

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

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

Официальные оппоненты: **Рябец Александр Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, Калининградский пограничный институт, заместитель начальника по научной работе

Тезиков Александр Львович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой

Попович Василий Васильевич, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, АО «СПИИРАН - Научно-техническое Бюро Высоких Технологий», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: **Ордена Александра Невского Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»**

Защита состоится 25 декабря 2025 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС 24.2.365.01 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Я.А. Петров

Актуальность темы исследования.

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 принятых нормативных документов. Согласно указу Президента РФ от 05.03.2020 № 164 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года», в число основных национальных интересов России в Арктике входит развитие Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) в качестве стратегической ресурсной базы и её рациональное использование в целях ускорения экономического роста страны.

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 проводить многофакторный анализ, прогнозировать изменения в транспортной инфраструктуре, оптимизировать логистику с учетом разнородных рисков, основываясь как на ординарных (эксплицитных) данных, так и имплицитной (скрытой) информации.

Дальнейшее 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, ледовитостью, 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 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.

Анализ предметной области АТА и процессов реализации арктической деятельности выявил наличие двух определяющих классов данных: ординарной информации (эксплицитной, традиционной, регулярно используемой в повседневной управленческой деятельности) и имплицитной информации (скрытой, слабовыраженной, недооценённой), содержащей скрытый, неочевидный потенциал для решения текущих задач. При этом объём имплицитных данных значительно преобладает, что актуализирует задачу их трансформации (преобразования) в структурированную ординарную форму для повышения обоснованности управленческих решений.

Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления существующего противоречия между прогрессом в сфере кибернетики и компьютерных технологий и недостаточной адаптацией современных моделей и методов географического анализа к передовым инструментам информационных технологий, таким как искусственные нейронные сети (ИНС) и элементы искусственного интеллекта. Это отставание создаёт пробелы в эффективности обработки данных, особенно при работе с имплицитной информацией, что ограничивает возможности её преобразования в ординарную форму и дальнейшего использования в управленческих решениях. Применяемые модели и методы часто оказываются неспособными адекватно учитывать всю полноту факторов, влияющих на ситуацию.

Возрастающие возможности представления рисков 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.

Проблема заключается в отсутствии адекватного модельно-методического аппарата, обеспечивающего сквозную, непрерывную и многоуровневую технологию регулирования рисками на территории, что требует разработки соответствующих геоинформационных методов и инструментов для её решения.

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

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

Цель исследования: разработка геоинформационного метода поддержки рисковей АТА на основе модельно-методического аппарата с использованием абстрактных категоризованных геоструктур, что позволит совершенствовать технологии обработки геоинформационных данных за счет применения современного аппарата преобразования математических структур и прогнозного моделирования.

Для достижения поставленной цели определены и решены следующие **научно-технические задачи**:

1. Анализ предметной области применительно к АТА.
2. Разработка геоинформационных моделей представления геоструктур и геообъектов, рисковей 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.

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 модельно-методического аппарата в геоинформационных технологиях исследовались в работах таких ученых как: Берлянт А.М., Тикунов В.С., Истомин Е.П., Соколов А.Г., Рябец А.Ф., Тезиков А.Л., Кудж С.А., Биденко С.И., Шипилов В.В., Вагизов М.Р., Матвеев В.В., Доценко С.М., Голубчик М.М., Дэвид О'Салливан, Гудчайлд. Значительный вклад в области математического моделирования внесли учёные: Колокольцов В.Н., Матвиенко В.А., Малинин В.Н., в области формирования объектно-ориентированных моделей в геоинформационных системах Присяжнюк С.П., в сфере процессного управления Бурлов В.Г., в области искусственного интеллекта Душкин Р.В.

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 категории, модифицируя отношения между геообъектами из разных категорий, что способствует выявлению ранее не очевидных закономерностей. Такой подход эффективно применяется в автоматизируемых системах с элементами ИИ.

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 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, предложенный 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 (ООП) к категоризации географических объектов отличается системностью, гибкостью и формализацией представления данных в моделях с высоким уровнем абстракций, обеспечивая согласованное отображение сложных взаимосвязей между объектами и их свойствами в рамках единой концептуальной модели.

Научная новизна категоризации на основе ООП заключается в способности обеспечивать более гибкую, модульную и понятную модель разнородных данных, что значительно улучшает качество геоконтроллингового метода регулирования рискованной деятельности.

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

Предложенные геоинформационные модели представления геоструктур (ГС) и геообъектов (ГО) характеризуются универсальностью формуляров и расширяемостью форматов, обеспечивающей устойчивость моделей к

неопределенностям мониторинговой информации от разнородных источников, что позволяет создавать адаптивные методики для решения задач прогнозирования развития географических ситуаций.

Научная новизна исследования заключается в интеграции методов геоинформационного моделирования, теории категорий и семантического анализа, что открывает перспективу развития геоинформационных технологий в работе со сложноструктурированными геоданными.

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 ГО, формализацию их взаимосвязей с другими объектами и ГС на основе пространственной и категорийной упорядоченности.

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

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.

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 ГО и ГС, 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:

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

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.

57-ой Межведомственной военно-научной конференции на тему конфликтов будущего, Санкт-Петербург, декабрь 2022 г. Михайловская военная артиллерийская академия;

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;

V Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и подготовки специалистов» в Санкт-Петербурге РГО 11 апреля 2024 год; ВКА им. А.Ф. Можайского;

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» в НИР «Прагматика-ГНИНГИ» при составлении баз данных изученности физических полей и окраинных морей 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 25.07.2025 г.), в АО «Радар ММС» в ОКР «Создания комплекса средств магнитной съемки» с реализацией объектно-ориентированного подхода к классификации геообъектов и категоризации пространственных отношений, с оценкой по точности классификации на 27% и скорости обработки данных на 35% (акт от 29.07.2025 г.), в работах УНиО МО РФ по теме СЧ НИР «Магнолия» в части применения методов геоконтроллинга с оценкой в 20% повышения точности прогнозирования динамики магнитных аномалий.

Публикации. Основные научные положения, теоретические выводы и практические рекомендации, разработанные в рамках диссертационного исследования, нашли отражение в 26 научных публикациях, из которых 20 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных по перечню ВАК, две из которых входят в базу данных SCOPUS, 2 монографии, 3 доклада в значимых конференциях, один патент на полезную модель 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 175 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, определены объект и предмет, сформулированы научная проблема, цель и задачи исследования. На основе проведенного анализа сформулированы основные

научные положения, выносимые на защиту, а также раскрыты научная новизна и практическая значимость работы.

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 первой главе проведен разносторонний анализ Арктической зоны Российской Федерации, системы арктической территориальной активности (АТА), опирающейся, в том числе, на акваторию Северного морского пути (СМП). Приведены теоретические основы рискологического подхода в оценке транспортной активности АЗРФ. Проведен анализ конфликтов и рисков и обоснована постановка задачи исследования.

АЗРФ 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. N 296 "О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации". Через АЗРФ проходят кратчайшие морские пути между рынками Северо-Западной Европы и Тихоокеанского региона, потенциал использования которых еще не раскрыт.

Анализ транспортной, портовой, связной, навигационной, энергетической и иных связанных социальных инфраструктур АЗРФ обращает внимание на значительный рост уровня развития всех значимых для развития региона отраслей. Особую роль в этом процессе играет СМП, который не только служит ключевой транспортной артерией, связывающей восточные и западные территории России, но и укрепляет единство экономических зон страны, обеспечивая их интеграцию в глобальные логистические цепочки (рисунок 1). Поддержка развития инфраструктуры СМП, как и других отраслей АЗРФ, является сложной кибернетической задачей, связанной с необходимостью обработки больших объемов данных, учета множества взаимосвязанных факторов и применения современных технологий моделирования, машинного обучения и искусственного интеллекта.



Рисунок 1. АЗРФ в единстве экономических зон страны

Арктическая территориальная деятельность характеризуется глобальным пространственным охватом и сложным функциональным содержанием. Задачи АТА требуют непрерывной обработки больших массивов динамической геоинформации, содержащей разнородные данные о природных, социально-экономических и инфраструктурных факторах, а также скрытую (имплицитную) информацию, от которой зависит эффективность принимаемых управленческих решений в условиях высокой неопределённости и риска.

Значимой характеристикой АТА является её рисковость, обусловленная совокупностью природно-климатических и инфраструктурных факторов. К ним относятся мелководность и высокая ледовитость акватории Арктической зоны РФ, экстремальные погодные условия, а также недостаточная инфраструктура. Эти детерминанты формируют среду с повышенной неопределённостью, требующую развитие подходов к управлению и прогнозированию.

Проблема эффективной геоинформационной поддержки управления АТА состоит в отсутствии адекватного модельно-методического аппарата, способного реализовать сквозную, непрерывную, многоуровневую методику регулирования АТА с учетом арктических рисков.

Для разрешения проблемы геоинформационного управления АТА предложено использование аппарата активизации имплицитной (скрытой, слабовыраженной) геоинформации предметной области АТА на основе категорийно-гомоморфных отображений, что ранее не учитывалось в других методах геопространственного анализа.

Результатом данных преобразований должно стать перемещение максимально возможного объема имплицитных данных во множество ординарных.

Во второй главе 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.

В рамках предложенного объектно-ориентированного подхода (ООП) категории объединяют классы 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.

В парадигме ООП геообъект как самостоятельная сущность, имеет внутреннее пространство свойств (атрибуты) и классификационных признаков, обладает поведением: может изменять свои свойства, взаимодействовать с другими объектами или реагировать на внешние воздействия, может быть частью более сложной системы, образуя иерархии.

В рамках ООП географические объекты моделируются как идентифицированные экземпляры элементов классов. Класс определяет набор атрибутов, методов и отношений, характеризующих ГО, при этом категория выступает как более высокий уровень абстракции, обеспечивающий правила взаимодействия между классами и другими категориями.

Преимущества ООП с реализацией категоричности ГО заключаются в возможности формализовать отношения между ГО используя предустановленные формуляры классов и типов, что обеспечивает более строгую математическую основу для моделирования ГС 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.

Опираясь на идеологию ООП разработана концептуальная модель АТА в условиях риска, определены понятия ГО и ГС, описаны базовые

преобразования объектов в системе категорий, дополненные механизмами гомоморфно-имплицитного упорядочения категорий.

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

$$GSp = \langle GOb, Relat \rangle, \quad (1)$$

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.

Геообъект (ГО) – это область ГП, имеющая определенное положение и протяженность относительно земной поверхности, обладающая собственным содержательным пространством атрибутов.



Рисунок 2 — Структура основных геопространственных понятий и категорий

В число характерных производных геопространственных понятий входят: «геообъект», «геопространство», «георегион», «геосистема», «система территориальной активности», «геоинформационная поддержка управления» и другие (рисунок 2).

Отношения пространственной упорядоченности – это форма пространственной связи между объектами ГП, с помощью которых осуществляется упорядочение модели физического пространства.

Все категории геоинформационной поддержки управления: ГО, георегионы, ГС, — составляют пространство функциональной активности, в котором описываются их положения относительно поверхности Земли, пространственная протяженность, содержательные характеристики, функционирование, взаимодействие, взаимное размещение и другие территориальные параметры. Пространство функциональной активности – это часть ГП, в пределах которого реализуется целенаправленная деятельность

функциональных ГО и ГС, опираясь на модели категорий управления геосредой: обстановки, оценки, решения, плана, контроля исполнения и т.д.

ООП в концептуальной модели призван повысить порядок абстракции рассмотренных моделей ГП, оперируя с их математическими структурами и используя методы теории категорий, такие как гомоморфизм, непрерывные отображения и гомеоморфизм топологических пространств.

Категория – это совокупность объектов и преобразований над ними с некоторыми ограничениями. Формальное определение категории записывается отношением (2).

$$C = \langle Ob_C | Mor_C \rangle, \quad (2)$$

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

Под классом объектов понимается любая структура моделей объектов, природа которых не имеет значения. Это могут быть математические, алгебраические, топологические, порядковые, технические, географические и любые другие структуры (таблица 1).

Таблица 1. Пример определения категорий, объектов, морфизмов

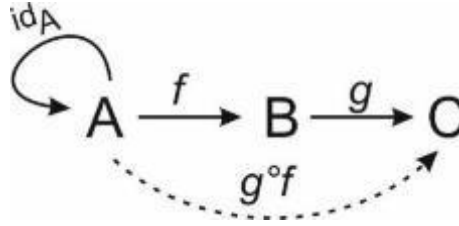
Пример категорий	Объекты	Морфизмы
Категория множеств (обозначается <i>Set</i>)	множества, как совокупность каких-либо (любых) объектов — элементов этого множества	функции
Векторных пространств (обозначается <i>Vect</i>)	вектора и скаляры поля	линейные отображения
Топологических пространств (обозначается <i>Top</i>)	структуры топространства	непрерывные отображения
Метрических пространств (обозначается <i>Met</i>)	метрические пространства	короткие отображения — не увеличивающие расстояния
Практические примеры		
Транспорт	классы судов, самолетов, автомобилей и т.п.	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	ГР, ГС	отображения, гомеоморфизмы

Непрерывное отображение — отображение из одного пространства в другое, при котором выполняется условие гомотопии, т.е. близкие точки области определения переходят в близкие точки области значений.

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

Таким образом, категория будет означать любую теоретико-множественную модель, удовлетворяющую выше приведенным аксиомам.

Морфизмы – 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 . Такая связь записывается в виде (3)

$$f: A \rightarrow B, \text{ или } A \xrightarrow{f} B \quad (3)$$

Множество морфизмов не может быть пустым, так как даже при отсутствии содержательных отношений у каждого элемента или объекта категории существует тождественный морфизм по определению.

Морфизмы играют центральную роль в теории категорий, так как они позволяют описывать связи между объектами, формулировать универсальные свойства, изучать структуры через их взаимодействия.

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.

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

$$F(id_c) = id_{F(c)}, \quad F(g \odot f) = Fg \odot Ff, \quad (4)$$

что поясняется диаграммой (рисунок 3)

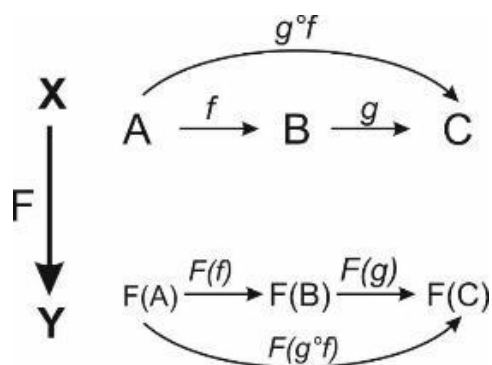


Рисунок 3 - Диаграммы морфизма и функтора для категорий X и Y

Если подобные свойства применяются к объектам и функторам категорий, то мы говорим о различных типах морфизмов категорий.

Естественным преобразованием называются морфизмы объектов, категорий, функторов категорий с сохранением топологии. Изменения географического аспекта объекта или развитие отношений между ГО в ГП и времени представимо естественными преобразованиями их математических структур.

Гомеоморфизм топологических пространств представляет собой отображение между двумя топологическими пространствами, сохраняющее их основные свойства, структуру и связность. Значимость гомеоморфизмов топологических пространств заключается в раскрытии дополнительных возможностей анализа отношений между пространствами и применении теоретических концепций к практическим задачам, реализуемым в ГИС.

Концептуальная модель АТА в соответствии с логикой ООП и системы категорий сводится к более простой и одновременно насыщенной схеме, изображенной на рисунке 4.

Цель концептуального моделирования системы АТА заключается в создании абстрактного представления, которое позволяет понять, проанализировать и оптимизировать взаимодействие ее элементов в процессах геоинформационной поддержки с учетом ординарной и максимально возможного числа имплицитной информации в рискованных условиях.

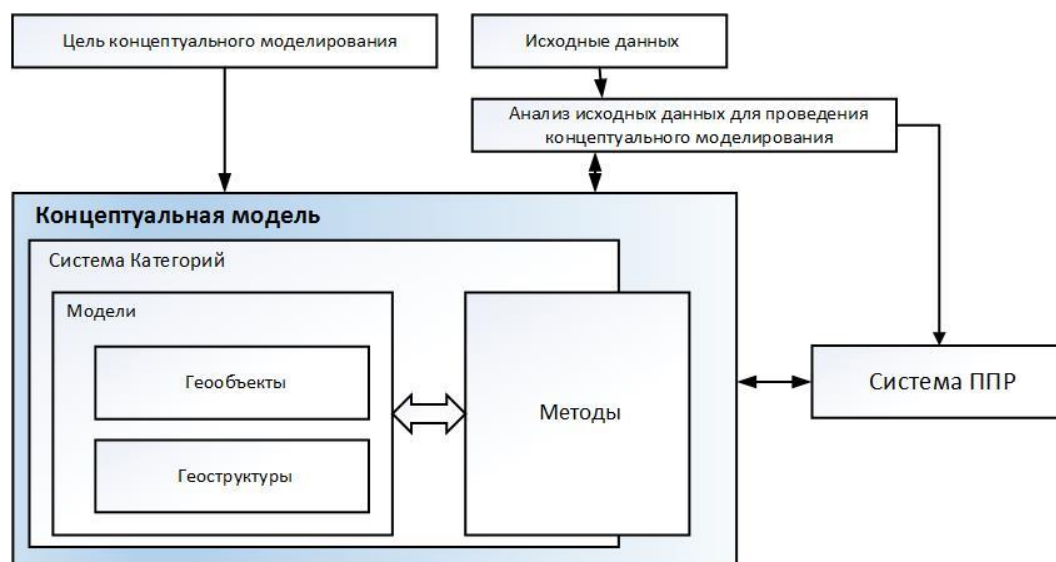


Рисунок 4 - Структура концептуальной модели АТА

Компонент «Система Категорий» базируется на понятиях категории, описанных выше.

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 2).

Таблица 2. Категории концептуальной модели АТА

Тип категории	Класс	Объекты (примеры)
Индекс геообъектов	Set	идентификаторы экземпляров геообъектов
Свойства геообъектов	Vect	линейные размеры, вес, расход, прочность, температура и т.п.
Геоситуации	Top	объекты в моделях геопространств
Гидрометео-обстановка	Top	циклон, течение, волнение, ветер, температура, топоструктуры явлений и ЧС, приливы
Логистика	Graf	маршруты, стоимости, пошлины, полигоны, частоты средств связи, расписания, ресурсы
Функторы	Matr	связи между категориями
Ресурсы	Graf	время , связь, топливо, социум

Множество объектов категории «лед» будут составлять все значимые для транспорта виды ледяных образований, например, припай (неподвижный лёд), плавающие 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). Примером функтора от категории «лед» в категорию «судно» могут служить влияние ледяных образований на изменение свойств объектов из 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 5).

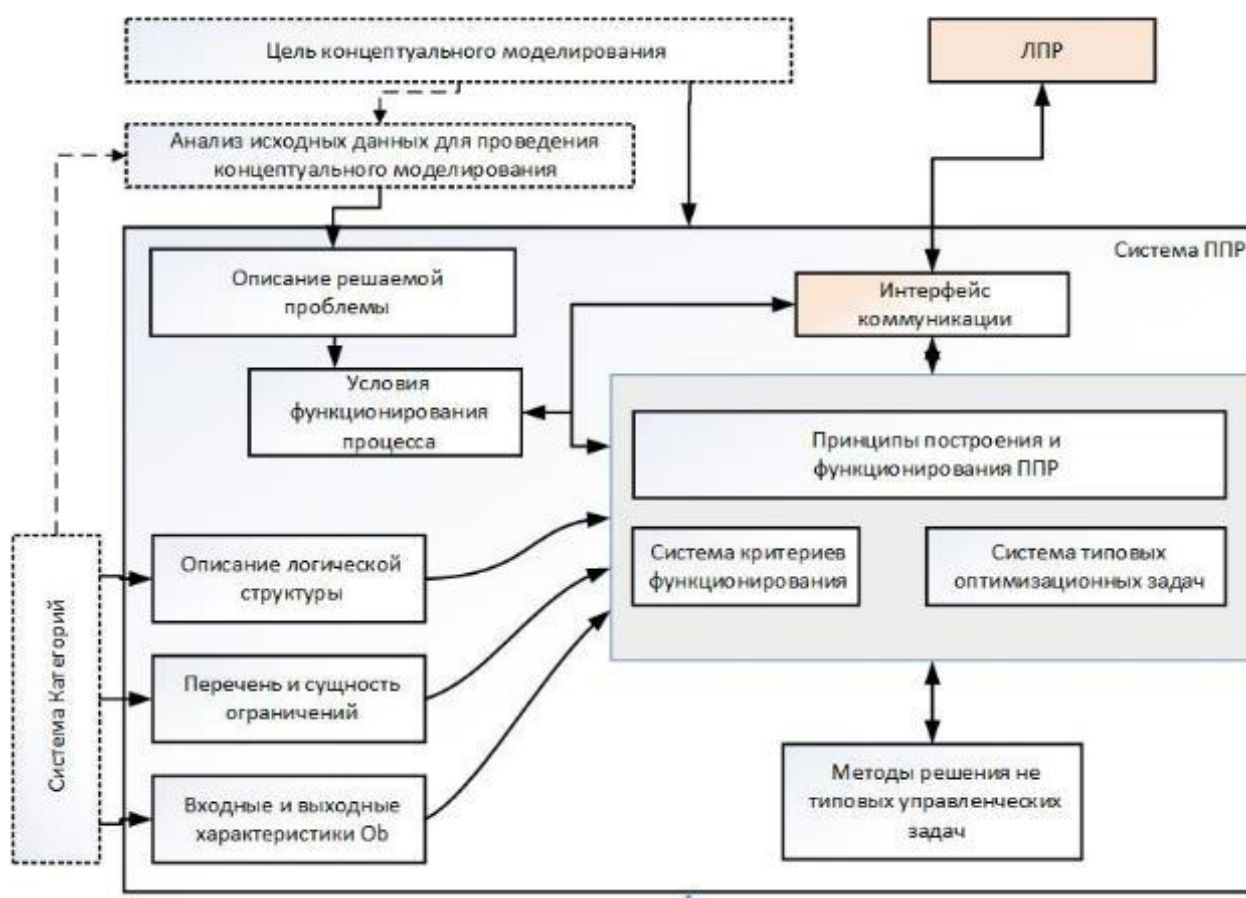


Рисунок 5 - Компонент «Система ППР»

Исходными данными для системы ППР являются: цель концептуального моделирования, описание проблемы, содержательная цифровая модель реального объекта и набор (если существует) типовых методов решения задач.

Компонента «Система Категорий» можно записать в следующем общем виде:

$$\text{Sys SK} = \langle G, V, P, M, T, F, D, Em \rangle \Leftrightarrow Z, \quad (5)$$

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 мониторинга внешней обстановки и иными интерфейсами ввода данных. При наличии активной составляющей оптимизационных задач система категорий **Sys SK** будет служить отображением результата управляющих воздействий для критериальной оценки эффективности принятых решений.

$$\delta Z(t_1) \subset F(dt) : SK(t_0) \rightarrow SK(t_1), \quad (6)$$

где, $\delta Z(t_1)$ – критерий оценки эффективности, $F(dt)$ – функтор категорий, $SK(t)$ – состояние системы категорий на момент времени t .

Категория векторов состояния ГО – это расширяемая категория, объектами которой являются вектор состояния, он же набор значений свойств экземпляров ГО. Вектор состояния описывается сигнатурой (7).

$$\forall x \in G, \overrightarrow{\exists V(x)} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, \quad (7)$$

Морфизмами вектора состояния для приведенного примера выступают операции, изменяющие элемент экземпляра, например: пополнение топлива, разгрузка/загрузка судна, неисправность технических средств, изменение квалификации экипажа и т.п.

Категория геоситуации наполняется группой моделей ГП, 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 ГП. Морфизмы геопространств определяются динамикой отношений и операциями над ГО.

Категория гидро-метеорообстановки содержит в себе модели топологических пространств и пространственных многообразий, описывающих природные явления в атмосфере и гидросфере. Вся метеорологическая информация может быть описана с применением топоструктур и соответственно морфизмы между топологическими структурами являются их непрерывные отображения, представленные естественными преобразованиями.

Категория логистика – это множество взвешенных ориентированных графов по различным аргументам весовых функций, для решения задач удовлетворения ограничений логистики. Морфизмами данной категории являются гомоморфизм графов.

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

Категория ресурсов предоставляет исходную информацию для задач удовлетворения естественных ограничений. Объектами этой категории являются собственно ресурсы, такие как, ресурсы жизнеобеспечения, ресурсы социума, время, линий связи, топливо, ископаемые.

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

Рассмотренные выше категории представляют собой систему моделей (рисунок 6) более высокого уровня абстракции, чем любое из геоинформационных пространств.

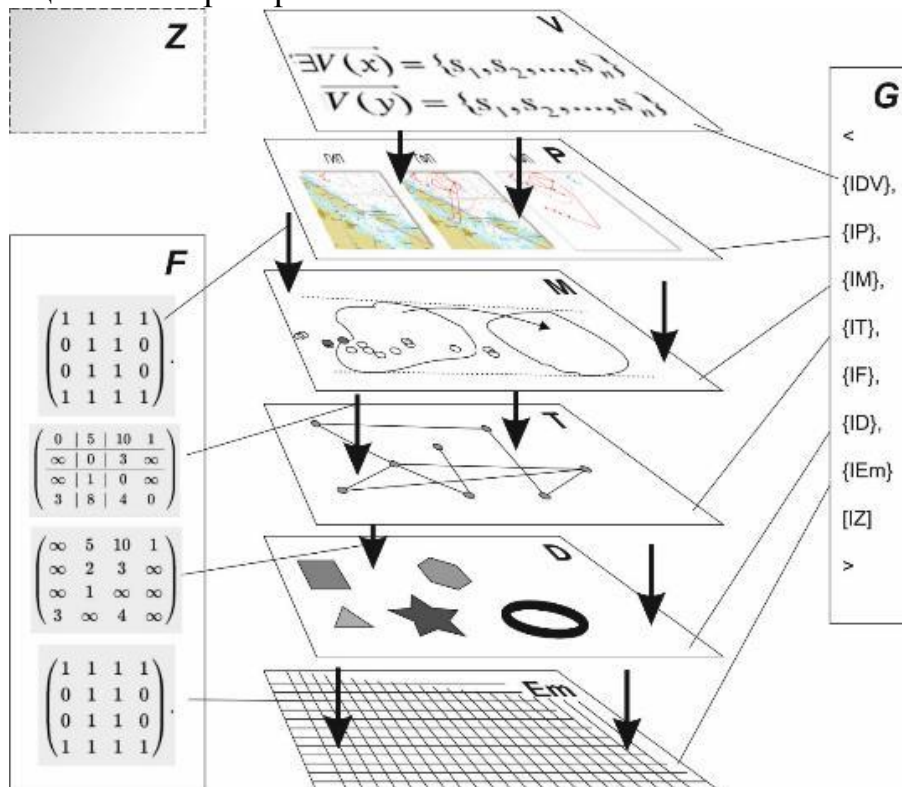


Рисунок 6. Система категорированных моделей

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

В **третьей** главе на основании изложенных принципов геомоделирования системы АТА подробно рассмотрены группы моделей ГП,

группы подмоделей параметрической многоаспектной модели георегиона, обобщенная рискологическая модель и получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана модель ГО, формализуемая на основе категорируемых структур в концептуальной модели АТА.

2. Дополнена модель геоинформационного пространства, отличающаяся топологическим переходом наполняемых ее структур от географически конкретного представления территориальной ситуации к пространственно-абстрактному представлению, что позволяет формировать наборы исходных геоданных для работы с применением ИНС.

3. Дополнена модель геофункционального пространства, допускающая гомеоморфные преобразования с сохранением содержательной динамики.

4. Модель геофункционального пространства оптимизирована для анализа и обработки динамических данных.

5. 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.

6. Группа моделей адаптирована для использования ИНС и ИИ в автоматизированных системах распознавания обстановки, идентификации и классификации объектов.

7. Представлена обобщенная рискологическая модель обстановки, обеспечивающая геомоделирование АТА и территориальных транспортных систем в динамике сущностно-содержательных свойств и их собственных пространственных характеристик с возможностью анализа гомоморфизмов геоситуации.

Геообъекты (рисунок 7) характеризуются собственным пространством и атрибутами (содержательными характеристиками):

$$GOB = (SpGO, Atrib) \quad (8)$$

где: $SpGO$ – собственное пространство ГО; $Atrib$ – содержательные характеристики ГО.

$$SpGO \subset Rm, \quad SpGO = \langle DislC, DForm, DPar \rangle \quad (9)$$

где: $DislC$ – координаты центроида ГО; $DForm$ – пространственные линейные параметры ГО; $DPar$ – динамические параметры центроида и скорости изменения пространственных параметров.

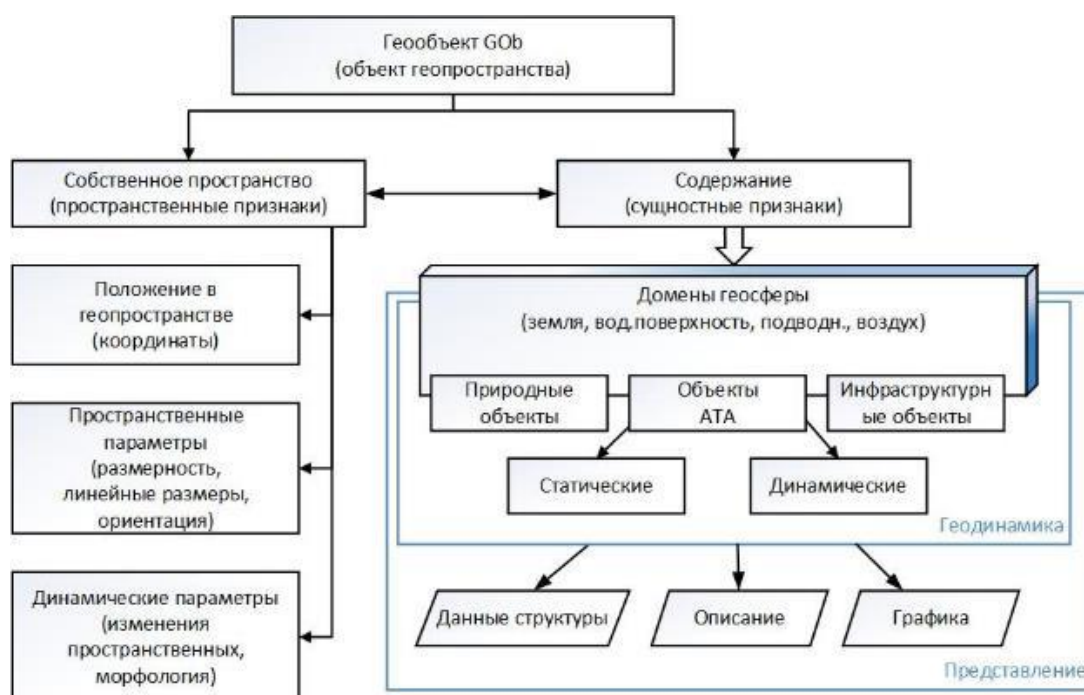


Рисунок 7 - Структура геообъекта

Содержательные параметры ГО принадлежат многомерному пространству признаков ($Atrib \subset S_n$) и характеризуют сущностные характеристики его собственного пространства. Многомерное пространство признаков S_n является подмножеством категории векторов состояния V , выбор которых определяется исходя из индекса экземпляра ГО.

$$S_n \subseteq V = Vect(G) \quad (10)$$

Все ГО привязываются (отображаются) к поверхности Земли с помощью математической (картографической) проекции Pr :

$$\forall GOB \exists Pr: GOB \rightarrow R^2 (3D), \quad (11)$$

где Pr – метод отображения (проекция) ГО на поверхности Земли R^2 .

С помощью отношений осуществляется структурирование (упорядочение) геопространства, способного к гомологическим преобразованиям. С их помощью суть множества ГО и становится геопространством – своего рода каркасом для последующих операций преобразования. Операции преобразования структур служат для выделения отношений между объектами ГП и осуществления межпространственных переходов.

Отношения между ГП проиллюстрированы рисунком 8.



Рисунок 8 - 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.

Для отображения динамики и развития территориальных систем функциональной активности служит геофункциональное пространство, опирающееся на категорию геоситуации концептуальной модели АТА.

Геофункциональное пространство включает:

$$GFSp = \langle GOb, Rat, Op, T \rangle \quad (12)$$

где: GOb – геообъекты; Rat – отношения пространственной и содержательной упорядоченности (ОПУ и ОСУ); Op – активные операции; T – время.

Абстрактное функциональное пространство (АФП) отличается тем, что его объекты не имеют географической привязки к земной поверхности. Это достигается с помощью операций над объектами, к которым относятся морфизмы, упрощение контура, переносы, развороты, масштабирование и пр. В общем случае переход в АФП $AbstrS$ определяется:

$$\begin{aligned} AbstrSp &= (Obj, Rat), Obj \subset R^2, Obj \not\subset 3П (3П \not\subset AbstrSp), \\ \{Refli\}, i &= 1, \dots, n: \{GOb\} \rightarrow \{Obj\}, \\ GOb &\subset 3П, Obj \not\subset 3П \end{aligned} \quad (13)$$

где: $\{Refli\}$, $i = 1, \dots, n$ – геоинформационные операции, $3П$ – земная поверхность, Obj – объекты АФП; GOb – геообъекты.

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.

$$GReg = (GOb, RatGR), GOb \subset (R^2, S(k)), S(k) \subset S_n \quad (14)$$

где: $S^{(k)}$ – подпространство признаков класса (типа) GOb , Rat_{GR} – ОПУ.

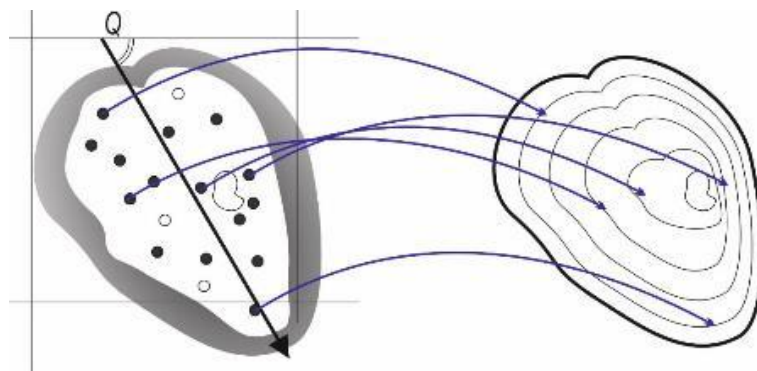


Рисунок 9 - Представление георегиона в виде территориальной топологической структуры взаимного размещения точек (слева) и топологической структуры полей

Георегион определяет первичное структурирование территории по распределению однородных объектов на ЗП. Геосистема агрегирует геообъекты и георегионы в территориальную топологическую структуру разнокачественных ареалов.

Многоаспектная модель исследуемого георегиона призвана упростить реализацию отображений, преобразований и модификацию функторов за счет единства методов для родственных и гомоморфизма соседних георегионов. Однако ООП предоставляет возможность эксклюзивности реакции экземпляра ГО на общие методы, например гидросамолет не является полноценно судном, а как самолет может не иметь ограничения по наличию посадочной полосы. Также тождественное преобразование родственных регионов не влияет на преобразование соседних (рисунок 10).

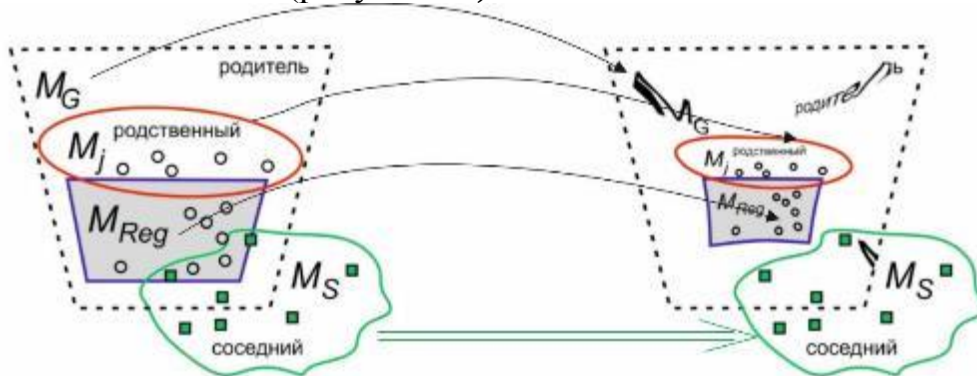


Рисунок 10 - Тождественное преобразование родственных регионов

Концептуальная модель АТА позволяет определять глобальные методы преобразования ГП с учетом взаимосвязей между содержательными подмоделями, посредством операций функторов, что обеспечивает согласованность и целостность моделирования на всех уровнях абстракции. Корреляционные матрицы, связывающие классы из разных категорий, сведены в категорию F - межкатегорийных связей.

$$F = \langle F_M^P, F_T^P, F_D^P, F_{Em}^P \rangle, \quad (15)$$

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.

Включение в параметрическую модель имплицитных факторов осуществляется именно через корреляционные матрицы категорий, на простом принципе функции эластичности (рисунок 11).

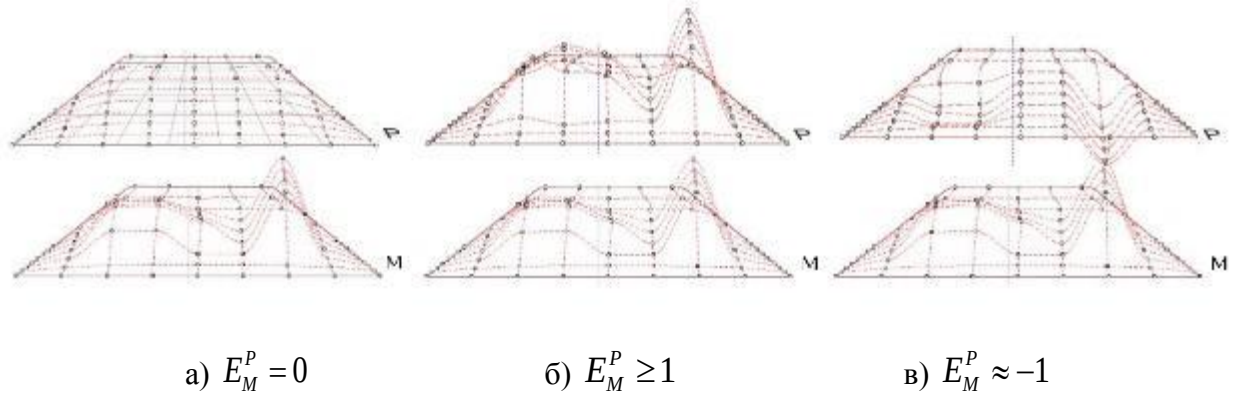


Рисунок 11 - Иллюстрация зависимости между слоями для различных эластичностей

Замечательным свойством такого способа представления зависимости между классами 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 машинном виде, действительно:

$$E_x^y = \frac{dy}{y} : \frac{dx}{x} = \frac{dy}{dx} * \frac{x}{y} = y'(x) \frac{x}{y}, \quad (16)$$

для $y = x^n$ примет вид

$$E_x^y = nx^{n-1} \frac{x}{x^n} = n, \quad (17)$$

Таким образом, зависимость между слоями можно описать достаточно простой для восприятия формой в виде симметричной матрицы значений эластичности (рисунок 12).

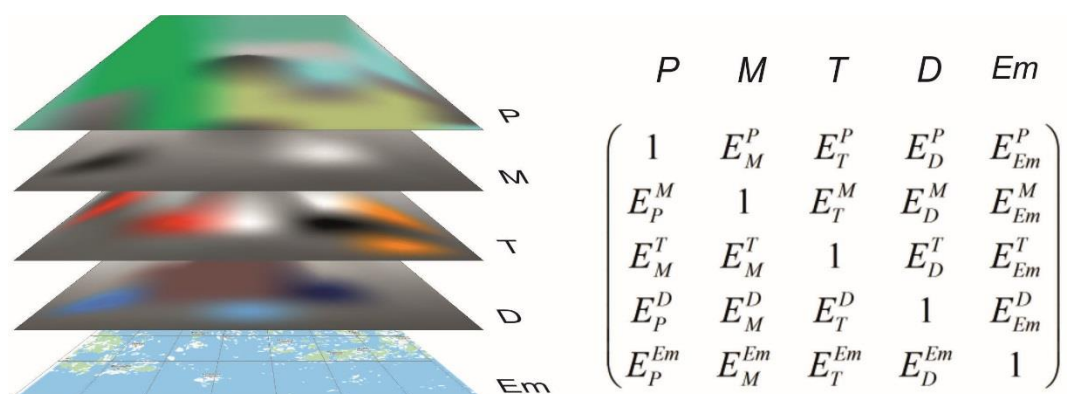


Рисунок 12 - Матрица значений эластичности зависимостей

Далее в главе рассмотрен математический аппарат работы сверточной ИНС, который определяется операциями нелинейных активаций и преобразований, что также применимо в концептуальной модели АТА.

В задачах автоматизированного распознавания, классификации и идентификации представлений предлагается использовать совокупность небольших, специализированных и обученных ИНС набор которых будет определяться из соображений детерминированного подхода к числу категорий и их представлений в концептуальной модели (рисунок 13).

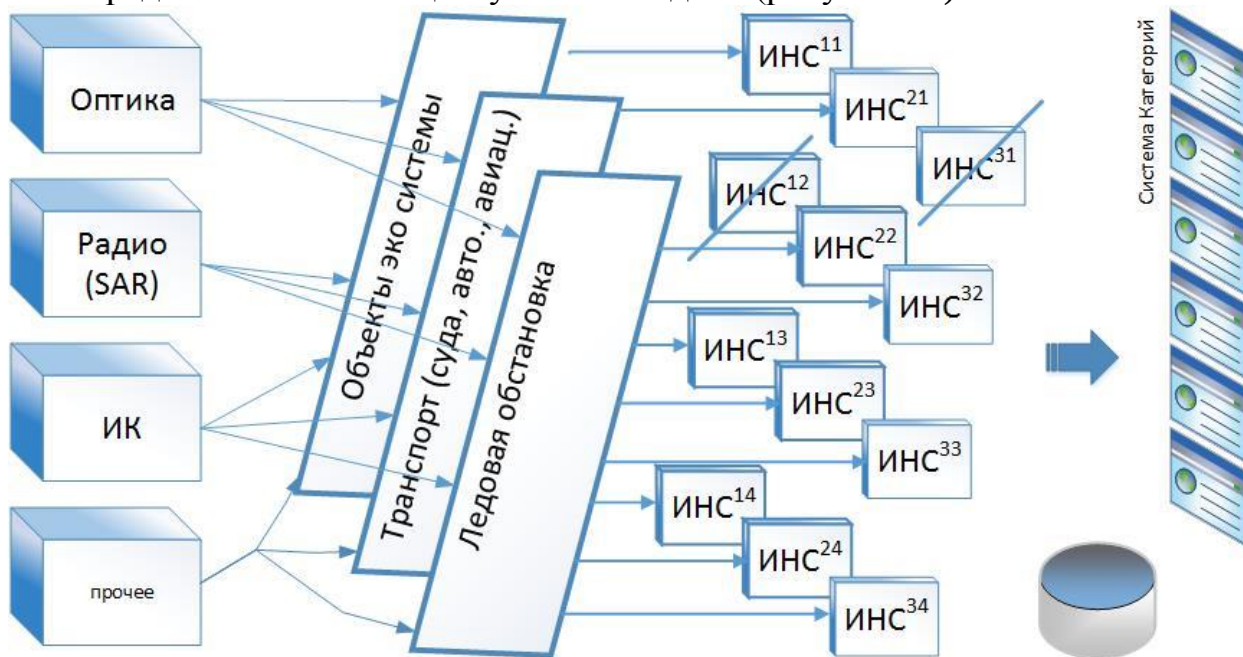


Рисунок 13 - Совокупность ИНС для задач распознавания

Благодаря автоматическому сбору данных и способностям ИНС по распознаванию и классификации ГО, концептуальная модель АТА обогащается информацией, на основе которой подсистема ППР в реальном времени способна выполняет задачи геоанализа и формировать рекомендации по снижению рисков с использованием разнородных и имплицитных данных.

В четвертой главе изложены методические подходы к реализации геоконтролинговой поддержки АТА в условиях риска.

Методической основой геоинформационного управления служит общий метод создания и использования информации с географическим аспектом (рисунок 14).

Общий геоинформационный метод служит для организации сквозной интегральной обработки геоинформации в АСУ и полнофункционального пространственного анализа. Суть метода состоит в автоматизации ручных технологий создания и использования геопространственной информации, переходе от ручного составления и наполнения карт, баз данных и знаний оператором к геоинформационной технологии работы с информацией и изображениями, содержащими географический аспект.



Рисунок 14 — Структура общего геоинформационного метода

Геоинформационный метод отображения – это цифровая трансформация традиционного картографического метода исследования в современную цифровую картографию, автоматизированный пространственный анализ, визуализацию и представление.

Геоинформационный метод создания ГИ включает разрабатываемые геоинформатикой и геоинформационным картографированием приемы и способы ввода, преобразования, согласования, анализа и визуализации разнородной ГИ (априорной и оперативной).

На примере анализа радиоголограмм от радаров с синтезированной апертурой (РСА) спутников ДЗЗ показаны методы пошаговых преобразований цифровых объектов с использованием сверточной нейронной сети (нелинейных) и математических линейных преобразований цифровых абстракций методами теории категорий.

Визуализация радиоголограммы (рисунок 15а) практически не анализируемая в человеческом восприятии, после ряда последовательных и итерационных преобразований с использованием интеллектуальных методов представления становится источником данных, недоступных в оптическом диапазоне. В процессе обработки данных радиоголограммы осуществляется синтез радиолокационной информации с использованием генеративно-состязательной сети, передискретизация из системы координат наклонной дальности в системы координат наземной дальности, перепроецирование в геодезическую системы координат, устранение спекл-шума, устранение искажений от поляризации, многоучёвости, диффузии и т.п.

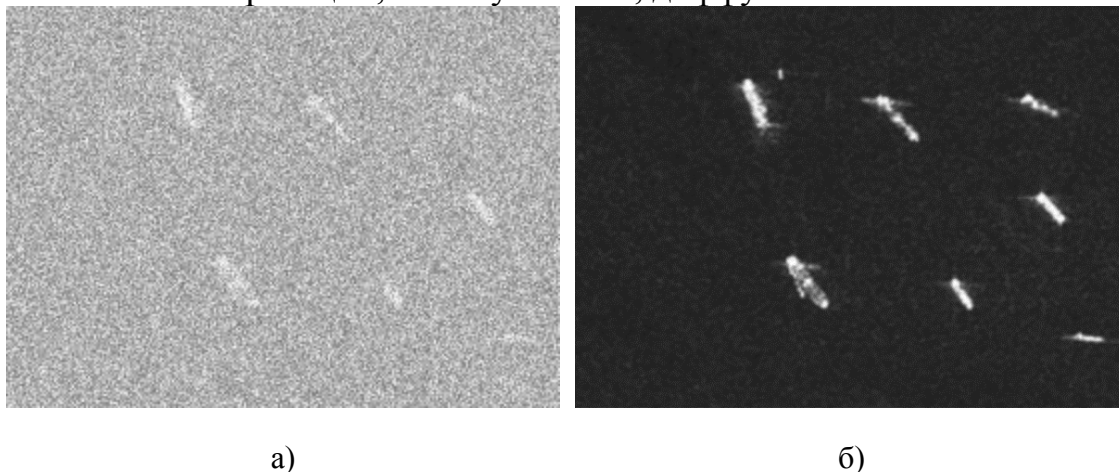


Рисунок 15 — Морские суда по данным PCA (а) радиоголограмма (б) частично обработанное изображение

По итогу получаемая визуализация становится воспринимаемой человеком, идентифицируемой и классифицируемой (рисунок 15б).

Основываясь на более качественной базе знания об окружающей обстановке и состоянии ресурсов ГО, очевидна возможность значительного повышения эффективности управления АТА в многофакторных рискованных условиях к которым относится АЗРФ.

Методические подходы к реализации геоконтролинговой поддержки АТА опираются на общий подход к использованию геоинформации, который состоит в построении оптимального отображения:

$$f_s : \{C_{cont}, F_{cont}, Rec, GSit\} \rightarrow GSp_1 \rightarrow GSp_2 \rightarrow \dots \rightarrow GSp_n \rightarrow Cov_{dec} \rightarrow \langle R^2, Lg_{chart} \rangle \quad (18)$$

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.

Гомоморфно-имплицитная упорядоченность категорий позволяет выявлять и учитывать скрытые, неочевидные риски АТА, например, влияние деградации ледовых образований на устойчивость транспортной

инфраструктуры, которые остаются за рамками видимости традиционных детерминистических моделей.

Пятая глава посвящена применению разработанного модельно-методического аппарата для анализа рискологических ситуаций и прогнозирования динамики их развития.

Практическое применение методики рискологического моделирования рассмотрено на примере решения классической задачи выбора оптимального пути по участку СМП от Карских ворот до пролива Вилькицкого. В качестве базиса используется модель ледовой обстановки, сгенерированная ИНС в виде тепловой карты. Базовый рисковый критерий на основе анализа взаимосвязей модифицируется доступными факторами с использованием гомоморфно-имплицитного упорядочения категорий. Модель совокупного параметра риска строится на основе треугольных примитивов, обеспечивающих простоту применения, гибкость и наглядность представления (рисунок 16).

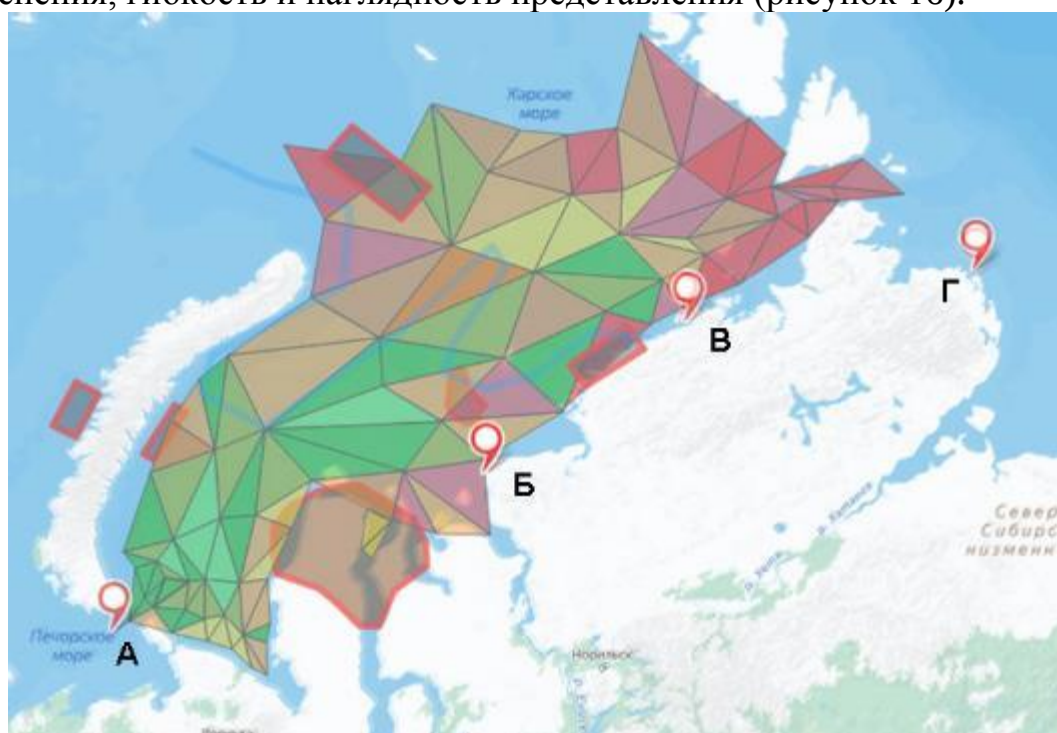


Рисунок 16 — Тепловая карта областей по рассчитанному совокупному параметру риска

Гомоморфизм полученной базовой планарной полигональной сетки в трехмерную поверхность осуществляем вертикальной экструзией по данным плотностей совокупного параметра риска. Промежуточный результат можно представить в виде неразрывной поверхности (рисунок 17), основание которой замыкается плоскостью на уровне моря (горизонта, эллипсоида и т.п.).

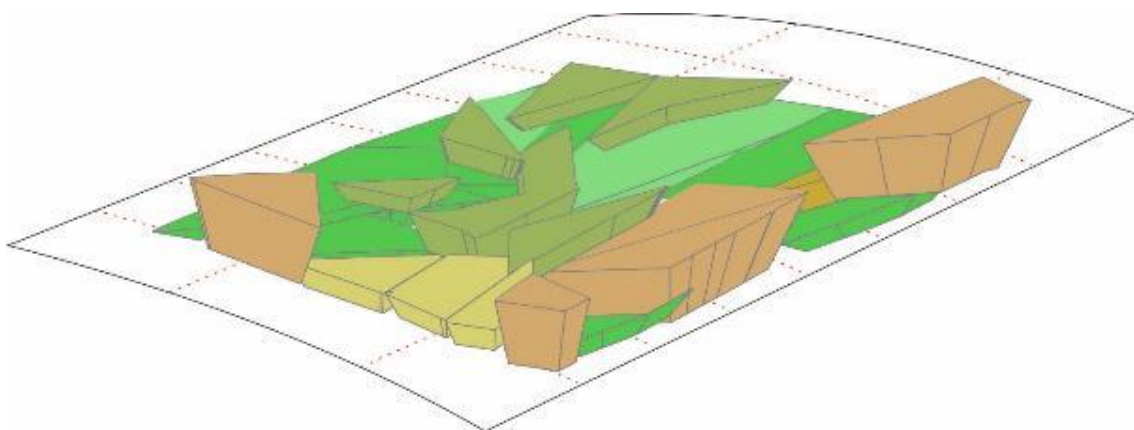


Рисунок 17 — Трехмерная поверхность, анаморфированная вертикальной экструзией по значению совокупного риска

В процессе дальнейших преобразований необходимо избавиться от предельных вертикальных переходов полученной поверхности совокупного параметра риска, для чего над поверхностью выполняются две операции: замыкания и размыкания трехмерной поверхности 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 19 и иллюстрируется рисунком 18.

$$A \bullet B = (A \oplus B) - B \quad (19)$$

В данном выражении оператор объединения можно считать оператором, преобразования поверхности в окрестности структурного элемента.

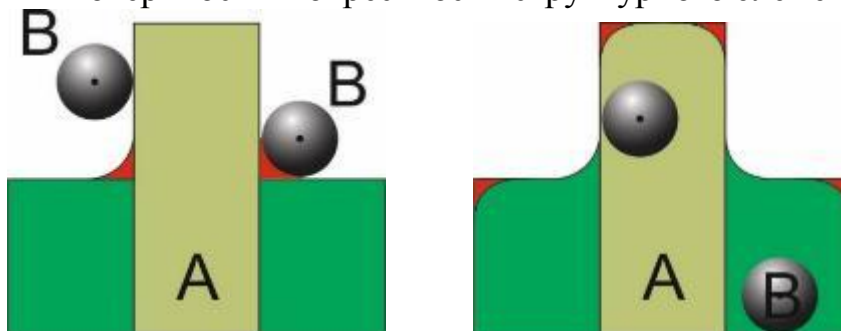


Рисунок 18 — Действие оператора замыкания (слева) и размыкания (справа)

По итогу выполнения замыкания и размыкания должна получиться сглаженная трехмерная поверхность, анаморфированная вертикальной экструзией по значению совокупного параметра риска.

Следующим этапом решается задача моделирования движения материальной точки под действием условной силы натяжений, направленной к пункту назначения по поверхности фактора риска под действием силы гравитации. В предложенной абстракции сила гравитации призвана

обеспечить минимизацию параметра риска в гомологической области близко лежащих значений.

Апробация разработанного аппарата подтверждает применимость гомеоморфных преобразований в задачах прогнозирования ледовой обстановки, транспортной доступности и экологической безопасности при динамическом изменении факторов риска.

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 территориальной активности, и требующая разработки соответствующей 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.

2. Концептуальная модель построения системы региональной территориальной активности, способной к применению современного математического аппарата.

3. Геоинформационные модели представления геоструктур и геообъектов, формализованные и структурированные, эффективно работающие при динамично изменяющихся внешних и внутренних рискованных параметрах, неточности, неполноте, многомерности и разнородности мониторинговой информации.

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

Настоящее исследование нацелено на создание единой методологии, основанной на применении адекватного модельно-методического аппарата в геоинформатике, с использованием современных математических инструментов из областей теории математических структур, математического анализа, линейной алгебры и прикладной математики, которые составляют фундамент для развития технологий ИНС, ИИ и компьютерного моделирования.

Существенным новшеством предлагаемого подхода является применение гомоморфных преобразований структур для трансформации имплицитных факторов в ординарные, что создаёт основу для дальнейшего совершенствования геотехнологий в решения научно-практических задач.

Оценена эффективность предложенного модельно-методического аппарата, которая в интегральном выражении представляет следующее: 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.

При решении задач поиска оптимального пути в Карском море с использованием предлагаемого модельно-методического аппарата удалось добиться увеличения множества ординарных данных на 11% за счет имплицитных.

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 ИИ, математического анализа, математико-картографического моделирования, системного подхода, рискологии, исследования операций, 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 пространственного ГИС-анализа информации о территориальной обстановке;
- дальнейшей разработки и оптимизации методов топологизации и анаморфирования карт и геоизображений для повышения контроллингового потенциала методов геоинформационного регулирования рисков;
- изучения обратного влияния процедур и категорий геоконтроллинга на элементы классической методики работы ЛПР по управлению подчиненными объектами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в открытых рецензируемых изданиях, включённых в перечень, рекомендованный ВАК (Перечень ВАК)

1. **Миляков Д.Ф.** Опыт применения современных инфокоммуникационных технологий для повышения точности речных электронных навигационных карт / В.В. Каретников, С.В. Рудых // Журнал речной транспорт (XXI век). — 2015. — № 5 (76). — С. 35–37. — №2407 перечня ВАК.
2. **Миляков Д.Ф.** Использование системы определения углов пространственной ориентации объекта для измерения динамического дифферента промерного судна на мелководье / А.Е. Сазонов, В.В. Каретников // Гироскопия и навигация. — 2017. — Т. 25, № 1(96). — С. 128–135. Scopus №98.
3. **Миляков Д.Ф.** Навигационное обеспечение Северного морского пути: проблемы и перспективы развития / В.В. Каретников, Я.Д. Брянова, А.А. Сикарев // Морская радиоэлектроника. — 2017. — № 4 (62). — С. 24–28. — №1798 перечня ВАК.
4. **Миляков Д.Ф.** Спутниковая навигация сантиметровой точности // Морской сборник. Журнал военно-морского флота — 2017. — №7 (2044) — С. 68-71. — №1803 перечня ВАК.
5. **Миляков Д.Ф.** и др. Навигационное обеспечение Северного морского пути: функциональные дополнения ГНСС // Морская радиоэлектроника. — 2018. — № 2 (64). — С. 8–11. — №1798 перечня ВАК.
6. **Миляков Д.Ф.** Приоритетные вопросы внедрения беспилотных судов на морском и внутреннем водном транспорте / В.В. Каретников // Морская радиоэлектроника. — 2018. — № 4 (66). — С. 4–6. — №1798 перечня ВАК.
7. **Миляков Д.Ф.** Расширение геолокационного функционала ГНСС сервисами мобильной сетевой ASSIST-поддержки в интересах моделирования (освещения) территориальной обстановки / С.Г. Черный, А.С. Присяжнюк, С.И. Биденко, Ю.Л. Николашин // Информация и Космос. — 2020. — № 2. — С. 118–123. — №1466 перечня ВАК.
8. **Миляков Д.Ф.** Направления организации альтернативного радионавигационно-телекоммуникационного обеспечения судоходства в Арктической морской зоне / Щесняк С.С., Биденко С.И., Присяжнюк С.П., и др. // Информация и Космос. — 2020. — № 3. — С. 102–111. — №1466 перечня ВАК.
9. **Миляков Д.Ф.** Автономные системы навигации Обской губы / В.В. Каретников, С.С. Щесняк, С.И. Биденко // Морская радиоэлектроника. — 2020. — № 3 (73). — С. 28–33. — №1798 перечня ВАК.
10. **Milyakov D.** Topologisation of the situation geographical image in the aspect of control of local transport and economic activity / S. Chernyi, S. Bidenko, Y. Nikolashin, E. Borodin // Int. J. Computational Science and Engineering. — 2022. — Vol. 25, № 2. — P. 108–115. — Scopus 69.

11. **Миляков Д.Ф.** Искусственные нейронные сети в системе обеспечения безопасности мореплавания автономных безэкипажных судов / И.А. Сикарев, С.В.Травин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2023. — № 2. — С. 191–201. – №2267 перечня ВАК.
12. **Миляков Д.Ф.** Проблемы высокоточного координирования гидрографических и других морских работ в акватории СМП в условиях санкционных ограничений и пути их решения. Часть II. Российский инновационный сервис высокоточного определения координат от компании АО ГЛОНАСС / В.М.Смолин, С.В. Решетняк, О.Л. Онищенко // Навигация и гидрография. — 2023. — № 4(73). — С. 7–31. – №1628 перечня ВАК.
13. **Миляков Д.Ф.** Проблемы высокоточного координирования гидрографических и других морских работ в акватории Северного морского пути в условиях санкционных ограничений и пути их решения. Часть III. Результаты тестирования PPP-сервиса высокоточного определения координат компании АО «ГЛОНАСС» с использованием отечественной мультисистемной навигационной аппаратуры / В.М.Смолин, С.В. Решетняк, О.Л. Онищенко // Навигация и гидрография. — 2024. — № 2(75). — С. 76–108. – №1628 перечня ВАК.
14. **Миляков Д.Ф.** Определение слабовыраженных сущностных свойств геообъектов в процедурах территориального ГИС-анализа / А.А. Бенгерт, С.И. Биденко, Д.В. Звездарев, Д.О. Куценко // Информация и Космос. — 2024. — № 3. — С. 111–116. – №1466 перечня ВАК.
15. **Миляков Д.Ф.** Особенности нормативного регулирования безопасности плавания автономных судов внутреннего водного транспорта / В.И. Дмитриев, В.В. Каретников // Речной транспорт (XXI век). — 2024. — № 2 (110). — С. 40–41. – №2407 перечня ВАК.
16. **Миляков Д.Ф.** Подходы к реализации геоконтроля морской транспортной деятельности в условиях киберспособности флота / Е.Л. Бородин, Д.В. Звездарёв, С.И. Биденко, А.Ю. Миронов // Эксплуатация морского транспорта. — 2025. — № 1 (114). — С. 56–62. – №3125 перечня ВАК.
17. **Миляков Д.Ф.** Геоинформационный подход к реализации совместного территориально-предиктивного анализа состояния охранных мониторингов местности / А.К. Беляев, С.И. Биденко, Д.В. Звездарев [и др.] // Информация и космос. — 2025. — № 1. — С. 147–154. – №1466 перечня ВАК.
18. **Миляков Д.Ф.** Метод учета имплицитного окружения при проведении ситуационного анализа в ГИС // Гидрометеорология и экология. — 2025. — Вып. 78. — С. 128–139. – №1056 перечня ВАК.
19. **Миляков Д.Ф.** Объектно-ориентированный подход к категоризации географических объектов в ГИС // Информация и Космос. — 2025. — № 3 — С. 102–105. – №1466 перечня ВАК.
20. **Миляков Д.Ф.** Геоинформационная модель обстановки в территориально-распределенной системе специальных охранных мониторингов местности с

- учетом динамических факторов геосреды / А.К. Беляев, С.И. Биденко [и др.] // Информация и Космос. — 2025. — № 3 — С. 82-92. — №1466 перечня ВАК.
21. **Миляков Д.Ф.**, Подходы к реализации геоконтролинга морской транспортной деятельности в условиях киберспособности флота / Д. Ф. Миляков, Е.Л. Бородин, А.Ю. Миронов [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. — 2025. — № 1(114). — С. 56–62. — №3125 перечня ВАК.

Материалы докладов на конференциях:

22. **Миляков Д.Ф.** Роботы, волна за волной // Перспективы беспилотных технологий на водном транспорте: сборник докладов национальной научно-практической конференции. — СПб. ГУМРФ — 2018. — С. 44–47.
23. **Milyakov D.** Method for Choosing a Scheme of Placing Navigation Signs on a Section of Inland Waterways for Navigating a Vessel with a Given Navigation Risk Value / V. Karetnikov, A. Prokhorenkov, K. Efimov // E3S Web of Conferences. Сер. "Ural Environmental Science Forum 'Sustainable Development of Industrial Region', UESF 2021". — 2021.
24. **Миляков Д.Ф.** Моделирование пространства военного конфликта: концептуальный подход / Труды IV научно-практической конференции ВКА им. А.Ф.Можайского — 2022 — №2804 перечня ВАК

Материалы в отчетах НИР:

25. Отчет о НИР «Опора», этапы 6,7, книга 1, разделы 1.1.3, 2.2, 3.2 / Д.Ф.Миляков, О.А.Борсук [и др.] — М.: АО «КБ НАВИС», 2023. — С. 218 - 253.
26. Отчет о НИР «Опора», этап промежуточный 8, книга 1, разделы 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3 / Д.Ф.Миляков, О.А.Борсук [и др.] — М.: АО «КБ НАВИС», 2024. — с.141 -175.
27. Отчет о НИР «Опора», этап промежуточный 9, книга 1, разделы 1.1.1.3, 1.1.2, 1.2.1, 2.2.3, 2.3, 2.4, 2.6 / Д.Ф.Миляков, О.А.Борсук [и др.] — М.: АО «КБ НАВИС», 2025. — С. 211 – 245.
28. Отчет о НИР «Пунктир» этап промежуточный 4, книга 1, разделы 1.1.3, 2.2, 3.2 / Д.Ф.Миляков, В.А. Киреев [и др.] — М.: АО «КБ НАВИС», 2023. — С. 140 – 176.
29. Отчет о НИР «Пунктир» этап промежуточный 5, книга 3, разделы 4.3, 5.3 / Д.Ф.Миляков, В.А. Киреев [и др.] — М.: АО «КБ НАВИС» - 2024. – С. 54-91.
30. Отчет о СЧ НИР «Развитие ГЛОНАСС», книга 1, разделы 1.6, 1.10, 1.12, 2.5. / Д.Ф.Миляков, Г.Э. Кнауэр [и др.] — М.: АО «КБ НАВИС» - 2024. – С. 204-241.
31. Отчет о НИР «Прагматика-ГНИНГИ», книга 1, разделы 2.5, 2.6, 2.7 / Д.Ф.Миляков, А.М. Шарков [и др.] — СПб: АО ГНИНГИ - 2023. – с.254-282.
32. Отчет о СЧ НИР «Магнолия», этап 2 / Д.Ф.Миляков, Г.Н. Непомилуев [и др.] — СПб: УНиО МО РФ – 2025. - том 3. С. 94-128.

Патенты и авторские свидетельства:

33. **Миляков Д.Ф., Каретников В.В., Рябов Г.Г., Сикарев И.А., Рудых С.В.** Устройство контроля технического состояния строительных конструкций: патент на полезную модель RU 148817 U1, 20.12.2014. Заявка № 2014130367/28 от 22.07.2014.
34. **Миляков Д.Ф.**, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №RU2025682561 Российская Федерация от 25.08.2025. Программа для моделирования, планирования и визуализации доступных маршрутов судна с учётом двумерного фактора риска и трёхмерного многообразия имплицитных параметров среды «Трассер.ГИП». заявл. 04.08.2025: опублик. 25.08.2025 Бюл. №9: Миляков Денис Федорович.

Монографии:

35. **Миляков Д.Ф.** Применение глобальных навигационных спутниковых систем на внутренних водных путях Российской Федерации: монография / Д.Ф. Миляков, В.В. Каретников, С.Ф. Шахнов – СПб: Наука, 2021. — 288 с.
36. **Миляков Д.Ф.** Геоконтроллинг и моделирование рисков территории: монография / Д.Ф.Миляков, В.Л.Михеев, С.И.Биденко [и др]. — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. — 262 с.

В других изданиях:

37. **Миляков Д. Ф.** О защите геоинформационных данных в категорийном моделировании территориальных систем // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. — 2025. — № 34. — С. 142–143.
38. **Миляков Д.Ф.** Концепция электронной навигации и мониторинг морской обстановки // Записки по гидрографии. — СПб.: ЦКП ВМФ, 2014. — № 291. — С.5-12.
39. **Миляков Д.Ф.** Требования к системам геоинформационного обеспечения ВМФ / С.И. Биденко, Д.Ф. Миляков, О.А. Чопенко // Записки по гидрографии. — СПб.: ЦКП ВМФ, 2010. — № 279. — С. 16–19.
40. **Миляков Д. Ф.** Авторская методика представления геоинформации в ГИС ВМФ // Записки по гидрографии. — СПб.: ЦКП ВМФ, 2007. — № 268. — С. 10–16.