

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Российский государственный  
гидрометеорологический университет»

*На правах рукописи*

Беляев Александр Константинович

**МЕТОДИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОХРАННЫХ МОНИТОРИНГОВ МЕСТНОСТИ  
НА БАЗЕ ГЕОСЕНСОРНОГО НАБЛЮДЕНИЯ  
И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ**

Специальность 1.6.20 – «Геоинформатика, картография»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Российский государственный  
гидрометеорологический университет»

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

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

**Полюхович Максим Алексеевич**,  
кандидат технических наук, доцент Высшей школы  
техносферной безопасности ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация: **Закрытое акционерное общество «Институт  
телекоммуникаций»**

Защита диссертации состоится «16» сентября 2026 года в 13-00 на заседании  
диссертационного совета 24.2.365.01 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 года.

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

**Петров Я. А.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Региональная сеть операционно-логистических центров (РСЛЦ) включает территориально распределенную систему разнородных складских комплексов, операционных центров, перегрузочных терминалов и характеризуется значительным территориальным охватом и сложным содержательным функционированием. Такая сеть функционирует как территориальная система: она испытывает влияние природных, техногенных, инфраструктурных и социальных факторов геосреды и одновременно сама изменяет прилегающую территорию за счет транспортной, энергетической, эксплуатационной и антропогенной нагрузки.

Поддержание ее целостности и устойчивого функционирования требует непрерывного охранного мониторинга местности (ОММ). Важным элементом ОММ является геосенсорная территориально распределенная платформа (ГТРП). Эта киберфизическая платформа включает пространственно локализованные средства наблюдения и обнаружения (геосенсоры), связи, питания, элементы инженерно-технических средств охраны (ИТСО), состояние которых зависит от размещения и воздействий окружающей среды.

Существующие модели представления обстановки в технической подсистеме (ТПС) ОММ недостаточно учитывают геоспецифику функционирования РСЛЦ. В них слабо формализованы территориальная неоднородность условий, пространственные отношения между объектами, ситуационно-тактические ограничения, двойственный характер антропогенных угроз и связь между факторами геосреды и техническим состоянием средств наблюдения.

Методы оценки и прогноза технического состояния, в основном представленные аппаратом предиктивной аналитики, ориентированы преимущественно на отдельные элементы системы. Они позволяют оценивать вероятность отказа или деградации конкретного технического средства, но без геоинформационного описания не учитывают пространственную значимость элемента, неоднородность территории, различия между зонами региональной сети логистических центров, доступность технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и влияние локальной геоситуации на восстановление. Кроме того, не позволяют производить комплексную оценку и прогнозирование состояния ОММ РСЛЦ и не поддерживают выработку пространственно-содержательных управленческих директив.

Выявлено общее противоречие между потребностью в совместном территориальном и предиктивном анализе состояния технической подсистемы ОММ и ограниченными возможностями существующих предиктивно-аналитических подходов, рассматривающих пространство, состояние и прогноз раздельно.

Требуют своего разрешения частные противоречия, которые состоят в отсутствии:

– геоинформационного модельного аппарата представления обстановки в системе охранного мониторинга региональной операционно-логистической сети как зависимости характеристик ее состояния от пространственно-временных показателей процессов на территории;

– геоинформационного ситуационно-предиктивного методического аппарата оценки и формирования пространственно-содержательных рекомендаций по поддержанию функциональной и пространственно-структурной целостности территориально распределенных объектов ОММ РСЛЦ.

Актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью разработки геоинформационного модельно-методического аппарата представления, анализа и регулирования технической готовности (ТГ) ОММ, в котором элементы ТПС ОММ задаются как геообъекты с пространственным и атрибутивным содержанием, а текущая оценка обстановки, прогноз ухудшения состояния ТПС и рекомендации по контролю и ТО формируются с учетом пространственно-содержательных характеристик, отношений между элементами системы и влиянием факторов природной, техногенной и социальной геосреды.

**Объект исследования:** территориально распределённая геосенсорная платформа охранных мониторингов местности.

**Предмет исследования:** модельно-методический аппарат геоинформационной поддержки анализа и регулирования пространственно-структурной и функциональной целостности

охранных мониторингов территориально-распределенной сети логистических центров на основе предиктивно-аналитического подхода.

**Цель диссертационного исследования:** разработка геоинформационного модельно-методического аппарата представления и оценки состояния технической подсистемы геосенсорной платформы территориально-распределенных охранных мониторингов региональной логистической сети на основе ситуационно-предиктивного подхода.

**Задачи исследования:**

1. проанализировать назначение, задачи, состав, структуру, архитектуру, а также специфику ОММ РСЛЦ и выявить ограничения регламентного управления ТОиР и контроля в условиях территориальной неоднородности;

2. разработать геоинформационную модель обстановки технической подсистемы ОММ РСЛЦ, представляющую объекты, зоны, события и факторные воздействия как множество геообъектов и отношений в координатном и признаковом пространствах;

3. разработать геоинформационную ситуационно-предиктивную методику оценки и прогнозирования состояния геосенсорной платформы и ИТСО, обеспечивающую формирование пространственно-содержательных рекомендаций по контролю и ТОиР;

4. разработать геоинформационную программную методику расчета и отображения контроллинговых предписаний по поддержанию ТГ ОММ РСЛЦ для оценки эффективности модельно-методического аппарата и выработки практических рекомендаций.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Геомодель обстановки в территориальной системе охранных мониторингов региональной сети логистических центров.

2. Геоинформационная ситуационно-предиктивная методика оперативной оценки и прогнозирования обстановки в системе охранных мониторингов региональной логистической сети.

**Новизна научных результатов:**

1. Геомодель обстановки в ОММ РСЛЦ дополнительно содержит пространственные компоненты, которые позволяют наращивать аналитические и описательные возможности традиционных предиктивных моделей за счет пространственно-атрибутивной структуры, расширенного территориального состава и аналитического описания процессов эксплуатации ОММ в неоднородной динамической геосреде, что обеспечивает возможности точного оперативного прогнозирования технического состояния ГТРП и эксплуатации территориально-распределенных объектов ОММ РСЛЦ.

2. Геоинформационная ситуационно-предиктивная методика отличается определением текущей и прогнозной оценок состояния технической подсистемы на основе ситуационно-предиктивного аппарата, возможностью формирования пространственно-содержательных рекомендаций по контролю и ТОиР. Методика позволяет строить геоизображения прогнозного ухудшения состояния, формировать ранжированные списки геообъектов по вероятности отказа, а также вырабатывать адресные решения по поддержанию и контролю функциональной и пространственно-структурной целостности ОММ РСЛЦ.

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии научно-методических основ геоинформационного моделирования и геоконтроллинга территориально распределенных систем охранного мониторинга местности за счет интеграции методов пространственного анализа и предиктивной аналитики.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что результаты доведены до машинных методик, алгоритмов и программ и могут служить основой для разработки технических заданий на новые ГИС-продукты. По результатам верификации обеспечено повышение качества определения текущих и прогнозных оценок технического состояния ОММ РСЛЦ на горизонтах 7 и 14 суток на 12% и 10% соответственно, сокращение времени выявления отказов на 8%, уменьшение продолжительности выездного обслуживания на 10% за счёт оптимизации маршрутов ТОиР с учётом доступности объектов и условий прохождения маршрутов.

**Методы исследования.** При проведении диссертационного исследования использовались методы формальной аксиоматической логики, теории функциональных систем, системного анализа, теории случайных процессов, картографического синтеза, теории вероятности и

математической статистики, математического моделирования, теории множеств, теории управления, сетевого анализа, численного анализа, теоретической географии и геоинформатики.

Методологическую базу исследования составили труды ведущих ученых: Алаева Э.Б., Андреевой Е.А., Байкова Е.А., Берлянта А.М., Биденко С.И., Бунге В., Бурлова В.Г., Вагизова М.Р., Гарсиа М., Гуссейн-Заде С.М., Дмитриева В.В., Душкина А.В., Евтушенко Ю.Г., Завгороднего В.Н., Истомина Е.П., Лисицкого Д.В., Лурье И.К., Малинина В.Н., Малыгина И.Г., Новикова В.В., Охорзина В.А., Палюха Б.В., Перцика Е.Н., Поповича В.В., Присяжнюка С.П., Саушкина А.В., Рябца А.Я., Соколова А.Г., Топчиева А.Г., Фрумина Г.Т., Царьковой Е.Г., Шаркова А.М.

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

**Соответствие паспорту специальности.** Область исследований соответствует пунктам 6, 20, 21 паспорта научной специальности 1.6.20 – «Геоинформатика, картография».

**Апробация и публикация результатов работы.** Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях (с публикацией в сборниках докладов):

- Научно-практическая конференция «Научно-технические проблемы и перспективы развития систем, комплексов и средств связи, управления и радиоэлектронной борьбы», г. Воронеж, 2026;

- Научно-практическая конференция «Научно-технические проблемы и перспективы развития систем и комплексов радиолокационного мониторинга, радиотехнической, звукометрической и тепловизионной разведки, технологий искусственного интеллекта и оптико-электронных систем», г. Санкт-Петербург, 2026;

- V международная научно-практическая конференция «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях», г. Санкт-Петербург, 2026;

- XVIII международная научно-практическая конференция «Государство и бизнес. Современные проблемы развития региональной экономики», г. Санкт-Петербург, 2026;

- XIV Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России» (ИБРР–2025), г. Санкт-Петербург, 2025;

- Международная научно-практическая конференция ИНФОГЕО 2025 «Единое геоинформационное пространство для обеспечения устойчивого развития регионов: от сбора данных к интеграции», Санкт-Петербург, 2025;

- Международная научно-практическая конференции «Информатизация и техническое обеспечение УИС Российской Федерации: проблемы, решения и перспективы развития», г. Тверь, 2021;

- Научно-практической конференции с международным участием «Пенитенциарная безопасность: национальные традиции и зарубежный опыт», г. Самара, 2021;

- Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», г. Воронеж, 2021.

Основные результаты работы **опубликованы** в 13 научных статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, включая IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, индексируемого в Web of Science (CPCI). Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ: 2020619844 «Бастион» – учет и анализ технического состояния инженерно-технических средств охранных мониторингов местности; 2024663590 "DATA MINING STUDIO" – программная платформа интеллектуального анализа данных.

**Результаты работы внедрены:** в АО «КБ НАВИС» в 3-й этап НИР «Развитие-ГЛОНАСС»; в НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА» во 2-й этап НИР «Аналитика»; в АО «ГНИНГИ» в НИР «Ветер»; в АО «Радар ММС» в ОКР «Создания комплекса средств магнитной съемки»; в АО «НПО «Импульс» в НИР «А-Монитор»; а также в учебный процесс

ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», кафедры компьютерной безопасности и математических методов управления при изучении дисциплины «Аналитика больших данных»; в учебный процесс ФГКВУ ВО «Военная ордена Жукова академия войск национальной гвардии РФ», кафедры военно-научных исследований при изучении дисциплин «Информационные технологии в науке и образовании», «Предметное содержание выбранной научной отрасли»; в учебный процесс ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)», военно-учебного центра СПбГЭТУ при изучении дисциплины «Тактической и тактико-специальной подготовки»; в учебный процесс ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», кафедры прикладной информатики при изучении дисциплины «Создание геоинформационной системы»; в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», кафедры экологической безопасности телекоммуникаций при изучении дисциплин «Геоинформационные системы в экологии и природопользовании», «Математические методы в экологии и природопользовании», «Техногенные системы и экологический риск».

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

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы. Диссертационная работа содержит 166 страниц машинописного текста, 79 рисунков, 23 таблицы. Список литературы включает 151 наименование.

### Содержание работы

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

В **главе 1** выполнен пространственно-содержательный анализ состава и структуры охранных мониторингов местности, их технической и сенсорной составляющих, связи с внешней средой, существующего модельно-методического аппарата анализа и прогнозирования технического состояния ОММ РСЛЦ. Установлено:

1. ОММ РСЛЦ представляют собой сложную многоуровневую территориально распределенную иерархическую геосистему (рис. 1), элементы которой размещаются, функционируют, взаимодействуют и обслуживаются в границах конкретного района.



Рисунок 1 – Иерархическая пространственно-функциональная структура сети региональных операционно-логистических центров и технической подсистемы охранного мониторинга

Территориальность системы ОММ выражается в географической локализации объектов относительно поверхности Земли, значительном территориальном распределении, пространственными связями и территориальными отношениями между ее собственными элементами и другими объектами, явлениями окружающего мира. ОММ испытывают

воздействие природных, техногенных, социальных факторов геосреды. Одновременно РСЛЦ как контролируемые объекты сами изменяют территориальную обстановку: создают транспортную, энергетическую и антропогенную нагрузку, формируют режимные зоны, ограничения доступа, участки повышенной криминогенной напряженности.

Территориальные объекты системы ОММ обладают динамичным характером распространения за счет перемещения обслуживающих групп, логистических потоков РСЛЦ, изменения зон действия технических средств. Свойство территориальности ОММ обуславливает необходимость применения особого геопространственного модельно-методического аппарата для анализа системы в целом и ее технических элементов.

2. Система контроля РСЛЦ, в отличие от обычных охранных мониторингов местности, является территориальным объектом гибридной уязвимости и подвергается деструктивным воздействиям не только внешней среды, которыми являются внешние нарушители, природные и техногенные факторы, но и внутренних антропогенных – некомпетентности персонала, умышленных злонамеренных действий, саботажа, порчи имущества, правонарушений (рис. 2).



Рисунок 2 – Примеры воздействия антропогенных факторов геосреды на ОММ РСЛЦ

3. Целостность ОММ в значительной мере определяется состоянием ее технической подсистемы. В структуре ОММ она образует базовый материально-сенсорный уровень, обеспечивающий обнаружение, наблюдение, первичную обработку сигналов и поддержание наблюдательного покрытия. К данной подсистеме относятся сенсоры, средства наблюдения и контроля, каналы связи, электроснабжения, элементы ИТСО и устройства локальной обработки данных. Отказ или деградация этих элементов приводит к нарушению пространственного покрытия, снижению достоверности обстановки и потере устойчивости ОММ как территориальной системы. Без ТПС невозможны обнаружение, наблюдение, передача данных, актуализация геодемии, оценка состояния и прогноз.

4. В составе технической подсистемы ОММ выделена геосенсорная территориально распределенная платформа как функциональная «категория» (рис. 3).



Рисунок 3 – Состав и структура геосенсорной территориально распределенной платформы

Ее особенность состоит в возможности изменения состава средств наблюдения под задачу, район и текущую обстановку. За счет единых интерфейсов в состав платформы могут включаться стационарные, мобильные, БПЛА-носители геосенсоров, а также видеосенсоры, сейсмо- и вибросенсоры, тепловизионные, радиолокационные, акустические, метеорологические и экологические датчики.

Геоконтроллинговая составляющая ГТРП реализуется через модули распознавания, классификации событий и выявления аномалий и признаков нештатной активности, предпосылок нарушений. По результатам оценки обстановки и прогноза ОММ может изменять режимы работы, уточнять границы контролируемых зон, назначать участки донаблюдения, подключать мобильные средства и повышать частоту получения данных.

Это позволяет рассматривать ГТРП как адаптируемую геосенсорную основу ОММ, обеспечивающую оперативное пополнение геодезии, предупреждение нарушений, оценку состояния и поддержку решений по сохранению технической готовности ОММ РСЛЦ.

5. Важнейшим элементом платформы являются геосенсоры. Выявлена тройственная сущность системы геосенсоров мониторинга (рис. 4). Они выступают в качестве:

1. Объекта ОММ – как средства обнаружения нарушителей, деструктивных элементов.
2. Субъекта ОММ – как элементов технического функционала, требующих контроля их технического состояния, оценки и прогнозирования их работоспособности.
3. Средства наблюдения за окружающей средой и измерения физических полей Земли (ФПЗ).

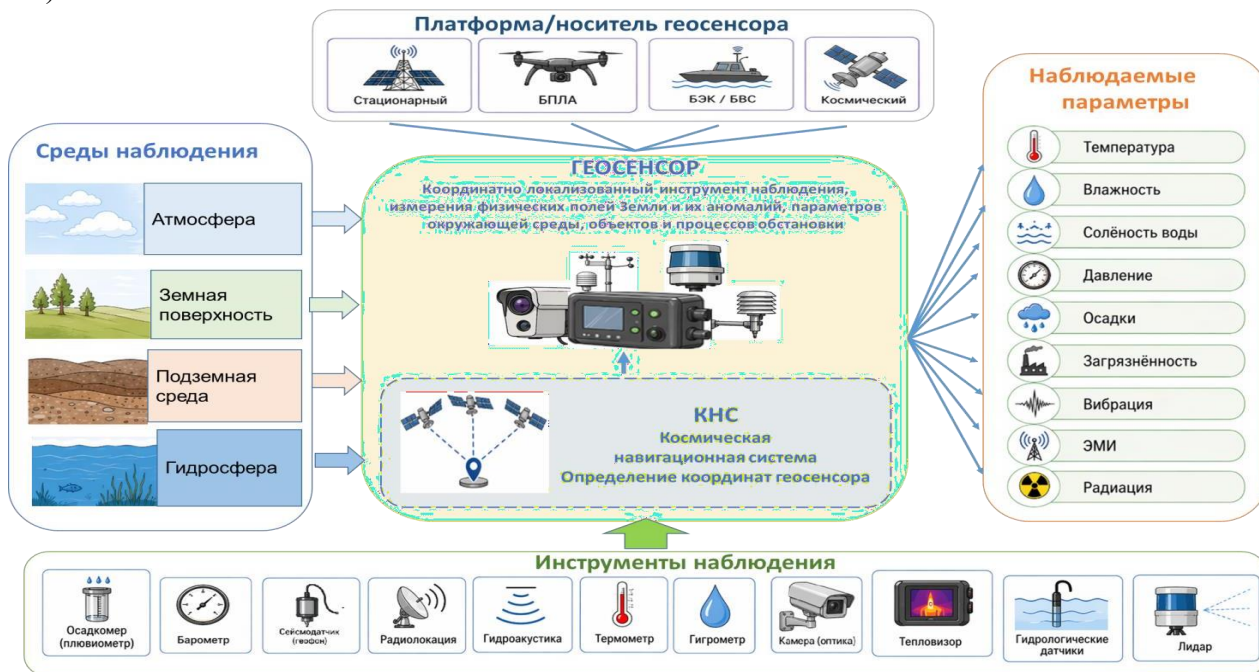


Рисунок 4 – Структурная схема геосенсора как средства измерения параметров геосреды

6. Определены группы факторов, которые влияют на функционирование мониторингов: природно-климатические; техногенные; социальные; географо-территориальные; эксплуатационно-технические.

7. Существующие модели описания технической готовности не учитывают территориальную специфику ОММ, связи между геообъектами, пространственный характер отношений, воздействие факторов среды (табл. 1).

Таблица 1. Результаты анализа существующего модельного аппарата представления, оценки и прогнозирования состояния ОММ РСЛЦ

Группа моделей	Конкретные модели	Ограничение
Нормативно-диагностические	модели работоспособности и отказа; диагностические признаки; пороговые и логические правила контроля	описывают категории состояния, но не учитывают его пространственную локализацию
Надёжностные, ресурсно	интенсивности отказов и восстановлений; коэффициент готовности; MTBF, MTTR, MTF;	дают объектную или усреднённую оценку надёжности и ресурса, но не описывают переходы между

	экспоненциальная, логнормальная модели; ресурсные зависимости	состояниями и не связывают результат с зонами ЛЦ и ячейками покрытия
Стохастические, обучаемые, прогнозные	непрерывные цепи Маркова; уравнения Колмогорова; байесовские сети; модели деградации и RUL; Random Forest; градиентный бустинг; LSTM;	описывают отказ и прогноз ухудшения, но в базовом виде применяются к отдельному объекту или подсистеме
Пространственные, имитационные	модели покрытия и размещения узлов; ячеечные и зональные модели; графы связности и маршрутов ТОиР; сети Петри; дискретно-событийные модели; ГИС-модели и цифровые двойники	описывают пространственную структуру, связи, покрытие и логистику обслуживания, но сами по себе не дают модели технической деградации и прогноза состояний ТПС ОММ РСЛЦ

8. Традиционно-используемые методы анализа и прогнозирования состояния технических средств ОММ, основным из которых является метод предиктивной аналитики применяются только для отдельных элементов оборудования, а также не отвечают требованиям учета влияния факторов внешней и внутренней окружающей среды (табл. 2).

Таблица 2. Результаты анализа основных методов оценки и регулирования ТГ ОММ РСЛЦ

Подход	Применяемые методы	Ограничение
Периодический контроль и диагностика	регламентные осмотры и функциональные проверки; контрольные измерения; пороговый контроль; экспертная диагностика	Текущая оценка состояния и явных отклонений; не даёт прогноза
Обслуживание по состоянию (СВМ)	condition monitoring; трендовый анализ; индекс технического состояния; оценка по показателям надёжности; регрессионное уточнение состояния	Учитывает фактическое состояние и сокращает работы; ограничено уровнем отдельного объекта
Предиктивная диагностика / PdM	прогнозирование и оценка RUL (остаточный ресурс); анализ временных рядов; байесовское обновление (цепи состояний); методы ML (машинное обучение): логистическая регрессия, деревья решений, случайный лес, градиентный бустинг, SVM, kNN, ANN, LSTM, автоэнкодеры, Isolation Forest	Обеспечивает прогноз ухудшения состояния и формирование упреждающих воздействий; не переводит прогноз в территориальную оценку
Интеллектуальная поддержка решений по ТОиР	анализ критичности; многокритериальное ранжирование; выбор мероприятий при ограничениях по ресурсам (задача о ранце); назначение исполнителей (задача о назначениях); маршрутизация ТОиР	Выбор работ, приоритетов и маршрутов; без ГИС не учитывает структуру территории, отношения между геообъектами

Таким образом, выявлен проблемный вопрос, связанный с необходимостью интеграции геоинформационных методов с аппаратом предиктивного анализа для решения вопроса адекватной оценки и прогнозирования состояния, а также формирования территориально-содержательных рекомендаций по поддержанию технической готовности ТПС ОММ РСЛЦ.

Задача исследования – построение трех последовательных отображений множества геопространственных данных о ситуации и территориальной активности в ОММ РСЛЦ (рис. 5).

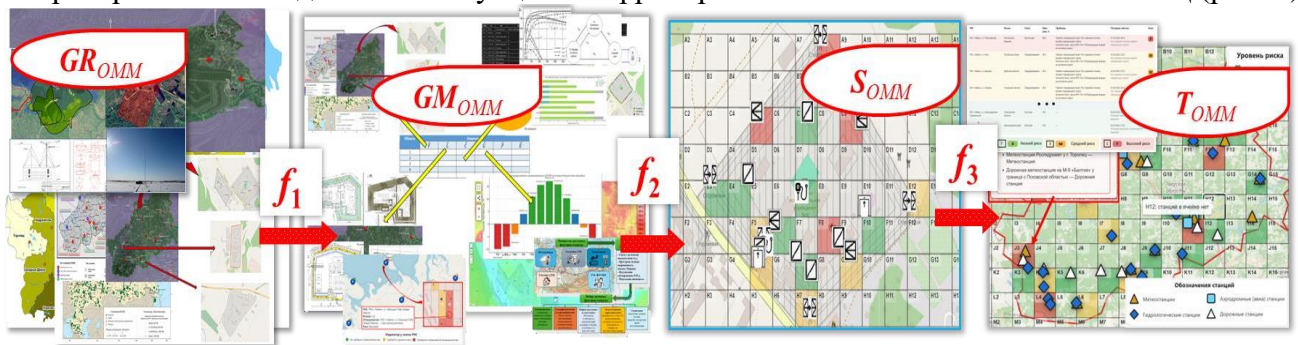


Рисунок 5 – Иллюстрация схемы постановки задач:  $GR_{ОММ}$  – реальная геоситуация, оперативные данные об обстановке в системе ОММ;  $GM_{ОММ}$  – динамическая геомодель обстановки в системе ОММ;  $S_{ОММ}$  – оценка обстановки в системе ОММ;  $T_{ОММ}$  – пространственно-содержательные рекомендации по ТОиР;  $f_1$  – отображение обстановки  $GR_{ОММ}$  в геомодель ситуации  $GM_{ОММ}$ ;  $f_2$  – отображение геомодели  $GM_{ОММ}$  в оценку геоситуации ОММ  $S_{ОММ}$ ;  $f_3$  – отображение оценки обстановки  $S_{ОММ}$  в пространственно-содержательные рекомендации  $T_{ОММ}$  по поддержанию функциональной целостности ОММ

Отображения  $f_1, f_2, f_3$  реализуются с помощью модельно-методического аппарата, аналитических зависимостей и процедур математического и геопространственного описания, преобразования, отображения, оценочного анализа больших динамических массивов гидрометеорологической, ситуационной геоинформации с использованием инструментов, формализмов, процедур и методик хорологизации, топологизации, анаморфирования, генерализации, масштабирования, утрирования и других приложений геоинформатики.

В главе 2 исследована модель обстановки в территориальной системе охранных мониторингов региональной операционно-логистической сети. Геомодель ОММ формализуется через представление ее структуры, состава и содержания и вводится через описание геообъектов (ГО) ОММ и отношений над ними.

Структура геомодели обстановки в территориальной системе ОММ  $GM_{ОММ}$  представляется как множество ее геообъектов  $Gobj_{ОММ}$  (географических, хозяйственных) с определенными над ними отношениями упорядоченности  $Rel_{ОММ}$ . В отличие от известных описаний структур  $GM_{ОММ} = (S_{Gobj_{ОММ}}, S_{Rel_{ОММ}}), S_{Gobj_{ОММ}} \subset (R^m, S^n), m = \bar{2}, \bar{3}, n \gg m$ , где  $S_{Gobj_{ОММ}}$  – множество ГО ОММ;  $S_{Rel_{ОММ}}$  – множество отношений пространственной и содержательной упорядоченности над ГО ОММ, введены и исследованы:

1) дополнительные классы специфических ГО (рис. 6) – элементы территориально-распределенной технической подсистемы ОММ, ГТРП, отдельные логистические центры (ЛЦ), периметры, КПП, складские и погрузочно-разгрузочные зоны, контроллеры, узлы связи и электропитания, кабельные трассы, которые являются субъектами и объектами окружающей геосреды. Отдельное место занимают геосенсоры. Они рассматриваются как пространственно локализованные источники данных, регистрирующие параметры земной поверхности и возмущения ФПЗ на контролируемой территории: оптического, теплового, акустического, вибрационного, сейсмического, электромагнитного и иных проявлений обстановки. Через геосенсоры события на территории ЛЦ переводятся в координатно привязанные признаки геомодели. Геосенсорам приписано не только функционал контроля целостности РСЛЦ, но и наблюдение и измерение ФПЗ.



Рисунок 6 – Виды, группы и отдельные ГО ОММ РСЛЦ

Описаны такие специфические свойства нового класса ГО как: а) характеристики собственного пространства  $Gobj_{ОММ}$  – топологически не связанное пространство размещения и зон действия ГТРП ОММ, динамические параметры территориальной локализации акторов «нарушитель» и «мобильная группа тех. обслуживания»; б) характеристики многомерного пространства признаков (МПП)  $Gobj_{ОММ}$  – описание эндо- и экзо- угроз функциональной целостности РСЛЦ, тройственность характеристик ГТРП как средства обнаружения деструктивных элементов, как субъекта ТОиР и как средства наблюдения и измерения ФПЗ. В отличие от обычного технического объекта, такой  $Gobj_{ОММ}$  содержит геоинформационные

динамические параметры эксплуатации: периодичность контроля, продолжительность ТО, очередность обслуживания и маршрут ТОиР.

Определена системообразующая роль ОММ – обеспечение и поддержание пространственно-структурной и функциональной целостности РСЛЦ за счет наблюдения, контроля, оценки состояния и своевременного восстановления возможностей своих структурных подсистем. Таким образом, выражения для описания параметров ГО  $G_{obj_{OMM}}$  представляются следующим образом:

$$GS_{G_{obj_{OMM}}} = \{G_{obj_{OMM}_i} = (o_i, Att_i)\}, i = \overline{1, n} \quad (1)$$

$$G_{obj_{OMM}} : S_{G_{obj_{OMM}_i}} \rightarrow R^m, Att_i : S_{G_{obj_{OMM}_i}} \rightarrow S^n.$$

где:  $o_i$  – пространственная компонента ГО (ПКГО);  $Att_i$  – атрибутивно–содержательная компонента ГО (АСКГО), отражающая технические параметры, характеристики, ресурс, состояние. ПКГО  $o_i$  задается выражением:

$$o_i = (Loc_i, Geom_i, Trj_i), \quad (2)$$

где:  $Loc_i$  – координаты центра ГО в системе геодезии;  $Geom_i$  – размеры и форма пространственного охвата ГО;  $Trj_i$  – отражает изменение положения, формы и размеров ГО во времени. Состав АСКГО  $Att_i$  определяется следующим выражением:

$$Att_i = (Tech_i, Rs_i, Stat_i, Serv_i), \quad (3)$$

где:  $Tech_i$  – технические характеристики объекта (тип, модель, параметры чувствительности, производитель);  $Rs_i$  – ресурсные характеристики (остаточный ресурс, наработка на отказ, регламентный срок эксплуатации);  $Stat_i$  – текущее техническое состояние (исправен, частично работоспособен, отказ);  $Serv_i$  – эксплуатационно-обслуживающие характеристики (даты и результаты обслуживания, ремонтов, замен).

2) опциональная группа отношений оценочной упорядоченности (отношения оценки). Известные отношения пространственной  $R_{spat}$  и содержательной  $R_{sem}$  упорядоченности решают задачи оценки геоситуации опосредованно через анализ отдельно собственного пространства ГО и его МПП. Это требует последовательного отражения факторов обстановки и препятствует представлению геоситуации и ее оценки в целом. Оценочные отношения  $E_{subj}$  ориентированы на прямой синтез оценки геоситуационных классов «свои», «противник», «среда» (табл. 3).

Таблица 3 – Опциональная группа - оценочные отношения в структуре операций пространственно-содержательного упорядочения

Оценка пространства	Оценка содержания	Оценка целостности ОММ
достаточность пространственного покрытия	техническая готовность ИТСО	сохранение наблюдаемости зоны
плотность размещения технических средств	исправность, деградация, отказ, скрытый отказ	связность сенсорно-коммуникационного контура
топологическая целостность – наличие разрывов наблюдательного покрытия	актуальность диагностических данных	возможность передачи события в контур обработки
перекрытие зон обзора и обнаружения	остаточный ресурс и наработка	функциональная устойчивость ОММ – способность решать штатные задачи
доступность участка для контроля	качество связи и эл. питания	структурно-пространственная устойчивость ОММ – устойчивость к отказам отдельных элементов
сервисно-территориальная достижимость объекта	статус события и обработки	полнота данных для оценки обстановки – необходимость и достаточность dataset

Использование только отношений пространственно-содержательной упорядоченности позволяют лишь опосредованным образом решать задачу структурирования множества ГО в аспекте анализа обстановки. Требование выполнения прямой оценки обстановки обуславливается центральной ролью категории обстановка в системе геоинформационной поддержки управления территориальными объектами и системами. И, таким образом, предлагаемая система отношения упорядочения строится следующим образом:

$$S_{Rel} = \{R_{spat}, R_{sem}, E_{subj}\}, \quad (4)$$

где  $R_{spat}$  – (англ. – spatial Relations) отношения пространственной упорядоченности (ОПУ), обуславливают территориальную структуру геопространства для выражения содержания геообъектов и служат основой пространственного анализа геоситуации;  $RS_c$  – (англ. – semantic Relations) отношения (предикаты) семантической, содержательной упорядоченности (ОСУ), определяют многомерное пространство признаков, и служат для тематической характеристики горизонтальной составляющей геопространства;  $E_{subj}$  – (англ. – subjective evaluations) субъективные оценочные отношения.

Состав геомодели  $GM_{OMM}$  представляется следующим кортежем множеств векторов параметров составных элементов геоситуации в OMM РСЛЦ (рис. 7):

$$GM_{OMM} = (F^{\rightarrow}, L^{\rightarrow}, G^{\rightarrow}, C^{\rightarrow}, A^{\rightarrow}, E^{\rightarrow}, K^{\rightarrow}, T^{\rightarrow}, S^{\rightarrow}) \quad (5)$$

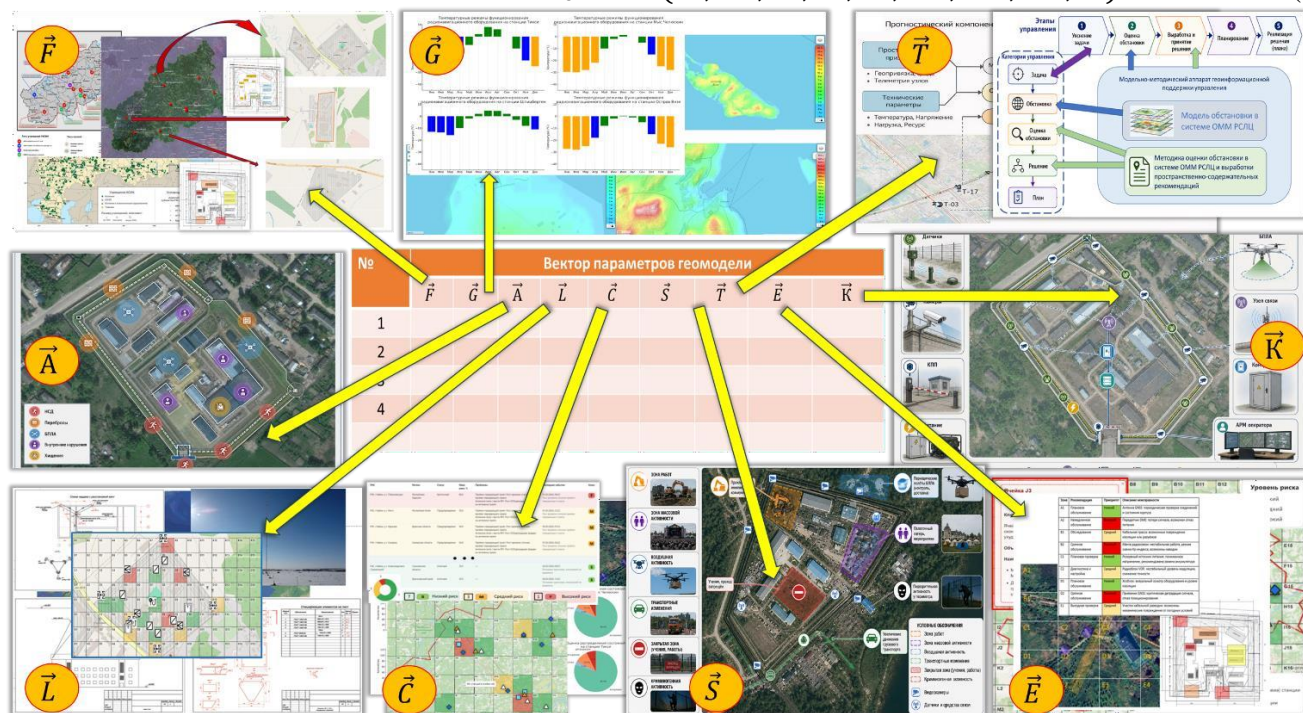


Рисунок 7 – Состав геомодели обстановки в OMM:  $F^{\rightarrow}$  – параметры территориально-сетевой организации;  $L^{\rightarrow}$  – параметры локального размещения технических средств;  $G^{\rightarrow}$  – параметры окружающей среды;  $C^{\rightarrow}$  – параметры технического состояния ИТСО;  $A^{\rightarrow}$  – параметры внешних и внутренних антропогенных воздействий;  $E^{\rightarrow}$  – параметры операционно-событийного компонента обстановки;  $K^{\rightarrow}$  – параметры киберфизической геосенсорной платформы;  $T^{\rightarrow}$  – параметры контроллинговой обстановки;  $S^{\rightarrow}$  – ситуационно-тактические параметры обстановки

Наряду с традиционными географическими параметрами такими как топография, климат, гидрография суши, растительность, инфраструктура, в множество векторов включены характеристики территориального распределения логистических центров  $F^{\rightarrow}$ , параметры киберфизической мониторинговой платформы  $K^{\rightarrow}$ , антропогенные факторы  $A^{\rightarrow}$ . А также контроллинговые  $T^{\rightarrow}$ , ситуационно-тактические  $S^{\rightarrow}$ , эксплуатационные  $E^{\rightarrow}$ , параметры локального размещения технических средств  $L^{\rightarrow}$ .

Формирование структуры и состава геомодели позволило перейти к строго математическому исследованию формальных зависимостей, характеризующих техническую готовность средств OMM в условиях воздействий внешней среды.

Содержание геомодели передается через ее: параметрическое описание связей компонентов модели, которые отражают влияние факторов геосреды; аналитические зависимости, являющиеся формальным описанием переменных, характеризующих техническую готовность оборудования OMM.

В аналитическую составляющую разработаны и включены подмодели, формально описывающие факторы геосреды, переходы технических состояний, адаптивные интенсивности переходов между техническими состояниями OMM на основе аппарата цепей Маркова. Подмодель описания обстановки в ТПС OMM РСЛЦ передает три основных состояния объекта – готовность, обслуживание, скрытый отказ и интенсивности переходов между ними (рис. 8).

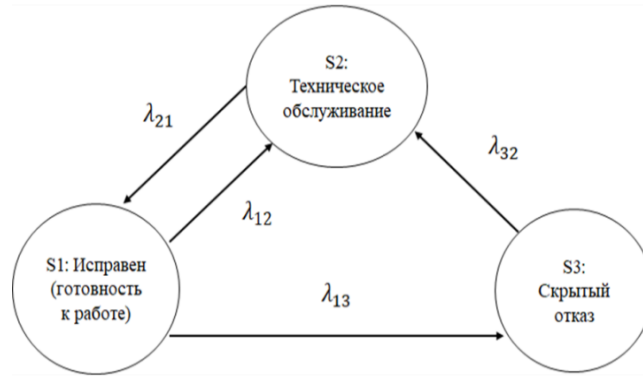


Рисунок 8 – Графовое представление переходов между состояниями ТПС ОММ РСЛЦ;  $S_1$  – работоспособное состояние;  $S_2$  – выявленный отказ, обслуживание;  $S_3$  – скрытый отказ;  $\lambda_{13}$  – геозависимая интенсивность отказов;  $\lambda_{12}, \lambda_{32}$  – интенсивность диагностирования;  $\lambda_{21}$  – интенсивность восстановления

Динамика изменения вероятности нахождения системы в одном из состояний описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda(t) + \frac{1}{\tau_{TO}})P_1(t) + \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{TO}}P_1(t) - \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t) + \frac{1+\lambda_i(t)\tau_{TO}}{1+\lambda_i(t)\tau_{TO}}P_3(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda(t)P_1(t) - \frac{1+\lambda_i(t)\tau_{TO}}{1+\lambda_i(t)\tau_{TO}}P_3(t). \end{cases} \quad (6)$$

Для системы (6) используется нормирующее условие  $P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1$ . Начальные условия задаются выражениями:

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = 0. \quad (7)$$

Целевое состояние системы – это состояние  $S_1$  исправен (готов к работе). Для его достижения необходимо подобрать оптимальные периодичность и длительность технического обслуживания. Для этого решена задача получения оптимального управления как экстремума вероятности нахождения в отказовых состояниях с учетом ограничений на управление:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= P_1(t), \quad x_2(t) = P_2(t), \quad x_3(t) = 1 - x_1(t) - x_2(t), \\ u(t) &= \frac{1}{\tau_{TO}}, \quad \mu = \frac{1}{\tau_{TO}}, \quad t \in [0, T]. \end{aligned} \quad (8)$$

$$I(u) = \int_0^T e^{-\delta t} [M_1(1 - x_1(t) - x_2(t)) + M_2 u^2(t)] dt \rightarrow \min, \quad (9)$$

Описание зависимостей для минимизации основано на принципе максимума Понтрягина. Определены геозависимые интенсивности отказов для последующего их адаптивного моделирования, что составляет особенность предложенного ситуационно-предиктивного подхода. Итоговая краевая задача принципа максимума Понтрягина имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -(\lambda_i(t) + u(t))x_1(t) + \mu x_2(t), \quad t \in [0, T], \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{1}{\lambda_i(t)} u^2(t)x_1(t) - (\mu + u(t) + \frac{u^2(t)}{\lambda_i(t)})x_2(t) + (\frac{u(t)}{\lambda_i(t)} + 1)u(t), \\ \psi_1(t) &= -\frac{\partial H(t, x, \psi, u)}{\partial x_1} = -e^{-\delta t} + (\lambda_i(t) + u(t))\psi_1(t) + \frac{u^2(t)}{\lambda_i(t)}\psi_2(t), \\ \psi_2(t) &= -\frac{\partial H(t, x, \psi, u)}{\partial x_2} = -e^{\delta t} - \mu\psi_1(t) + (\mu + u(t) + \frac{u^2(t)}{\lambda_i(t)})\psi_2(t), \end{aligned} \quad (10)$$

$$u^*(t) = \begin{cases} Y_{min}, & \text{при } \hat{u}(t) < Y_{min}, \\ \hat{u}(t), & Y_{min} \leq \hat{u}(t) \leq Y_{max}, \\ Y_{max}, & \text{при } \hat{u}(t) > Y_{max}, \end{cases} \quad (12)$$

с граничными условиями:

$$x_1(0) = X_1, x_2(0) = X_2, \psi_1(T) = \psi_2(T) = 0, \quad t \in [0, T], i = \bar{1}, \bar{n}. \quad (13)$$

Для учета стохастического характера факторов, отраженных в геомодели и оказывающих влияние на работоспособность ТПС ОММ реализован адаптивный подход для расчета значений геозависимой интенсивности отказов, который состоит во включении аппарата искусственных

нейронных сетей при учете параметров модели. Предложены два агрегированных нормированных признака, формируемые по совокупности факторов  $G_i(t)$ :

$$x_j^{(G)}(t) = \phi_j \left( \frac{G_i(t)}{n_i} \right), j = 1, 2, i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

где  $\phi_j$  — функция нормализации/агрегации. Нейросетевая аппроксимация интенсивности  $\lambda_i(t)$  задается выражениями:

$$g_1(t) = G_1 \left( \sum_{j=1}^2 \omega_{1j}(t) x_j^{(G)}(t) - \psi_1 \right), \quad (15)$$

$$g_2(t) = G_2 \left( \sum_{j=1}^2 \omega_{2j}(t) x_j^{(G)}(t) - \psi_2 \right), \quad (16)$$

$$\lambda_i(t) = G_0(\omega_{01}(t)g_1(t) + \omega_{02}(t)g_2(t) - \psi_0), \lambda_i(t) \geq 0, \quad (17)$$

где  $\omega_{kj}(t)$  весовые коэффициенты ИНС,  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  параметры сдвига,  $t \in [0, T]$ .



Рисунок 9 – Последовательность формирования геоавтономной интенсивности отказов для матрицы переходов состояний для оценки состояния ОММ

Также определены параметры геомодели, участвующие в формировании входных признаков нейросетевой адаптивной подмодели для построения интенсивности отказов – в условиях полноты данных о состоянии объекта (рис. 9).

Для условий неполноты данных разработана и введена скрытая Марковская подмодель при неполной наблюдаемости состояния, в которой состояние ГО рассматривается как скрытая переменная, а наблюдаемыми являются последовательности диагностических, событийных, инфраструктурных и пространственно-эксплуатационных признаков. Наблюдение в СММ задается как совокупность признаков, зарегистрированных для  $i$ -го ГО «ГТРП» на момент контроля. Определен полный перечень внешних наблюдательных признаков для определения скрытых состояний технической подсистемы ОММ (рис. 10).



Рисунок 10 – Переменные величины наблюдений состояния системы ОММ

Для оценки параметров скрытой Марковской сети применяется алгоритм Expectation–Maximization (EM, ожидание–максимизация), в котором по наблюдаемым данным последовательно уточняются оценки скрытых состояний и параметров модели. Для разработанных подмоделей эта процедура реализуется алгоритмом Баума-Велша, используемым для оценки вероятностей переходов и параметров наблюдаемого процесса. Предложено формальное описание вероятностей нахождения в одном из скрытых состояний:

$$X_i(t) \in E = \{S^0, S^1, S^2\}, \quad (18)$$

$$Y_i(t) = (O_{i1}(t), O_{i2}(t), \dots, O_{im}(t)), \quad (19)$$

$$Z_i(t) = [A_i(t), G_i^{env}(t), E_{subj}_i], \quad (20)$$

где:  $X_i(t)$  – скрытые технические состояния  $i$ -го элемента ТПС ОММ;  $Y_i(t)$  – вектор наблюдений для оценки состояния;  $Z_i(t)$  – вектор условий перехода ГО между состояниями, включающий атрибутивные параметры объекта, факторы геосреды и оценочные показатели, полученные из его пространственно-содержательных отношений. Предполагается, что истинная последовательность состояний не наблюдается напрямую, а оценивается вероятностно по данным  $Y_i(1: T)$ . Результатом расчета является апостериорное распределение вероятностей скрытых состояний:

$$\alpha_i(t) = [P(S_0 | Y_i(1: t)), P(S_1 | Y_i(1: t)), P(S_2 | Y_i(1: t))]. \quad (21)$$

Здесь  $P(S_0 | Y_i(1: t))$  – вероятность работоспособного состояния при имеющихся наблюдениях;  $P(S_1 | Y_i(1: t))$  – вероятность деградации;  $P(S_2 | Y_i(1: t))$  – вероятность скрытого отказа. Сформированные вероятности состояний системы ОММ служат формальной основой для описания надежностных параметров ТПС ОММ, таких как среднее время между отказами, среднее время восстановления, коэффициент готовности.

Разработанные геомодельные представления позволили перейти непосредственно к решению задачи обеспечения технической готовности ТПС ОММ, то есть разработке методического аппарата работы.

В третьей главе разработана геоинформационная ситуационно-предиктивная методика оперативной оценки и прогнозирования обстановки в системе охранных мониторингов региональной операционно-логистической сети. Состав и структура обобщенной методики оценки обстановки в ТПС ОММ (рис. 11).

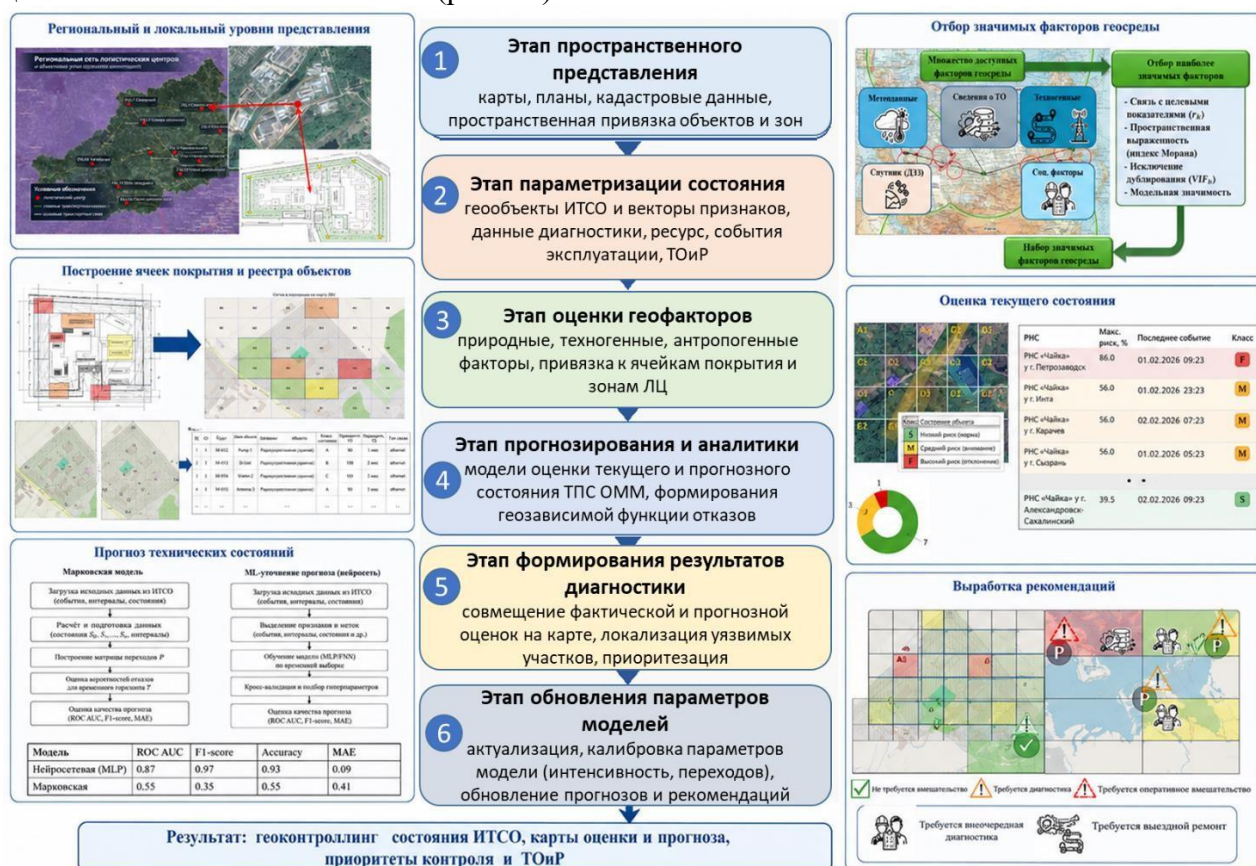


Рисунок 11 – Структура и состав обобщенной методики оценки обстановки в ОММ РСЛСЦ

Методика определяет взаимодействие составных процедур с внешними ситуационными данными и процессами и включает этапы: 1) пространственного представления; 2) параметризации состояния; 3) отбора значимых факторов геосреды; 4) анализа, оценки и прогнозирования состояния ТПС ОММ; 5) формирования пространственно-содержательных рекомендаций; 6) обновления значений параметров модели, расчет невязки.

В отбор значимых факторов геосреды входит:

1. Оценка связи параметров каждого фактора геосреды  $g_k$  с целевым показателем состояния  $y$  по коэффициенту корреляции:

$$r_k = \text{corr}(g_k, y). \quad (22)$$

2. Проверка пространственной выраженности фактора с использованием индекса пространственной автокорреляции Морана, показывающего наличие устойчивой территориальной структуры распределения значений:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (23)$$

где:  $n$  – количество геообъектов;  $x_i, x_j$  – значения переменной в ячейках  $i$  и  $j$ ;  $\bar{x}$  – среднее значение переменной по всей выборке;  $w_{ij}$  – вес в пространственной матрице весов между объектами  $i$  и  $j$  (соседство, общая граница, расстояние).

3. Исключение взаимно-дублирующих признаков по критерию мультиколлинеарности:

$$VIF_k = \frac{1}{1 - R_k^2}, \quad (24)$$

где  $R_k^2$  – коэффициент детерминации при регрессии  $k$ -го признака на остальные. Для признаков с высоким значением  $VIF$  сохраняется только один, наиболее интерпретируемый и физически значимый.

Главный этап методики – оценка состояния ТПС ОММ РСЛЦ с учетом воздействия деструктивной геосреды. Процедура базируется на разработанных модельных зависимостях технического состояния с учетом влияния факторов окружающей среды. Выбор подмодели для расчета вероятностей переходов между состояниями осуществляется согласно алгоритму, который учитывает полноту данных, отобранные значимые параметры, характеристики оцениваемых средств ОММ (рис. 12).

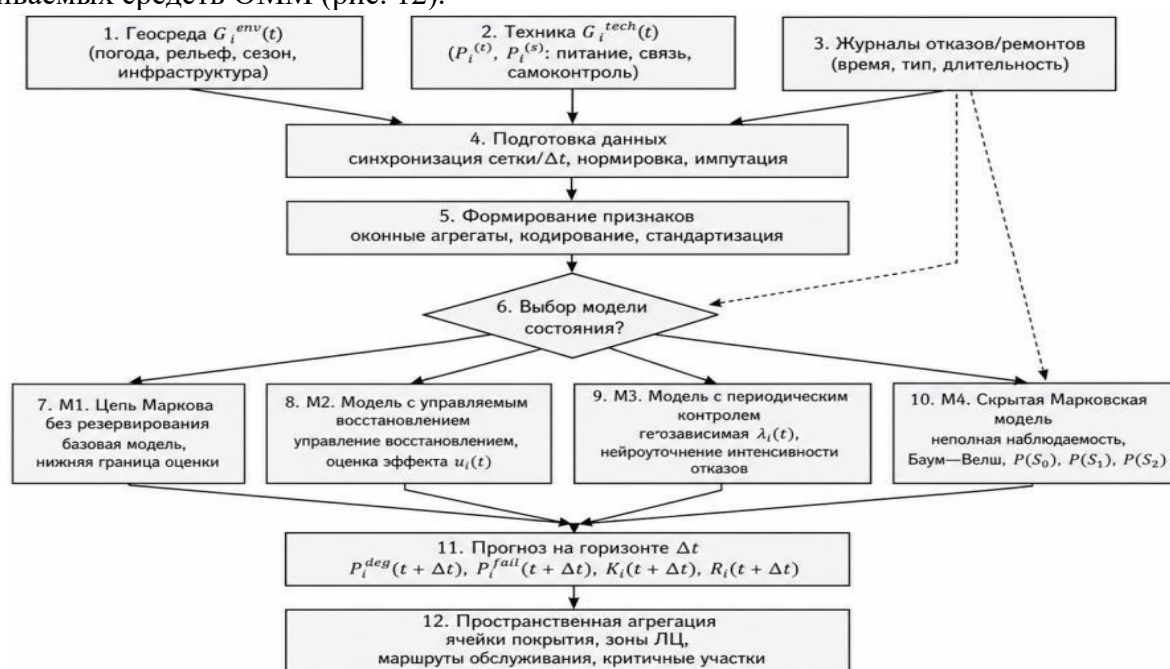


Рисунок 12 – Структура алгоритма выбора модели прогнозирования технического состояния геообъектов ОММ

При работе с Марковскими подмоделями вычисляются вероятности состояний:

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) \exp(Q_i(t) \Delta t), \quad (25)$$

где:  $p_i(t)$  – вектор вероятностей состояний геообъекта в момент времени  $t$ ;  $Q_i(t)$  – матрица интенсивностей переходов, параметризованная с учетом  $\lambda_i(t)$ , восстановления, обслуживания и условий эксплуатации;  $\Delta t$  – горизонт прогноза. Для скрытой Марковской модели прогноз строится от апостериорного распределения  $\alpha_i(t)$  и определяется выражением:

$$\alpha_i(t + h) = \alpha_i(t) A_i^h \quad (26)$$

где:  $A_i$  – матрица переходов скрытых состояний;  $h$  – число шагов прогноза.

Базовое правило присвоения категории угрозы задается двумя порогами  $\tau_1 < \tau_2$ , согласованными с режимом эксплуатации (сезон/зона). Для ячейки  $o_i$  определяется класс:

$$\begin{aligned}
 & \text{низкая вероятность, } S_i(t) \leq \tau_1, \\
 c_i(t) = & \{ \text{средняя вероятность, } \tau_1 < S_i(t) \leq \tau_2, \\
 & \text{высокая вероятность, } S_i(t) > \tau_2,
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Процедура анализа состояния ТПС ОММ РСЛЦ территориально (масштабно) по принципу «снизу-вверх» разбивается на оценки локального уровня (рис. 13).

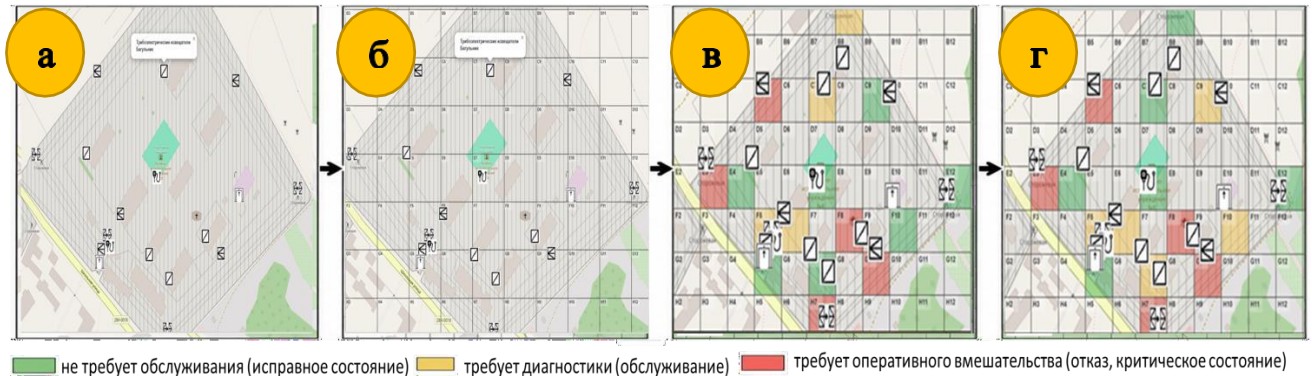


Рисунок 13 – Оценка и прогноз состояния ТПС ОММ РСЛЦ на локальном уровне: а – геоизображение базовой подложки; б – построение сетки разбиения для локализации геообъектов по ячейкам; в – визуализация текущего состояния ТПС ОММ; г – визуализация прогнозного состояния ТПС ОММ на горизонт  $t + \Delta t$

Этапом, следующим за оценкой и прогнозированием состояния ТПС ОММ на уровне отдельных ЛЦ, является пространственно-содержательное обобщение локальных оценок – получение интегральной региональной оценки (рис. 14).

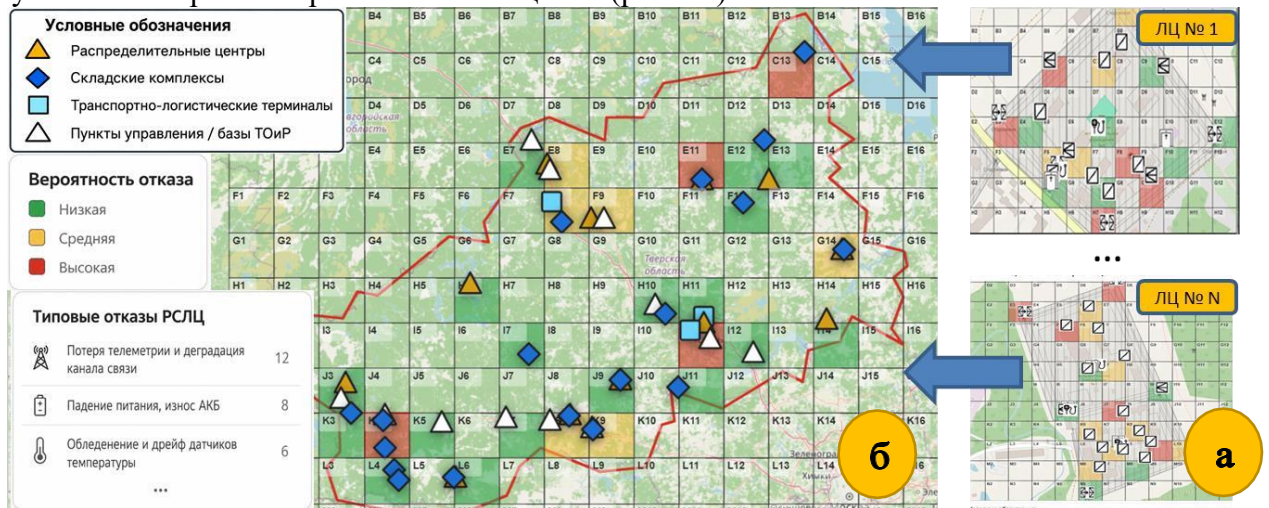


Рисунок 14 – Формирование оценки состояния ТПС ОММ РСЛЦ на региональном уровне: а – локальные оценки состояния ТПС ОММ; б – обобщенная региональная оценка состояния ОММ РСЛЦ

Затем осуществляется переход от оценки обстановки к формированию рекомендаций.



Рисунок 15 – Этапы формирования всех возможных для текущей обстановки рекомендаций

Исходя из целевой установки поддержания требуемой технической готовности ТПС предложена процедура выработки оптимального плана ремонта и сервисного обслуживания оборудования. При этом формируется база возможных (рекомендуемых) сервисных мероприятий (рис. 15).

Для выбора подходящей рекомендации из общего набора определены уровни иерархии контроллинговых требований (рис. 16). Иерархический подход к выбору управленческого

воздействия для геообъекта  $G_{obj_i}$  включает три основных уровня:

– уровень цели: выбор предпочтительного воздействия  $a_i^*$ ,  $i = \bar{1}, \bar{n}$  для объекта территориального управления  $G_{obj_i}$ ;

– уровень критериев и подкритериев:

$$K = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}; \quad (28)$$

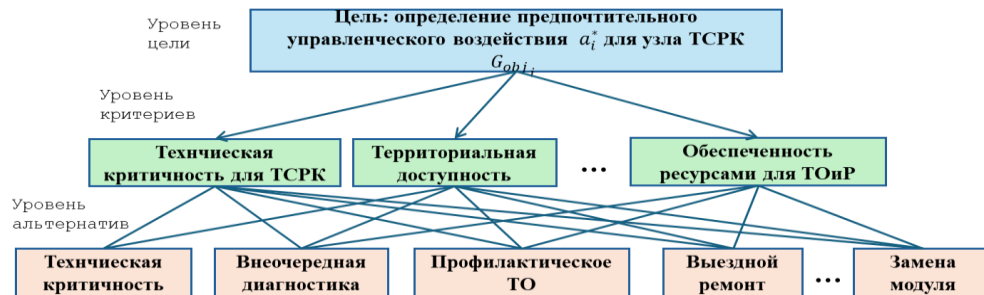


Рисунок 16 – Схема иерархического упорядочения анализа управляющих воздействий

– уровень альтернатив:

$$A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im}\}, i = \bar{1}, \bar{n}. \quad (29)$$

Определен порядок отбора подходящих рекомендаций на базе этих иерархических уровней предпочтений. Веса критериев:

$$w = \langle w_1, w_2, \dots, w_k \rangle, \quad \sum_{j=1}^k w_j = 1, k = \bar{1}, \bar{5}. \quad (30)$$

Для каждого критерия  $K_j$  формируется локальный вектор приоритетов альтернатив:  $p^j = \langle p_1^j, p_2^j, \dots, p_m^j \rangle$ ,  $\sum_{r=1}^m p_r^j = 1, j = \bar{1}, \bar{5}$

Суммарный приоритет альтернативы  $A_{ir}$  определяется выражением:

$$P(A_{ir}) = \sum_{j=1}^n w_j p_r^j, r = \bar{1}, \bar{m}, i = \bar{1}, \bar{n}. \quad (31)$$

Оптимальное воздействие:  $a^* = \arg \max_i P(A_{ir}), i = \bar{1}, \bar{n}$ .

Далее определен порядок формирования региональных ячеек-шаблонов с рекомендованными сервисными воздействиями и предложен подход к картографической визуализации территориально-содержательных рекомендаций ТОиР.

В четвертой главе предложена геоинформационная программная методика для верификации разработанного модельно-методического аппарата, оценки его эффективности и выработки практических рекомендаций по применению и составлению ТЗ на создание систем поддержки принятия решений и модулей ГИС. Обобщенная структура программной методики включает блоки: подготовки, преобразования и импорта данных (1-2); построение сетки пространственного разбиения и проведение оценки на локальном и региональном уровнях (3-7); формирование вариантов оптимальных маршрутов ТОиР на основе оценки состояния ТПС ОММ и данных об обстановке в РСЛЦ (рис. 17). Результатом работы методики является пространственно-содержательный план выполнения ТОиР на региональном уровне.



Рисунок 17 – Структура программной методики построения оптимального маршрута ТОиР ОММ РСЛЦ  
 Определена архитектура программной системы – веб-приложение на языке ООП С#, фреймворке Asp.Net Core для сбора данных и визуализации, Python-модули с библиотеками keras, tensorflow для реализации предиктивной аналитики и моделей. Взаимодействие между модулями осуществляется по REST. Установлен порядок загрузки исходных данных в программную систему. Построена региональная геоподложка отображения и оценки обстановки в QGIS и ее перенос в разработанную программу «Бастион».

После ввода данных осуществляется переход к локальному уровню РСЛЦ и оценка состояния ТПС ОММ программой Data Mining Studio (рис. 18).



Рисунок 18 – Последовательность перехода к локальному уровню на примере ЛЦ №2:  $f_1$  – отображение базового представления обстановки в ОММ ЛЦ в систему дискретных ячеек;  $f_2$  – отображение системы дискретных ячеек в оценку состояния ТПС ОММ РСЛЦ

Исходя из локальных оценок состояния ТПС ОММ строится интегральная оценка состояния РСЛЦ на региональном уровне (рис. 19).



Рисунок 19 – Последовательность перехода к региональному уровню: а – базовая геоподложка РСЛЦ; б – пространственная сетка разбиения РСЛЦ на контролируемые участки; в – оценка обстановки в системе ОММ РСЛЦ на региональном уровне

После расчета текущей и прогнозной оценок состояния ТПС определяется операционная региональная ремонтная база для планирования маршрута ТОиР как отправная точка. По узлам ремонтной базы строится граф точек обслуживания РСЛЦ с учетом факторов геосреды и текущей обстановки, влияющих на формирование маршрута ТОиР (рис. 20).

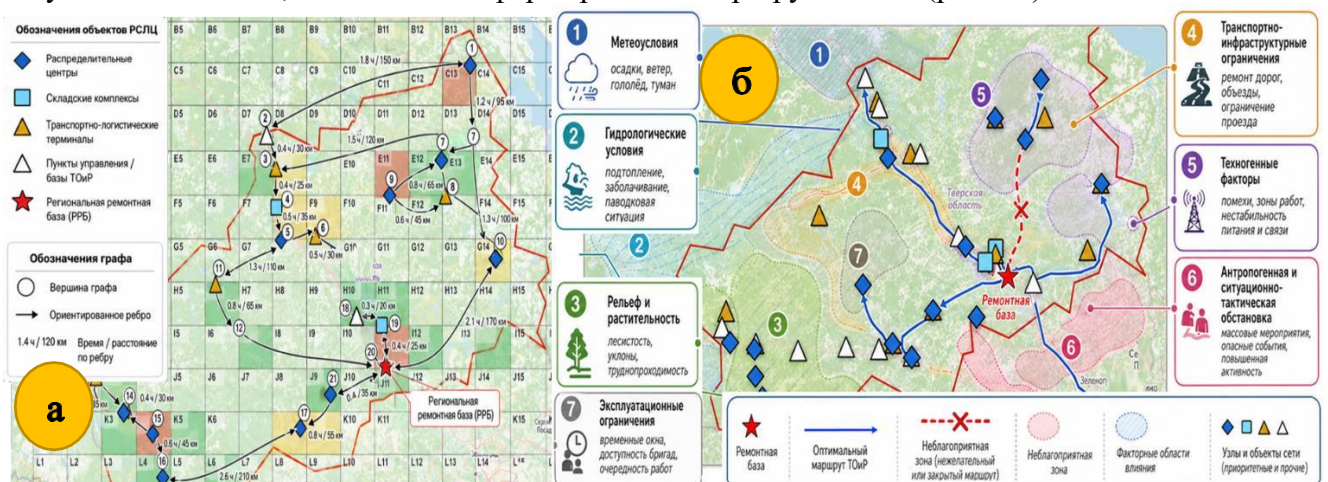


Рисунок 20 – Визуализация построения маршрута обслуживания ТПС ОММ РСЛЦ: а - графовое представление РСЛЦ для построения маршрута; б - факторы геосреды, влияющие на формирование маршрута

Затем осуществляется формирование оптимального маршрута ТОиР РСЛЦ и его визуализация на геоизображении. Расчёт маршрута основан на дополненном алгоритме Дейкстры (рис. 21), где:  $A^*$  – множество выбранных мероприятий;  $v_0$  – региональная ремонтная база;  $G_{tr} = (V, E)$  – ориентированный граф транспортной доступности, где  $V$  – множество вершин,  $E$  – множество дуг. Для учёта последовательности посещения объектов и распределения обслуживающих бригад используются постановки TSP (Travelling Salesman Problem) – задача коммивояжёра и VRP (Vehicle Routing Problem) – задача маршрутизации обслуживающих бригад.

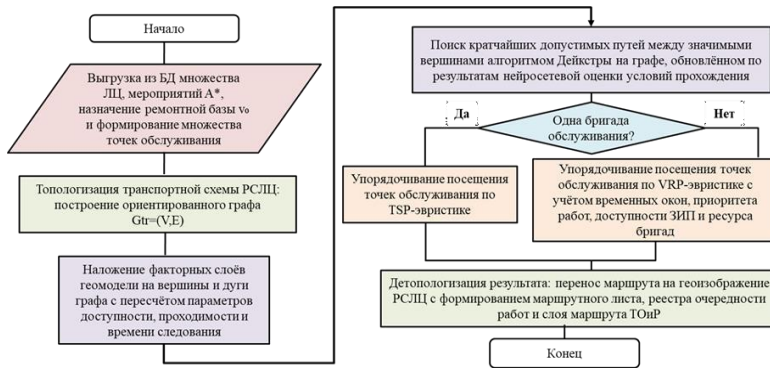


Рисунок 21 – Алгоритм построения оптимального маршрута ТОиР

Пример оптимального маршрута ТОиР в виде графа на геоизображении, приведён на рис. 22.

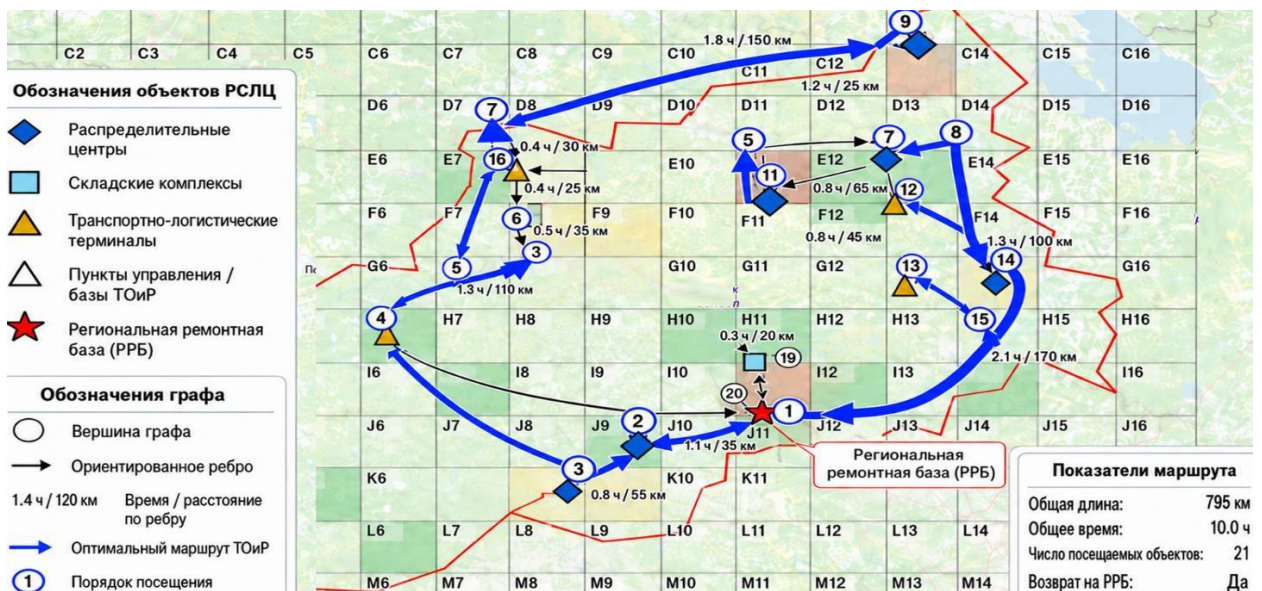


Рисунок 22 – Оптимальный маршрут ТОиР РСЛЦ, визуализированный на ориентированном графе

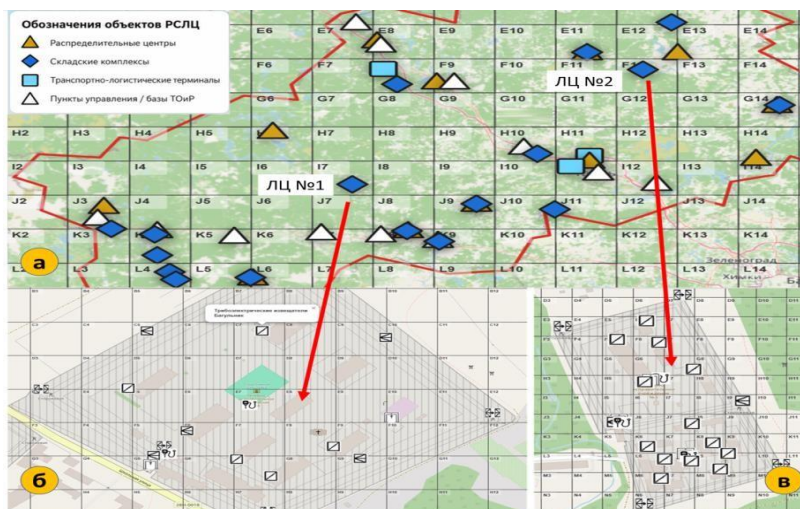


Рисунок 23 – Исходное геоизображение обстановки: а – РСЛЦ; б – ЛЦ №1 с типовыми условиями размещения; в – ЛЦ №2 со сложными условиями размещения

Выполнен расчёт показателей эффективности результатов работы программной методики в сравнении с традиционными методами предиктивной аналитики без учета пространственных атрибутов. В качестве объектов для проверки выбраны два ЛЦ (рис. 23) со схожим техническим составом системы ОММ и разными пространственными условиями размещения. ЛЦ №1 расположен на равнинной местности, вдали от техногенных объектов, характеризуется типовыми условиями размещения, нормальными природными и социальными условиями функционирования. ЛЦ №2

расположен на краю промышленной зоны, следом за которой располагаются значительные лесные массивы с участками заболоченности, по границе территории проходит трасса ЛЭП. В зимнее время года объект труднодоступен, трудовые ресурсы ограничены. Определены показатели эффективности работы ситуационно-предиктивной методики, отвечающие за качество оценки и прогнозирования состояния ТПС ОММ, а также сравниваются время выявления отказов оборудования и протяженность маршрута ТОиР. По каждому ЛЦ методика формирует ранжированный перечень объектов с определением их текущего и прогнозного состояний, а также детализированное геоизображение как визуализация обстановки в системе ОММ РСЛЦ.

Результат работы ситуационно-предиктивной программной методики для ЛЦ №1 с типовыми условиями размещения (рис. 24) представлен перечнем ГО контроля и визуализацией обстановки в ТПС ОММ. Для ЛЦ №1 характерно меньшее количество технических средств в отказовом и предотказовом состояниях в сравнении с ЛЦ №2.



Рисунок 24 – Результат работы программной методики для ЛЦ №1: а – ранжированный перечень ГО для контроля и регулирования тех. готовности; б – геоизображение оценки технического состояния ГО

Визуализация обстановки в системе ОММ геоизображением и ранжированный перечень ГО с характеристикой их расчетного состояния для ЛЦ №2 (рис. 25) позволили наглядно продемонстрировать влияние сложных условий размещения ЛЦ, о чем свидетельствует большее количество оборудования ТПС ОММ в состоянии, отличном от исправного.

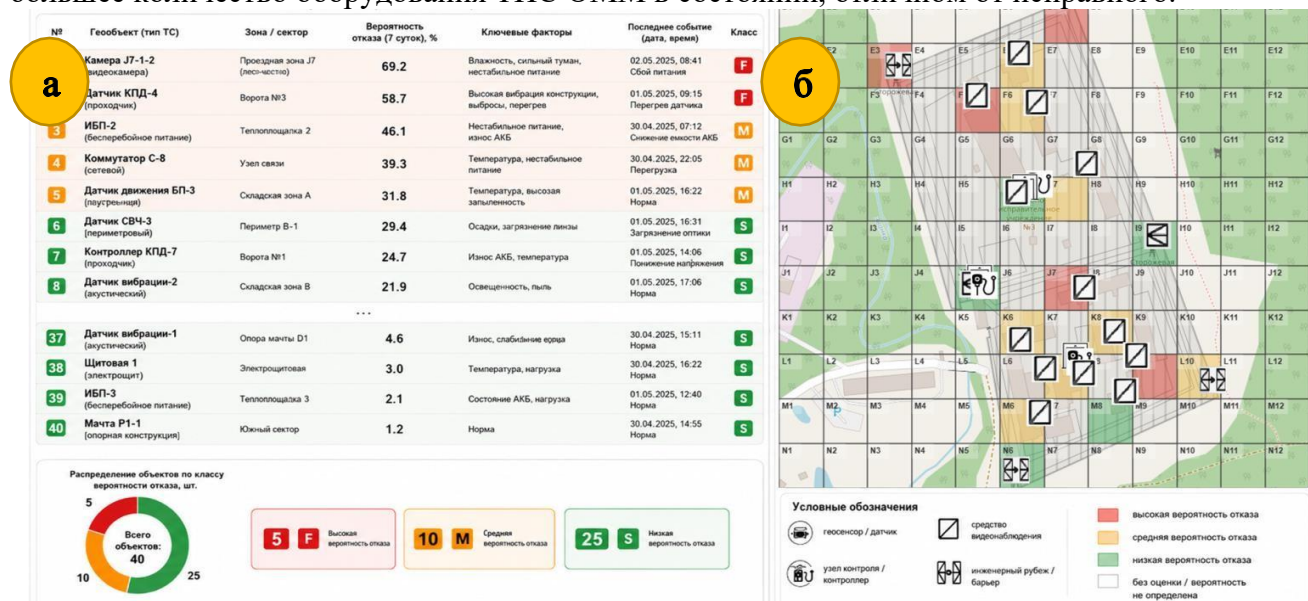


Рисунок 25 – Результат работы программной методики для ЛЦ №2: а – ранжированный перечень ГО для оценки и регулирования тех. готовности; б – геоизображение оценки технического состояния ГО

Построение и апробация геоинформационной программной методики оценки и выработки пространственно-содержательных рекомендаций показала работоспособность предложенного в работе модельно-методического аппарата.

По сравнению с традиционными предиктивными методами предложенный модельно-методический аппарат обеспечил повышение качества определения текущего и прогнозных ТС ОММ РСЛЦ при горизонтах прогноза 7 и 14 суток, на 12% и 10% соответственно. На 8% сокращено время выявления отказов за счет пространственной локализации проблемных участков. На 10% снижена протяженность выездного обслуживания за счет построения маршрута ТОиР, учитывающего критичность состояния для системы ОММ РСЛЦ, доступность объектов и условий прохождения маршрутов.

### **Заключение**

В результате проведенного диссертационного исследования получена совокупность научных результатов, обеспечивающих решение актуальной задачи разработки геоинформационного модельно-методического аппарата представления, анализа, прогнозирования и регулирования технической готовности ОММ, в том числе:

1. Выполнен анализ предметной области ОММ РСЛЦ, показавший необходимость объединения геоинформационных и аналитических методов прогнозирования технической готовности ОММ.

2. Разработана геомодель обстановки в ОММ РСЛЦ, отличающаяся описанием динамических априорных и оперативных факторов окружающей геосреды, что обеспечивает более полное содержательное и территориальное отображение положения, состояния и функционирования технических средств геосенсорной платформы и подсистем ОММ РСЛЦ в установленных геолокациях проявления экстремальных природных и техногенных условий и воздействий недружественной социальной среды.

3. Разработанная геоинформационная ситуационно–предиктивная методика отличается объединением текущей оценки состояния технической подсистемы, прогноза технического состояния на основе ситуационно-предиктивного подхода, учитывающего геозависимые факторы отказов, что обеспечивает построение карт прогнозного ухудшения состояния, ранжирование геообъектов по приоритету воздействия, а также поддержку адресных решений по обслуживанию, резервированию и восстановлению функций ОММ РСЛЦ.

4. Разработанная геоинформационная программная методика оценки и выработки рекомендаций показала работоспособность предложенного модельно-методического аппарата и обеспечивает повышение качества определения текущего и прогнозных ТС ОММ РСЛЦ при горизонтах прогноза 7 и 14 суток, на 12% и 10% соответственно по сравнению с традиционными предиктивными методами. Также сокращено время выявления отказов технических средств ОММ РСЛЦ на 8% и протяженность маршрута ТОиР на 10% в сравнении с методами эксплуатации, построенными на регламентных подходах.

Направления дальнейших исследований представляются на путях детализации разработки оценочных отношений в содержательной системе аналитических зависимостей, развитии гибридных прогностических моделей для формирования геозависимых интенсивностей отказов, развитии процедур выработки пространственно-содержательных рекомендаций за счет интеграции интеллектуальных методов, дополнении функциональных возможностей программных продуктов путем внедрения мультимедийных технологий, ментальных геоизображений, онтологического аппарата.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

1. Беляев, А.К. Геоинформационная модель обстановки в территориально-распределенной системе специальных охранных мониторингов местности с учетом динамических факторов геосреды / Беляев А.К., Биденко С.И., Звездарев Д.В., Травин С.В., Храмов И.С., Удыч М.Ф. // Информация и космос. – 2025. – № 3. – С. 82–92.

2. Беляев, А.К. Геоинформационный подход к реализации совместного территориально-предиктивного анализа состояния охранных мониторингов местности / Беляев А.К., Миляков

Д.Ф., Биденко С.И., Храмов И.С. // Информация и космос. – 2025. – № 2. – С. 147–154.

3. Беляев, А.К. Геоинформационная методика ситуационно-предиктивной оценки территориальных систем охраны в условиях деструктивных воздействий / Бородин Е.Л., Беляев А.К., Биденко С.И. // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 4 (117). – С. 46–50.

4. Беляев, А.К. Ситуационно-предиктивное моделирование обстановки в системе охранных мониторингов территориальных объектов в условиях воздействия внешних факторов / Беляев А.К., Биденко С.И. // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 3 (116). – С. 44–52.

5. Беляев, А.К. Подход к организации геоинформационной поддержки аппарата предиктивной аналитики технического состояния систем охранных мониторингов местности / Беляев А.К., Бородин Е.Л., Биденко С.И., Звездарёв Д.В., Михеев В.Л. // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 2 (115). – С. 24–31.

6. Беляев, А.К. Возможная модель оценки состояния приборов, систем и оборудования в условиях деструктивных воздействий геосреды / Беляев А.К., Шарков А.М., Звездарёв Д.В., Биденко С.И. // Навигация и гидрография. – 2025. – № 3 (80). – С. 70–85.

7. Беляев, А.К. Методы поддержки принятия решений при управлении техническим обслуживанием и ремонтом охранного оборудования / Беляев, А. К., Царькова, Е. Г. // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 7 (91). С. 40–49.

8. Belyaev A. Reliability forecasting for optimal planning of measures for maintenance of security systems of transport infrastructure facilities / A. Belyaev, E. Tsarkova, D. Churakov, E. Andreeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 918. – Art. 012090. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012090.

9. Belyaev A. Technical diagnostics of equipment using data mining technologies / A. Belyaev, E. Tsarkova, Y. Lagutin, Y. Matveev, E. Andreeva // Safety in Aviation and Space Technologies: select proceedings of the 9th World Congress Aviation in the XXI Century. – Cham: Springer, 2022. – P. 345–356. – DOI 10.1007/978-3-030-85057-9\_30.

10. Беляев, А.К. Программная методика ситуационно-предиктивного контроля радиоэлектронного оборудования в удаленном эксплуатационном районе / Беляев А.К., Шарков А. М., Дегтярев А.В. // Навигация и гидрография. – 2026. – № 2 (82). – С. 84–93.

11. Беляев, А.К. Геоинформационная методика анализа и прогнозирования функционирования территориально-распределенных систем радионавигационного оборудования: алгоритмы и программная реализация / Беляев А.К., Шарков А. М., Биденко С. И. // Навигация и гидрография. – 2026. – № 2 (82). – С. 105–114.

12. Беляев, А.К. Процедура иерархического упорядочения альтернатив реализации стратегий технической готовности территориальных систем освещения морской обстановки / Бородин Е.Л., Беляев А.К., Биденко С.И., Травин С.В. // Эксплуатация морского транспорта. — 2026. – № 2 (119). – С. 29–37.

13. Беляев, А.К. Геоконтроллинг систем освещения обстановки и управления с учетом предиктивных оценок их технического состояния / Бородин Е.Л., Беляев А.К., Биденко С.И., Удыч М.Ф. // Эксплуатация морского транспорта. – 2026. – № 2(119). – С. 53–65.

### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ**

1. Беляев, А.К. "DATA MINING STUDIO" – Программная интеллектуально-предиктивная платформа интеллектуального анализа данных: Свидетельство № 2024663590 / Беляев А.К., Царькова Е.Г., Царьков В.В. – М.: ФСИС РФ.

2. Беляев, А.К. Программное средство «БАСТИОН» - Программное средство учета номенклатуры инженерно-технических средств охраны для анализа эффективности комплексной системы безопасности объектов: Свидетельство № 2020619844 / Беляев А.К., Царькова Е.Г., Чураков Д.Ю., Зыбин Д.Г. – М.: ФСИС РФ.

### **Материалы докладов на конференциях**

1. Беляев, А. К. Методика оперативного ситуационно-предиктивного контроля и регулирования связного радиоэлектронного оборудования // Научно-технические проблемы и перспективы развития систем, комплексов и средств связи, управления и радиоэлектронной борьбы: сборник трудов научно-практической конференции, Воронеж, 27 мая 2026 г. – Воронеж: АО «Концерн «Созвездие», 2026. – С. 131–139.

2. Беляев, А. К. Геомодель обстановки в интеллектуальной системе поддержки управления сложными территориальными объектами и системами // Научно-технические проблемы и перспективы развития систем и комплексов радиолокационного мониторинга, радиотехнической, звукометрической и тепловизионной разведки, технологий искусственного интеллекта и оптико-электронных систем: сборник трудов научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10 июня 2026 г. – СПб. АО «НИИ «Вектор», 2026. – С. 57–65.

3. Беляев, А. К. Геоинформационная ситуационно-предиктивная методика оперативной оценки и прогнозирования обстановки в системе охранных мониторингов региональной логистической сети // Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях: сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10.04.2026 г. – СПб. РГГМУ, 2026. – С. 83–92.

4. Беляев, А. К. Геомодель обстановки в территориальной системе охранных мониторингов региональной логистической сети // Инновационные методы в экологических и гидрометеорологических исследованиях: сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10.04.2026 г. – СПб.: РГГМУ, 2026. – С. 111–119.

5. Беляев, А. К. Геосенсорная территориально распределенная платформа наблюдения за окружающей средой: киберфизическая поддержка технической готовности охранных мониторингов сети региональных торгово-логистических центров // Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях: сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10 апреля 2026 г. – СПб.: РГГМУ, 2026. – С. 56–63.

6. Беляев, А. К. Подходы к организации геоконтроллинга территории // Единое геоинформационное пространство для обеспечения устойчивого развития регионов: от сбора данных к интеграции (ИНФОГЕО-2025): материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 28.11.2025 г. – СПб. РГГМУ, 2026. – С. 66–75.

7. Беляев, А. К. Гибридная геоинформационно-предиктивная модель цифрового двойника логистическо-складской сети в аспекте обеспечения ее территориально-структурной целостности // Перспективы развития таможенного регулирования в условиях цифровой экономики: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2026 г. – СПб.: РАНХиГС, 2026. – С. 158–170.

8. Беляев, А. К. Геоинформационная методика ситуационно-предиктивной оценки состояния территориальных охранных систем деструктивного региона // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025): материалы XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 39–42.

9. Беляев, А. К. Геоинформационная модель состояния охранных мониторингов местности с учетом территориально-предиктивных и стохастических факторов в условиях пространственно-временной неопределенности // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025): материалы XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 42–45.

10. Беляев, А. К. Геоконтроллинг: подходы к реализации поддержки управления территориальной активностью // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025): материалы XIV Санкт-Петербургской конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 46–48.

11. Беляев, А. К. Программное средство «Бастион» как инструмент поддержки принятия решения в работе сотрудников службы инженерно-технического обеспечения и вооружения // Актуальные проблемы деятельности подразделений: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2021. – С. 290–296.

12. Беляев, А. К. Новые подходы к многокритериальному оцениванию альтернатив при принятии решений // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж, 2021. – С. 1774–1782.

13. Беляев, А. К. Интеллектуализация принятия решений в системах защиты охраняемых объектов // Пенитенциарная безопасность: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Самара, 2021. – С. 245–246.