосылками появления и формирования общего геоинформационного метода послужили:

- теоретический и методический аппарат компьютерного моделирования;
- развитие, широкое внедрение и использование геоинформатики;
- развитие спутниковой навигации, цифровых и электронных карт;
- внедрение беспилотных авиационных и морских средств мониторинга;
- развитие средств связи и телекоммуникации, интернета;
- современная система геоинформационного и геоэкологического образования.

Становление геоинформационных методов обуславливается:

- ростом объемов и пространственного охвата обрабатываемой территориальной информации в органах управления, усложнением решаемых с помощью ГИ задач;
- необходимостью расширения приемов и способов пространственного анализа разнородной ГИ;
- потребностями автоматизированного управления в технологиях сквозной, согласованной, оперативной обработки ГИ;
- необходимостью преодоления ограничений картографического метода создания и использования ГИ.

Структуру метода составляют процедуры отображения и анализа ГИ, то есть данных обстановки, на всех этапах обработки ГИ при поддержке управления. Это приемы и способы ввода, согласования, преобразования и визуализации геоинформации, а также приемы анализа и способы работы с отдельными цифровыми данными, содержащими географическую информацию. Они основываются на известном картографическом методе отображения и исследования [27,131], и в расширение картографического метода обеспечивают участием пользователя в создании ГИ, использование первичной полевой информации при составлении карт, расширение

номенклатуры приемов и методов преобразования и анализа информации. ОГМ является результатом последовательного развитием КМ на базе методологии геоинформатики, компьютерной графики, геоинформационного картографирования, дистанционного зондирования, средств и систем интегральной навигации и управления, электронных карт.

По аналогии с методами компьютерного моделирования геоинформационные методы работы с ГИ включает два основных этапа – геоинформационный метод создания (отображения) и геоинформационный метод использования геоинформации. Однако от компьютерного моделирования геоинформационные методы отличаются согласованностью и совместным использованием разнородной геоинформации, более высокой степенью объективности отображения и геопространственного и геоструктурного анализа данных с географическим аспектом. Основное назначение ГИС – организация и обеспечение интегральной, сквозной, согласованной обработки разнородной ГИ для обеспечения отображения и анализа территориальной обстановки. Вопросы, относящиеся к автоматизации непосредственного управления или поддержки принимаемых ЛПР решений, традиционно относятся к системам и области ответственности АСУ, комплексирования и интеграция которых с ГИС уже попала в область внимания разработчиков информационных систем.

4.1.1. Геоинформационный метод создания пространственной информации

Геоинформационный метод создания ГИ включает разрабатываемые геоинформатикой приемы и способы ввода (сканирование, цифрование, обработка данных дистанционного зондирования (ДДЗ), обмен по вычислительным сетям), преобразования (форматов, координат, протоколов, кодирования), согласования (по ГР, по отношению, по точности, по дискретности), совместной обработки разнородной ГИ (априорной и оперативной), визуализации ГИ [48, 53, 60]. Геоинформационный метод

создания строится в соответствии с принципами, требованиями и рекомендациями по формированию ГИ в АСУ, геомодельными представлениями АСУ.

Метод дополнительно включает способы обработки ГИ, которые устраняют недостатки картографического метода отображения и обеспечивают: оперативность создания ГИ и выполнения разнообразных преобразований и согласований ГИ, обусловливаемую автоматизацией сбора, обработки, актуализации, обмена и отображения ГИ, совместной обработкой оперативной (информация от системы наблюдения, ДЗЗ) и априорной ГИ (карты); объективность отображения обстановки, обусловливаемую устранением фактора картографа-составителя, участием пользователя в формировании ГИ, доступом к первичным данным полевых наблюдений, совместной обработкой разнородной ГИ; повышение эргономических качеств ГИЗ за счет реализации адаптивной информационной модели отображения ГИ и ГИЗ, взаимно-однозначного соответствия картографической и описательной форм ГИ.

С точки зрения проблематики автоматизированного управления ГО геоинформационный метод отображения обеспечивает:

- формирование однородного геоинформационного поля АСУ за счет хорологизации данных и согласования различной ГИ;
- формирование однородного геоинформационного поля АСУ за счет согласования различной ГИ на основе хорологизации данных;
- представление геоситуации в близком к реальному масштабу времени за счет совместной обработки априорной и оперативной ГИ;
- активность пространственного представления содержательной составляющей ГИ за счет реализации взаимно-однозначного соответствия основных форм ГИ – описательной и графической (картографической).

4.1.1. Геоинформационный метод использования пространственной информации

Геоинформационный метод исследования базируется на концептуальной модели использования и визуализации данных, принципах геомоделирования и применении геомodelей. Этот метод представляет собой комплекс подходов и технологий, направленных на преобразование, анализ и интерпретацию ГИ для проведения глубокого и всестороннего пространственного анализа. Он позволяет выявлять закономерности, взаимосвязи и динамику изменений в пространственных данных, что способствует решению широкого круга задач в области территориального планирования, мониторинга окружающей среды, управления ресурсами и других сфер. Метод включает приемы и способы: определения, описания, графические и графоаналитические приемы, морфометрии и картометрии, математико-геоинформационного моделирования, преобразования ГИ, геоструктурного и геопространственного анализа, анализа разновременной и категоризированной ГИ.

От картографического метода исследования, геоинформационный метод отличается:

- более высокой оперативностью, объективностью и точностью пространственного анализа;
- расширением номенклатуры приемов и способов территориального анализа, акцентом на геопространственных и геоструктурных исследований ситуации.

Основные приемы и способы метода исследования:

- описания, наблюдения и определения, как первичную основу для сбора фактографических данных о территории и проведения базового пространственного анализа;

- графические и графоаналитические приемы, связанные с прямыми измерениями по карте и последующими расчетами, обеспечивающими пространственное моделирование;
- приемы математико-геоинформационного моделирования, направленные на совместное применение математических и геоинформационных моделей для получения новой идеальной пространственной информации;
- способы преобразования изображений, обеспечивающие трансформации ГИ в вид, пригодной для выполнения пространственного анализа и решения задач территориальных приложений; базируются на операциях геопространств;
- способы работы с сериями разновременной и разнолокализованной ГИ, позволяющие устанавливать связи ГО разной тематики или территории, а также определять параметры системной динамики объектов и процессов на ЗП;
- способы работы с геоструктурами, включающие определение на основе отношений пространственного и содержательного упорядочения геопространства базовых территориальных образований (ГО, ГР, геосистем), а также пространственный и тематический анализ этих структур;
- способы работы с геопространствами.

Любое территориальное исследование начинается с описания пространственных явлений и связей между ними. Это первичная фактография. На геоинформационном уровне определение или наблюдение состоит в запросе к базе пространственных данных для получения территориальных и содержательных характеристик ГО. Описание может сопровождаться качественными оценками (синтез) и количественными исследованиями (анализ). Описание позволяет детализировать графические данные (условные знаки объектов на изображении карт), расписывая их по слоям.

С помощью описания осуществляется текстовое сопровождение ГИ для пояснения поставленных задач и отображаемой обстановки, детализации ГИ,

передачи рекомендаций ЛПР по действиям при решении стандартных задач в типовых условиях обстановки.

Наблюдение (описание) сравнимо с чтением обычной карты. Оно включает подсчет и определение положений объектов, того что, где и в каком количестве находится.

Одной из наиболее важных причин для поиска и определения ГО является возможность выполнения их дальнейших измерений и сравнений. Количественные характеристики ГО позволяют выполнять прямые аналитические сравнения с другими тематическими покрытиями.

Наблюдение и определение объектов выполняется с помощью моделей ГО. Графические и графоаналитические приемы [27, 54] представляют различные измерения и построения на картах. Выполняется определение длин, расстояний, направлений, углов, площадей, объемов и т.д. вместе с определением местоположения и подсчетом ГО эти приемы образуют полный комплект начальных возможностей для более сложных методов территориального анализа.

Приемы математико-геоинформационного моделирования, как и математико-картографическое моделирование [132] включают совместное последовательное или циклическое выполнение математических и картографических определений, преобразований и отображений ГИ в ходе территориального анализа. Они подразумевают получение с помощью наблюдений и определений фактических тематических и позиционных параметров объектов, наполнение этой информацией, генерирование с помощью математических моделей новой производной пространственной информации, отображение полученных посредством математического моделирования данных в форме карты или изображения и последующий анализ этой идеальной информации самостоятельно или совместно с исходной картой. Если в основе формирования математической модели лежат географические характеристики и признаки; процесс построения математической модели исходит из основных географических принципов

системного анализа, величины, характеризующие состояние геообъектов, увязываются в определенной логической последовательности на базе подходов геомоделирования, то получаемые при этом по логико-математическим законам последовательности образуют математико-геоинформационные модели.

Математико-картографическое моделирование, являясь разновидностью географического моделирования, представляет комплексирование математических и картографических моделей в системе "создание – использование" карт в целях конструирования и пространственного анализа тематического содержания карт. Картографическая информация здесь используется двояко:

- как источник тематической информации для математических моделей;
- как отображение результатов математического моделирования тематического содержания карт.

Важным направлением использования математического анализа в территориальных исследованиях являются методики аппроксимации, применяемый для моделирования кривых и поверхностей, разложения изображений на составляющие.

При аппроксимации поверхностей и полей решаются чисто интерполяционные задачи построения поверхностей по отдельным значениям параметра для достижения наиболее полных приближений в заданных пределах. При этом осуществляется использование особых структур данных для работы с поверхностями: грид сетки, TIN-модели (триангуляционные нерегулярные сети), полигоны Тиссена, диаграммы Вороного и др. [56].

Математическая статистика имеет широкое применение при исследованиях по картам и фотографиям ДЗЗ, в картометрии и морфометрии. Заимствованные методы статистики модифицируются в соответствии с особенностями и требованиями пространственного анализа. Основной дефект статистических показателей – их недостаточная пространственная дифференцированность. Нельзя проследить различия от места к месту

обобщающих статистик или показателей связи, полученных для какого-либо участка, области или района. Поэтому разрабатываются способы картографирования самих статистик: средних, дисперсий или других моментов. Выполняется картографирование взаимосвязей явлений, составление специальных схем районирования территории по степени взаимного соответствия явлений.

Приемы теории информации, информационные функции для территориального анализа используются в двух направлениях:

- применение функции энтропии в качестве показателя неоднородности представления сложных структур региона: рельефа, грунта, геологического строения и др. свойства этой функции позволяют получать синтетическую оценку пространственной дифференциации явлений;
- использование информационной меры в качестве показателей соответствия явлений на представления разной тематики, подобно тому, как это осуществляется в теории корреляции.

Вычисление информационных критериев не связано с ограничениями, накладываемыми особенностями распределения сопоставляемых величин. Расчеты можно выполнять и в том случае, когда одно или оба сопоставляемых явления не имеют в представлении числовых характеристик, а подразделяются только по качественным градациям (порядковая шкала).

Приемы теории графов позволяют наглядно моделировать сети, маршруты, коммуникации, иерархические структуры ГИ и т.д.

Приемы математико-географического моделирования позволяют увеличивать количество пространственной информации в территориальных исследованиях за счет генерации новой производной геинформации.

Способы преобразования ГИ обеспечивают трансформацию геоданных в требуемый вид или форму. По сути являются операциями над объектами ГП. Это известные операции: анаморфирования; абстрагирования; генерализации; проекционные преобразования; преобразования масштаба, перспективы и др.

Методы работы с сериями ГИ и их визуализацией включают в себя так называемые техники наложения (оверлеи). Эти приемы предполагают сравнение данных одного слоя с другими слоями. Они применяются для выявления взаимосвязей между географическими объектами, явлениями и процессами, а также для создания новых слоев на основе нескольких исходных. Основная цель наложений — формирование итоговых оценочных слоев, которые выделяют области на исследуемой территории, где возможны определенные виды деятельности. Результаты наложений также позволяют анализировать причинно-следственные связи между географическими явлениями и процессами.

Способы работы с геоструктурами – наиболее существенная составляющая аппарата геоинформационного метода исследования. Основное назначение способов – пространственное упорядочение и структурирование геосреды. Они включают:

- определение территориальных или пространственных объектов;
- установление отношений между ГО;
- выделение регионов и структур на основе выявленных отношений пространственной и содержательной упорядоченности;
- выполнение пространственного анализа геоструктур, определение их метрических и топологических характеристик.

Геообъектный анализ подразумевает, во-первых, выделение ГО в пространстве путем анализа: плотности территориальных распределений; концентрации; коммуникаций; миграций; узлов и узловых районов; центральных мест и др. территориальных явлений.

Во-вторых, определение пространственных характеристик ГО – положение, конфигурация, форма и т.д.; в-третьих, осуществление преобразований – переносы, развороты, буферизация, окрестности и др.

Георегиональный анализ включает, во-первых, установление отношения пространственной упорядоченности между геообъектами: территориальные распределения (расстояние); соседство (окрестность). Во-вторых,

определение георегионов как территориальных структур взаимного размещения.

В-третьих, анализ ГР:

- определение конфигурации и протяженности – собственное пространство, ориентация, форма;
- определение пространственных распределений на территории – выявление того, как точки, линии и области образуют измеримые паттерны, дающие ключ к пониманию того, как устроены территориальные объекты или явления. За пространственным распределением может быть выявлен источник или первопричина процессов в регионе;
- определение концентрации в регионе, интегрально характеризующей тяготение ГО к каким-либо пунктам в пределах анализируемой территории, выявление распределений потенциалов по территории, как источника функциональной или природной активности в регионе.

В-четвертых, определение динамики явлений и процессов в регионе.

В-пятых, определение геоструктуры и параметров связей между элементами геосистем, определение системообразующих элементов и связей. структурное моделирование.

Работа с геопространствами реализует подход к территориальному анализу как к исследованию конкретного пространства предметов и явлений географической действительности в различных формах его выражения. Форма представления пространства связана с существом решаемой задачи геоанализа и нацелена на адекватное пространственное отображение содержательной сущности исследуемых объектов и явлений геосреды.

4.2.Методика ведения оперативной информации

С применением современных методов преобразования математических структур и применением технологий ИНС, как показано в предыдущем разделе, значительно расширяются возможности по распознаванию и классификации географических объектов с использованием датчиков

различной физической природы. Помимо классификационных задач в процессе наблюдения и анализа изменений во времени регистрируемых физических полей как первичных, так и вторичных, источником которых служат географические объекты, возможно получение широкого спектра их динамических характеристик, определяющих тренд и перспективу развития геоситуации.

Рассматривая процесс управления в кибернетических системах различают два вида информации:

- структурная информация, присущая всем объектам живой и неживой природы естественного и искусственного происхождения и возникающая как результат самого факта существования объекта в системе или среде в форме определенных структурных связей;
- оперативная, циркулирующая между объектами материального мира и используемая в процессах управления в живой природе, технических системах и человеческом обществе.

Определение оперативной информации опирается на характеристику «циркулирующая», что определяет зависимость оперативной информации от времени. Таким образом, оперативная информация содержательно наполняется динамическими характеристиками, суть которых, как правило, есть производная структурной информации по времени. Для простоты обращения с динамическими характеристиками целесообразно хранить их в виде параметрической составляющей вектора состояния геообъекта.

Важно отметить, что оперативная информация возникает как результат отклонения параметров системы во времени под воздействием среды, внешнего управления или как результат проявления внутренних свойств исследуемого объекта. В динамике происходит отбор и накопление полезной, с точки зрения целевой функции, информация, превращение ее в структурную, тем самым дополняя вектор свойств геообъекта как элемента класса или категории, так и конкретного в коротком промежутке времени.

При качественном различии структурной и оперативной информации, в содержательном представлении они обе изоморфны, что дает нам право структурировать ее в одной категории и является объективной предпосылкой широкого использования искусственных информационных систем, реализующих функции имитации и прогнозирования реальных процессов. Тем самым формализованная оперативная информация может служить источником: классификационных признаков в процессе идентификации объекта и первичной информации в задачах обучения, адаптации и прогнозирования развития ситуации.

Таким образом в предлагаемой модели географического объекта оперативная параметрическая динамическая информация является частью его вектора состояния. Процесс сбора, анализа, идентификации и классификации оперативной обстановки для формирования формуляров географических объектов эффективнее выполняются автентические системы и комплексы наблюдений. Визуализация оперативной информации для оператора ГИС осуществляется в, уже ставшем стандартным и привычным формате, с использованием дополнительных слоев над картой подложкой.

4.2.1. Применение методики формирования оперативной обстановки на примере анализа радиоголограмм

Выше была подробно описана и обоснована актуальность оперативного сбора пространственных данных для анализа, идентификации и классификации ГО и геоситуации.

Рассмотрим в свете предложенной концепции реализацию метода автоматического распознавания целей на радиолокационных изображениях от радаров с синтезированной апертурой (РСА, англ. SAR). Этот источник информации интересен тем, что исходные данные со спутников с радарми РСА не зависят от оптической проницаемости атмосферы, поступают ежедневно и доступны на серверах компаний владельцев, в том числе отечественных.

Комплексная радиоголограмма является результатом детектирования суммы отраженных сигналов от множественных объектов на земной поверхности [152]. Известно, что все этапы радиолокационного обзора поверхности с использованием РСА математически описываются в рамках теории линейных систем с выполнением соответствующих законов. В частности, результат операции над суммой сигналов равен сумме результатов операций над каждым сигналом. Это позволяет при синтезе радиоголограммы получить радиолокационные изображения как сумму сжатых откликов множества наземных точечных целей и, таким образом, разрешить (разделить) отдельные цели на изображении.

Для Арктического региона актуальность изображений РСА резко возрастает из-за проблем визуального (для технического зрения оптического) восприятия ледового покрова, не обладающего текстурой. Изображения ледового покрова на радиолокационных изображениях РСА содержат информацию о структуре, плотности и толщине льда, наличии трещин, запорошенных поймах и пустотах, не видимых в оптическом диапазоне даже на малых расстояниях.

Данный вид зондирования Земли известен давно, но неочевиден для широкого применения при анализе транспортной активности, так как имеет сложную специфику и, главное, требует проведение многоэтапной постобработки для получения привычной для анализа человеком визуальной картинки [136]. Пример радиоголограммы группы морских судов и обработанных данных радиосканирования от спутника с РСА в X диапазоне приведен на рисунке 69.

Все больше внимания уделяется разработке программных комплексов формирования радиолокационных изображений высокого (1 метр и более) и сверхвысокого (менее 1 метра) разрешения. Также, в развитии РСА можно отметить такие направления как сокращение периодичности наблюдения до одних суток (в том числе, для обеспечения возможности получения интерферометрических пар данных), использование различных диапазонов

частот и типов поляризации (в том числе, для повышения информативности). Обработанные данные используются для решения ряда тематических задач, в том числе, для оценки характеристик наблюдаемых пространственно распределенных объектов (мониторинг транспорта, ледовой обстановки, геологическое картирование, оценка площадей пожаров и наводнений, контроль границ застройки, целостность дорог, трубопроводов и др.).

При стандартной обработке для приемлемой визуализации осуществляется синтез радиолокационной информации из радиоголограммы, последующая передискретизация из системы координат наклонной дальности в системы координат наземной дальности, перепроецирование в геодезическую системы координат, устранение спекл-шума, искажений от поляризации, многоучёвости, диффузии и т.п.

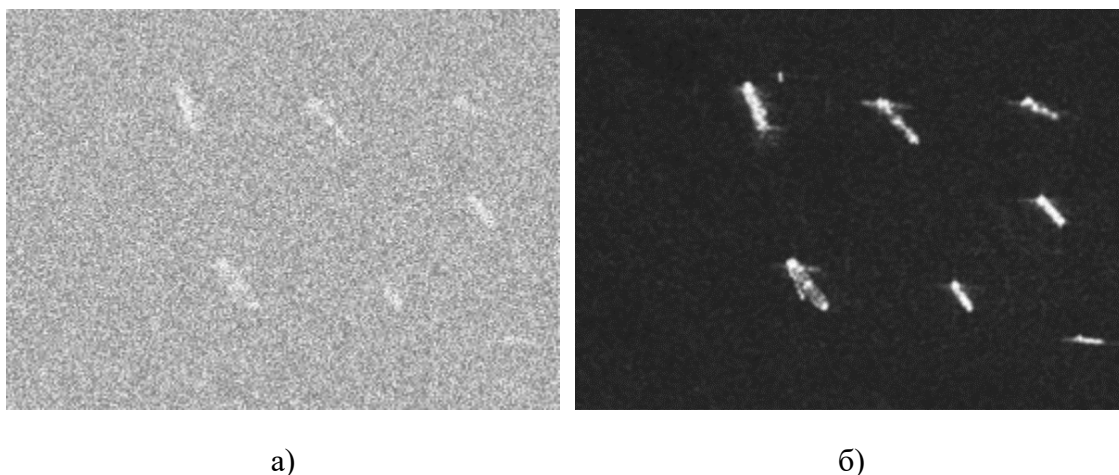


Рисунок 69 — Морские суда по данным РСА (а) радиоголограмма (б) частично обработанное изображение

Обработка первичных данных РСА в визуальный ряд опираются на операции преобразований над множествами, что в системе категорий соответствует морфизмам объектов. Если у нас задача идентификации, классификации и выделения динамических свойств наблюдаемых объектов возлагается на ИНС, то часть преобразований, связанных с визуализацией, в последствии можно упростить или вовсе исключить. Основными архитектурами ИНС, в которых работа с геоданными эффективна, являются

многослойный перцептрон, рекуррентная нейронная сеть и сверточная нейронная сеть [137, 138].

4.2.2. Предварительная обработка изображений

Если фоновый шум изображения слишком сильный, точность распознавания снизится.

Гистограмма серого изображения представляет статистическое распределение значений серого в пикселях изображения. Распределение оттенков серого на изображении РСА неоднородно, и яркость изображения одной и той же цели может изменяться в разных сценах, поэтому использовать одно пороговое значение недостаточно. Фоновый спекл-шум может остаться на некоторых изображениях и детальные характеристики цели могут быть потеряны. Следовательно, необходимо выполнить выравнивание гистограммы для сегментов изображения РСА, с применением динамического диапазона значений пикселей, отрегулировать контрастность изображения, а затем выбрать частный порог для каждого сегмента изображения.

Обозначим r оттенки серого исходного изображения РСА и s это оттенки серого изображения после выравнивания гистограммы. Функция преобразования из r в s может быть выражено с помощью:

$$s=T(r) \quad (4.1)$$

где $T(\cdot)$ функция преобразования.

Для облегчения рассуждений установим для $T(\cdot)$ следующие условия:

$$\left[\begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1, 0 \leq s \leq 1 \\ \text{для } 0 \leq r \leq 1, T(r) \text{ это монотонно возрастающая функция} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Затем функция преобразования из s в r может быть записан как:

$$r=T^{-1}(s) \quad (4.3)$$

где $T^{-1}(\cdot)$ является оператором обратного преобразования.

Чтобы удовлетворить вышеуказанным условиям, предположим, что $T(r)$ является функция распределения вероятностей r :

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(v) dv, \quad (4.4)$$

$$\frac{ds}{dr} = \frac{dT(r)}{dr} = p_r(r)$$

Плотность вероятности преобразованных оттенков серого s может быть получено в соответствии с плотностью вероятности функции случайной величины:

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{dr}{ds} \right]_{r=T^{-1}(s)} = 1, \quad (4.5)$$

Видно, что значение серого на изображении РСА после преобразования распределено равномерно. Для дискретной функции оператор кумулятивного распределения каждого оттенка серого гистограммы можно рассматривать как функцию преобразования, а значение серого для преобразованного изображения можно записать как:

$$q(i) = \sum_{k=0}^i p_r(r_k) = \sum_{k=0}^i \frac{n_k}{n}, \quad (4.6)$$

где $i=0,1,2,\dots,255$, n количество элементов изображения, n_k количество элементов в шкале оттенков серого r_k , и $p(r_k)$ какова вероятность k -го оттенка серого.

Затем значение серого преобразованного изображения преобразуется в диапазон $[0 \dots 255]$ в соответствии с:

$$s(i) = 255 \cdot q(i), \quad (4.7)$$

Видно, что распределение оттенков серого на изображении РСА после выравнивания гистограммы близко к равномерному распределению, и контрастность изображения скорректирована, что закладывает основу для последующего выбора равномерного порога при сегментации изображения.

2.2. Пороговая сегментация

Пороговая сегментация изображений — это один из самых простых методов сегментации, который позволяет разделить изображение на области

(сегменты) на основе интенсивности пикселей. Этот метод особенно полезен для обработки изображений с четким разделением объектов и фона, но для изображений РСА пороговая сегментация реализуется сложнее.

Изображения РСА нормализуются после выравнивания гистограммы, и целевые области, представляющие интерес на изображениях РСА, выделяются путем выбора единообразных пороговых значений (рисунок 70). Предположим, что Q получается ли РСА изображения после равновесной нормализации, (x,y) есть ли какой-либо пиксель изображения Q , и P является ли изображение двоичной маски РСА после пороговой сегментации. Если $Q(x,y) < \eta$, тогда $P(x,y) = 0$ и этот пиксель рассматривается как фон; если $Q(x,y) \geq \eta$, тогда $P(x,y) = 1$ и этот пиксель распознается как цель, а η является единым порогом.

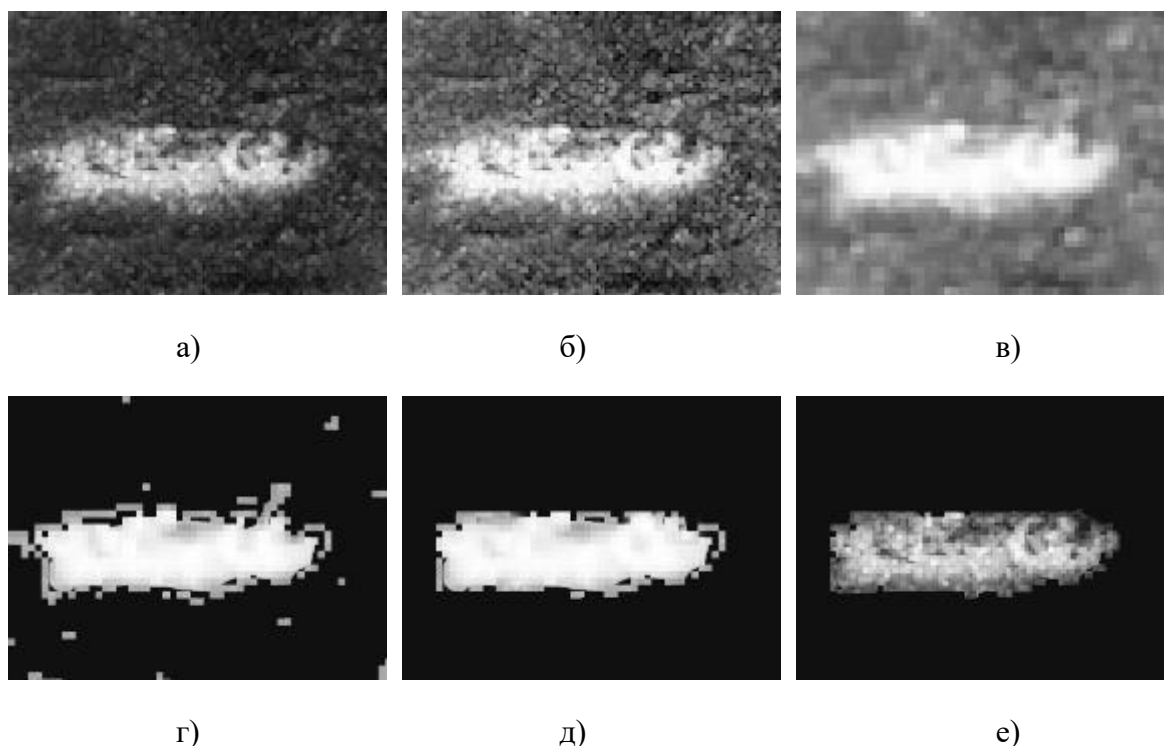


Рисунок 70 — Пороговая сегментации изображения РСА: (а) исходное частично преобразованное изображение, (б) нормализация равновесия, (в) фильтрация среды, (г) пороговая сегментация, (д) морфологическая фильтрация и (е) сегментированное изображение

Существуют методы автоматического выбора локального порога, используемого для отдельных участков изображения, но в большинстве

случаев при отсутствии явных засветок на изображении РСА достаточно автоматически выбираемого оптимального порога.

Пороговая сегментация позволяет отделить объекты от фона, преобразовать изображение в бинарное или значительно упростить его для последующего анализа, что можно рассматривать как морфологическую операцию над объектом снижающую размерность его модели.

Пороговая сегментация — это мощный и одновременно простой инструмент для обработки изображений, который позволяет выделять объекты, упрощать данные и подготавливать их для дальнейшего анализа. Однако ее эффективность зависит от качества изображения и правильного выбора порога. Для более сложных задач пороговая сегментация часто комбинируется с другими методами, такими как морфологическая обработка или методы машинного обучения.

2.3. Морфологическая фильтрация

Морфологическая фильтрация — это метод обработки изображений, основанный на математической морфологии, которая используется для анализа и изменения структуры объектов на изображении, таких как их форма, размеры и границы. Морфологическая фильтрация применяется после этапа сегментации (например, пороговой сегментации) для улучшения качества изображения и подготовки данных к дальнейшему анализу.

Основные цели морфологической фильтрации изображений являются:

- удаление шума и артефактов;
- улучшение формы объектов, устранение пустот и разрывов;
- разделение слипшихся объектов;
- удаление лишних деталей.

Типовые морфологические операции над изображением:

- эрозия - уменьшает размер объектов, удаляя пиксели на границах, используется для удаления мелких объектов или разделения слипшихся;
- дилатация - увеличивает размер объектов, добавляя пиксели на границах, для заполнения разрывов в объектах или соединения близлежащих объектов;

- открытие - комбинация эрозии, а затем дилатации;
- закрытие - комбинация дилатации, а затем эрозии;
- выделение границ, вычитание эрозии из исходного изображения позволяет выделить границы объектов;
- замыкания и размыкания, используются для сглаживания внешних или внутренних областей объектов;
- скелетизация преобразует объекты в их силуэты (тонкие линии, сохраняющие форму объекта).

Чтобы уменьшить спекл-шум и нечеткость границы цели на изображении двоичной маски РСА, необходимы некоторые операции фильтрации для сглаживания и подавления спекл-шума. Здесь используется морфологическая фильтрация. Установим $B(x,y)$ коррозия и расширение могут быть определены как структурный элемент соответственно как:

$$(Q - B)(x, y) = \min\{Q(x - m, y - n) - B(x, y), (x, y) \in D_B\}, \quad (4.8)$$

$$(Q \oplus B)(x, y) = \max\{Q(x - m, y - n) + B(x, y), (x, y) \in D_B\}$$

где: DB соответствует области структурного элемента $B(x,y)$. Если размер области в пикселях $M \times N$, тогда $1 \leq m \leq M$, $1 \leq n \leq N$. Определим операции очистки и заполнения как:

$$Q \circ B = (Q - B) \oplus B$$

$$G \circ B = (G \oplus B) - B, \quad (4.9)$$

Очистка позволяет удалить изолированные точки и заусенцы. Заполнение позволяют заполнить небольшие пустоты области, соединить соседние объекты и сгладить границы.

Морфологическая фильтрация на основе категорийной принадлежности объекта является мощным инструментом улучшения содержательного качества изображений, что позволяет удалять шум, улучшать форму объектов и подготавливать данные для дальнейшего углубленного анализа.

Рекомендуемая последовательность преобразований изображений РСА приведена на рисунке 71.

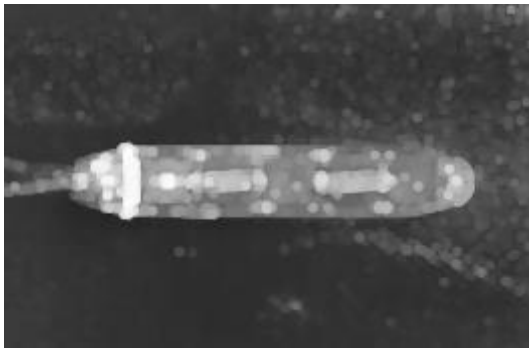


Рисунок 71 — Последовательность предварительной обработки изображений РСА

Таким образом, с помощью ряда операций преобразования, отображения и морфологии математических структур, каковыми в настоящем примере являются изображения (или фрагменты радиоголограмм) РСА, предварительно обработанные изображения становятся содержательно насыщенными, свободными от лишней информации и доступными для визуального анализа оператором.

4.2.3. Улучшение изображения РСА

РСА изображения достаточно дорогие в плане объемов обрабатываемых данных измерений и их передачи на сервера центров управления. В свою очередь РСА изображения с низким разрешением не позволяют получить однозначные результаты задачи классификации. Ниже приведены предварительно обработанные изображения балкера с различным разрешением. Оператору без опыта может быть не очевидно, как классифицировать объект по изображению с низким разрешением.



а)



б)

Рисунок 72 — PSA изображения (а) с высоким и (б) низким разрешением

Существуют решения с использованием нейронных сетей для решения проблемы улучшения PSA-изображений с низким разрешением.

Благодаря изучению взаимодействия между генератором и дискриминатором оказалось возможно получать изображения с высоким визуальным разрешением, одновременно снижая емкость исходного кода.

Цель — реконструировать изображение с высоким разрешением (SR) из входного изображения с низким разрешением (LR), которое является уменьшенной копией изначального снимка (HR). Изображения HR доступны только во время обучения, а LR создаются применением к ним фильтра Гаусса с последующей операцией понижения дискретизации и описываются с помощью действительного тензора.

Для решения проблемы сглаженных пикселей можно использовать генеративно-сопоставительные сети (GAN) и применять, например, функции потерь, основанные на евклидовых расстояниях, вычисленных в пространстве признаков нейронных сетей в сочетании с сопоставительным обучением. Также можно использовать признаки, извлечённые из предварительно обученной нейросети, формулируя функцию потерь как евклидово расстояние между картами этих признаков. Результаты, полученные с применением этих подходов, показали высокую эффективность при обработке PSA изображениями.

Реализация метода строится разработкой и обучением сетей дискриминатора и генератора, которые последовательно оптимизируются

вместе для решения состязательной проблемы min-max. Общая идея заключается в том, чтобы обучить генеративную модель «обманывать» дискриминатор, который обучен отличать изображения высокого качества от реальных [115]. С помощью такого подхода генератор может научиться создавать решения, трудно классифицируемые дискриминатором и, следовательно, очень похожие на реальные изображения (рисунок 73).

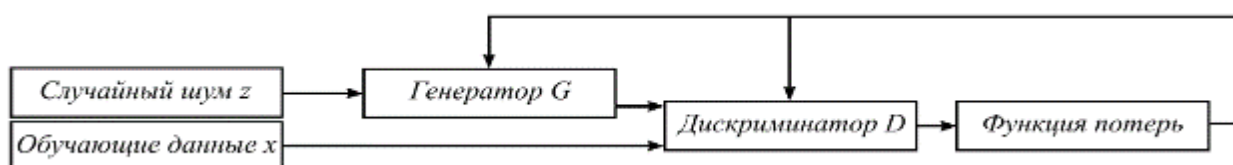


Рисунок 73 — Структурная схема генеративно-состязательной сети

Идея GAN исходит из равновесия Нэша в теории игр, которое состоит из генератора и дискриминатора и предсказывает потенциальное распределение реальных изображений и генерирует новые изображения посредством итеративного рекламируемого обучения между ними. Обучающая цель генератора - генерировать максимально реалистичные изображения, чтобы обмануть дискриминатор, в то время как дискриминатор должен максимально отличать реальные изображения от ложных, генерируемых генератором. При достижении состояния равновесия по Нэшу, генератор способен создавать ложные изображения, достаточные для того, чтобы сбить с толку человеческий глаз и дискриминатор, создавая реалистичные изображения.

Задача состоит в том, чтобы обучить генеративную функцию, которая для входного низкого PCA-изображения оценивает соответствующий высококачественный аналог. Для этого мы обучаем GAN как свёрточную нейронную сеть прямого распространения с оптимизацией специфичной для PCA функции потерь восприятия. Функция потерь восприятия генерируется как взвешенная комбинация нескольких компонентов, которые моделируют различные желаемые характеристики восстановленного PCA-изображения.

Стоит также заметить, что для обучения нейронных сетей с целью обработки PCA-изображений, важной задачей является формирование баз

данных достоверных изображений. В процессе формирования большой базы данных (состоящей из нескольких сотен или тысяч PCA-изображений) требуется многократно повторять эти операции. В результате этот процесс может занимать много сотен часов. Таким образом, разработка методики, которая позволяет из десятков изображений генерировать правдоподобную базу данных (сотни или тысячи изображений) и тем самым значительно уменьшать время для подготовки базы данных для обучения нейросетей, является актуальной задачей.

Процесс обучения GAN является динамичным игровым процессом. Входными данными GAN являются реальные выборки и шум, в то время как входными данными являются исходные изображения PCA и изображения PCA низкого разрешения. В то же время функция потерь содержит не только предотвращение потери GAN, но и потерю содержимого, что увеличивает сходство между восстановленным PCA-изображением и исходным сегментированным PCA-изображением в пространстве объектов.

4.2.4. Функции потерь сети GAN

Чтобы представить улучшение визуального разрешения, функция потерь восприятия l^{SR} определяется в GAN как:

$$l^{SR} = l_{cont}^{SR} + 10^{-3} l_{Gen}^{SR}, \quad (4.10)$$

где l_{cont}^{SR} потеря контента, l_{Gen}^{SR} - это проигрыш в генерации.

Потеря содержимого отражает разницу между входом изображения SAR с низким разрешением и выходом восстановленного изображения SAR, созданного генератором. Функция потерь содержимого l_{Cont}^{SP} можно выразить как:

$$l_{Cont}^{SP} = \frac{1}{t^2 WH} \sum_{x=1}^{tW} \sum_{y=1}^{tH} \left[I_{x,y}^{HR} - G_{\theta G}(I_{x,y}^{LR}) \right]^2, \quad (4.11)$$

где: t время выборки верхнего уровня; W, H - размеры изображения с низким разрешением; $I_{x,y}^{HR}$ значение в пикселях сегментированного изображения, которое является исходным в виде изображения PCA высокого разрешения в точке (x,y) ; I^{LR} изображение PCA с низким разрешением; $G_{\theta G}(I^{LR})_{x,y}$ значение пикселя восстановленного изображения с высоким визуальным разрешением, сгенерированного в соответствии с изображением низкого разрешения I^{LR} и изображения высокого разрешения I^{HR} в точке (x,y) .

Функция потери в состязательности l_{Gen}^{SR} может быть выражено как:

$$l_{Gen}^{SR} = \sum_{n=1}^N -\log D_{\theta}[G_{\theta}(I^{LR})] , \quad (4.12)$$

где $D_{\theta}[G_{\theta}(I^{LR})]$ представляет вероятность того, что дискриминатор рассматривает изображение, сгенерированное генератором $G_{\theta}(I^{LR})$ как изображение высокого разрешения I^{HR} .

Процесс обучения SRGAN можно резюмировать как задачу оптимизации параметров сети $\hat{\theta}_G$:

$$\hat{\theta}_G = \arg \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N l^{SR}(G_{\theta G}(I_n^{LR}), I_n^{HR}) , \quad (4.13)$$

где I_n^{LR}, I_n^{HR} являются n -ными изображение PCA с низким и высоким разрешением соответственно; $G_{\theta G}$ дискриминантная модель; N количество изображений PCA в обучающем наборе [139].

Исходное сегментированное изображение вводится в сеть GAN дважды. Впервые в процессе обучения вводится изображение PCA высокого разрешения, которое используется для изображения PCA низкого разрешения для изучения высокочастотной информации, подробной информации о границах и точной текстуры изображения PCA высокого разрешения.

Вторично оно вводится в GAN как изображение PCA, которое будет улучшено в процессе тестирования.

Регенерированное изображение пригодно для направления в задачу классификации изображений.

4.2.5. Классификация изображений

Метод классификации изображений также опирается на использование сверточных нейронных сетей и основан на их глубоком обучении, что позволяет автоматически изучать пространственную информацию и текстурные характеристики изображений, чтобы избежать сложностей ручного извлечения и выбора объектов, уменьшить влияние субъективных факторов на результаты классификации и повысить универсальность алгоритма классификации [116].

Точность классификации целей можно повысить, должным образом углубив сеть. Как известно, чем меньше слоев, тем быстрее обучение. Однако сеть с меньшим количеством слоев не может сравниться с точки зрения точности распознавания с сетью с глубокой архитектурой. Однако, благодаря многократному объединению небольших сверточных ядер размером 3×3 и максимальному объединению слоев размером 2×2 , в Оксфордском университете была успешно создана сеть с 16 и 19 слоями, которые называются VGG16 и VGG19 соответственно. Эти сети получили наилучшие оценки в проекте классификации [140] еще в 2014 году.

Китайскими исследователями была разработана и протестирована подобная ИНС для классификации объектов по данным PCA. Используемая ими структурная схема ИНС показана на рисунке 74, которая в основном состоит из 13 сверточных слоев, 5 слоев объединения и 4 уровней полного соединения [114].



Рисунок 74 — Архитектура ИНС классификации объектов по данным PCA

На выходе дополнительно добавлен уровень активации softmax.

Сверточный слой является ключевым слоем для извлечения объектов. Он извлекает объекты путем свертки карты изображения на выходе предыдущего слоя. В процессе обучения сети сверточное ядро постоянно обновляется за счет изучения карт объектов. Если для каждой операции свертки используются разные сверточные ядра, то с увеличением уровней сети требуется все больший объем обучения для настройки весовых параметров сети. Чтобы уменьшить количество обучающих параметров сети, применяют операцию разделения веса. Так для большинства задач распознавания сверточному ядру достаточно иметь размерность 3×3 [115,116].

Операции сверточного уровня включают свертку и активацию, и процесс свертки может быть выражен как:

$$z_j^{(l)} = \sum_i q_i^{(l-1)}(x, y) * \omega_{ij}^{(l)}(x, y) + b_j^{(l)}, \quad (4.14)$$

где (x, y) пиксель изображения PCA, $q_i^{(l-1)}$ является i -ый элемент изображения предыдущего уровня $(l-1)$, $\omega_{ij}^{(l)}$ признак, является ли сверточное ядро, соединяющее i -го уровня для ввода в j -ый выходных объектов на слое l , $b_i^{(l)}$ абсолютное смещение значения для j -того элемента уровня l , и $*$ обозначает операцию двумерной свертки.

Чтобы повысить нелинейную характеристику сети и повысить качество модели в классификации, к каждому сверточному слою рекомендуется (и это возможно) подключить слой функции нелинейной активации:

$$q_i^{(l-1)}(x, y) = f(z_i^{(l)}), \quad (4.15)$$

где f это нелинейная функция активации нейрона.

При отображении в пространство большей размерности окончательная поверхность принятия решений разбивается на несколько плоскостей. По мере усложнения нейронной сети для окончательного принятия решений и реализации нелинейной классификации требуется несколько кусочно-линейных плоскостей. Ядра свёртки и смещение — это параметры, которые необходимо обучить.

Чтобы уменьшить количество обучающих параметров, после сверточного слоя добавлен слой объединения для реализации “сжатия” информации в локальном поле зрения. Объединение данных делится на максимальное и среднее. Максимальное объединение данных возвращает максимальное значение в объединенном окне сверточного ядра, в то время как среднее объединение данных возвращает среднее значение в объединенном окне. Выбор типа объединения зависит от результата обучения или выбирается эмпирическим путем. Для максимального объединения используется функция максимума:

$$q_j^{(l)}(x, y) = [\max_{m,n} (q_j^{(l)}(x + m, y + n)) \mid m, n = 0..p], \quad (4.16)$$

где p - размер окна объединения.

После нескольких сверточных слоев и процедуры объединения результата извлекаются и изучаются особенности полученного изображения.

Уровень активации *softmax* является последним уровнем всей сети, в основном выполняющим задачу классификации, и его результатом является апостериорная вероятность для каждого класса выборки:

$$p(y_i \mid q^{(L)}) = \frac{\exp(q_i^{(L)})}{\sum_{j=1}^K \exp(q_j^{(L)})}, \quad (4.17)$$

где y_i обозначает метку объекта i -го класса; $q^{(L)}$ это входные данные уровня *softmax*, которые вычисляются предыдущим полсвязанным уровнем; $q^{(L)}$ является весовой суммой i -го узла вывода последнего полсвязанного уровня; K - номер класса; L - номер слоя.

С помощью функции *softmax* выходные данные модели нормируются в вектор вероятности, и метка, соответствующая максимуму апостериорной вероятности, является предсказанным классом этой выборки.

4.2.6. Обучение нейронной сети

Обучение сети методом обратного распространения состоит в следующем: пусть имеется некоторая неизвестная функция распознавания $g : X \rightarrow Y$, аргументом которой являются изображения $x_n \in X$, представленные в виде вектора длины n категории IDV , а значениями функций — множество классов $y \in Y$. В соответствии с концептуальной моделью в нашем случае совокупность классов географических объектов составляют категорию IP .

Обучающая выборка представляет собой подмножество значений этой функции

$$D = \{(x_0, y_0), (x_i, y_i), \dots, (x_m, y_m)\}, \quad (4.18)$$

где x_i — i -тое изображение, y_i — i -тый класс (индекс категории IP).

Задача обучения модели распознавания заключается в отыскании такой функции $h : X \rightarrow Y$, которая бы аппроксимировала функцию g на всей ее области определения, в том числе значениях, не включенных в D , и представляет собой приложение теории категорий.

Пусть $h(x)$ — выходное значение сети, полученное путем последовательной активации нейронов каждого слоя, а $g(x)$ — значение аппроксимируемой функции для одного и того же изображения. Далее выполняется шаг обратного распространения, заключающийся в вычислении частной производной для каждого нейрона сети по отношению к его весам:

$$\frac{dE}{d\omega_{ij}} = \frac{dE}{do_j} \frac{do_j}{dnet_j} \frac{dnet_j}{d\omega_{ij}},$$

$$E = \frac{(h(x_i) - g(x_i))^2}{2}, \quad (4.19)$$

где E — среднеквадратичное отклонение сети, W — весовое значение нейрона, O — отклонение, Net — ошибка.

Далее на каждом шаге обучения веса нейронов инкрементируются значениями частных производных в соответствии с методом градиентного спуска. Значения x_i , представляющие собой l -мерный вектор, нормализуются в пределах интервала $\{0,1\}$.

Для многослойной сверточной сети результаты выходного уровня являются прогнозируемыми результатами сети. Значение погрешности выходного уровня сети может быть получено путем сравнения прогнозируемых результатов с реальными результатами:

$$\delta_i^L = -[y^{(i)} - p(y_i | q^{(L)})], \quad (4.20)$$

где p — вероятность выбора сетью значения y_i по входным данным последнего полносвязанного уровня $q^{(L)}$.

В соответствии с погрешностью всех слоев градиенты веса и смещения каждого слоя могут быть рассчитаны с использованием дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dw_{ji}^{(l)}} &= q_i^{(l-1)} \delta_j^{(l)} \\ \frac{dL}{db_j^{(l)}} &= \sum_{x,y} \delta_j^{(l)}(x,y) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Использование метода градиентного спуска для обновления веса и смещения сети:

$$\begin{aligned} w &\leftarrow w - \eta \frac{dL}{dw} \\ b &\leftarrow b - \eta \frac{dL}{db} \end{aligned} \quad (4.22)$$

где η скорость обучения.

Благодаря прямому и обратному распространению сеть в процессе обучения итерационно сходится и получают стабильные и, главное, приемлемые весовые параметры сети.

4.2.7. Эксперименты и результаты практических исследований

Для проведения экспериментов использовались данные космического спутника ICEYE, собранные по подписке в период 2021 – 2023 гг [142,143]. Библиотеки для ИНС импортировались с сайта IT-проектов разработки. Github.com. Компания Iceye (Финляндия) является мировым лидером в области малых спутниковых радиолокационных систем (микроспутников ДЗЗ) с синтезированной апертурой (SAR). Группировка малых спутников SAR ICEYE в количестве 6 единиц в 3-х орбитах настроено на высокую частоту повторения и частую доставку изображений с высоким разрешением в том числе с целью мониторинга судов. Высота солнечно-синхронной орбиты спутников составляет 570 км, ширина полосы захвата составляет 30, 100 км. На спутниках ICEYE SAR используется радиолокационный тип съемки в режимах SpotLight, ScanSAR с разрешением на местности от 15 до 3 метров с одиночной вертикальной поляризацией (VV).

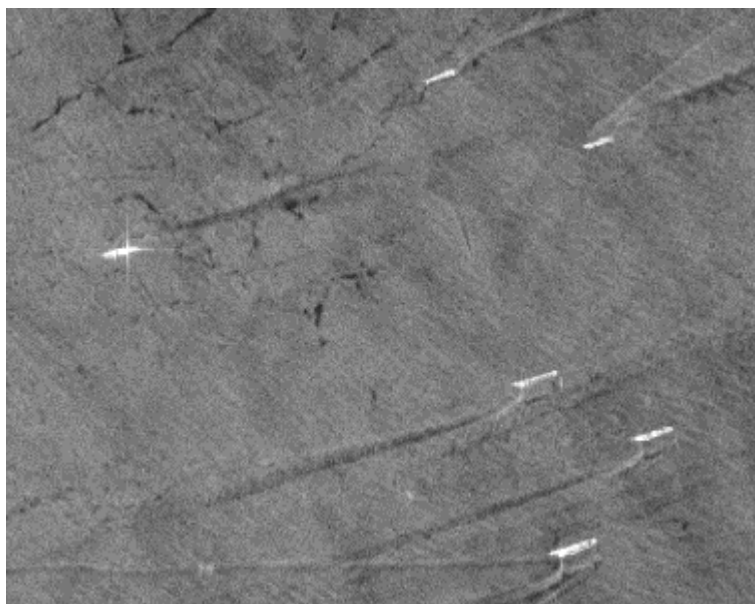


Рисунок 75 — Фрагмент изображения по данным ICEYE SAR

Фрагмент изображения в районе острова Колгуев (Баренцево море) от сентября 2023 года, доступных для скачивания на сайте ICEYE приведен на рисунке 75.

Время первичной обработки данных от момента направления запроса на серверах ICEYE составляет 5 и более дней. Данные для идентификации судов в европейской части акватории СМП выбирались по данным АИС в районе Кольского залива и данным с сайта MarineTraffic [10] и GORADAR от Компания HARDFOR (г.Москва) [144]. Соответствующая ситуация в районе острова Колгуев, примерно с задержкой до 6 часов по данным MarineTraffic приведена на рисунке 76. Пример экрана GORADAR приведен на рисунке 77.

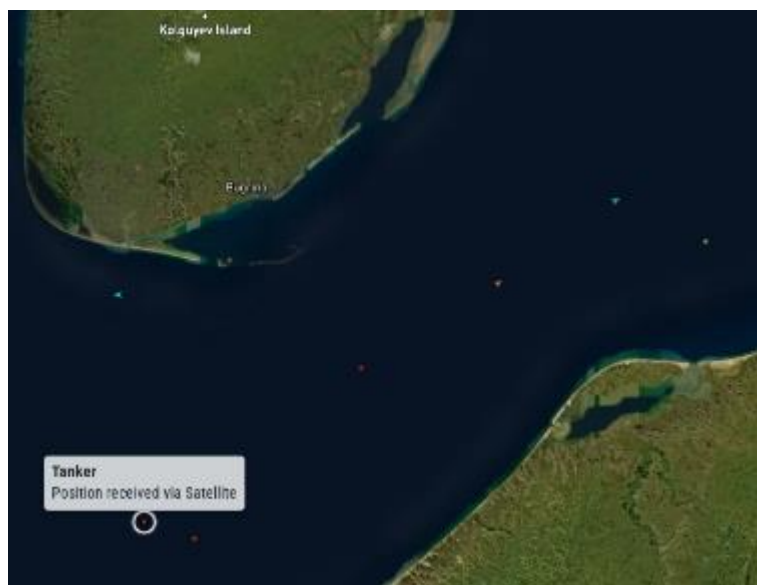


Рисунок 76 — Скриншот экрана MarineTraffic в районе острова Колгуев

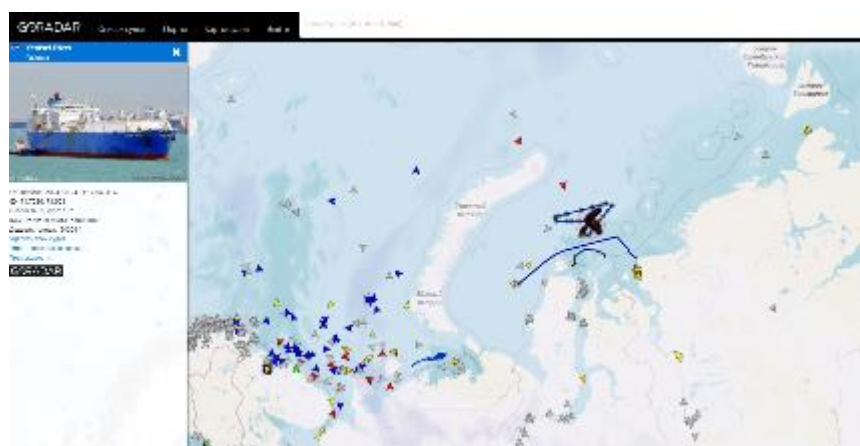


Рисунок 77 — Скриншот экрана GORADAR в районе острова Новая Земля

Исходными для обработки являются сырые данные радиоголограммы, получаемые с борта КА по радиолинии с сопутствующей служебной информацией. Сырые данные подлежат распаковке, восстановлению целевой

и служебной информации, фильтрации служебных данных. В результате первичной обработки сырых данных формируется продукт нулевого уровня — радиолокационная голограмма.

Радиоголограмма нулевого уровня является уровнем хранения и входным уровнем данных для последующего синтеза и формирования радиолокационной информации последующих уровней, которые могут служить исходными данными для формирования геокодированных (приведенное к одной из картографических проекций без учета рельефа) и орторектифицированных (приведенное к одной из картографических проекций с учетом рельефа) изображений (рисунок 78). Для селекции движущихся целей могут быть использованы данные первого уровня, содержащие амплитудную и фазовую информацию.

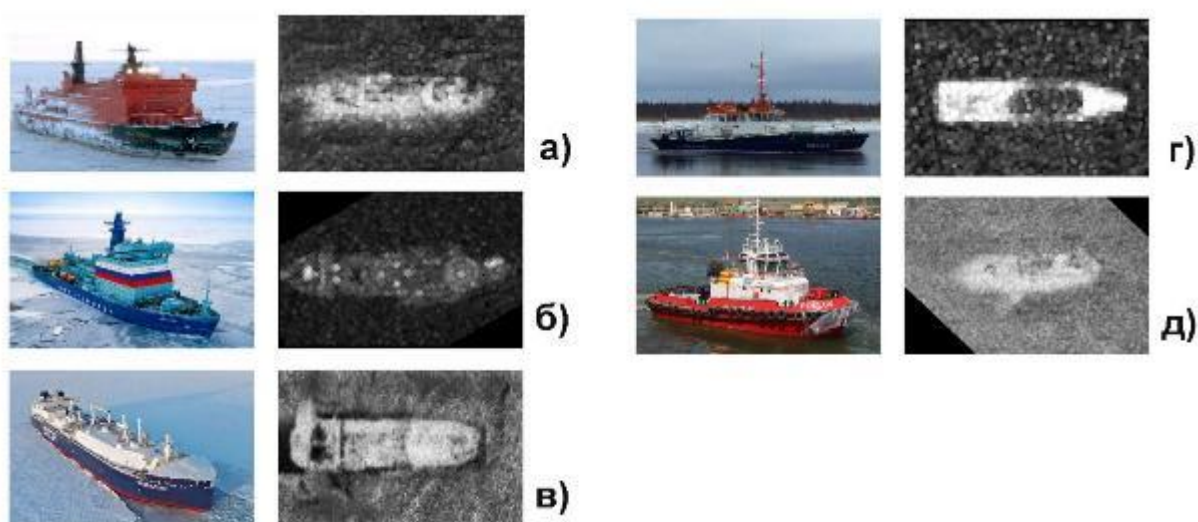


Рисунок 78 — Частично обработанные изображения РСА (а) ледокол проекта 10521, (б) ледокол проекта 22220, (в) танкер газовоз, (г) лоцманское судно, (д) буксир морской

Обучающий и тестовый наборы формировались параллельно и составили около 350 изображений после первичной обработки с различными углами обзора от разных спутников. В процессе эксперимента было выделено около 20% изображений для тестов для пяти типовых судов, отметки которых возможно идентифицировать и встречаются наиболее часто, данные по тестовым наборам к ним приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Типы судов, тестовые наборы РСА

Типы судов	Описание	Размер набора	
		обучающей	тестовый
Ледокол проекта 10521 рисунок 78 (а)	2 судна. «50 лет Победы», «Ямал»	44	15
Ледокол проекта 22220 рисунок 78 (б)	2 судна «Сибирь», «Арктика»	32	12
Танкер газовоз типа «Кристоф де Маржери» рисунок 78 (в)	4 судна (из 15) Габариты: длина — 299,0 м, ширина — 50,13 м	76	21
Лоцманское судно рисунок 78 (г)	3 судна Габариты: длина — 29,0 м, ширина - 11 м.	33	11
Буксир морской рисунок 78 (д)	10 единиц Кольский залив, порты СМП	82	22

Полученные наборы данных оказались недостаточно репрезентативными для обучения нейронной сети, а использование однотипного набора для обучения и тестов не являются хорошей практикой. Однако цель эксперимента заключается в подтверждении возможности автоматизации оперативного сбора, идентификации и использования данных зондирования в ближней морской зоне для целей принятия решений с применением ИНС в ГИС.

Результаты эксперимента сведены в матрицу успешности идентификации (таблица 22).

Таблица 22 – Матрица успешности идентификации

	Ледокол 10521	Ледокол 22220	Танкер	Лоцманское судно	Буксир морской	Доля успеха
Ледокол 10521	9	4	2			60%
Ледокол 22220	2	8			2	67%
Танкер газовоз		1	16	2	2	76%
Лоцманское судно				7	4	64%
Буксир морской	1	4			17	77%

Полученные результаты подтверждают возможность обучить сверточную ИНС классифицировать объекты по данным РСА. Достигнутая точность для всех типов объектов превышает 60%. С учетом оговорок и при значительном увеличении обучающей выборки вероятность успешной классификации может достигнуть приемлемого для автоматизации уровня в 90%, что подтверждают аналогичные эксперименты и электронные публикации сообщества «экспонента» [145], специализирующемся на вопросах цифровой обработки сигналов, работе с изображениями и видео. Так по набору данных MSTAR, общедоступного в сети интернет, содержащего 8 688 изображений РСА от 7 наземных транспортных средств в X-диапазоне с высоким разрешением, вероятность классификации достигала 96,7%.

4.2.8. Тематическая обработка изображений РСА

Радиолокационная съемка, наряду с оптической, является одним из основных видов ДЗЗ для целей мониторинга и оценки земной поверхности, а также процессов природного и техногенного характера. Ввиду особенностей радиолокационной съемки она имеет преимущества в решении ряда таких задач и потому стала все более широко применяться в мировой отрасли ДЗЗ.

В настоящее время в мире существует, и достаточно много, космических РСА, позволяющих получать радиоголограммы с разрешением порядка 1 метра [146]. Что позволяет после проведения описанных выше манипуляций с изображениями на основе морфологического анализа достигать разрешения и дешифрирование объектов на местности при точностях РСА, как указано в таблице 22.

Таблица 23 – Точности РСА для дешифрирования объектов

Корабли	7.6 — 15 (м)
Самолеты	4.5 (м)
Автомобили	1.5 (м)

Кроме прочего, линейные преобразования при работе с данными изображений РСА позволяют эффективно решать комплекс задач по компенсации искажений от растяжений и сжатия, отражения и переотражения, интерференции и рефракции, поляризации, удаления спекл-шума и т.п.

Обработка изображений РСА получила распространение в следующих направлениях зондирования на поверхности Земли:

- мониторинг районов чрезвычайных ситуаций и катастроф (наводнений, паводков, землетрясений, пожаров, техногенных катастроф), оценка и контроль их последствий;
- обнаружение и оценка нефтяных разливов;
- контроль за ситуацией в прибрежных зонах;
- обнаружение, сопровождение и контроль судов;
- обнаружение и оценка ледовых заторов;
- мониторинг динамики, оценка и определение типов границ ледовых образований (ледовые покровы, ледники, айсберги);
- контроль состава и состояния лесов, количественная оценка биомассы;
- мониторинг и оценка лесных вырубок и гарей;
- контроль за состоянием наземных трубопроводов (аварии, подвижки);
- мониторинг и контроль объектов инфраструктуры (порты, аэродромы, дороги, электростанции и др.);
- мониторинг изменений обстановки в зонах интереса;
- всепогодное оперативное картографирование;
- мониторинг развития городских территорий;
- структурное геологическое картографирование;
- построение высокоточных цифровых моделей местности;
- мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий, идентификация различных тип сельхозкультур;
- оценка и прогнозирование урожаев;
- определение влажности почв;
- др.

Мировые спутниковые системы, использующие технологию PCA/SAR:

- **ICEYE SAR.** Группировка малых спутников от финской компании Iceye. Настроена на высокую частоту повторения и частую доставку изображений с высоким разрешением.
- **Sentinel.** Семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства. Спутники созданы в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности «Коперник» (англ. Copernicus).
- **TerraSAR-X.** Немецкий спутник дистанционного зондирования Земли, предназначенный для радарной съёмки поверхности Земли в гражданских интересах.
- **Capella Space.** Калифорнийская компания, занимающаяся производством снимков SAR из космоса.
- **SAR-Lupe.** Немецкая разведывательная спутниковая система, состоящая из пяти одинаковых спутников-радаров и одной наземной станции управления. Может получать круглосуточно и независимо от погодных условий изображения любого участка поверхности Земли с высоким разрешением.
- **SR SAR.** Орбитальная группировка космических аппаратов, оснащённая радарами с синтезированной апертурой. Позволяет проводить всепогодный мониторинг поверхности Земли и наблюдения за погодными и климатическими изменениями.
- **ALOS-2.** Японский исследовательский спутник. Задачи ALOS: картографирование (масштабы 1:25 000), региональное исследование, мониторинг стихийных бедствий, исследование и поиск ресурсов.

В России более десяти лет для радиолокационного зондирования Земли с технологией PCA используются спутники семейства «Кондор» («Кондор-ФКА»). Ожидается ввод в эксплуатацию перспективного космического комплекса «Обзор-Р», предназначенного для обеспечения МЧС России, Минсельхоза России, Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии, других министерств и ведомств радиолокационной

информацией для решения задач картографирования, обеспечения безопасности мореплавания и мониторинга ЧС. Однако данные с этих систем публично не доступны.

Отечественный проект «Окулус» — первое коммерческое российское решение по созданию радиолокационного спутника ДЗЗ, который мог бы упростить ряд задач по мониторингу и развитию СМП и АЗРФ. Проект призван обеспечивать наблюдение за акваторией СМП в любую погоду. Оперативные снимки Арктической зоны обеспечат ледовый мониторинг, транспортный мониторинг, мониторинга нефтяных разливов, землетрясений, наводнений, вопросов обороны, строительства. Разработкой проекта занимается АО «Корпорация по аэрокосмической деятельности «Новый космос».

4.3. Базовая методика управления рисками в системе АТА

Основной целью оценки рисков является обеспечение стратегической и оперативной устойчивости некой системы за счет поддержания уровня риска в допустимых границах. Все риски, которые могут негативным образом воздействовать на достижение целевых задач, устойчивость объектов и связей между ними, жизненный цикл процессов, подлежат выявлению, оценке и усиленному управлению на непрерывной основе. Из приведенного определения вытекают задачи по управлению рисками:

- - выявление потенциальных областей, источников и факторов риска;
- - оценка рисков и их влияния на выполнение целевых задач;
- - определение мероприятий и ресурсов, необходимых для минимизации выявленных рисков;
- - предупреждение возникновения рисков на основе их системного прогнозирования и оценки, минимизация ущерба в случае их наступления.

Использование АСУ, реализующих линейный принцип управления процессами подразумевает детерминированный подход, выделяющий значимые этапы итерационного управления рисками (рисунок 79).

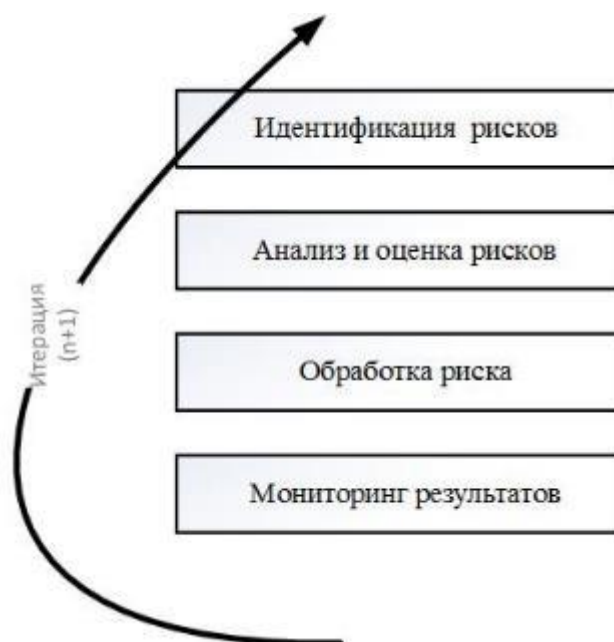


Рисунок 79 — Этапы управления рисками в системе АТА

Этап идентификации рисков осуществляется во время анализа реализуемых планов, поставленных целей, задач, программ и методов их достижения, а также справочной информации на предмет присутствия в них источников и факторов риска, их специфики, включая вероятность возникновения угроз или ущерба [147, 155]. Информация, выявленная при идентификации рисков, является первичным источником для анализа.

Этап анализа и оценки рисков может быть качественным, количественным или комбинированным. Качественный анализ предполагает выявление источников и причин возникновения риска, анализ задач при выполнении которых возникает риск, установление потенциальных зон и сред риска. Результаты качественного анализа служат исходной информацией для осуществления количественного анализа, который предполагает численное определение риска.

Целью количественного анализа рисков является оценка уровня риска, расчет вероятности наступления рисковых событий, возможных отклонений (и их вероятностей) планового значения целевого показателя вследствие воздействия факторов риска, а также допустимого уровня риска.

Риски, которые не поддаются количественной оценке и (или) отсутствует надежная статистическая информация для их моделирования, оцениваются только на качественной основе.

Анализ рисков осуществляется с использованием аналитических и имитационных моделей, методов обработки экспертных оценок (квалиметрии), приемлемых в конкретных случаях технологии оценки значимости риска. Технологии оценки риска, в том числе с использованием математических методов приведены в ГОСТР 58771- 2019 [149], значительная часть которых реализуема на базе предложенной концептуальной модели.

Цель анализа риска заключается в том, чтобы понять природу риска и его характеристики, в том числе, когда это необходимо, уровень риска. Анализ риска включает подробное рассмотрение неопределенностей, источников риска, последствий, вероятности, событий, сценариев, методов управления риском и их эффективности. Событие может иметь несколько причин и последствий и может влиять на достижение нескольких целей. Анализ риска может проводиться с различной степенью детализации и сложности, в зависимости от цели анализа, доступности и достоверности информации и доступных ресурсов. Технологии анализа могут быть качественными, количественными или их комбинациями в зависимости от обстоятельств и предполагаемого использования.

Анализ риска должен учитывать такие факторы, как:

- вероятность событий и последствий;
- характер и масштабы последствий;
- сложность и взаимосвязь с другими рисками;
- факторы, связанные со временем, волатильность;
- эффективность существующих методов управления риском;
- уровень чувствительности и достоверности.

Этап обработки риска относится к мероприятиям по управлению рисками и представляет собой процедуру выбора решения о мерах по уменьшению влияния риска, а также предусматривает разработку вариантов

реакции (воздействия) на риск. Мероприятия по управлению рисками разрабатываются на основании одного из следующих методов:

- а) метод уклонения от риска – отказ от совершения тех или иных действий, характеризующихся высоким уровнем риска;
- б) метод снижения риска – снижение частоты ущерба или предотвращение убытка (диверсификация или профилактика) и др.;
- в) метод принятия риска – допустимая реакция с оценкой неблагоприятных последствий риска и мер по снижению негативных последствий.

Этап мониторинга проводится на непрерывной основе с обязательной актуализацией исходной и дополнительной информации. Кроме получения дополнительной информации о рисках, мониторинг и контроль обеспечивает связь между управленческими решениями по воздействию на риск и результатами такого воздействия.

В процессе мониторинга производится актуализация и сбор информации о результатах воздействия на риск, включая:

- сравнить фактические результаты обработки риска с результатами, полученными при оценке риска;
- идентификацию новых рисков;
- переоценку ранее выявленных рисков;
- контроль результатов мероприятий по воздействию на риск;
- пересмотр критериев, источников и факторов риска.

Результаты анализа рисков являются вкладом в принимаемые решения или действия, которые необходимо предпринять. Факторы, которые следует учитывать при принятии решений определяются ЛПР.

4.4.Методика геоинформационной поддержки управления в условиях риска

В силу геопространственного характера территориальной хозяйственной активности в регионе при регулировании территориальной

активности может применяться модельно-методический аппарат геоинформационной поддержки управления. Суть геоинформационной поддержки управления территориальными объектами и системами состоит в пространственной интерпретации категорий и этапов управления, трансформации рабочей географической графики из пассивной карты-подложки в активное геоизображение, наглядно показывающее, в каком районе и каким образом необходимо действовать [148,157].

Геоинформационные процедуры поддержки управления теми или иными видами морской территориальной активности (грузовые и пассажирские перевозки, добыча углеводородов и полезных ископаемых на шельфе, прокладка кабелей и трубопроводов, исследования Мирового океана, спасательные операции, оборонная деятельность и др.) соответствуют традиционным этапам управления: прием информации, оценка обстановки, принятие решения, планирование задач, реализация принятых решений, контроль эффективности и направлены на геопространственное представление и наглядное картографическое отображение базовых категорий управления: план, обстановка, задача, решение.

Процесс управления объектами АТА должен обеспечивать непрерывный и циклический характер выполнения перечисленных этапов управления и может характеризоваться неравномерностью, инерцией, замиранием входящей информации, запаздыванием управленческих действий.

Модель обстановки является системообразующей категорией в структуре геоинформационной методики управления территориальной активностью, т. к. к ней циклически обращаются все другие этапы управления. Особенно активно эти обращения происходят на этапе реализации решений, при выявлении рассогласования между ожидаемым и фактическим состоянием обстановки.

Геомодель обстановки постоянно наполняется текущей информацией об объектах морской территориальной активности и среде, в которой протекает хозяйственная деятельность. Высокой динамикой в определенных условиях

может обладать геоситауция по любой категории из концептуальной модели АТА, влияя на взаимосвязанные геоинформационные пространства. Например, гидрометеорологическая информация при выполнении задач транспортировки груза водным путем, навигационная обстановка при маневрировании в узкостях, геоэкологическая при устранении последствий чрезвычайного происшествия и т.п.

Анализ требований со стороны органов управления (субъектов) и объектов арктической территориальной активности показывает, что для эффективного функционирования хозяйствующего социума в АЗ РФ требуются следующие виды киберфизического обеспечения:

- комплексное освещение обстановки в акваториях СМП;
- поддержание связи и телекоммуникации в регионе;
- навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение (поддержка) судоходства и других видов деятельности в Арктике.

Формально эти требования формулируются следующим образом (рисунок 80).

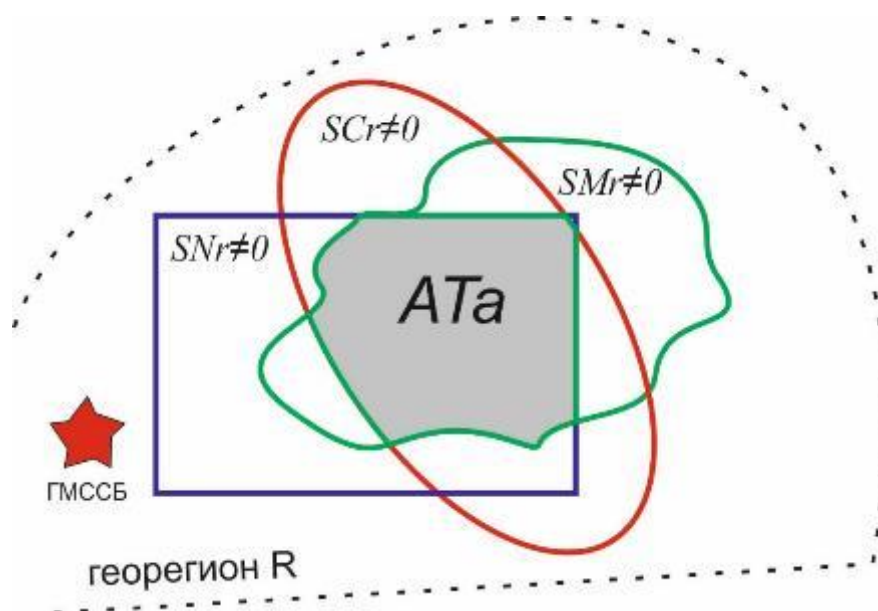


Рисунок 80 — Иллюстрация киберфизического пространства системы арктической территориальной активности

Система (пространство) арктической территориальной активности (АТа) будет наблюдаемой, управляемой и контролируемой (т.е. будет иметь

кибертехнические предпосылки для функционирования) тогда и только тогда, когда:

1. Не являются пустыми множествами соответствующие пространства георегиона: связи и телекоммуникации (SCr), навигации (SNr) и ситуационного мониторинга (SMr).

2. Не является пустым множеством пересечение указанных пространств, т.е. пространство АТа киберспособно, когда оно наблюдаемо, управляемо и контролируемо (4.21).

$$\langle \exists ATa | SCr \neq 0, SNr \neq 0, SMr \neq 0, SCr \cap SNr \cap SMr \neq 0 \rangle \quad (4.21)$$

При выполнении этих условий пространство АТа риск-способно (наблюдаемо, управляемо, безопасно).

Для представления этих покрытий формируются геопространства, в которых отображаются модели геоструктур и категорий управления. Для получения результирующих кибернетических территориальных покрытий-оценок и покрытий-рекомендаций на основе геомоделей пространств, структур и данных разрабатываются геоинформационные методы поддержки управления. Общий подход к использованию геоинформации в АСУ на базе ГИС в теории категорий состоит в построении оптимального отображения:

$$f_s : \{C_{cont}, F_{cont}, Rec, GSit\} \rightarrow GSp_1 \rightarrow GSp_2 \rightarrow \dots \rightarrow GSp_n \rightarrow Cov_{dec} \rightarrow \langle R^2, Lg_{chart} \rangle \quad (4.22)$$

где: C_{cont} - категории управления; F_{cont} - функции управления; $GSit$ - геоситуация; Rec - рекомендации ЛПР; $GSp_1, GSp_2, \dots, GSp_n$ - совокупность геопространств; Cov_{dec} - территориальные оценки; R^2 - плоскость (слой в ГИС); Lg_{chart} - легенда геоизображения в двумерном евклидовом пространстве.

Циклическое повторение операций оптимального отображения с использованием математического аппарата линейной алгебры и методов основанных на теории категорий призвано обеспечить совершенство и эффективность поддержки принятия решений, формирование условий осуществления процесса управления.

4.4.1. Методика оценки рисков АТА

Морские опасности – это объекты (явления) окружающей среды и социума, могущие нанести ущерб кораблю, судну и объектам АТА. Это ледовые поля, поднятия морского дна, течения, сложные гидрометеорологические условия, другие корабли и суда, гидротехнические сооружения и т.д. Ключевым является пространственный фактор, который определяется положением морского объекта по отношению к источнику опасности.



Рисунок 81 — Субъектно-объектный дуализм рисковей природы объекта АТА

Как объект риска, судно (объект АТА) подвергается негативному воздействию окружающей среды. Как сложный техногенный объект, в случае аварии, он же выступает в качестве субъекта риска – может нанести ущерб окружающей среде и другим объектам АТА (рисунок 81).

Степень угрозы для объектов в акватории, на некоторой территории, в сфере деятельности в общем случае определяется следующим образом:

$$C_y = C_o * \Phi_{\text{пр.-вр.}} * \Phi_c, \quad (4.23)$$

где C_y – степень угрозы; C_o – степень опасности; $\Phi_{\text{пр.-вр.}}$ – пространственно-временной фактор; Φ_c – ситуационный фактор.

Если объект вывести за пределы опасной территории, то угрозы для него не будет, хотя опасность территории сохранится. Угроза изменяется во

времени: она может возникать, усиливаться, снижаться и исчезать вследствие изменения влияющих на ее степень факторов – пространственного, временного и ситуационного, а также степени опасности.

Угрозы (риски) навигационной ситуации (ледовая обстановка, глубины, течения, ветер, видимость, и т.п.) в геопространственном отношении характеризуются содержательными параметрами опасных зон (ОЗ) их описательными характеристиками и географическими (геометрическими) параметрами (собственное пространство ОЗ). Так непосредственно зона опасности SpD (рисунок 82) формируется, распределяется и изменяется в регионе (геопространстве) в зависимости от:

$$SpD = f(C_D, Cnt_D, V_D, CP_D, F_{EI}, t), \quad (4.24)$$

где: C_D – координаты ОЗ (центроид); Cnt_D - граница (контур) ОЗ; V_D - скорость перемещения ОЗ; CP_D , - содержательные параметры опасности; F_{EI} - факторы влияния окружающей среды (геосреды) на ОЗ – температура, течения, ветер, волнение, осадки, ...; t - момент времени.



Рисунок 82 — Пространственно-содержательные периметры региональной зоны опасности SpD , $SpDt_i$, $SpDt_{i+1}$ – границы (контур) ОЗ на разные моменты времени t_j

Сложнее и динамичнее формируется и изменяется топология и содержание рисковой зоны $RSpV$ территориальной системы «судно - ОЗ» (рисунок 83).



Рисунок 83 — Пространственно-содержательные параметры «относительной» RSp_V рискованной (опасной) зоны

Параметры зоны RSp_V зависят не только от физической природы и физико-географический условий региона, но и от взаимного расположения ОЗ и корабля (судна), а также от содержательно-пространственных характеристик судна — его ледового класса, осадки, наличия укомплектованности и обученности экипажа, уровня запасов, состояния технических средств и систем освещения обстановки, скорости, курса, расстояния относительно границы ОЗ:

$RSp_V = f((P_V, W_V), (P_{TA}, W_{TA})) = f(Sp_D, K_V, V_V, CP_V, t, A_D, F_{EL}, D_D, C_V, C_{TA}), (2.37)$
 где: P_V - вероятность инцидента с кораблем (судном); W_V — оцениваемый ущерб от инцидента с кораблем (судном); P_{TA} - вероятность нежелательного воздействия на ОС, объекты ТХА; W_{TA} — оцениваемый ущерб (негативные последствия) от нежелательного события с ОС, объектом ТХА; K_V — координаты корабля; V_V — скорость корабля; CP_V - содержательные параметры (состояние) корабля; A_D — угол встречи корабля с опасностью; D_{DV} — расстояние между кораблем и опасностью; C_V — ресурсно-«стоимостные» параметры корабля; C_{TA} - ресурсно-«стоимостные» параметры ОС и ТХА.

Угроза возникает в момент нахождения объекта в непосредственной близости к опасности, поэтому для снижения вероятности угрозы необходимо

минимизировать время присутствия в опасной зоне, а также предпринимать все возможные меры к сокращению возможной опасности.

Все три концепции исходят из парадигмы всеобщности понятия «Риск» (и связанных с ним категорий «Неопределенность», «Опасность», «Угроза») для предметной области «Мореплавание, Морские грузоперевозки» (рисунок 84).



Рисунок 84 — Иллюстрация «всеобщности» категории «Риск» для объектов и процессов предметной области морской транспортной логистики. Риски в системе воинских морских арктических грузоперевозок

Относительно процессов регулирования (управления) морской логистической деятельностью, риски и с вероятностной, и содержательной мерами характеризуют успешность (или проблематичность) выполнения (реализации) этапов общепринятой рекомендованной методики принятия решения, выработки рекомендаций и управления объектами флота в системе МТА (рисунок 85).

Прогнозирование морских рисков при оценке обстановки в системе морских рисковых грузоперевозок напрямую связывается с прогнозированием ледовой и гидро-метео-обстановки [50]. Схема метода остается прежней – по соотношению судна с объектом опасности или угрозы. Только данные обстановки берутся не текущие, а спрогнозированные на некоторую глубину в будущем.



Рисунок 85 — Риски как мера успешности (или проблематичности) реализации этапов управления в системе морских рисков грузовых перевозок

Рассуждая о месте рисков в предметной области морских грузовых перевозок и системы морской активности в целом, следует отметить некий дуализм положения и роли риска в системе управления морской логистикой (рисунок 86).



Рисунок 86 — Объективная и субъективная ипостаси рисков в системе управления морскими рисковыми грузовыми перевозками (МРГП)

Здесь, с одной стороны, риски выполняют классическую функцию параметров или данных, характеризующих обстановку, и обеспечивающих информационную количественно-качественную поддержку процедур анализа и оценки обстановки, с другой стороны, если на роль ведущего фактора

(критерия) АТА выдвигается безопасность морских грузоперевозок, тогда риски в системе управления АТА начинают выступать в роли субъекта управленческой логистической деятельности. И все процедуры, и этапы управления будут нацелены на минимизацию рисков морских грузоперевозок. Риски являются субъектом управленческой деятельности в системе риск-менеджмента АТА, когда управление исходит из необходимости минимизации рисков и их последствий.

Таким образом, в соответствии с парадигмой классической рискологии, риск морских грузоперевозок R характеризуется двумя сущностными сторонами (элементарными мерами):

1) вероятностью P нежелательных событий морского предприятия, связанных: а) со складывающейся обстановкой, обуславливающей наступление этих нежелательных событий; б) с действием (логическим – принятием решения по достижению цели; и физическим действием по достижению поставленной цели);

2) уровнем возможного ущерба W при наступлении соответствующего нежелательного события.

Комбинация (произведение) этих мер представляет собой обобщенную меру опасности, называемую риском ($R = P \times W$). Такое толкование риска может быть подкреплено совершенно прозрачными логически непротиворечивыми выводами субъекта об опасности, находящегося в одной из трех основных предельных идеализированных ситуаций:

- полная информация об обстановке, несущественный возможный ущерб;
- ничтожная информация об обстановке, существенный возможный ущерб;
- полная информация об обстановке, существенный возможный ущерб.

Любые инциденты, произошедшие в Арктике, потенциально содержат высокий уровень риска как за счет составляющей ущерба, так и вероятности навигационного происшествия. Наиболее опасной аварией, которая может возникнуть в высоких северных широтах, является ледовая коллизия, посадка на мель, опрокидывание судна в результате обледенения.

Обе составляющие компоненты риска (P и W) определяются некими внешними факторами (риск-факторами). Одни факторы в большей степени влияют на вероятность аварии, другие – на величину ущерба.

Вероятность – ведущая составляющая по двум видимым причинам.

1. Наряду с количественной градацией степени успешности арктической грузоперевозки она исходно определяет саму возможность ($P=1$) или невозможность ($P=0$) выполнения морского предприятия.

2. Она является универсальной интегральной оценкой воздействия всех зависимых и независимых природных и техногенных факторов морского предприятия.

Рассмотрение критериев для принятия решений на основании которых принимаются решения и определяются дальнейшие действия, зависит от:

- способа анализа риска;
- результатов, которые необходимо получить от анализа;
- наиболее подходящих для использования технологий оценки.

Критерии могут быть качественными или количественными. В некоторых случаях не могут быть использованы как явные (эксплицитные) критерии, но стремление к построению более совершенных моделей реальной обстановки и качеству моделирования геоситуации обязывает учитывать менее значимые, не явные (имплицитные) критерии, роль которых может быть не менее значимой.

Критерии риска (понятия и связи, на основании которых определяется значимость риска) могут быть выражены в терминах, которые включают любые характеристики и показатели риска. Этические, культурные, правовые, социальные, репутационные, экологические, договорные, финансовые и другие аспекты также могут иметь значение.

Умеренное многообразие учитываемых критериев риска все более находит реализации в АСУ в связи с возрастающей ролью автоматизации и развития искусственного интеллекта, чем определяет нарастающий конфликт с ролью человека в компетенции управления.

4.4.2. Методика поддержки принятия решения в условиях риска транспортной активности

Рассматривая перспективные ГИС мы определили главной целью роста уровня автоматизации на транспорте – повышение эффективности управления для обеспечения устойчивого функционирования и развития транспортной системы, обеспечение ее безопасности для человека и окружающей среды при минимизации ресурсных затрат на ее обслуживание [150]. Такая формулировка в расширительном смысле позиционирует ГИС как элемент АСУ не только в управлении физическими географически определенными объектами вблизи ЗП, но как элемент снижения рисков.

С точки зрения АСУ на транспорте наработан значительный опыт и разработано многочисленное число информационных продуктов [147] по управлению рисками от задач бухгалтерского учета и управления финансами до диспетчеризации и АИС. Соответствующие классификации, оценки, методы управления и предупреждения логистических рисков широко исследована в публичной литературе. По мере необходимости в предлагаемой концепции построения ГИС, отработанные решения могут быть включены как модули или вынесены за рамки ГИС как самостоятельные информационные реализации широкого перечня задач.

Исходя из понимания, что в перспективной ГИС аккумулируется большое количество данных об геообъектах транспортной активности, георегионе и геоситуации, содержащих географический аспект и динамические характеристики можно предложить методику поддержки принимаемых решений в условиях риска путем построения многофакторной матрицы оценки рисков для выбранного направления анализа ситуации.

Исходной информацией для проведения количественной оценки рисков становятся итоговые результаты качественного анализа, то есть анализируются только те риски, которые присутствуют при проведении конкретной операции алгоритма принятия решения. Риски исчисляются с

помощью числовых значений величин отдельных рисков и риска объекта в целом на этапе количественного анализа риска. При этом определяется размер предполагаемого ущерба и проводится стоимостная оценка последствий риска. Завершающей стадией количественного анализа служит разработка ЛПР системы антирисковых мероприятий и расчёт их эффективности.

При построении многофакторной матрицы оценки рисков применяется качественная, описательная статистическая или экспертная оценка показателей вероятности возникновения опасных событий и тяжести их последствий. Матрица риска строится на соотношении вероятности причинения ущерба и выявленной опасности и тяжести последствий ущерба, где вероятность и тяжесть имеют свои весовые коэффициенты, а уровень риска рассчитывается путем их перемножения по показателям вероятности и тяжести по каждой идентифицированной опасности.

Необходимо ответить на вопрос: какие опасности существуют или могут возникнуть в процессе выполнения логистического процесса? Опасности могут принадлежать самым различным аспектам логистического процесса, приведем примеры опасностей:

- I. задержка судна с выходом из порта отправления;
- II. отклонение от графика движения (в одну или другую сторону);
- III. обнаружение хищения груза;
- IV. ошибки в транспортных, таможенных и иных документах;
- V. отказ стороны от исполнения условий договора;
- VI. нормативные нарушения режима плавания;
- VII. чрезвычайная ситуация на судне в порту (варианты);
- VIII. чрезвычайная ситуация на судне в море (если есть зоны – по зонам);
- IX. чрезвычайная ситуация по метеоусловиям;
- X. чрезвычайная ситуация по условиям ледовой обстановки;
- XI. сигнал бедствия другого судна в регионе;
- XII. конфликтная обстановка в экипаже;
- XIII. отсутствие связи с судном;

- XIV. экологическая катастрофа опасного груза;
- XV. неготовность служб обеспечения в порту назначения;
- XVI. простой;
- XVII. забастовка экипажа.

Оценка уровня риска включает оценку возможного ущерба и вероятность наступления события. Единицы измерения и размерность в таком методе не имеет принципиального значения. Значения могут быть представлены в бальной системе или процентном выражении, но по возможности, рекомендуется придерживаться исходных величин типа денежных и вероятностных значений.

По результатам оценка риска ИНС может сформировать матрицу опасностей, условный пример которой приведен в таблице 18.

Таблица 24 – Пример матрица опасностей

Уровень риска	Оценка возможного ущерба			
	Незначительный	Легкий	Средний	Тяжелый
Малый (0.1)	I; XVI	IV	V	VIIa
Умеренный (0.3)	II; IV	VI	XI	VIII-A2
Средний (0.5)	III; XVII	VII;	XV	XII
Значительный (0.7)	IX	X	VIII-A1;	XVIII
Высокий (0.9)	VIIb	XIII	XIVa	XIVc

На основании матрицы опасностей определяются наиболее высокие риски и приоритетные мероприятия по их предупреждению, снижению последствий и готовности к устранению ущерба.

Топологическое представление на географической карте районов с учетом матрицы опасностей откроет возможность автоматизации анализа геоситуации средствами ГИС для выработки рекомендаций системой поддержки принятия решения в условиях риска транспортной активности.

4.5. Выводы по четвертой главе

В четвертом разделе на основании разработанной концептуальной модели АТА, дополненных и расширенных моделей геоинформационных пространств изложен комплекс методов поддержки АТА в условиях риска.

Основываясь на тренде сближения и роста производительности вычислительных систем типа АСУ и ГИС очевидна необходимость объединения модельных архитектур и методических подходов, обеспечивающих работу с геоинформацией для обоих типов вычислительных систем. Комплексирование АСУ и ГИС или интегрирование одной системы в другую можно рассматривать как тренд развития автоматизированных систем управления, использующих не просто большое число данных и большее число методов анализа, но и географическую сущность анализируемой информации в процессе принятия решений.

На практически разобранный пример анализа радиоголограмм от радаров с синтезированной апертурой спутников ДЗЗ показаны методы пошаговых преобразований цифровых объектов с использованием сверточной нейронной сети, в основе которой используются математические линейные преобразования абстракций теории категорий.

Применение интеллектуальных методов преобразования математических структур и применением технологий ИНС значительно расширяются возможности по распознаванию и классификации географических объектов с использованием датчиков различной физической природы. При достаточной вычислительной мощности помимо классификационных задач из системы наблюдения возможно получение широкого спектра динамических характеристик как отдельных геообъектов, так и пространственных геоструктур региона.

Гомоморфно-имплицитная упорядоченность категорий позволяет выявлять и учитывать скрытые, неочевидные риски транспортной активности в АЗРФ (например, влияние деградации ледовых образований на устойчивость

транспортной инфраструктуры), которые остаются за рамками традиционных детерминистических моделей.

Основываясь на более наполненной базе знаний об окружающей обстановке и собственном состоянии ресурсов объекта, открывается возможность значительного повышения эффективности управления за счет учета факторов имплицитного окружения и применения интеллектуальных методов анализа с использованием ИНС. Это касается не только отдельного объекта, но и системы АТА региона в целом, в том числе междоменных и разнородных транспортных инфраструктур АЗРФ.

Пример моделирования процесса поиска оптимального пути методом морфологии пространства признаков риска подробно разобран в настоящем разделе.

Тренд на дальнейшее внедрение ИНС и ИИ в системах поддержки принимаемых решений неизбежен. Категории автоматически аккумулируют сложные зависимости, что позволяет лицу, принимающему решения (ЛПР), опираться на уже верифицированные связи, а не анализировать «сырые» данные. Учитывая абсолютную прерогативу человека на принятие управляющего решения, субъективная составляющая в ошибке выбора того или иного сценария и процесса управления с использованием ИИ безусловно снижается.

5. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МОДЕЛЬНО-МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА

Применение модельно-методического аппарата для анализа риско-логических ситуаций с использованием ИНС и ИИ представляет собой современный и эффективный подход к решению сложных задач, связанных с оценкой, прогнозированием и управлением сложными структурами, к которым относятся АТА. Этот метод особенно востребован в областях, где требуется обработка больших объемов данных, учет неопределенностей и сложных взаимосвязей.

Модельно-методический аппарат — это совокупность математических, статистических и алгоритмических методов, которые позволяют формализовать и анализировать сложные системы. В контексте риско-логических ситуаций модельно-методический аппарат используется для идентификации, оценки и управления рисками на основе системного анализа и формализованных подходов [158]. Он позволяет:

- формализовать неопределенности, представить риски в виде математических моделей, что делает их более понятными;
- оценивать вероятности и последствия, применяя алгоритмы количественной и качественной оценки вероятностей наступления событий и их потенциального воздействия на систему;
- выявлять взаимосвязи между различными факторами, влияющими на возникновение рисков, и определять ключевые точки приложения усилий для их минимизации;
- прогнозировать сценарии различных стратегий и решений, чтобы выбрать наиболее оптимальный вариант действий;
- обосновывать решения обоснованных рекомендаций и стратегий управления рисками, снижая уровень неопределенности для ЛПР.

Таким образом, модельно-методический аппарат становится инструментом, который помогает преобразовать сложные и неопределенные ситуации в структурированные задачи, поддающиеся анализу и управлению.

Нейронные сети и методы искусственного интеллекта значительно расширяют возможности модельно-методического аппарата за счет:

- обработки больших данных, что особенно важно для оценки рисков в условиях неопределенности;
- непрерывного обучения, что позволяет выявлять скрытые закономерности и зависимости, которые трудно обнаружить традиционными методами;
- прогнозирования с использованием рекуррентных ИНС для предсказания временных рядов, что полезно для прогнозирования рисков;
- адаптивности ИИ к изменяющимся условиям, что делает их применимыми в динамичных средах.

Рассмотрим практические примеры применения разработанного модельно-методического аппарата при моделировании риско-логической ситуации с использованием ИНС и ИИ, морфологических преобразований полученной поверхности совокупного риска с учетом имплицитных факторов.

5.1. Моделирования риско-логической ситуации с использованием ИНС и ИИ

Основной целью моделирования риско-логической ситуации является поиск и обеспечение процесса выполнения логистических операций при минимальной вероятности наступления негативного события. К логистическим операциям на водном транспорте Арктического региона относятся: транспортировка, грузоперевалка, складирование, управления запасами, а также администрирование логистики, управление логистическими функциями.

Транспортная логистика — это совокупность мероприятий по организации доставки, материальных ценностей, включающих выбор оптимального вида транспорта, прокладывание выгодных путей, следование утвержденным схемам и нормативным указаниям. Оптимальным считается маршрут, по которому возможно доставить логистический объект в

кратчайшие сроки с минимальными затратами, а также с минимальным риском (ущербом) для объекта доставки.

Рассмотрим методику моделирования процесса транспортировки с использованием ГИС и интегрированной АСУ как наиболее очевидной составляющей среди географически связанных аспектов риска. В таком случае риски для кораблей, судов, иных значимых объектов в акватории СМП (нефтегазодобывающие платформы, трубопроводы, кабели), в процессе выполнения логистических операций очевидно категоризируются по предполагаемым источникам угроз, также обладающих географическим аспектом. При этом наиболее весомым критерием вероятности существования угроз от того или иного географического объекта выступает близость источника угроз к исследуемому объекту, иными словами их относительным положением в пространстве и во времени. Относительная близость определяется природой источника угроз и может носить нечеткое определение, например, для различных факторов опасных природных, техногенных и социальных явлений. Следует отметить, что вероятность наступления рискованной ситуации непостоянна во времени: она способна появляться, возрастать, уменьшаться или полностью исчезать под влиянием изменений пространственных, временных и ситуационных условий.

При многофакторном моделировании риска результирующее воздействие рассматривается как совокупность вероятностей негативного события от каждого из воздействующих факторов, моделируемых отдельно. В рассматриваемом примере корреляцию между несколькими факторами, влияющими на условия транспортировки, опустим, так как методика учета связанности была изложена выше.

Пространственный фактор определяется положением объекта по отношению к источнику опасности. Чем ближе объекты располагаются к источнику опасности, тем больше угроза. Для постоянно действующих опасных факторов, таких как ледовые поля, мелководье, закрытые полигоны, области с неблагоприятными климатическими условиями, временной фактор

учитывается как доля времени, в течение которого суда находятся в зоне их действия. Для источников риска, реализующихся в виде опасных явлений, временной фактор учитывают, как вероятность того, что рассматриваемые объекты будут находиться в зоне действия их негативных факторов.

При пуассоновском характере потока опасных явлений их возникновение в произвольный момент времени равновероятно и определяется исключительно интенсивностью потока и длительностью воздействия негативных факторов на объект. Следовательно, степень риска воздействия опасных явлений соответствует математическому ожиданию вероятности их возникновения за рассматриваемый период. Вероятность наступления неблагоприятного события зависит от трех ключевых параметров: риск возрастает пропорционально увеличению интенсивности вредного фактора, сокращению расстояния до источника опасности и удлинению времени нахождения в зоне его влияния.

Риск сочетает в себе вероятность наступления неблагоприятного события и меру его воздействия на объект (потери, ущерб, убытки). Оценка риска – количественная величина вероятности недостижения поставленной цели и величины возможного ущерба.

Рассмотрим методику моделирования рискологической ситуации на примере выбора оптимального пути по участку СМП от Карских ворот (остров Вайгач) до пролива Вилькицкого. Определим к рассмотрению следующие рисковые аспекты арктических грузоперевозок:

1. Физико-географические условия, а именно ледовая обстановка.
2. Аномальные погодные условия (раздел 1.3).
3. Нормативные ограничения.

Ледовая обстановка Арктики - это динамичная система ледовых покровов на Северном Ледовитом, препятствующая движению судов, меняющая маневренные элементы судна и влияющая на маршрут следования.

Плавание в аномальных погодных условиях современных судов, несмотря на их размеры и высокие технические и мореходные качества,

остается тяжелой и ответственной задачей. Нередко сила шторма бывает такой, что следование судна по курсу становится невозможным, и тогда на первом плане должна быть задача борьбы за живучесть и спасение судна, а не выбор и следование маршруту.

Экологические и нормативные ограничения – это районы ограниченного судоходства по соображениям защиты морской фауны и флоры, полигоны боевой подготовки во время учения ВМФ и т.п.

Классическим для решения логистических задач являются методы из теории графов. Однако для этого примера рассмотрим альтернативный подход. Одним из вариантов расчета риска является произведение вероятности возникновения негативного события на величину ущерба от него. Для территориально распределенных областей степень риска будем определять для каждой области по каждому из аспектов отдельно.

$$R_{ij}=P_{ij}*E_{ij}, \quad ()$$

где: P –вероятность наступления негативного события от j -го фактора в i -той области, E – величина ущерба в случае, если негативного события произойдет.

То есть, определенному набору параметров и их значений, ставится в соответствие вероятностная мера наступления того или иного события. Например, для судна ледового класса Arc7 при толщине льда – 80 см. и сплоченности – 60%, вероятность преодоления ледового массива составит 0,8, соответственно вероятность риска непреодоления – 20%.

Вероятность наступления негативного события по данным статистики или экспертные оценки (квалиметрически). Ущерб проще оценивать в универсальных единицах – стоимости, определяемой ущербом, затратами на восстановление или компенсацией последствий. В нашем примере воспользуемся качественным подходом и вероятность определим категориями вероятности риска непреодоления с явно заданными значениями: высокая 40%, средняя 30% и низкая 20%. Аналогично поступим с оценкой ущерба: высокий установим равным 3 балла, средний 2 и низкий в 1 балл.

Для каждой области посчитаем параметр совокупного риска как сумму рисков для каждого из рассмотренных факторов:

$$Rs_i = \sum_1^i Pi * Ei \quad (5.1)$$

Для областей, относящихся к запрещенным для плавания по экологическим и нормативным ограничениям введем критическое значение совокупного риска, равного 10. В результате получим матрицу плотностей распределения целевого параметра - совокупного риска, фрагмент которой приведен ниже:

$$\begin{bmatrix} 10 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & \dots & 0.9 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & \dots & 1.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 10 & \dots & 1.2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Для визуализации результата нанесем полученные области и результаты на карту с маршрутами из раздела 3.3.2 (рисунок 57). На рисунке 88 полученные области окрашены в тепловой цветовой схеме, определяющей значение совокупного параметра риска.

Области серого цвета с выделенной границей относятся к полигонам, плавание в которых ограничивается по расписанию на основании извещений мореплавателям, зоне аномальной погоды по данным метеослужбы и району закрытому для судоходства по экологическим ограничениям. Синей линией показана граница перехода ниласа в молодой лед толщиной до 30 см. по данным станций ледовой обстановки на май месяц.

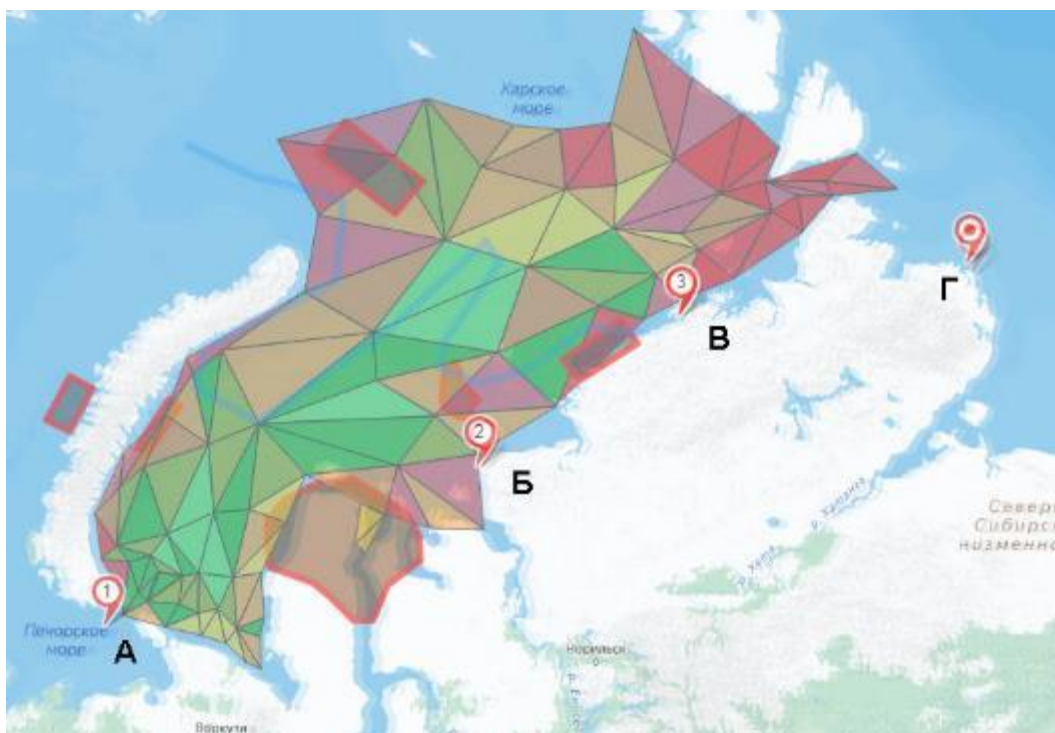


Рисунок 87 — Тепловая карта областей по рассчитанному совокупному параметру риска

Решение задачи поиска оптимального пути далее можно поручить отдельной целевой задаче, как вариант, использующей технологию ИНС. В дальнейшем ситуация моделировалась на открытой архитектуре рекуррентной нейронной сети (RNN). Архитектура RNN состоит из нейронных слоев и блоков, в которых информация обрабатывается последовательно. В контексте оценки вероятности риска каждый блок будет отвечать за обработку информации о судне на каждом шаге его перемещения по маршруту. Математическая составляющая такой RNN связана с передачей информации от одного блока к другому. Вводные данные – указанные выше типы рисков – являются входами нейронной сети. Каждый блок обрабатывает информацию, учитывая предыдущие состояния и данные, передавая их следующему блоку. Формализуем задачу оценки риска в терминах ИНС. Исходные геоданные задаются выражением 5.3:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_i(t) &= -\gamma x_i(t) + g_i(z_i(t)) + u_i(t) \\
z_i(t) &= \sum_{j=1}^j w_{ij}(t) x_j(t - \tau) \\
g_i(z_i(t)) &= \left(\frac{1}{1 + e^{-z_i(t)}} \right)
\end{aligned}
\tag{5.3}$$

где t – аналог времени сопоставимый с порядковым номером пересекаемой области, $x_i(t)$ – входные данные блока нейронной сети для текущей области (момента времени t), $\dot{x}_i(t)$ – выходной вектор блока нейронной сети, преобразованный для оценки обстановки, $w_{ij}(t)$ – вектор приоритетов параметров j -го фактора в i -той области, $u_i(t)$ – вектор внешних воздействий в конкретной области, g_i – функция активации нейрона (сигмоидального типа, рисунок 89), $z_i(t)$ – сумма воздействия группы нейронов, γ – затухание нейрона.

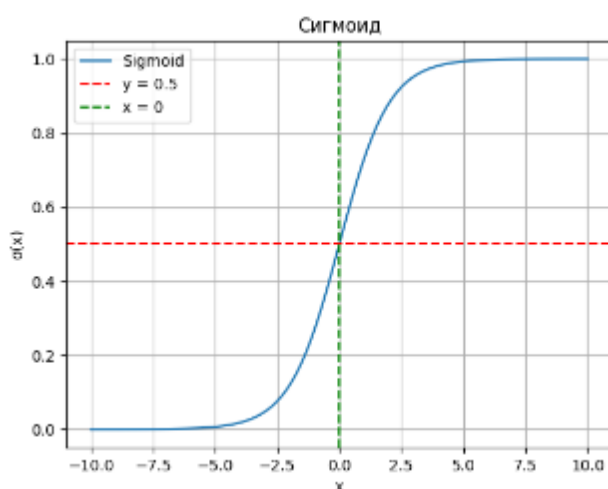


Рисунок 88 — Функция активации нейрона (сигмоидального типа)

При практическом моделировании в качестве исходных данных приняты условия для судна класса Arc6. Класс Arc6 определяется для зимне-весеннего периода навигации в Арктике возможностью плавания в разреженных однолетних льдах толщиной до 1,3 м. Осредненные значения толщин льда (м) в апреле-мае на традиционных трассах СМП при ледовых условиях «легкого»

и «среднего» типов, согласно статистическим данным XX века приведены в таблице 25.

Таблица 25 – Осредненные значения толщин льда (м) в апреле-мае на традиционных трассах СМП при ледовых условиях «легкого» и «среднего» типов, согласно статистическим данным XX века

Район плавания	Тип ледовых условий	
	«легкий»	«средний»
Пролив Карские Ворота – остров Диксон	1,0	1,2
Остров Диксон – мыс Челюскин	1,1	1,4
Мыс Челюскин – порт Тикси	1,2	1,5
Порт Тикси – река Колыма	1,7	2,1

При практическом моделировании перемещение самоходного судна класса Arc6 (самостоятельное плавание в разрежённых однолетних арктических льдах при их толщине до 1,1 м в зимне-весеннюю навигацию и до 1,3 м в летне-осеннюю) в летне-осеннюю навигацию.

После обучения нейронной сети на тестовых наборах данных из принятых нами по условию исходных данных, обученная нейронная сеть будет анализировать информацию о судне и обстановке и способна выдавать рекомендации по выбору маршрута следования. При подаче на ее вход оперативных данных обстановки ИНС способна предсказывать на основе динамической модели обстановки варианты ее развития вперед на 3 временных шага предстоящего маршрута плавания как совокупный параметр риска с вероятностью не ниже 67%. Применение такой модели позволит оценивать вероятность возникновения различных рисков событий на маршруте судна.

Разбиение региона на области произведено классически трехгранными полигонами, поэтому рекомендованный путь на выбранном участке формируется путем построения средней линии, соединяющей смежные ребра предыдущей и последующей областей.

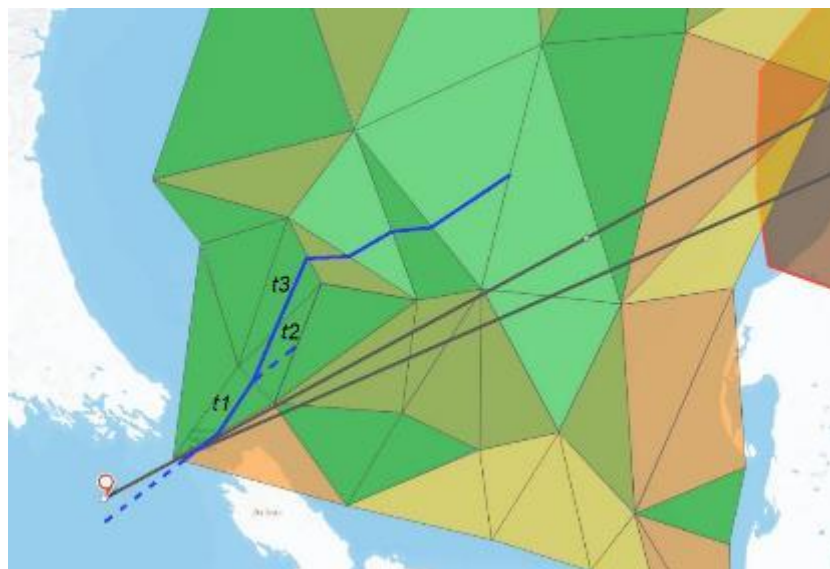


Рисунок 89 — Рекомендованный путь в функциональном пространстве

По результатам работы обученной нейронной сети в функциональном пространстве построен оценочный картоид.

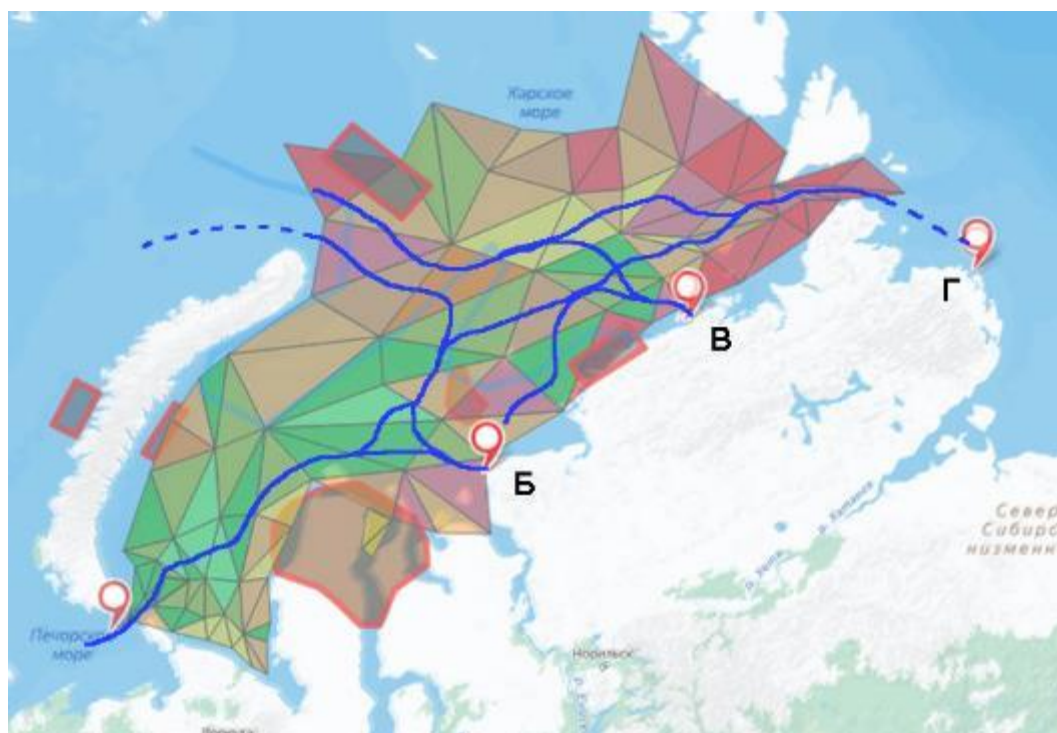


Рисунок 90 — Оценочные картоиды маршрутов

В качестве финального этапа исследований осуществляется детопологизация картоида, сглаживание графа и перенос маршрута на географическую карту. Перенос представлен на рисунке 92.



Рисунок 91 — Рекомендованные пути на географической карте

Полученный результат, возможно не самый впечатляющий, но перспективы технологий автоматизации обработки оперативных данных на основе ИНС в ГИС очевидны.

Важно сделать оговорку, что приведенный пример имеет решения в любом случае, но реальность сложнее любой модели. Пример перехода 21-23 октября 2014 года т/х «Георгий Ушаков» в балласте из порта Диксон за грузом в порт Дудинка показал, что безошибочный расчет на проходимость судна льда со средневзвешенной толщиной 18 см. оказался несостоятельным по ряду причин. Сильный ветер и низкая температура стали причиной интенсивного ледостава и высокого сжатия, а при скорости во льду менее 1,2 узла судно заклинивало из-за приповерхностного положения бульбы в носовой части.

Таким образом, совершенствование методов моделирования с применением все более совершенных методик бесспорно повышает качество принимаемых решений, но для дальнейшего повышения эффективности рекомендаций с применением АСУ возрастает роль учета оперативной информации и необходимость учета имплицитных (малозначимых) факторов.

5.1.1. Методика моделирования оптимального пути методом морфологии пространства признаков риска

Рассмотрим решение той же задачи с использованием методов преобразования пространства признаков с применением теории гомологии.

Исходным пунктом будет являться тепловая карта (рисунок 81) областей по построенную ИНС совокупному параметру риска, которая представляет собой полигональную сетку, базовым элементом структуры которой является треугольник. К такого рода полигональной сетке, довольно просто применимы методы морфологической гомологии.

Построим из планарной полигональной сетки трехмерную поверхность, анаморфированную вертикальной экструзией по данным матрицы плотностей совокупного риска. Промежуточный результат можно представить в виде неразрывной поверхности с предельными переходами (рисунок 93), основание которой замыкается поверхностью уровня моря (плоскостью горизонта, эллипсоида и т.п.). Последнее условие необходимо для последующего определения высотной координаты точек поверхности.

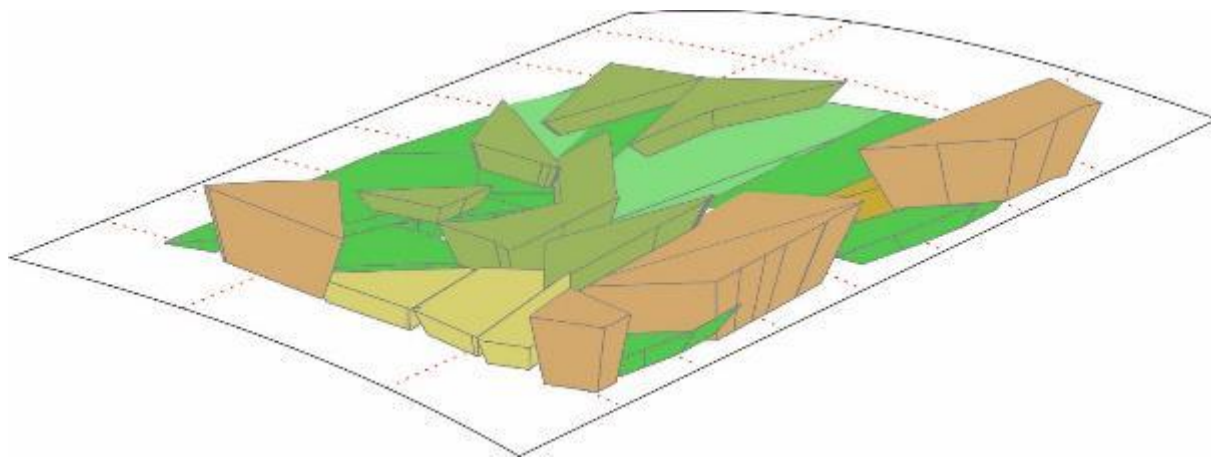


Рисунок 92 — Трехмерная поверхность, анаморфированная вертикальной экструзией по значению совокупного риска

Исходя из условия, что вершины и ребра граней планарной полигональной сетки не образовывали мультиграф, то в результате такого

анаморфирования получается неразрывная пространственная структура в виде поверхности с предельными переходами.

Для дальнейшей работы нам необходимо избавиться от предельных вертикальных переходов фактора совокупного риска, для чего над поверхностью выполняются две операции: замыкания и размыкания трехмерного объекта структурным элементом «шар». Данные операции относятся к основным в математической морфологии и определяются выражениями и иллюстрациями, приведенными ниже.

Замыкание поверхности A структурным элементом B определяется выражением 5.4.

$$A \bullet B = (A \oplus B) - B \quad (5.4)$$

В данном выражении оператор объединения можно считать оператором, преобразования поверхности в окрестности структурного элемента в случае невозможности нахождения взаимного положения для разности равной нулю. Иллюстрация действия оператора на плоскости приведена на рисунке 94.

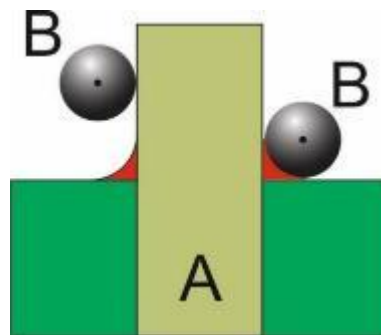


Рисунок 93 — Действие оператора замыкания

По итогу морфизма операции замыкания будут заполнены внутренние углы исходной пространственной структуры.

Размыкание поверхности A структурным элементом B определяется выражением 5.5.

$$A \circ B = (A - B) \oplus B \quad (5.5)$$

Морфизм размыкания преобразовывает исходную структуру отсеивая пространства меньшие, чем структурный элемент. Применение размыкания необходимо осуществить к исходной пространственной структуре с учетом стороны обратной к нормали поверхности для операции замыкания. Иллюстрация действия оператора для плоскости приведена на рисунке 95.

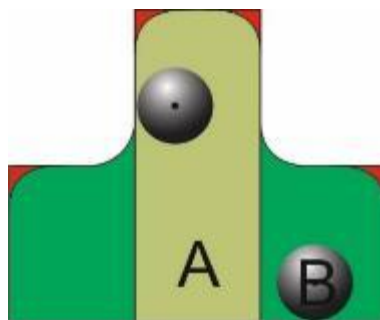


Рисунок 94 — Действие оператора размыкания

Следует обратить внимание, что диаметр элемента В не должен быть меньше минимального шага между ближайшими значениями целевого параметра - совокупного риска из матрицы 4.5.

По итогу выполнения замыкания и размыкания должна получиться сглаженная трехмерная поверхность, гомеоморфированная вертикальной экструзией по значению совокупного риска. На этом этапе, путем понятных морфологических отображений мы получили сглаженную трехмерную поверхность фактора совокупного риска, которая соответствует начальной гомологической структуре самого фактора и обладает свойствами непрерывности, сглаженности, отсутствие разрывов и границ (условно).

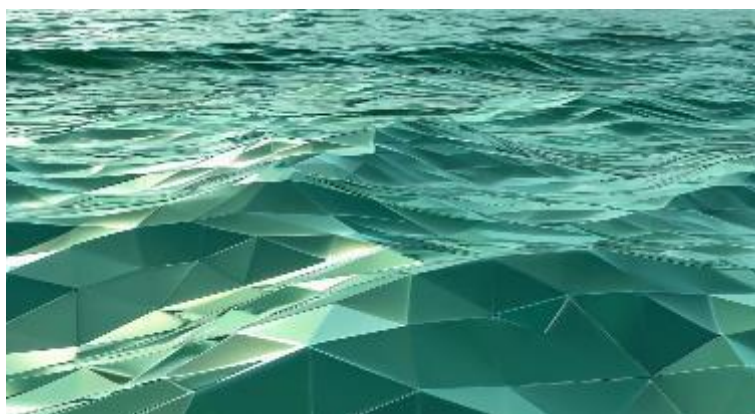


Рисунок 95 — Абстрактная иллюстрация гомеоморфизма трехмерной поверхности совокупного фактора риска

Следующим этапом решения задачи поиска оптимального пути в условиях минимизации фактора совокупного риска очевидна подзадача, реализующая функцию гравитации материальной точки при ее следовании в пункт назначения с учетом полученной поверхности фактора совокупного риска.

Для решения этой задачи предлагается смоделировать движение материальной точки под действием условной силы натяжений, направленной к пункту назначения по поверхности фактора совокупного риска под действием силы гравитации (рисунок 97). В предложенной абстракции сила гравитации призвана обеспечить выбор минимального риска в области возможных близко лежащих значений.

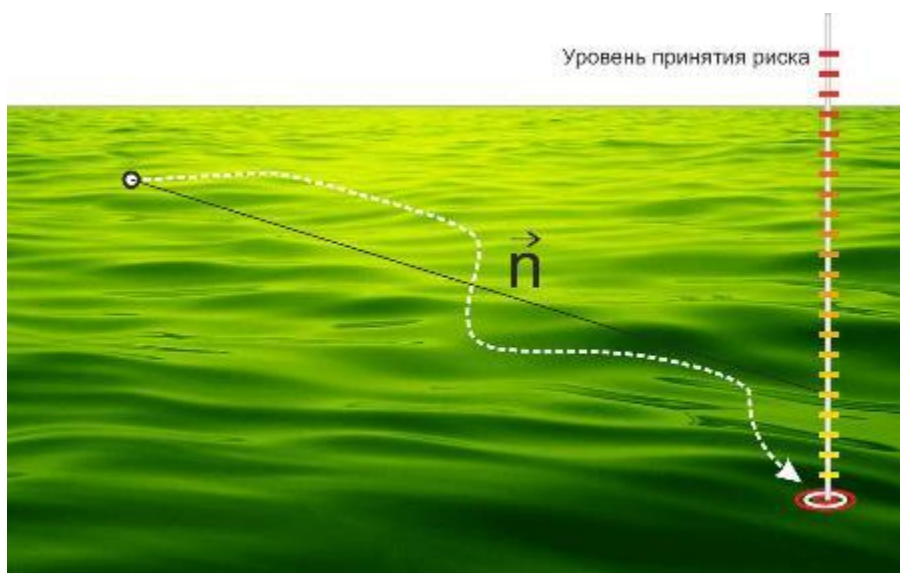


Рисунок 96 — Модель задачи поиска оптимального пути при условии минимизации фактора совокупного риска

Однако, при математическом моделировании, может случиться ситуация, в которой действие силы натяжения может совпасть с нормалью участка поверхности, что вызовет коллизию, так как модель не позволит продолжить движение материальной точки (рисунок 98). В положении (а) материальная точка преодолеет барьер, обусловленный повышением параметра совокупного риска, в положении (б) заданного уровня принятия риска будет недостаточно.

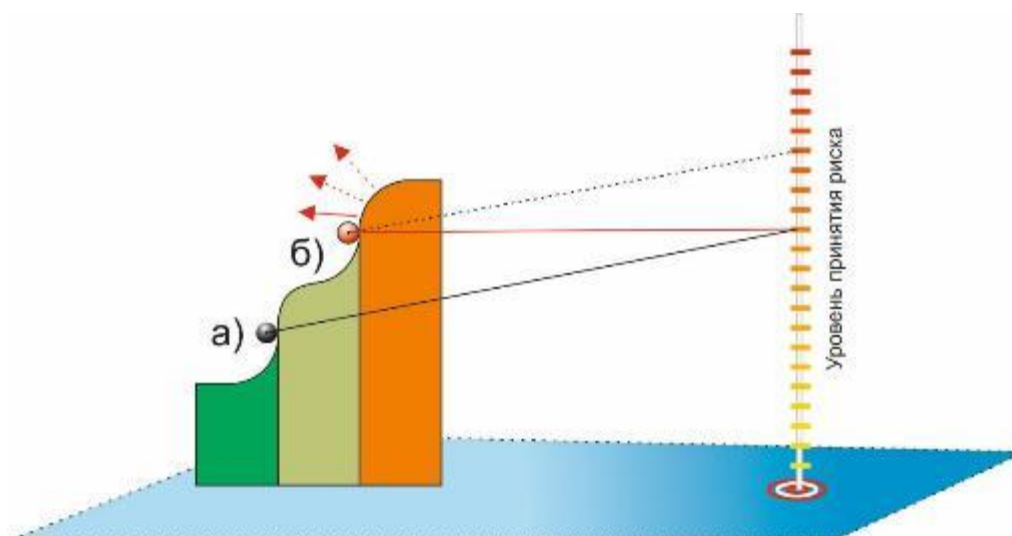


Рисунок 97 — Иллюстрация коллизии в задаче поиска оптимального пути при превышении текущего уровня риска над принимаемым

Для снижения вероятности наступления такого рода коллизии для модели поиска оптимального пути предложенным методом необходимо задавать «уровень принятия риска», условно приподнимая доступные ходы в решении задачи над базовым уровнем модели. В тоже самое время, путем выбора радиуса элементов замыкания и размыкания больше минимального шага изменения совокупного риска, есть возможность регулирования условия превышения уровня принимаемого риска.

Таким образом, на начальном этапе с использованием ИНС и ИИ строится полигональная сетка совокупного параметра риска, определяемого влиянием несколькими значимых факторов. Полученная полигональная сетка, перенесенная на картоид, методами математической морфологии преобразуется в трехмерную поверхность значимых факторов риска, на которой моделируется задача поиска оптимального пути с условием минимизации совокупного параметра риска. На следующих этапах приведем пример учета имплицитных факторов и методику ввода динамических параметров в полученной модели.

5.2. Учет имплицитных факторов в модели поиска оптимального пути

При построении трехмерной поверхности совокупного параметра риска в нашей модели учитывались следующие факторы:

- физико-географические условия (ледовая обстановка),
- аномальные погодные условия,
- нормативные ограничения.

Дополним полученный ранее ситуационный анализ некоторым имплицитным фактором, например, абиотическим: вместе со льдом в районе предполагаемого маршрута дрейфуют люди (фактор может быть критическим, но не учтенным) или редкие животные. Данный дополнительный фактор не относится к формирующим полноценную картину, но вносит существенные изменения в полученную ранее поверхность параметра риска.

Для учета имплицитного фактора необходимо провести дополнительную морфологическую операцию преобразования поверхности фактора риска оператором (корреляционной матрицей) имплицитного фактора как описано в третьем разделе и проиллюстрировано на рисунке 99, где (а) корреляции между поверхностями нет; (б) исходная поверхность изменяется подобно заданной с коэффициентом корреляции равным единице; (в) исходная поверхность изменяется подобно заданной с коэффициентом корреляции больше единицы.

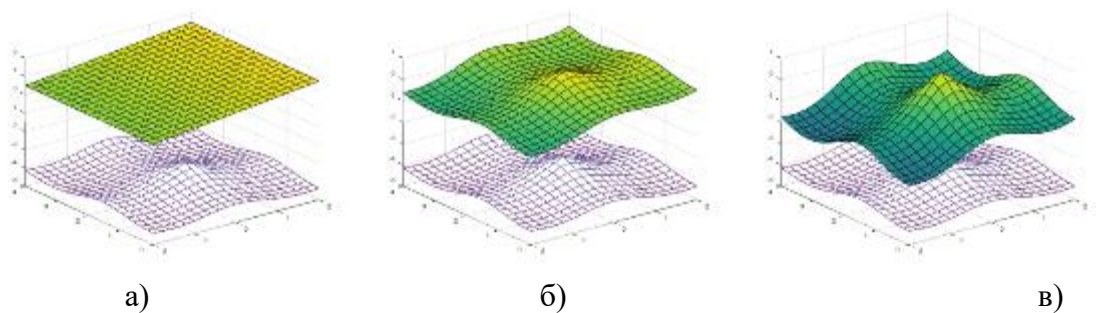


Рисунок 98 — Иллюстрация коллизии задачи поиска риска

В рассматриваемым нами примере коэффициент корреляции выбирается равным такому значению, чтобы абиотический фактор, который также может быть распределённым, в результате применения увеличивал результирующий фактор риска близко к предельному. Итоговое преобразование повлияет на решение целевой задачи (рисунок 100).



Рисунок 99 — Модель задачи поиска оптимального пути с учетом имплицитного фактора

Приведенный пример описывает метод учета имплицитных факторов непосредственно на анаморфированную поверхность ключевого фактора, путем эластичного слияния в модель поверхности той же размерности. Однако предлагаемый метод имеет возможность учета имплицитных факторов, не обладающих территориальным аспектом, например, лимит топлива, вынуждающий судоводителя идти на больший риск во избежание остаться без топлива при выборе менее опасного, но более длинного пути.

В таком случае для учета подобного фактора риска математическая модель и анаморфированная поверхность ключевого фактора остается практически без изменения, но необходимо и достаточно увеличить уровень принятия риска. Решение в процессе поиска оптимально пути будет другим, вероятнее всего более коротким, но пролегающим через области с более высоким риском, что в общей имплементации задачи соответствует реальности.

Таким образом, учета имплицитного фактора одного или их совокупности по предлагаемой методике возможен, не вызывает значительного роста вычислительной нагрузки и может быть применим в динамическом режиме в интервале итераций между построением поверхности совокупного фактора риска до начала решения целевой задачи.

5.3. Результаты машинного моделирования

Моделирование решения задачи поиска оптимального пути с применением трехмерной поверхности совокупного фактора риска реализовано в программной среде Delphi на языке программирования Паскаль.

На рисунке 101 представлен интерфейс программы моделирования задачи поиска оптимального пути с использованием сглаженной трехмерной поверхности совокупного риска (рисунок 87).

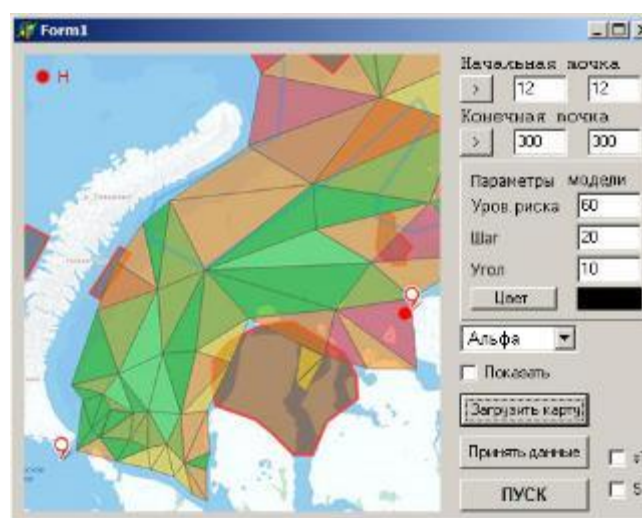


Рисунок 100 — Внешний интерфейс и карта с полигонами после работы ИНС

Интерфейс пользователя позволяет задать:

- планарные относительные координаты начальной и конечной точек на рабочей поверхности с началом отсчета левый верхний угол;
- условный уровень риска, применяемый в модели;
- шаг итерационных приближений материальной точки к цели;
- предельный угол подъема градиента для цвета максимального риска;
- цвет максимального риска для загруженной карты (как правило черный);
- органы управления и визуализации процесса вычислений.

Расчет производится исходя из логики последовательных перемещений материальной точки по поверхности совокупного риска при выполнении следующих условий (рисунок 101):

- расстояние перемещения определяется сокращением абсолютного расстояния до конечной цели на условную единицу $El=r1-r2$;
- расстояние перемещения не может превышать двух условных единиц El ;
- направление перемещения определяется минимальным из возможных значений совокупного риска, т.е. высотной составляющей (вертикальной координаты) поверхности.

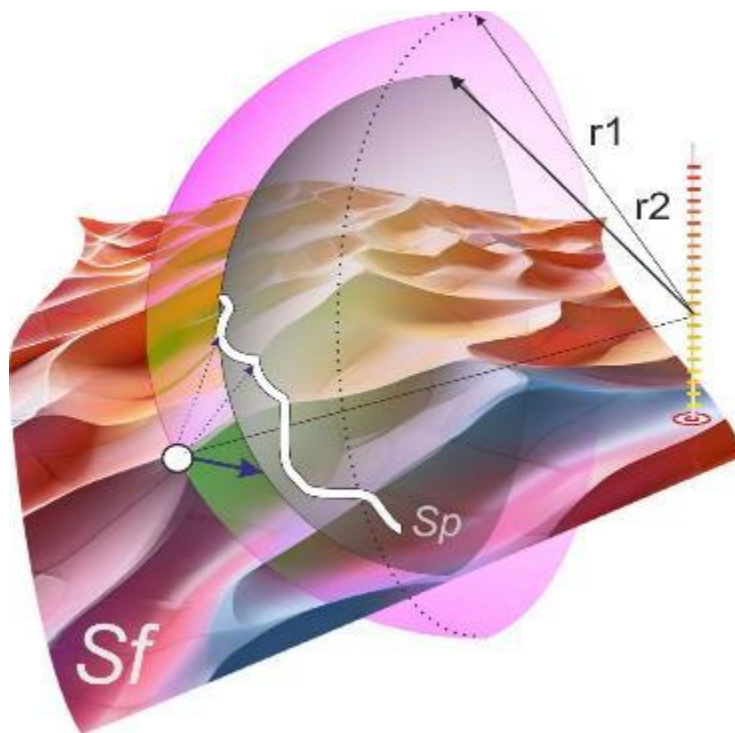


Рисунок 101 — Логика последовательных перемещений в задаче поиска пути

Исходя из сформулированных условий необходимо найти точку с минимальной вертикальной координатой на трехмерном сплайне, являющимся результатом пересечения сферы R , радиуса r_2 с центром в точке цели маршрута и поверхности совокупного риска. Искомый сплайн Sp_i для i -го шага будет определяться множеством точек пространства:

$$Sp_i = (\{P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), \dots, P_n(x_n, y_n, z_n)\} | R(r_2) \cap Sf) \quad (5.6)$$

где: i – текущая итерация, $P_n(x_n, y_n, z_n)$ – точки пространства, заданные соответствующими координатами, $R(r_2)$ – сфера с началом в точке цели маршрута, Sf – поверхности совокупного риска.

Вторым условием вводятся ограничения расстояния от материальной точки до найденного сплайна величиной не более двух условных единиц El . Вторую часть ограничения возможно сформулировать иначе: как часть сплайна, находящаяся в конусе телесного угла сферы из материальной точки к точке цели маршрута с углом раскрытия равным 120° .

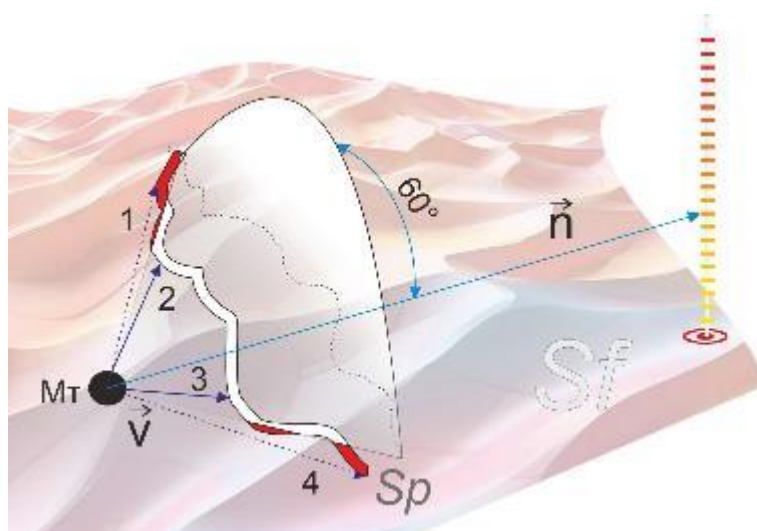


Рисунок 102 — Второе ограничение последовательных перемещений

Рисунок 102 поясняет, что участки 1 и 4 исключаются из возможных вариантов, даже если значение вертикальной координаты z точек сплайна на выделенных участках будут минимальными. Ограничение реализуется в виде системы неравенств:

$$\overrightarrow{v_{i+1}} = \begin{cases} \angle \theta = \angle(\vec{n}, \vec{v_n}) < 60^\circ \\ |\vec{n} - \vec{v_n}| < 2El \\ \min(\{z_n\}) \end{cases} \quad (5.7)$$

где: $\overrightarrow{v_{i+1}}$ – вектор следующего перемещения, $\vec{n}$ – вектор направленный на конечную точку маршрута, $\vec{v_n}$ – вектора возможных перемещений для текущего шага, El – условное единичное расстояние. В свою очередь угол θ между направляющими векторами находится из формулы:

$$\cos \theta = \frac{x_1x_2+y_1y_2+z_1z_2}{\sqrt{x_1^2+y_1^2+z_1^2}\sqrt{x_2^2+y_2^2+z_2^2}}, \quad (5.8)$$

а расстояние между точками по формуле

$$|\vec{n} - \vec{v_n}| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (5.9)$$

где x, y, z – координаты точек пространства.

Приведенное ограничение вводится для исключения коллизии предельных переходов по направлениям, близким к плоскости, перпендикулярной направляющему вектору на точку цели маршрута.

Визуализация процессов работы программного обеспечения с трехмерными пространственными данными сопряжена с некоторыми условностями представления материала в двухмерном отображении. Так в качестве имплицитной (мультипликативной) составляющей использовался дополнительный слой альфа-канала изображения. К сожалению, карту с полигональной сеткой без кодирования трехмерных данных в альфа-каналах использовать невозможно, поэтому дальнейшие демонстрации основаны на генерированной трехмерной карте с одним альфа-каналом имплицитного фактора.

Результаты моделирования при решении задачи поиска оптимального пути по описанному выше методу приведены ниже на рисунках с пояснениями.

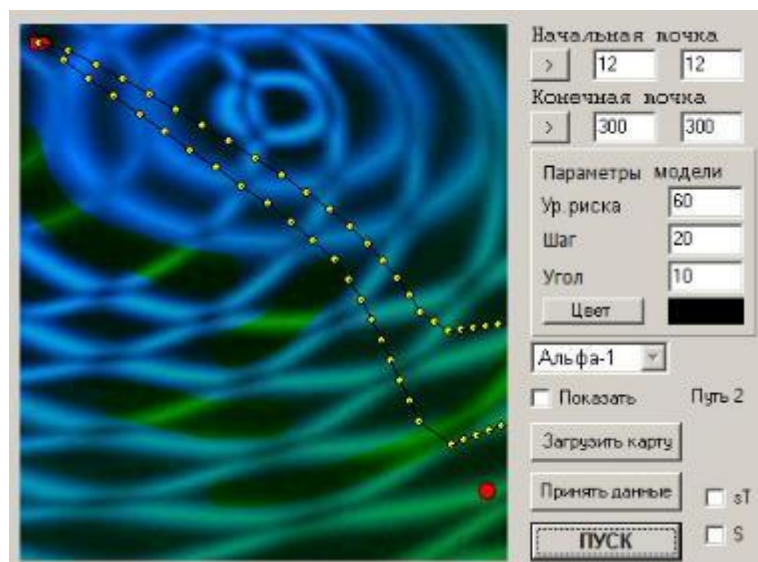


Рисунок 103 — Внешний интерфейс и карта с альфа-каналом имплицитного фактора

На рисунке 103 представлен фрагмент рабочей области программы и пример классического решения задачи поиска оптимального пути. В качестве исходной карты была выбрана поверхность, моделируемая как результат интерференции волн от двух когерентных источников. Уровень параметра совокупного риска определяется значением яркости одно из каналов RGB изображения. В данном случае он отличается уровнем яркости: чем темнее, тем выше параметр риска.

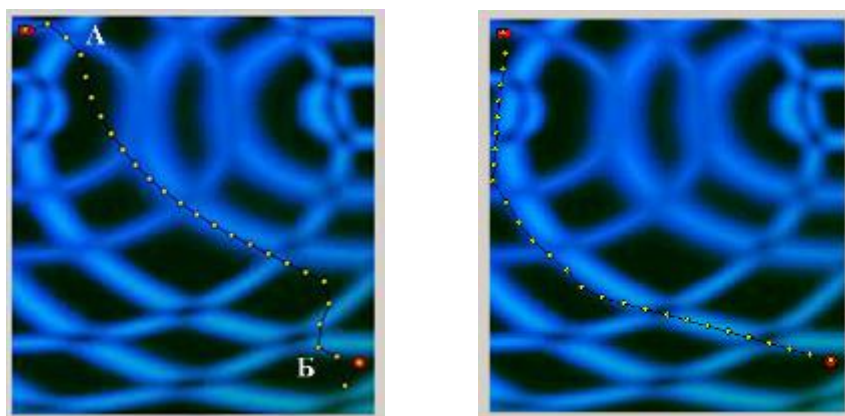


Рисунок 104 — Задача решена корректно

Как видно из рисунка 104 оба найденных пути тяготеют к светлым областям карты и немного по-разному, но достигают заданной цели.

На рисунке 105 карту переместили в область с заведомо высоким уровнем имплицитного фактора, что выделено зеленым оттенком изображения карты и повторили имитацию решения целевой задачи.



Рисунок 105 — Задача не решена из-за высокого уровня имплицитного фактора

При повышении уровня приемлемого фактора риска задача снова начинает решаться, но в зоне отсутствия имплицитного фактора риска и низким уровнем совокупного модель выбирает более прямой путь к цели сквозь зоны повышенного риска, отдавая предпочтение более короткому пути, не смотря на наличие более высокого, но допустимого риска.

На рисунке 106 обнаружена коллизия в области конечной цели, которая не может быть разрешена без повышения уровня допустимого риска.

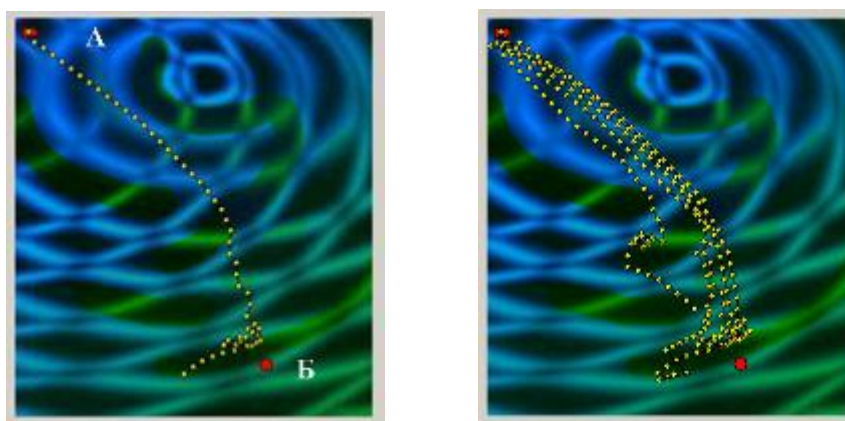


Рисунок 106 — Задача не решена из-за высокого уровня имплицитного фактора

Как видно из рисунка материальная точка в конце задачи начинает «метаться» с каждым новым шагом из стороны в сторону, так как уровень совокупного и имплицитного риска в сумме превышает допустимый,

соответственно область в непосредственной близости от цели становится не проходимой даже при повторных решениях.

Моделирование маршрута судна с учётом имплицитных факторов риска показало снижение расчётного индекса риска на 14% для маршрутов с учетом имплицитных угроз по сравнению с маршрутами, проложенными традиционными методами без учёта данных факторов.

5.4. Учет динамических параметров

В рассматриваемой нами системе геоструктур, с учетом возможностей концептуальной модели и влияние на анализируемую геоситуацию динамические параметры формализуются любыми категориями геообъектов на которые ссылается категория **G**. Формуляры объектов гидрометеобстановки категории **M** также имеют поля и свойства для описания динамики преобразования геометрических примитивов во времени в соответствии данным категории **V** (векторов состояния геообъектов). Таким образом, динамические параметры можно определить (задать) для:

- объектов подкатегории транспорта;
- объектов подкатегории ледовых образований;
- объектов подкатегории гидрометео образований;
- абстрактных объектов, имеющих непустую структуру в категории **G**.

Объекты категории **P** (геоситуации) по определению являются динамически изменяемыми, но их динамика является производной от динамики входящих в георегион геообъектов. Оставшиеся объекты в категориях **T**, **D**, **Em** и **F** могут быть изменяемыми, но не являются динамическими.

Формулярная часть динамикой структуры любого географического объекта или примитива должна содержать минимум шесть параметров:

$$V_{dob}(t) = \langle v_x, v_y, v_z, a_x, a_y, a_z, M_r, M_\omega, \dots \rangle, \quad (5.10)$$

где v_x, v_y, v_z - скорости центра масс геообъекта в ортогональных осях; a_x, a_y, a_z - ускорения центра масс геообъекта по соответствующим осям; M_r - оператор ориентации объекта; M_ω - оператор вращения вокруг соответствующих осей.

Пространственная ориентация геообъекта модифицируется использованием операторов линейного преобразования: M_r и M_ω , которые задаются в виде матрицы, т.к. в пространстве со степенью более 2 группа поворотов не коммутативна.

Такого рода причинами объясняется логика объединения векторов состояния в одну категорию V , которая призвана обеспечить вычислительную эргономику при работе с близкими математическими структурами. На этом основании стоит считать структуру динамических параметров геообъектов у всех одинаковой.

Опираясь на ортогональную Декартову систему координат Евклидова трехмерного пространства, операции по относительному позиционированию и ориентации геообъектов в составе одного георегиона могут выполняться с использованием широко применяемого программно-математического аппарата матричных вычислений (направляющих косинусов).

Вращение вокруг оси x на угол α :

$$M_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Вращение вокруг оси y :

$$M_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

Вращение вокруг оси z :

$$M_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

Расширенный формуляр динамической часть содержит еще три параметра, определяющие динамику изменения пространственного примитива:

$$V_{dOb} = \langle \dots, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z \rangle, \quad (5.14)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ - скорости изменения линейных размеров геообъекта от центра масс в ортогональных осях.

Преобразование пространственного примитива геообъекта в таком случае реализуется простым дополнением операторов линейного преобразования коэффициентами масштабирования:

$$\gamma = \varepsilon t, \quad (5.15)$$

где t – оперативное время.

Таким образом, оператор линейного преобразования, учитывающий одновременно вращение вокруг оси x и динамику изменения размеров получается в результате умножения операторов поворота на диагональный оператор изменения размеров:

$$M_x(\alpha, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_x & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_y & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_z \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

и т.д.

Такого классического математического аппарата для отображения и представления динамики геообъектов любой категорий достаточно для поддержания актуальности представления геоситуации в абстрактном функциональном пространстве. Важно учитывать, что операции умножения матриц в данном случае (и в общем) не коммутативны.

Проецирование абстрактного функционального пространства в геофункциональное пространство осуществляется традиционным проецированием АФП на карту подложку.

Помимо положения и ориентации географического объекта динамикой могут обладать геометрические формы объекта, для учета которых в категории V входит следующая структура:

$$V_{fob} = \langle type, x, y, z, ID_{гр}, * \rangle, \quad (5.17)$$

где: $type$ – признак примитива [1-эллипсоид, 2-параллелограмм]; x, y, z – пространственные размеры примитива; $ID_{гр}$ – идентификатор группы; $*$ – оператор связанности в группе (резерв).

Существуют две основные проблемы, связанные с описанием объекта современной геометрии. Первая проблема заключается в отсутствии возможности описать неидеальные объекты современной геометрией. Вторая – существующие методы геометрии не рассматривают формирование реальных объектов. Поэтому для описания объемной фигуры используются один из двух примитивов: эллипсоид или параллелограмм. При необходимости описать более сложную объемную форму используется идентификатор группы $ID_{гр}$ по которому определяются примитивы составляющие сложную форму и оператор $(*)$ типа связывания, который может принимать значения: «жесткое в точке» или «узел». Число параметров для описания примитивов у эллипсоида и параллелограмма одинаково и равно трем, но в первом случае это полуоси, а во втором грани. Пренебрегая необходимостью учитывать полости и разрывы, можно утверждать, что для подавляющего большинства случаев двух, приведенных примитивов достаточно для описания объекта.

Особняком в трехмерном моделировании стоит трехмерная поверхность и сплайн, часто используемые в ГИС [151]. При составлении объемной фигуры эти типы пространственных структур практически не используются и, как правило, применяются при моделировании средствами, непосредственно доступными в ГИС.

Динамика сплайна и трехмерных поверхностей — это область математики и вычислительной техники, которая изучает изменение формы

гладких кривых и поверхностей под воздействием внешних сил, ограничений или других факторов. Математическое обеспечение для моделирования динамики сплайнов включает в себя методы численного анализа, дифференциальные уравнения, методы оптимизации и компьютерные алгоритмы. Приведем основные понятия, аспекты и подходы.

Сплайн — это гладкая функция, заданная кусочно-полиномиальными выражениями. Часто используются кубические сплайны, которые обеспечивают гладкость второго порядка (непрерывность первой и второй производных). Динамика сплайна описывается дифференциальными уравнениями, аналогичными уравнениям движения в механике, которые учитывают силы, действующие на сплайн, и его свойства (например, жесткость, массу). Например, для упругого сплайна можно использовать уравнение:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha \frac{\partial^4 u}{\partial t^4} + F(x, t), \quad (5.18)$$

где:

- $u(x, t)$ — положение сплайна в точке x в момент времени t ,
- α — коэффициент жесткости сплайна,
- $F(x, t)$ — внешняя сила, действующая на сплайн, в нашем примере частная составляющая фактора риска в точке x в момент времени t .

Для решения уравнений динамики сплайна используются численные методы, такие как:

- метод конечных разностей (*FDM*): Аппроксимация производных разностными схемами;
- метод конечных элементов (*FEM*): Разбиение сплайна на элементы и решение уравнений для каждого элемента;
- метод Рунге-Кутты: для интегрирования по времени.

В большинстве задач требуется оптимизация сплайна, для чего используются такие методы как: градиентный спуск и метод Ньютона.

Оптимизация сплайна с привязкой к заданным точкам пространства используют методы условной оптимизации, такие как метод Лагранжа.

Рассмотрим упругий сплайн, закрепленный на концах и подверженный внешней силе $F(x,t)$. Для дискретизации разбиваем сплайн на N узлов с шагом Δx и аппроксимируем производные конечными разностями:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial t^4} \approx \frac{u_{i+2} - 4u_{i+1} + 6u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{(\Delta x)^4}. \quad (5.19)$$

Далее выполняется интегрирование по времени методом Рунге-Кутты. И, учитывая, что сплайн закреплен на концах:

$$u(0, t) = u(L, t) = 0, \quad (5.20)$$

получаем систему линейных или нелинейных уравнений, которую решаем численно, определяя значения u для незакрепленных узлов на времена t .

Для моделирования динамики сплайнов используются уже разработанные программные инструменты: встроенные функции для работы со сплайнами `'spline'`, `'ppval'` в MATLAB или библиотеки `'SciPy'` и `'NumPy'` в Python.

В процессе динамического моделирования трехмерных примитивов (поверхностей и сплайнов) данные для полиномов извлекаются из формулярной части динамикой структуры 5.10 и после итерации записываются в нее же на актуальный момент времени t .

Таким образом в концептуальной модели обеспечивается учет динамики собственного параметрического пространства на основе простых трехмерных примитивов, более сложных сплайнов и поверхностей, а также положения отдельного ГО в пространстве или в составе геоструктуры.

5.5. Применение метода Монте-Карло для анализа на гомеоморфной поверхности риска

Для многопараметрических задач, требующих расчетов в реальном времени — таких как оценка рисков безопасности плавания, прогнозирование динамики ледовых полей и планирование безопасных маршрутов в акваториях

Арктики — аналитические решения приведенным в 5.1 методом могут оказаться слишком ресурсоемкими. Эффективным подходом к упрощению таких вычислений является применение метода Монте-Карло. Этот численный метод, основанный на статистическом моделировании и использовании случайных чисел, позволяет проводить приближенные, но высокоэффективные вычисления и на гомеоморфных поверхностях, что особенно критично для оперативного принятия решений в условиях ограниченного времени и быстро меняющейся арктической обстановки, где важна скорость и устойчивость к высокой размерности данных: арктической навигации, ледовом прогнозировании, управлении рисками морских операций.

Метод Монте-Карло использует случайные выборки для аппроксимации решения конкретной задачи путем выполнения простых шагов:

1. Генерация случайных позиций с заданным распределением.
2. Выполнение расчетов параметра с использованием полученных случайных позиций на поверхности совокупного риска.
3. Анализ результатов моделирования.

Метод Монте-Карло позволяет приблизительно вычислять ареалы в многомерных пространствах, где полноценные методы моделирования трудоемки, оценивать вероятности сложных систем, моделировать проведения простых примитивов в сложных моделях.

Поясним применение метода на примере определения зоны операционных действий для судна с лимитом топлива в условиях ледовой обстановки с переменной сплоченностью льда.

Для моделирования нам потребуется однократно построить поверхность совокупного риска на заданной акватории и определить в модели зависимость скорости хода судна от плотности ледового покрытия. Таким образом, расход топлива является функцией плотности льда при установленной зависимости от интенсивности работы двигателей. Исключим вариант полной остановки с работающими двигателями. Задача: определить методом Монте-Карло

приблизительную рабочую зону судна для выполнения разового задания с учетом досягаемости по прямой линии в условиях лимита топлива.

Для решения этой задачи методом Монте-Карло необходимо случайным образом определить множество точек в исследуемой зоне и посчитать с учетом ледовой обстановки затраты топлива при движении судна к точке и обратно по маршрутам с минимальным уровнем риска согласно методики, приведенной в разделе 5.1. Все точки, достижение которых укладывается в выделенный лимит топлива образуют искомую рабочую зону (рисунок 107).

Как видно из рисунка, при относительно небольшом количестве испытаний для подобного рода задач можно быстро и без особых ресурсных затрат получить приемлемый результат.

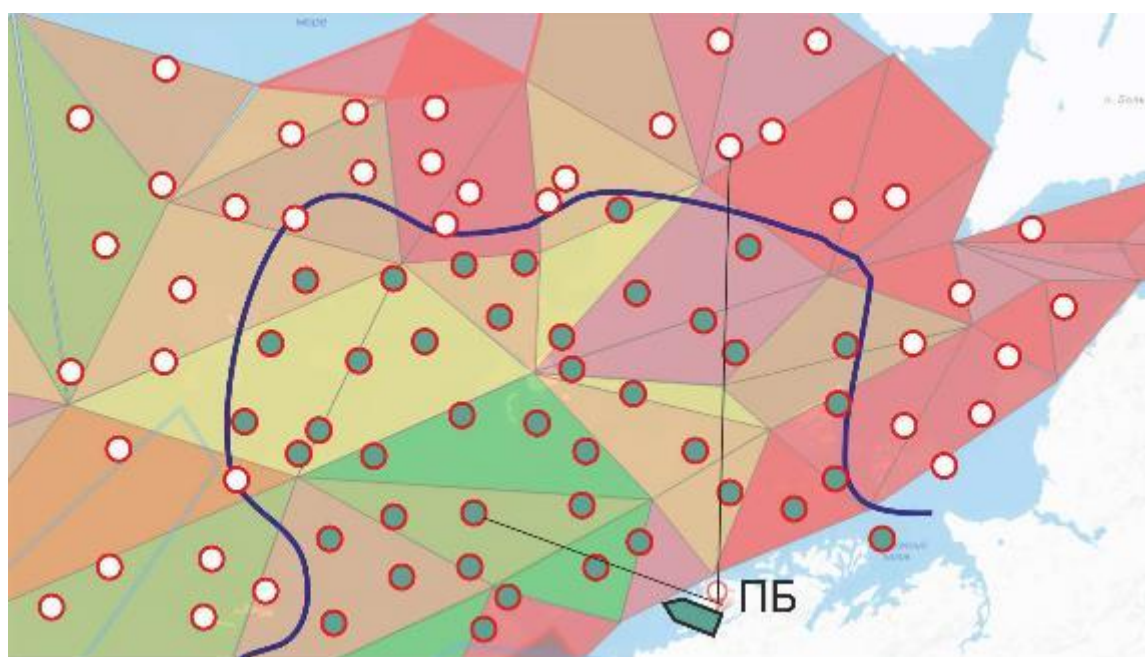


Рисунок 107 — Иллюстрация реализации метода Монте-Карло

Преимущества метода Монте-Карло заключается в его универсальности, простоте реализации и масштабировании (параллелизации вычислений). К недостаткам метода Монте-Карло относятся, возможно, большое количество испытаний и медленная сходимость (точность результата увеличивается как $1/\sqrt{N}$, где N — количество испытаний).

5.6. Применение анаморфирования для визуализации и организации категорий территориального управления

Анаморфирование картографического изображения — это процесс преобразования карты, при котором географические объекты и территории искажаются в соответствии с определёнными параметрами, такими как население, плотность ресурсов или иные количественные данные, как например, плотность льда или уровень риска. Основная цель анаморфирования — визуализировать информацию, которая не связана напрямую с физическими размерами территорий, но важна для анализа и интерпретации.

Анаморфирование картографического изображения анализируемого региона служит, с одной стороны: для снижения размерности пространства возможных решений; топологизации (переход от географически конкретной карты района к абстрактной в территориальном отношении графической схеме признака) геоситуации для связи с пространством рекомендаций; выравнивания плотности территориального распределения какого-либо показателя (сплочённость льда, интенсивность судоходства, навигационной опасности, ...). Анаморфирование в геоинформатике может быть рассмотрено как метод манипуляции с пространственными данными с целью улучшения визуализации и анализа, возможностью представить данные в виде карты, где выделяют территории, которые имеют большее значение по выбранному показателю или результату проведенного численного анализа, даже если их физическая площадь мала.

С другой стороны, по сути понятия и содержания категории «территориальный контроллинг (или территориальное управление, управление региональными объектами и системами), процедуру анаморфирования можно трактовать как пространственную оценку региональной обстановки по тому или иному анализируемому параметру (показателю). Она позволяет сразу в территориальной форме выделять на

геоизображении района наиболее важные и существенные для решаемой задачи пространственные области и зоны для маневра «положением» и «содержанием».

Ранее указывалось, что управление АТА включает такие базовые этапы, как оценка обстановки, выработка решения, реализация плана. Оценка обстановки является центральным элементом методики, так как на ее основе формируется план действий.

При использовании методов теории графов и ИНС в территориальном анализе и управлении АТА традиционная карта демонстрирует существенный недостаток — она сохраняет неравномерность передачи пространственного распределения картографируемых параметров. Речь идет о таких содержательных характеристиках, как плотность, напряженность, потенциалы различных полей (геофизических, географических, социальных, экономических, логистических и других). Ключевая проблема заключается в том, что эти признаки не обеспечивают изотропность — равномерность пространственного распределения картируемых параметров.

Для достижения изотропности представления анализируемых параметров геоситуации могут использоваться методы топологизации или анаморфирования картографических изображений [42, 46]. Эти преобразования переводят географически конкретное отображение территориальной обстановки (традиционную карту) в абстрактное представление (картоид или анаморфозу), где географическая конкретика уступает место сохранению ключевого свойства — изотропности картируемых параметров. Такой подход позволяет преодолеть ограничения, присущие классическим картографическим методам.

Еще одно полезное свойство анаморфирования геоситуации – снижение размерности пространства признаков, что в свою очередь повышает оперативность выработки вариантов решения и дружелюбность интерфейса доведения информации оператору.

Метод анаморфирования из когнитивной компьютерной графики помогает анализировать данные и принимать решения через визуализацию информации. Существует множество численных методов построения анаморфоз с разными преимуществами и ограничениями.

Анаморфоза — это преобразование визуального образа из евклидовой метрики в новое представление, основанное на метрике изучаемого процесса по заданному показателю. Этот метод ценен возможностью наглядно отображать сложные параметры, важные для принятия решений. Суть картографического анаморфирования — включение территориального параметра в уравнение картографической проекции.

Задача анаморфирования заключается в преобразовании изображения по заданным начальным и конечным координатам ключевых точек. Большинство существующих методов (У.Тоблера, Лоуренс Беркли, МГУ) основаны на разбиении ГР на участки однородности показателя, изменении их площади через выравнивание плотности либо аффинные преобразования. Ключевым аспектом анаморфирования здесь является выбор так называемых ключевых точек.

Предлагается следующий алгоритм топологического преобразования географически конкретного картографического образа района АТА (рисунок 108):



Рисунок 108 — Схема анаморфирования «По структурным линиям»

1. Вводится локальная прямоугольная система координат для упрощения расчётов.
2. Район делится на зоны по однородности параметра (толщина льда, течения и т.д.).
3. На границах зон отмечаются ключевые точки – их количество определяет точность анаморфирования.
4. Эти точки соединяются с центрами тяжести соседних зон.
5. По значению параметра точки смещаются к центру (при малых значениях) или от него (при больших).
6. Проверяются ограничения: конформность (сохранение углов) и границы области, хотя полная конформная инвариантность обычно недостижима.

7. Строится итоговая анаморфированная карта района (картоид).

Используем приведенный ранее пример. Такая форма представления наиболее удобна для дальнейшей обработки и визуализации. (рисунок 109).

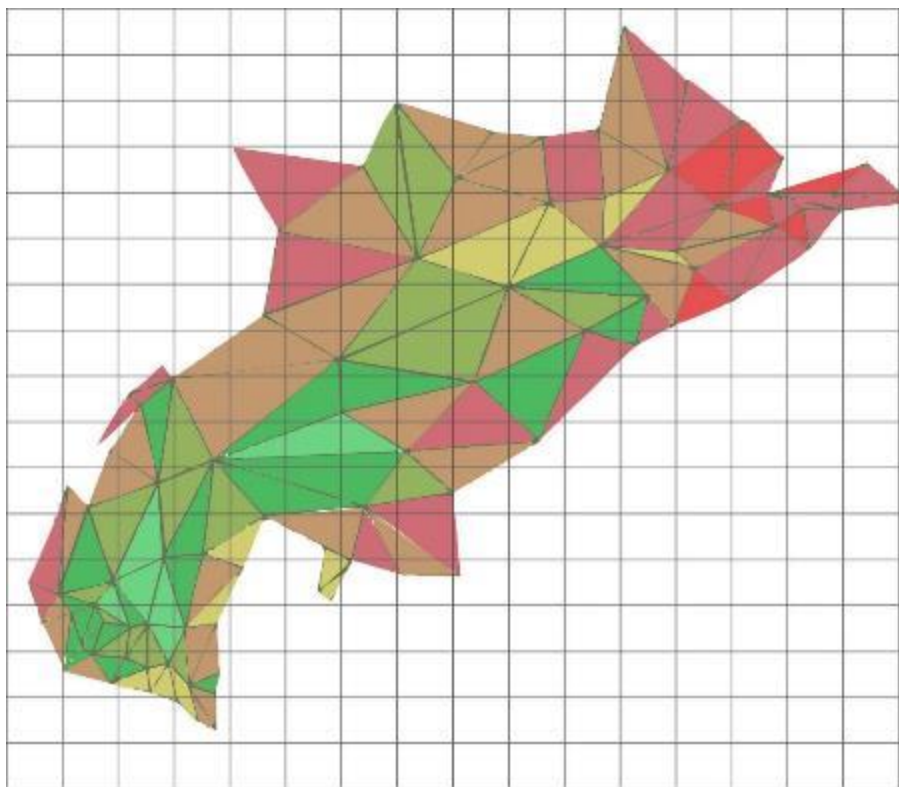


Рисунок 109 — Картоид, отображающий рисковый параметр с координатной сеткой

Важным аспектом для дальнейших действий является выбор центра территории. Логично и легко реализуемо центром территории считать центр тяжести фигуры. Воспользуемся следующими формулами

$$x_c = \frac{\iint_D x \rho(x,y) dx dy}{m} \quad (5.21)$$

$$y_c = \frac{\iint_D y \rho(x,y) dx dy}{m}, \quad (5.22)$$

где $m = \iint_D \rho(x,y) dx dy$ – масса фигуры, $\rho(x,y)$ – плотность параметра фигуры, D – площадь фигуры. Стоит отметить, что функция плотности может быть как рассмотрена не только как функция положения $\rho(x,y)$, но и как функция времени $\rho(x,y,t)$.

Затем необходимо осуществить привязку области к координатам. Удобнее всего это делать в геоинформационной системе ArcGIS. Она

позволяет осуществлять привязку и последующее редактирование координатной сетки встроенными средствами системы.

После осуществления привязки необходимо выбрать ключевые точки на границе каждой области и построить прямые отрезки «силовые отрезки» до центра масс анаморфируемого участка. Учитывая, что участки разбиения рискового признака, формируемые ИНС, основаны на простом примитиве типа треугольник, то достаточно определить шаг разбиения границы либо в абсолютном, либо в относительном выражении.

Параметрическое уравнения таких прямых будут иметь вид:

$$\frac{x-x_c}{x_a-x_c} = \frac{y-y_c}{y_a-y_c} \quad (5.23)$$

Силовые отрезки (рисунок 110) на этих прямых следует ограничить по значению x и y условием по типу:

$$\min(x_c, x_a) \leq x \leq \max(x_c, x_a)$$

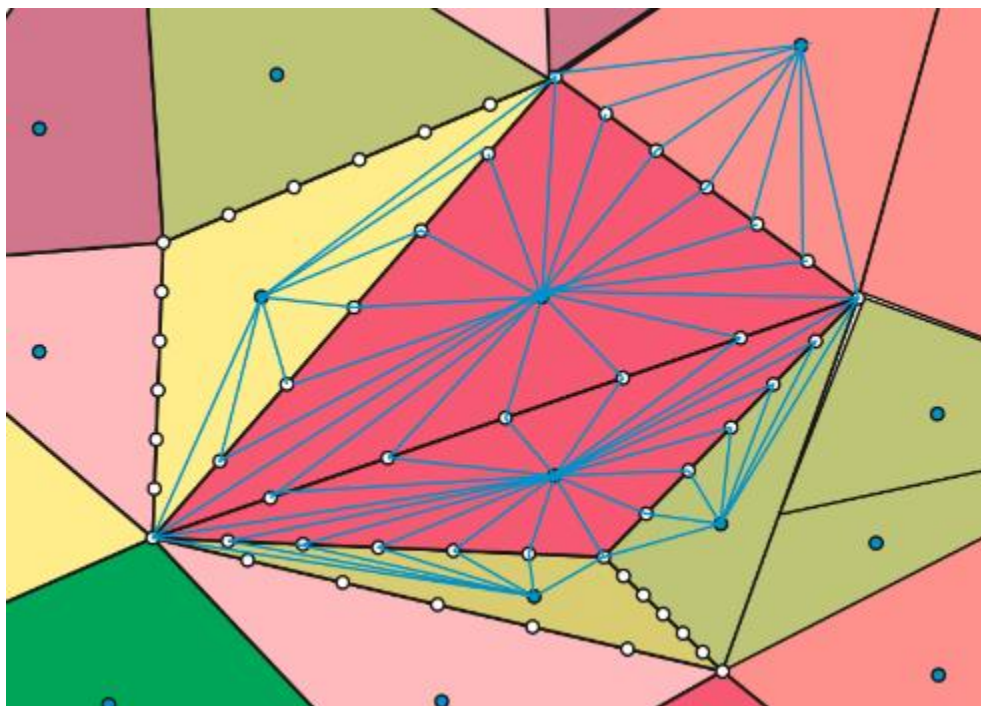


Рисунок 110 — Фрагмент картоида с силовыми отрезками

Анаморфирование выполняется путём изменения конфигурации и площади территорий через смещение ключевых точек границ к центру/от центра на расстояние k в пространственной метрике. Операция проводится для

каждой территории индивидуально, поскольку ключевые точки принадлежат минимум двум соседним территориям.

$$k = \frac{\max(p_i) - p_i}{q}, \quad (5.24)$$

где: q – расстояние между двумя максимально удаленными точками границы, иначе говоря диаметр области, p_i – параметр анаморфирования конкретной области.

Новые координаты ключевой точки находятся из уравнения:

$$k = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}. \quad (5.25)$$

Т. о. величина k одновременно является мерой:

- связи с параметром анаморфирования (p_i);
- трансформации участка.

Из вышеприведенных формул следует формула итогового сдвига.

$$\begin{cases} \frac{x - x_c}{x_a - x_c} = \frac{y - y_c}{y_a - y_c}; \\ k = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \end{cases} \quad (5.26)$$

После выполнения такого аффинного преобразования всех координат необходимо отобразить область внутрь прямоугольника, с ограничениями (5.27).

$$x_{min} = 0, x_{max} = L_x, y_{min} = 0, y_{max} = L_y. \quad (5.27)$$

Для упрощения, параметры L берутся целочисленными.

Для сглаживания контура анаморфированной фигуры применяется преобразование Фурье:

$$u_x(x, y, t) = -\frac{L_y}{\pi \rho(x, y, t)} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{m}{m^2 L_y^2 + n^2 L_x^2} \rho(m, n) * \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \right]$$

$$u_y(x, y, t) = -\frac{L_x}{\pi \rho(x, y, t)} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{m}{m^2 L_y^2 + n^2 L_x^2} \rho(m, n) * \cos\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \right]$$

Рассматриваются две меры локальной ошибки искажения – исходной (базовой):

$$e(x, y) = \ln \left(\frac{a(x, y)}{b(x, y)} \right), \quad (5.28)$$

и новой трансформированной фигуры:

$$\bar{e}(x, y) = 2\arcsin \left(\frac{a(x, y) - b(x, y)}{a(x, y) + b(x, y)} \right). \quad (5.29)$$

При конформном отображении подобные ошибки должны быть нулевыми и равными друг другу, но это идеальный и не всегда достижимый вариант. Поэтому максимальная локальная ошибка искажения может служить глобальной мерой отклонения картограммы от конформности.

На рисунке 111 представлен монохромный результат анаморфирования, в котором зоны с более высоким уровнем безопасности визуально выделены за счет увеличения их площади.

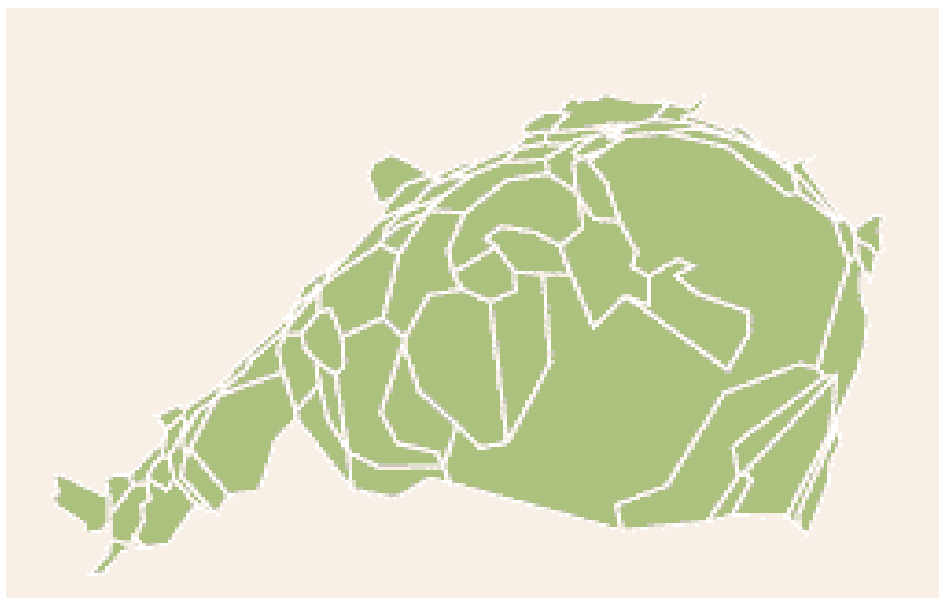


Рисунок 111 — Анаморфированный картоид рискового параметра

Для нахождения оптимального пути на трансформированном картоиде строим взвешенные графы, где ребра отражают ледовую нагрузку, а узлы — точки маршрута. Критерий рискового параметра — минимизация взаимодействия с опасными ледовыми зонами.

На заключительном этапе выполняется детопологизация картоида с переносом результатов оценки на географическую карту. Оптимальные для судоходства зоны выделены красным цветом.

Описанный выше метод в сравнении с классическим алгоритмом Гастнера-Ньюмана не дает существенного снижения ошибки моделирования, однако при возрастании числа анализируемых участков (фрагментов) наблюдается прирост скорости выполнения алгоритма [137].

Таким образом, структуризация общих свойств и связей внутри классов ГО упрощает их интеграцию в геоситуационные модели и геоконтроллинговые процедуры. Категорийная гомоморфно-имплицитная упорядоченность, за счет сохранения и передачи структурных отношений между категориями в процессе геопространственных трансформаций обеспечивает интеграцию в процесс автоматизированного территориального регулирования тех факторов риска, которые в традиционных геомоделях не учитываются. Одновременно эти трансформации и упорядочения обеспечивают модельно-процессную реализацию объектно-субъектного дуализма риска в системе регулирования территориально-хозяйственной деятельности.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании выполнен комплексный анализ условий территориальной активности в Арктической зоне Российской Федерации. На основе рискологического подхода к оценке транспортной активности, с использованием современных методов преобразования сложных математических структур, сформулированы и научно обоснованы положения, выносимые на защиту. Они представлены в форме концепции геоинформационной поддержки рискованной арктической территориальной активности, основанной на изложенных принципах гомоморфно-имплицитного упорядочения категорий географических объектов и структур.

Научная проблема, решаемая в работе, определяется отсутствием адекватного модельно-методического аппарата, способного реализовать сквозную, непрерывную и многоуровневую технологию управления рисками на территории, и требующая разработки соответствующих геоинформационной технологии.

В ходе работы получены следующие основные результаты:

1. Объектно-ориентированный подход к категоризации географических объектов, который отличается наличием внутренней иерархии формализованных свойств, параметров, признаков и связей, что позволит в значительной мере унифицировать описание и методы преобразования структур конкретных геообъектов используя структуры объектов верхнего порядка по принципу наследования. Указанный подход обеспечивает переход от пассивного, плоского и статического представления системы территориальной активности к созданию активной, многомерной, динамической и семантически структурированной цифровой среды, а также позволит детальнее и обоснованнее моделировать рискованную активность на арктических территориях.

2. Концептуальная модель построения системы региональной территориальной активности, способной к применению современного математического аппарата теории категорий по преобразованию

математических структур, что позволяет повысить эффективность получения, анализа и преобразования информации в сложных управляющих системах, обеспечивая возможность гомоморфно-имплицитного упорядочения большего порядка внешних факторов в условиях множественных рисков. Модель отличается введением дополнительных понятий и определений предметной области представления и регулирования рисков, принципов обработки и анализа геоинформации, в том числе и на базе имплицитных морфизмов, что обеспечивает перспективы совершенствования технологий оперативного использования разнородной нечеткой геоинформации при автоматизации системы поддержки принимаемых решений в интересах эффективного регулирования АТА.

3. Геоинформационные модели представления геоструктур и геообъектов, формализованные и структурированные, эффективно работающие при динамично изменяющихся внешних и внутренних рисковых параметрах, неточности, неполноте, многомерности и разнородности мониторинговой информации, что позволяет использовать геоинформационные методы поддержки управления АТА на основе интеграции разнородной информации (географической, экологической, социально-экономической и др.) в единую систему, сохраняющую структуру взаимосвязей и закономерностей географических объектов различных категорий.

4. Геоконтроллинговый метод регулирования рисков territorialной активности отличается интеграцией предиктивной аналитики, имплицитных факторов и адаптивного управления на основе разнородных данных. Данный подход принципиально отличается от традиционного геомониторинга и позволяет повысить оперативность, эффективность и уровень автоматизации системы поддержки принятия решений, что в конечном итоге обеспечивает повышение прогностической способность территориальных систем управления и формирование

обоснованных рекомендаций в режиме реального времени за счёт использования ИНС и методов ИИ.

Настоящее исследование базируется на применении и использовании в геоинформатике современных математических решений из областей прикладной математики, теорий математических структур, математического анализа, линейной алгебры, на базе которых в том числе развиваются современные технологии ИНС, ИИ и компьютерного моделирования.

Оценка эффективности предложенного модельно-методического аппарата, которая в интегральном выражении представляет следующее: моделирования маршрута судна с учётом имплицитных факторов риска показало снижение расчётного индекса риска на 14% для маршрутов с учетом имплицитных угроз по сравнению с маршрутами, проложенными традиционными методами без учёта данных факторов.

Вместе с тем выполненные исследования, ограниченные целью, задачами и объемом не исчерпывают всего многообразия требующих решения проблем в области развития модельно-методического аппарата геоинформационных технологий. Поэтому дальнейшие направления исследований представляются на следующих направлениях:

- адаптации методов искусственного интеллекта, математического анализа, математико-картографического моделирования, системного подхода, рискологии, исследования операций, теории вероятностей и математической статистики, численных методов, имитационного моделирования имплицитных факторов и др. для более полного использования в модельно-методическом аппарате геоконтроллинга рисков территории активности;
- наращивания депозитария геомоделей обстановки, геоконтроллинговых методик (процедур, технологий) для различных предметных областей;
- расширения и совершенствования методов геоконтроллинга, объектно-ориентированного категорирования в реализации пространственного ГИС-анализа информации о территориальной обстановке;

- дальнейшей разработки и оптимизации методов топологизации и анаморфирования карт и геоизображений для повышения контроллингового потенциала методов ГИУ;
- углублённого изучения обратного влияния (обратной связи) процедур и категорий геоинформационной поддержки управления (геоконтроллинга) на элементы классической методики работы ЛПР по управлению подчиненными объектами.

Поставленные в работе задачи решены полностью. Результаты выполненного исследования позволяют считать поставленную цель достигнутой, а исследование завершённым.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Указ Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. N 296 "О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации".
2. Фаузер В.В., Смирнов А. В., Лыткина Т. С., Фаузер Г. Н. Методика определения опорных поселений российской Арктики // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. — 2019. — № 5 (65). — ISSN 2307-0331.
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 августа 2022 года №2115-р. «План развития Северного морского пути на период до 2035 года».
4. Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 года N 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» (с изменениями на 27 февраля 2023 года).
5. Указ Президента Российской Федерации от 5 марта 2020 года N 164 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» (с изменениями на 21 февраля 2023 года).
6. Балыкин П.А. Состояние и ресурсы рыболовства морей восточной Арктики // Материалы всероссийской конференции ученых и специалистов, посвященной 160-летию Н.М. Книповича. - Мурманск, - 2023 - С. 50-55.
7. Перечень поручений по итогам совещания по вопросу развития Арктической зоны Российской Федерации от 13.04.2022 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/68462/print> (дата обращения 22.01.2024).
8. XIV Международный форум "Арктика: настоящее и будущее имени А.Н. Чилингарова". Портал Sudostroenie.info / [Электронный ресурс] // URL: <https://sudostroenie.info/novosti/44096.html> (дата обращения: с 18.12.2024)
9. Системные и современные проблемы, риски, возможности экономического развития российской Арктики: монография / под научной

редакцией Т.П. Скуфьиной, Н.А. Серовой. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2024. — 222 с.

10. MarineTraffic Live Ships Map. Discover information and vessel positions for vessels around the world. / [Электронный ресурс] // URL: <https://www.marinetraffic.com/> (дата обращения: с 22.03.2022).
11. Маркина В.М. Преимущества и вызовы освоения крупных и локальных угольных проекта в Арктической зоне России // Мир экономики и управления. 2023. Т. 23, № I. С. 32-56.
12. Бурлов, В.Г. Синтез модели и способов функционирования системы в условиях конфликта / В.Г. Бурлов, Е.А. Зенина, А.В. Матвеев // Научно-технические ведомости СПбГПУ: информатика, телекоммуникации, управление. – 2012. – № 3. – С.72-79.
13. Деловой совет госкомиссии по Арктике выступил с инициативой создания единой концепции развития связи и вещания в регионе [Электронный ресурс] // URL: <http://ru.arctic.ru/infrastructure/20151127/242462.html> (дата обращения: 16.11.2022).
14. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года / М.: Роскосмос, 2006.
15. Основы государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, утвержденных Президентом Российской Федерации от 19 апреля 2013 г. № Пр-906.
16. Аэронет 2035. Информационно-аналитический портал развития беспилотных авиационных систем. [Электронный ресурс] // Фонд НТИ - URL: <https://xn--2035-43d4a7chrx0j.xn--p1ai/c/tproduct/515704499-873488639101-okulus> (дата обращения: 22.07.2024)
17. Паспорт федерального проекта «Развитие Северного морского пути» / / [Электронный ресурс] // Минтранс - URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/12714> (дата обращения: с 18.03.2024)

18. Шумилов, Б.М. Нестационарные сплайн-вейвлеты в ГИС и САПР линейно-протяженных пространственных объектов / Б.М.Шумилов, Э.А.Эшаров – Вестник ТГАСУ №1, 2006. – с.153-163.
19. Чижков Ю. В. Арктическая морская транспортная система. – СПб.: Медиапапир, 2021. – 96 с.
20. Моря российской Арктики в современных климатических условиях. СПб: ААНИИ, 2021. - 360 с.
21. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: Изд. ААНИИ, 2010. – 320 с.
22. Рычагов В.А. Стихийные бедствия и чрезвычайные ситуации на морском транспорте. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2008. – 60 с.
23. Абчук В.А. Теория риска в морской практике. - Ленинград: Судостроение, 1983. - 152 с.
24. Петросян Л.А. Теория игр: учебник / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. В. Шевкопляс. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012 — 432 с.: ил.
25. Колокольцов В.Н. Математическое моделирование многоагентных систем конкуренции и кооперации (Теория игр для всех) / В.Н. Колокольцов. - СПб.: Лань, 2012. - 624 с.
26. Берлянт А.М. Геоинформационное картографирование / А.М.Берлянт. – М.: МГУ, РАЕН, 1997. – 218 с.
27. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 ноября 2023 г. № 3097-р об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года / Министерство транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс] // URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry> (дата обращения: с 23.04.2024).
28. Душкин Р.В. Искусственный интеллект / Р.В.Душкин. - М.: ДМК-Пресс, 2019. – 280 с.

29. Представление знаний в экспертных системах: учебное пособие / В.А. Морозова, В.И. Паутов; научный редактор В.А. Матвиенко // Уральский федеральный университет, 2017. — 120 с. — ISBN 978-5-7996-2037-0.
30. Представление знаний в экспертных системах: учебное пособие / В.А. Морозова, В.И. Паутов; научный редактор В.А. Матвиенко // Уральский федеральный университет, 2017. — 120 с. — ISBN 978-5-7996-2037-0.
31. Представление знаний в человеко-машинных и робототехнических системах. – Т. А,B,C,D. – М., ВЦ АН СССР , 1984.
32. Представление и использование знаний / Под ред. Уэно Х., Исидзука М. — М.: Мир, 1989. — 220 с.
33. Цаленко М. С., Шульгейфер Е. Г. Современная алгебра. Основы теории категорий. — М.: Наука, 1974. — 257 с.
34. Introduction to Category Theory (Paperback). Awodey, Steve. Category Theory (2 ed издание) 2010 год.
35. Хелемский А.Я. Лекции по функциональному анализу. — Москва: МЦНМО, 2004.
36. Родин А. В. Теория категорий и поиски новых математических оснований физики // Вопросы философии. — 2010. — № 7. — С. 67.
37. Голдблатт [Goldblatt R.] Топосы — категорный анализ логики. — 1983. — Т. 98. — (Studies in logic & foundation of mathematics).
38. Мак Лейн, Саундерс. Категории для работающего математика / С. Мак Лейн; пер. с англ. под ред. В. А. Артамонова. — 2-е изд., стер. — Москва: Физматлит, 2004. — 352 с. — ISBN 5-9221-0400-4.
39. Лепешкин, О. М., Бурлов, В. Г., Кирилова, Т. В. Моделирование процесса управления социальными и экономическими системами региона на основе потенциально активированных элементов пространства и времени /О. М. Лепешкин, В. Г. Бурлов, Т. В. Кирилова // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. – СПб. – 2013. – № 3. – С. 82-85.

40. Миляков Д.Ф. Геоинформационный метод представления, отображения и оценки обстановки в ближней морской зоне: дис. ... канд.техн.наук 25.00.35. – СПб., 2006. – 312 с.
41. Биденко С.И. Аэромобильные киберфизические платформы как инструмент для информационной поддержки управления арктической территориальной активностью / С.И. Биденко, Е.Л.Бородин, К.В.Захаров, и др. // Научно-технический журнал Информация и космос. №2 – 2022.
42. Топологизация картографической модели района территориальной активности как элемент оценки обстановки / С.И. Биденко, Е.Л. Бородин, К.В.Захаров, И.С.Храмов, Д.И.Якушев, С.Г.Черный // Информация и Космос. - 2021. - № 1. ~ С. 152-158.
43. Бурлов В.Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов. / В.Г. Бурлов. – СПб.: Факультет Комплексной безопасности, СПбГПУ, 2007. –265 с.
44. Долятовский, В. А. Исследование систем управления/ В. А. Долятовский, В. Н. Долятовская. – М.: MapT, 2003. – 256с.
45. Биденко С.И., Храмов И.С. Оценка навигационно-тактической обстановки и выработки рекомендаций на основании процедуры топологизации географической реальности. / С.И. Биденко // Региональная информатика (РИ-2020). XVII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции - Санкт-Петербург - 2020. С. 336-338.
46. Фултон Е, Мак-Фёрсон Р. Категорный подход к изучению пространств с особенностями / под ред. Бухштабер В. М.. — 1983. — Т. 33. — (Новое в зарубежной науке, математика).
47. Бушуев С. Н. Основы концептуального моделирования сложных систем. Часть 1./ С. Н. Бушуев, СПб.:ВАС, 1992. - 248 с.: ил.
48. Биденко С.И., Самотонин Д.Н. Геоинформационные модели и методы поддержки управления. – СПб: ФВУ ПВО, 2004 г.
49. Фильчаков С.В. Геоинформационные системы: учебник / С. В. Фильчаков. — М.: Юрайт, 2019. — 284 с. — ISBN 978-5-534-07123-4.

50. Шипилов В.В. Геоинформационные технологии в управлении территориями: монография / В. В. Шипилов. — Новосибирск: Наука, 2016. — 312 с. — ISBN 978-5-02-038954-2.
51. Алексеев А. В. Геоинформационные системы и технологии: учебное пособие / А. В. Алексеев. — М.: Издательство Лань, 2018. — 432 с. — ISBN 978-5-8114-3001-5.
52. Истомин Е.П., Истомин И.Е., Мартын И.А., Биденко С.И. Оценка георисков территориальной активности в районах со слабо коррелированными ограничивающими факторами // Геоинформатика. — 2025. — № 1. — С. 50–56.
53. Биденко С. И., Комарицын А. А., Яшин А. И. Геоинформационные системы поддержки принятия решений: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2004. – 32 с.
54. Биденко С.И., Лямов Г.В. Геоинформационные технологии: Учебное пособие. – Петродворец: ВМИРЭ, 2004. 272 с.
55. Бородин Е.Л., Биденко С.И., Гаевская З.А. [и др.] Геомоделирование территориальной морской активности в системе управления автономным судовождением // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 4(101). – С. 103-111.
56. Линдваль В. Р. Геоинформационные системы и технологии в телекоммуникациях : учебное пособие / В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков, Е. А. Спирина ; Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – 178 с. – ISBN 978-5-7579-1322-3.
57. Поспелов Д.А. О «человеческих» рассуждениях в интеллектуальных системах // Вопросы кибернетики. Логика рассуждений и ее моделирование. М. : Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», 1983. С. 5–37.
58. Гаврилова Т.А., Червинская К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем // М. : Радио и связь, 1992. 200 с.

59. Истомин Е.П. Организационные системы // Управление информационными системами: фирма, корпорация, деловая сеть / Е. П. Истомин, А. Г. Соколов, Л. С. Слесарева. — СПб.: Андреевский изд. дом, 2012.
60. Панамарев Г.Е., Биденко С.И. Геоинформационная поддержка управления сложными территориальными объектами и системами. — Новороссийск: Изд-во ГМУ, 2012. — 202 с.
61. Истомин Е.П. Организационные системы // Экономическая география и регионалистика: пространственные аспекты управления организациями / Е. П. Истомин, Л. Н. Карлин, А. Г. Соколов. — СПб.: Андреевский изд. дом, 2012. — ISBN 978-5-902894-31-5.
62. Соколов А.Г., Истомин Е.П. Геоинформационное управление развитием организационно-технических систем и территорий // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2014. — № 2 (13). — С. 44-49. — ISSN 2306-5788.
63. Алаев Э.Б. Социально-экономическая география: понятийно-терминологический словарь. - М.: Мысль, 1983. — 350 с.
64. Истомин Е.П. Организационные системы // Управленческие решения / под ред. Соколова А.Г.. — 2-е изд., с изм. и доп.. — СПб.: Андреевский изд. дом, 2011. — ISBN 978-5-902894-28-5.
65. Берлянт А.М. Картография: учебник для вузов. — М.: Аспект Пресс, 2002. — 336 с. — ISBN 5-7567-0142-7.
66. Истомин Е.П., Михеев В.Л., Биденко С.И., Соколов А.Г. Геоинформатика, геоинформационные технологии, геоинформационное управление // Гидрометеорология и экология. — 2025. — № 78. — С. 113–127.
67. Воробьев О.Г., Реут О.Ч. Геотехнические системы (генезис, структура, управление). — Петрозаводск. ПетрГУ, 1994. - 82 с.
68. Зализнюк, А.Н. Стратегическое планирование геоинформационного обеспечения систем управления / А.Н. Зализнюк, С.П. Присяжнюк // Информация и Космос. — 2016. — № 4. — С. 130–132.

69. Олышамовский С. Б. Организация безопасности плавания судов / С. Б. Олышамовский, Д. К. Земляновский, И. А. Щепетов. — Москва : Транспорт, 1979. — 214 с.
70. Руденко Л.Г. Картографическое обоснование территориального планирования. - Киев: Наукова думка, 1984. – 168 с.
71. Кравченко П.Н., Якушев Д.И., Биденко С.И. Геоинформационные управляющие системы и технологии: Монография. – СПб.: Изд-во СПбУ МВД России, 2014. – 248 с.
72. Истомин Е.П., Аганов С.С., Колбина О.Н., Петров Я.А., Яготинцева Н.В. Методология геоинформационного управления развитием сложных систем. — Санкт-Петербург, 2023. — 227 с. — ISBN: 978-5-4386-2353-3.
73. Кудж С.А. О философии геоинформатики // Перспективы Науки и Образования. 2016. № 6 (24). С. 7—16.
74. Руководство по ГИС анализу. Часть 1. Пространственные модели и взаимосвязи / Энди Миччел; под редакцией Селезнева А. // ESRI, 2000 г., 170 стр.
75. Бушуев С. Н. Основы концептуального моделирования сложных систем. Часть 1 / С. Н. Бушуев, СПб.:ВАС, 1992. - 248 с.: ил.
76. Номенклатура ВМО по морскому льду. Терминология - Том 1. Ледовые термины / - М.: Издание 1970 (переиздание), 2019 г.– 259 с.
77. Негойце К. Применение теории систем к проблемам управления / К. Негойце. – М.: Мир, 1981. – 560 с.
78. Бушуев С.Н. Организация распределенного преобразования информации в информационно-технических системах. / С.Н. Бушуев – СПб.: ВАС, 1994. – 226 с.:ил.
79. Волкова В. Н., Денисов А. А. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата. — издание 2-е. — М.: Юрайт, 2014. — 616 с.
80. Рыков А.С. Системный анализ. Модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации - М.: Издательский дом МИСиС, 2009. 609 с.

81. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. / Гермейер Юрий Борисович - М.: Наука, 1971. – 384 с.
82. Антонов А.В. Системный анализ. — М.: Высшая школа, 2004. — 454 с.
83. Бушуев С.Н. Основы концептуального моделирования сложных систем. Часть 1 / С. Н. Бушуев, СПб.:ВАС, 1992г. - 248 с.: ил.
84. Методы современной теории автоматического управления. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н.Д.Егупова.— М.: Издательство МГТУ им.Баумана, 2000.— 748 с.
85. Рубанов В.Г., Филатов А.Г., Рыбин И.А. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах. // БГТУ им. В. Г. Шухова [Электронный ресурс] // URL: <http://nrsu.bstu.ru/introduction.html> (дата обращения: с 13.06.2024).
86. Mamdani E.H. Higher-order logics for handling uncertainty in expert systems. / E.H. Mamdani, H.J. Efstathion. // «Int. J. Man-Mach. Stud.2. – 1985. - №3. - p.243-259.
87. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления. – М: Высшая школа, 2002. – 183 с
88. Круглов В.И., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Изд. Физ.мат.лит., 2002. – 312 с.
89. Кандель А., Байатт У.Дж. Нечеткие множества, нечеткая алгебра, нечеткая статистика / А. Кандель, У.Дж. Байатт //Труды американского общества инженеров – радиоэлектроников. - т. 66. – 1978. - №12. - С.37-61.
90. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркун. – М.: Наука, 1982.– 200с.
91. Ростовцев Ю.Г. Задачи знакового моделирования. Ч. 1. Методологические аспекты знакового моделирования/ Ю.Г. Ростовцев. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1996.
92. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. / О.И.Ларичев, Е.М. Мошкович .- М.: Наука. Физматлит. 1996г. - 208 с.:ил.
93. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. / Н. Н. Моисеев - М: Наука, 1981г. - 488с.: ил.

94. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. /Д.Ф. Люгер– М.: Издательский дом «Вильямс», 2005г. – 864 с.: ил.
95. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. Под ред. А.М.Берлянта и А.В.Кошкарёва. — М.: ГИС-Ассоциация, 1999. — 204 с.
96. Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники. Часть 1: Методология системных исследований. Моделирование сложных систем / Б.А. Резников. – М.: МО СССР, 1990. – 522 с.
97. Тикунов В. С. Моделирование в геоинформатике: от объекта к системе / В. С. Тикунов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2012. — № 5. — С. 7-17.
98. Координатно-временные преобразования в геодезии: учебное пособие – М.: Изд-во МИИГАиК, 2014. – 90 с., ил.
99. Разработка концептуальной модели управления рисками устойчивого развития объектов и территорий в пространственном аспекте» / отчет о НИР, РГГМУ, 2015 г., № 01201459336.
100. Кельберт М.Я., Сухов Ю.И. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Том 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. Часть I // МЦНМО, 2021. – 396 с.
101. Лепешкин О. М., Бурлов, В. Г., Кирилова, Т. В. Методологический подход к оценке безопасности функционирования социальной и экономической системы управления региона / О.М. Лепешкин, В. Г. Бурлов, Т. В. Кирилова // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. – СПб. – 2013. – № 2. – С.99-102.
102. Рожков Н. Н. Квалиметрия и управление качеством. Математические методы и модели: учебник и практикум для вузов / Н. Н. Рожков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 167 с.
103. Анохин К.В. Искусственный интеллект для науки и наука для искусственного интеллекта / К. В. Анохин, К. С. Новоселов, С. К. Смирнов, А. Р. Ефимов, Ф. М. Матвеев // Вопросы философии. — 2022. — № 3. — С. 93–105.

104. Калинин В.Н. Теория систем и управления (структурно-математический подход) / В.Н. Калинин, Б.А. Резников. – Л.: ВИКИ им. А.Ф.Можайского, 1978. – 417с.
105. Демек Я. Теория систем и изучение ландшафтов - М.: Прогресс, 1977 г. 223 с.
106. Журкин И.Г., Никишин А.Н. Анализ структуры данных для представления в ГИС // Геодезия и картография. 2003. N 8. с. 44 – 49.
107. Замятин Д.Н. Культура и пространство: Моделирование географических образов. — М.: Знак, 2006. — 488 с. ISBN 5-9551-0144-6
108. Матвеев В.В., Филатова Т.А. Методы управления организационными системами в условиях риска и неопределенности с целью обеспечения экономической безопасности // Национальная безопасность и стратегическое планирование. — 2021. — № 2 (34). — С. 73–96.
109. Прокофьев, П.А. Многоаспектная модель описания региона для решения задач планирования и оперативного управления / П.А. Прокофьев // Информация и Космос. – 2023. –№ 4. – С. 121–126.
110. Верхова Г.В. Метод многоаспектного геоинформационного моделирования географического района / Г.В. Верхова, С.В. Акимов, С.П. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2021. – № 4. – С. 123–129.
111. Носонов А. М. Моделирование в социально-экономической географии / А. М. Носонов // Теория регионологических исследований. Псковский регионологический журнал – 2014. - вып. № 19. – С. 3-15.
112. Модели в географии: пер. с англ. / Под. ред. Дж Р. Чорли, П. Хаггета. - М.: Прогресс, 1971. - 384 с.
113. ГОСТ Р 70955-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Картография цифровая. Термины и определения.
114. Миляков Д.Ф. Метод учета имплицитного окружения при проведении ситуационного анализа в ГИС / Д.Ф.Миляков // «Гидрометеорология и экология». – 2024 – Вып №76 - С.191-201

115. Никитин А. А. Процесс распознавания изображения нейронной сетью / А. А. Никитин, Н. И. Лиманова. // Молодой ученый. — 2020. — № 47 (337). — С. 23-25. [Электронный ресурс] // URL: <https://moluch.ru/archive/337/75420/> (дата обращения: 31.07.2024).
116. Миляков Д.Ф. Искусственные нейронные сети в системе обеспечения безопасности мореплавания автономных безэкипажных судов / Д.Ф.Миляков, И.А.Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2023. – Вып №2. - С.191-201.
117. Биденко С.И. Оценка территориальной ситуации с использованием искусственных нейронных сетей / С.И. Биденко, И.С. Храмов, М.Б. Шилин М.Б. // Геоинформационные технологии, 2022. – Вып №54. - С.109-123
118. Дерябин В. В. Использование электронных картографических навигационных информационных систем / В.В. Дерябин. – Санкт-Петербург: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2019. – 160 с.
119. Горелик В.А., Золотова Т.В. Критерии оценки и оптимальности риска в сложных организационных системах. Научное издание. - М.: ВЦ РАН, 2009. - 162 с.
120. Демидова Л. А. Принятие решений в условиях неопределенности / Л.А. Демидова, В.В. Кираковский, А.Н. Пылькин. – Горячая линия – Телеком, 2012г. – 288 с.: ил.
121. Мешалкин В.П., Белозерский А.Ю. Методика построения комплексной математической модели управления рисками предприятия металлургической промышленности // Прикладная информатика – 2011 г. - №3(33) – С.100-120.
122. Соловьев В.И. Математические методы управления рисками: учебное пособие / ГУУ. М.: 2003. - 100 с.
123. Фирсов Ю.Г. Гидрографические информационные технологии / Ю.Г. Фирсов. – Санкт-Петербург : Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. – 128 с.

124. Абчук В.А. Теория риска в морской практике / В.А. Абчук. – Ленинград: Судостроение, 1983. – 152 с.
125. Введение в исследование операций, 7-е издание. : Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. —912 с.
126. Visual Group Theory / Carter Nathan. - The Mathematical Association, 2009. – 298 с.
127. Вагизов М.Р., Хабаров С.П. Распараллеливание алгоритма муравьиной колонии на примере задачи о рюкзаке с использованием Python // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2024. — Т. 26. — № 5. — С. 73–83.
128. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Физматлит, 2003. — 432 с.
129. Чечкин А.В. Принципы и методы математического моделирования интеллектуальных систем / А.В. Чечкин // Интеллектуальные системы. – 1998. –Вып. 1–2. – Т.3.
130. Берлянт А. М. Геоиконика. – М.: Астрей, 1996. – 207 с.
131. Берлянт А.М. Картография: Учебник для вузов. – М.: Аспект Пресс, 2001. – 336 с.
132. Трифонова Т.А., Мищенко Н.В., Краснощеков А.Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях – М.: Академический проект, 2005 г. 349 с.
133. Anthony M. Smart Cities: Big Data, Civic Hackers, and the Quest for a New Utopia - Townsend: W.W. Norton & Company, 2013.
134. Sofia H. Mobile Mapping, Machine Learning and Digital Twin for Road Infrastructure Monitoring and Maintenance: Case Study of Mohammed VI Bridge in Morocco / H. Sofia, E. Anas, O. Faïz // IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo), Casablanca, Morocco. – 2020. – P. 1–6.
135. Лепешкин О.М. Моделирование безопасности критических социотехнических систем в среде радикалов: Монография/ О.М. Лепешкин, В.В. Копытов. – Ставрополь: Изд-во СГУ, 2010.– 304 с.

136. Шелковникова Т.Е. Применение генеративно-состязательных нейросетей для формирования баз данных в сканирующей туннельной микроскопии / Т.Е. Шелковникова, С.Ф. Егоров, П.В. Гуляев // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 314-322. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1144.
137. Храмов И.С. Оценка и прогнозирование рисков арктических грузоперевозок с помощью аппарата искусственных нейронных сетей / И.С. Храмов, С.И.Биденко, Д.А.Ежов и др. // Информация и Космос. – 2023. – № 4. – С. 127-136.
138. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки. // под общ. ред. чл.-кор. РАН Юсупова Р.М. и докт. техн наук Поповича В.В. – СПб.: Наука, 2013. - 284 с.
139. Ao D.; Wang R.; Hu C.; Li Y. A Sparse SAR Imaging Method Based on Multiple Measurement Vectors Model. // Remote Sens. – 2017. - No 9 – P. 297.
140. Simonyan K.; Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. ArXive-prints 2014, arXiv:1409.1556.
141. Pei J.; Huang, Y.; Huo, W.; Zhang, Y.; Yang, J.; Yeo, T.-S. SAR automatic target recognition based on multiview deep learning framework. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018, 56, 2196–2210.
142. Access strip SAR imagery from ICEYE. Example Strip SAR Imagery - Maritime Routes in Europe / [Электронный ресурс] // URL: <https://www.iceye.com/lp/example-strip-sar-dataset-maritime-routes-in-europe> (дата обращения: 12.04.2024).
143. Спутниковый АИС Ситроникс. Презентация. [Электронный ресурс] // Сайт sputnix - URL: https://sputnix.ru/tpl/docs/Спутниковый_АИС_Ситроникс.pdf (дата обращения: 16.03.2024)
144. GoRadar. Многофакторный трекинг грузоперевозок. [Электронный ресурс] // Сайт GoRadar - URL: https://goradar.ru/vessels_map_marinetraffic (дата обращения: с 28.09.2021).

145. Сообщество Экспонента. / [Электронный ресурс] // URL: <https://hub.exponenta.ru/> (дата обращения: с 18.05.2024).
146. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: учебник / А.Н. Фомин, В.Н. Тяпкин [и др.]; под общей редакцией И.Н. Ищука. – Красноярск, Сиб.Фед.ун-т, 2016. - 292 с.
147. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 55980-2014. Управление рисками на железнодорожном транспорте. Классификация опасных событий.
148. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 58771- 2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска.
149. IEC 31010:2019 - Risk management — Risk assessment techniques.
150. Меньков А.В. Теоретические основы автоматизированного управления / А.В. Меньков, В.А. Острейковский. Учебник для вузов. М.: Издательство Оникс, 2005. 640 с.: ил.
151. Завьялов Ю.С. Методы сплайн-функций / Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко. – М. : Наука, 1980. – 352 с.
152. Shi, X.; Zhou, F.; Yang, S.; Zhang, Z.; Su, T. Automatic Target Recognition for Synthetic Aperture Radar Images Based on Super-Resolution Generative Adversarial Network and Deep Convolutional Neural Network. // Remote Sens. – 2019. - No 11 – P. 135.
153. Атлас ледовых образований / А.В.Бушуев, Н.А.Волков, В.С.Лоцилов // Ленинград, Гидрометиздат, 1974 г. – 140 с.
154. Ндикумана Э., Истомин Е.П., Яготинцева Н.В. Значимость геоинформатики в управлении георисками // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2023. — № S2-1. — С. 128–133.
155. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство – Москва. Стандартиформ 2020г.
156. Вагизов М.Р., Потапов А.П. Технологии машинного обучения и обработки таксационных данных для визуализации геоинформационного

- моделирования лесных экосистем (часть 2) // Информация и космос. — 2023. — № 1. — С. 148–156.
157. Топалов В.П., Торский В.Г. Риски в судоходстве. — Одесса: Астропринт, 2009. — 238 с.
158. Вагизов М.Р., Истомин Е.П., Колбина О.Н., Присяжнюк С.П., Соколов А.Г., Яготинцева Н.В. Введение в геоинформационное управление: учебное пособие. — СПб.: НП «БИУ», 2021. — 352 с.
159. Brand E., Gerritsen R. Data Mining and Knowledge Discovery / E. Brand, R. Gerritsen // DBMS. - 1998. - № 7.
160. Голубчик М.М. Теория и методология географической науки: учебник для вузов / под редакцией С.П. Евдокимова, С.В. Макара, А.М. Носонова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 409 с.
161. Биденко С.И. Аэромобильные киберфизические платформы как инструмент геоинформационной поддержки управления арктической территориальной активностью / С.И.Биденко, Е.Л.Бородин, А.А.Бенгерт и др. // Информация и Космос. - 2021. - № 4. ~ С. 126-136.
162. Биденко С.И., Храмов И.С., Бенгерт А.А., Мучкаева И.С. Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) // Гидрометеорология и экология. — 2022. — № 68. — С. 508-524.
163. Кравченко П.Н. Щесняк С.С., Миляков Д.Ф. и др. Обоснование направлений построения и использования аэромобильных робототехнических киберплатформ в интересах обеспечения арктической территориальной хозяйственной активности / редак. проф. С.С. Щесняк: Монография. — СПб.: Изд-во АО НЦ ПЭ, 2022. — 289 с.
164. Шихеева В. В. Теория случайных процессов. Марковские цепи / В.В.Шихеева. — МИСиС, 2017г. — 71 с.
165. Чечкин А.В. Математическая информатика / А.В. Чечкин. — Москва: Наука, 1991.— 412 с.

166. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — 12-е изд., перераб. и доп. — Москва : Юрайт, 2019. — 479 с. — ISBN 978-5-534-01925-6.
167. Кострикин А. И. Теория категорий: учебное пособие / А. И. Кострикин, Ю. И. Манин. — Москва: МЦНМО, 2018. — 144 с. — ISBN 978-5-4439-1234-5.
168. Все о ГИС и их применении [Электронный ресурс] // GISTechnik: сайт. — URL: <http://gistechinik.ru/istochniki/literatura-po-gis> (дата обращения: 13.02.2025).
169. Дерябин В.В. Использование электронных картографических навигационных информационных систем / В.В. Дерябин. — Санкт-Петербург : Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2019. — 160 с.
170. Миляков Д.Ф., Доценко С.М., Бенгерт А.А., Звездарев Д.В., Биденко С.И., Куценко Д.О. Определение слабовыраженных сущностных свойств геообъектов в процедурах территориального ГИС-анализа // Информация и космос. — 2024. — № 3. — С. 111–116.
171. O'Sullivan David, Perry George L.W., Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process. — John Wiley & Sons, 2013. — 342 с.
172. Тикунов В.С. Картографическое отображение результатов исследования экспорта образования в России / В.С.Тикунов, В.С.Белозеров, В.О.Есикова [и др] // Геодезия и картография — 2023. — Т. 84. № 9. — С. 16-28.
173. Goodchild M. F. Geographical information science // International Journal of Geographical Information Systems. — 1992. — Vol. 6, № 1. — P. 31–45
174. Зализнюк А.Н. Объектно-ориентированная геопространственная информация, достоинства и недостатки при ее создании и применении / А.Н. Зализнюк, Ю. С. Александров, С.П. Присяжнюк, Д.В. Карманов, А. С. Присяжнюк // Информация и космос. — 2017. — № 2. — С. 102–106.