

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

На правах рукописи



Беляев Александр Константинович

МЕТОДИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ФУНКЦИОНИРОВА-
НИЯ ОХРАННЫХ МОНИТОРИНГОВ МЕСТНОСТИ НА БАЗЕ ГЕОСЕНСОР-
НОГО НАБЛЮДЕНИЯ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

Специальность: 1.6.20. Геоинформатика, картография

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Биденко Сергей Иванович

Санкт–Петербург, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОХРАННОГО ГЕОСЕНСОРНОГО МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ ОПЕРАЦИОННО– ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	15
1.1. Региональная сеть операционно-логистических центров	15
1.2. Охранный мониторинг местности региональной сети операционно– логистических центров как сложный территориальный организационно– технический объект	20
1.3. Анализ физико–географических и оперативно–географических условий функционирования ОММ РСЛЦ	23
1.3.1. Анализ природно–климатических особенностей функционирования ОММ РСЛЦ	24
1.3.2. Анализ техногенных особенностей функционирования ОММ РСЛЦ ..	27
1.3.3. Анализ социально–организационных особенностей функционирования ОММ РСЛЦ	28
1.3.4. Анализ географических особенностей функционирования ОММ РСЛЦ	30
1.3.5. Анализ информационно–диагностических особенностей функционирования ОММ РСЛЦ	32
1.4. Проблемные вопросы обеспечения эффективного функционирования ОММ РСЛЦ в условиях деструктивных факторов геосреды	34
1.4.1. Противоречия существующего модельного аппарата в контроле и регулировании технических систем специального охранного мониторинга местности	34

1.4.2. Противоречия существующего методического аппарата контроля и регулирования технических систем специального охранного мониторинга местности	37
1.4.3. Противоречия существующего программно–алгоритмического аппарата в контроле и регулировании технических систем специального охранного мониторинга местности	39
1.5. Постановка задач исследования	41
Выводы по разделу 1.....	45
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА ГЕОМОДЕЛИ ОБСТАНОВКИ В	
ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОХРАННЫХ	
ГЕОСЕНСОРНЫХ МОНИТОРИНГОВ МЕСТНОСТИ.....	
2.1. Место геомодели обстановки в системе регулирования ОММ.....	46
2.2. Структура геомодели обстановки	49
2.2.1 Геообъекты ОММ РСЛЦ.....	50
2.2.2 Отношения на множестве геообъектов.....	52
2.3. Состав геомодели обстановки РСЛЦ	55
2.3.1. Параметры территориально-сетевого состава РСЛЦ.....	57
2.3.2 Параметры киберфизической геосенсорной платформы.....	58
2.3.3 Параметры окружающей среды.....	60
2.3.4. Параметры средств ОММ РСЛЦ и их локального пространственного размещения	66
2.3.5. Эксплуатационно-событийные параметры системы ОММ РСЛЦ	66
2.3.6 Параметры антропогенных факторов влияния на ОММ РСЛЦ.....	67
2.3.7. Параметры контроллинговой обстановки - описание задач, решаемых ОММ РСЛЦ	71
2.3.8. Ситуационно-тактические параметры обстановки.....	72
2.4. Содержание модели обстановки ОММ РСЛЦ	74
2.4.1. Параметрическое описание связей компонентов модели	74
2.4.2 Аналитические зависимости оценки технико-эксплуатационных параметров функционирования ГТРП ОММ РСЛЦ	77

Выводы по разделу 2.....	93
РАЗДЕЛ 3. Разработка геоинформационной ситуационно-предиктивной методики оперативной оценки и прогнозирования обстановки в системе охранных мониторингов региональной логистической сети	
3.1. Обобщенная структура геоинформационной методики предиктивно–ситуационной оценки состояния ОММ РСЛЦ.....	94
3.2. Процедура сбора данных и заполнения геомодели	104
3.2.1. Источники геоданных об обстановке	104
3.2.2. Аэромобильный мониторинг местности как перспективный источник ДЗЗ	107
3.3. Процедура отбора наиболее значимых параметров геомодели обстановки в ОММ РСЛЦ	110
3.3.1. Процедура отбора наиболее значимых параметров компонентов геомодели	112
3.4. Процедура оценки текущего состояния и построения прогноза	114
3.4.1. Подготовка признаков и уточнение параметров прогноза	114
3.4.2. Прогнозирование технических состояний геообъектов ГТРП ОММ РСЛЦ с выбором модели состояния.....	116
3.4.3. Категоризация состояния на геоизображении	119
3.5. Процедура иерархической выработки управляющих воздействий	121
Выводы по разделу 3.....	125
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОГРАММНОЙ МЕТОДИКИ ВЫРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО–СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОММ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	
4.1. Обобщенная структура геоинформационной программной методики	127
4.2 Алгоритм выработки и выдачи пространственно-содержательных рекомендаций.....	129
4.3 Алгоритм адаптивного управления техническим обслуживанием.....	132

4.4. Программная реализация: структура и интерфейс программного комплекса	134
4.5. Программная реализация процедуры построения оптимального маршрута ТОиР РСЛЦ.....	135
4.5.1. Импорт геоданных и формирование региональной операционной активной геоподложки.....	139
4.5.2. Разбиение и оценка ТГ территориальной системы ОММ РСЛЦ на региональном и локальном уровнях	140
4.5.3. Построение обобщенной оценки состояния региональной ТПС ОММ РСЛЦ	141
4.5.4. Формирование ориентированного графа объектов ТПС РСЛЦ.....	143
4.5.5. Алгоритм построения оптимального маршрута	144
4.5.6. Пространственно-содержательные результаты работы методики и связь с геоконтроллингом	146
4.6. Сравнительный анализ предиктивной и ситуационно-предиктивной методик. Рекомендации по применению	147
4.6.1. Объекты верификации и их характеристики.....	148
4.6.2. Сравнительная оценка эффективности предиктивной и предиктивно– геоинформационной методик	150
Выводы по разделу 4.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АММ	аэромобильный мониторинг местности
РСЛЦ	региональная сеть операционно–логистических центров
ЛЦ	операционно–логистический центр
РЦ	распределительный центр
ОММ	охранный мониторинг местности
ГТРП	геосенсорная территориально распределенная платформа
ТПС	техническая подсистема
ГО	геообъект
ИТСО	инженерно–технические средства охраны
ТСО	технические средства охраны
ИСО	инженерные средства охраны
СОТ	система охранного телевидения
ТГ	техническая готовность
ТОиР	техническое обслуживание и ремонт
ЗИП	запасные части, инструменты и принадлежности
ГИз	геоизображение
НСИ	нормативно–справочная информация
КАГИз	Контроллинг-активное геоизображение
ЦММ	цифровая модель местности
ЦМР	цифровая модель рельефа
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
МАИ	метод анализа иерархий
ИНС	искусственная нейронная сеть
ML	(англ. Machine Learning) машинное обучение
CBM	(англ. Condition Based Maintenance) обслуживание по состоянию
PdM	(англ. Predictive Maintenance) предиктивное обслуживание
MTBF	(англ. Mean Time Between Failures) средняя наработка между отказами
MTTF	(англ. Mean Time to Failure) средняя наработка до отказа
MTTR	(англ. Mean Time to Recovery) среднее время восстановления

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Региональная сеть логистических центров (РСЛЦ) включает территориально распределенную систему разнородных складских комплексов, операционных центров, перегрузочных терминалов, контрольно-охранных модулей и характеризуется значительным территориальным охватом и сложным содержательным функционированием.

Поддержание ее конструктивной целостности и устойчивого функционирования требует непрерывного охранного мониторинга местности (ОММ). Важным элементом ОММ является геосенсорная территориально распределенная платформа (ГТРП). Эта киберплатформа включает пространственно локализованные средства наблюдения и обнаружения (геосенсоры), связи, питания, контроллеры и элементы инженерно–технических средств охраны, состояние которых зависит не только от аппаратных характеристик, но и от размещения, доступности обслуживания и внешних условий эксплуатации.

Техническая подсистема (ТПС) геосенсорной платформы ОММ функционирует в неоднородной внешней геосреде. На ее состояние одновременно воздействуют климатические и физико–географические факторы, особенности застройки и рельефа, электромагнитные и радиационные поля, транспортная и энергетическая доступность, внутренняя и внешняя социальная нагрузка, режим эксплуатации, интенсивность событий, история технического обслуживания и неполнота диагностических данных. Однотипные инженерно–технические средства (ИТСО) из состава ТПС ОММ, размещенные в разных зонах логистической сети, имеют разную вероятность ухудшения технического состояния.

Штатные регламенты технического обслуживания ориентированы преимущественно на фиксированные интервалы контроля, локальные диагностические признаки и реакцию на уже выявленную неисправность. Такая схема недостаточно учитывает пространственную вариативность условий эксплуатации, различия между зонами РСЛЦ, влияние маршрутов доступа, сезонности, внешних воздействий и степени резервирования наблюдения. В результате данные об отказах, лож-

ных срабатываниях накапливаются в эксплуатационных журналах, но не преобразуются в геоинформацию, пригодную для прогноза и адресного управления технической готовностью.

Возникает общее противоречие между потребностью в совместном территориальном и предиктивном анализе состояния ИТСО и ограниченными возможностями существующих предиктивно–аналитических средств, рассматривающих пространство, состояние и прогноз отдельно. Для преодоления этого противоречия требуется геоинформационный модельно–методический аппарат, в котором объекты технической подсистемы ОММ задаются как геообъекты с пространственной и атрибутивной компонентами, а текущая оценка, прогноз перехода в неблагоприятное состояние и рекомендации по контролю и ТО формируются с привязкой к зонам, ячейкам покрытия и маршрутам обслуживания.

Частные противоречия состоят в отсутствии:

- геоинформационного модельного аппарата представления обстановки в системе охранного мониторинга региональной логистической сети как зависимости характеристик ее состояния от пространственно–временных показателей процессов на территории;
- геоинформационного методического аппарата оценки и формирования пространственно–содержательных рекомендаций по поддержанию технической готовности территориально распределенных объектов.

Актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью перехода от регламентного и объектно–локального контроля технической подсистемы ОММ к ситуационно–предиктивной геоинформационной оценке состояния, прогнозированию вероятности неблагоприятных технических состояний и формированию картографически представленных рекомендаций по контролю, техническому обслуживанию, восстановлению и резервированию элементов гео-сенсорной платформы региональной сети логистических центров.

Теоретическую базу исследования составили труды ведущих отечественных и зарубежных ученых: Алаева Э.Б., Андреевой Е.А., Берлянта А.М., Браткова В.В., Бунге В., Беленко В.В., Биденко С.И., Верещака Т.В., Гарсиа М.,

Гусейн-Заде С.М., Душкина А.В., Евтушенко Ю.Г., Журкина И.Г., Капралова Е.Г., Кравцовой В.И., Лисицкого Д.В., Лурье И.К., Матерухина А.В., Палюха Б.В., Перцика Е.Н., Поповича В.В., Присяжнюка С.П., Савиных В.П., Саушкина Ю.Г., Топчиева А.Г., Трофимова А.М., Учаева Д.В., Царьковой Е.Г., Цветкова В.Я., Чибуничева А.Г., Янкелевич С.С.

Объект исследования. Геосенсорные сети как система сбора и обработки пространственных данных для поддержки территориального управления.

Предмет исследования. Модельно-методический аппарат описания и ситуационно-предиктивного анализа геоситуации в системе охранных мониторингов операционно-логистических центров, выработки пространственно-содержательных рекомендаций по обеспечению работоспособности ГТРП ОММ, функционирующих в условиях пространственно-временной неоднородности факторов окружающей среды.

Цель исследования: разработка геоинформационного модельно-методического аппарата представления и оценки состояния технической подсистемы геосенсорной платформы территориально-распределенных охранных ОММ РСЛЦ на основе ситуационно-предиктивного подхода.

Для достижения цели решены следующие задачи исследования:

1. Выполнить анализ предметной области ОММ РСЛЦ и выявить ограничения регламентного управления ТОиР и контролем в условиях территориальной неоднородности.

2. Разработать геомодель 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 системы охраны

РСЛЦ для оценки эффективности модельно-методического аппарата и выработки практических рекомендаций.

5. Выполнить оценку разработанной геоинформационной программной методики анализа и выработки пространственно-содержательных рекомендаций поддержания работоспособности ОММ РСЛЦ.

Научная новизна исследования:

1. Предложена геоинформационная модель обстановки в территориально-распределенной системе охранных мониторингов местности региональной сети логистических центров, отличающаяся введением дополнительных классов геообъектов технической подсистемы ОММ и геосенсорной территориально распределенной платформы, расширенным составом их пространственных и атрибутивных характеристик, а также введением оценочных отношений наряду с пространственными и содержательными отношениями, что обеспечивает непосредственное представление и оценку состояния технических средств в условиях воздействия динамических факторов геосреды.

2. Разработана геоинформационная ситуационно-предиктивная методика, позволяющая осуществлять совместный территориально-предиктивный анализ текущего и прогнозного состояния технических средств с учетом факторов геосреды, строить геоизображения прогнозного ухудшения состояния, ранжировать исследуемые технические объекты ОММ по прогнозируемой вероятности отказа и формировать адресные решения по поддержанию и контролю функциональной и пространственно-структурной целостности ОММ РСЛЦ.

3. Разработана геоинформационная программная методика автоматизации процессов ситуационно-предиктивного контроля и геоконтроллинга технического состояния системы ОММ, включающая алгоритмы и программные решения для расчета и геоинформационного отображения текущего и прогнозного состояния приборов, систем и оборудования ОММ, формирования контроллинговых предписаний, а также построения маршрутов ТОиР с учетом текущей геоситуации и территориальной доступности объектов ОММ.

Теоретическая значимость работы определяется расширением модельно-аналитических возможностей геоинформатики применительно к сложным территориально распределённым социотехническим системам. В диссертационной работе формализовано представление обстановки как взаимосвязанной совокупности геообъектов, для которых учитываются пространственные, содержательные и опциональные оценочные отношения упорядоченности, а также выделяются классы объектов и геосистем, критичные для функционирования рассматриваемой системы ОММ.

Развитие теоретического аппарата связано с установлением аналитических зависимостей между параметрами территориальной обстановки, факторами гео-среды и техническим состоянием элементов системы ОММ. Геоинформационный анализ интегрирован с предиктивной составляющей, что позволяет учитывать не только текущее состояние объектов, но и его пространственно-временную динамику. В результате методы геоинформационного моделирования и предиктивной аналитики объединены в единый модельно-методический аппарат оценки состояния территориально распределённых систем и формирования пространственно-содержательных рекомендаций поддержания ТГ ОММ.

Практическая значимость работы состоит в доведении до машинных методов, алгоритмов и программ и могут служить 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, геоинформационной поддержки управления, теоретической географии и геоинформатики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Геоинформационная модель обстановки в территориально-распределенной системе охранных мониторингов местности региональной сети логистических центров, позволяющая учитывать пространственно-атрибутивные характеристики технических средств ОММ, отношения между ними и динамические факторы геосреды при представлении состояния и функционирования технической подсистемы ОММ.

2. Геоинформационная ситуационно-предиктивная методика оперативной оценки и прогнозирования обстановки в системе охранных мониторингов региональной логистической сети, заключающаяся в совместном территориально-предиктивном анализе текущего и прогнозного состояния технических средств с учетом факторов геосреды и формировании пространственно-содержательных рекомендаций по поддержанию их технической готовности.

3. Геоинформационная программная методика автоматизации процессов ситуационно-предиктивного контроля и геоконтроллинга технического состояния системы охранных мониторингов местности, таких как расчет и геоинформационное отображение текущего и прогнозного состояния приборов, систем и оборудования ОММ, средств сервисного обслуживания; формирование контроллинговых предписаний и маршрутов технического обслуживания и ремонта.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Представляемая работа соответствует паспорту научной специальности 1.6.20. Геоинформатика, картография (технические науки) по следующим направлениям исследований:

6. Технические средства и технологии сбора, хранения и обработки пространственных и пространственно–временных данных. Оперативный анализ и картографирование потоковой географической информации. Геосенсорные сети и датчики.

20. Базы знаний и экспертные геоинформационные системы для принятия решений в области проблем управления территориями.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 8 международных, 2 всероссийских и 1 межрегиональной конференциях, в том числе V международной научно-практической конференции «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях», XVIII международной научно-практической конференции «Государство и бизнес. современные проблемы развития региональной экономики», XIV Санкт–Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России» (ИБРР–2025, Санкт–Петербург, 2025), а также на научно–практических конференциях по тематике эксплуатации и предиктивного управления состоянием инженерно–технических средств охраны и систем мониторинга (в т. ч. межведомственная НПК «Информатизация и техническое обеспечение уголовно–исполнительной системы Российской Федерации: проблемы, решения и перспективы развития», Тверь, 2021; ВНПК с международным участием «Пенитенциарная безопасность: национальные традиции и зарубежный опыт», Самара, 2021; Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 2021).

Результаты исследования опубликованы в виде статей и материалов конференций по направлениям: геоконтроллинг и геоинформационная поддержка территориального анализа; ситуационно–предиктивная оценка состояния территориально распределенных охранных систем; предиктивная аналитика технического состояния и поддержка решений ТОиР (в том числе в рецензируемых изданиях «Информация и космос», «Гидрометеорология и экология», «Эксплуатация морского транспорта», «Навигация и Гидродграфия»).

Публикации. По теме исследования автором опубликованы 12 статей в научных изданиях из перечня ВАК. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 3 научных статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на со-

искание ученой степени кандидата наук по научной специальности 1.6.20. Геоинформатика, картография (технические науки). 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.

Личный вклад автора заключается в анализе отечественных и зарубежных источников по теме исследования; в разработке геомодели обстановки территориально распределённой системы охранного мониторинга региональной сети операционно-логистических центров; в разработке геоинформационной ситуационно-предиктивной методики оценки и прогнозирования технического состояния ГТРП ОММ РСЛЦ с учётом пространственно-временной неоднородности геосреды. Автором разработаны алгоритмы формирования пространственно-содержательных рекомендаций по контролю и ТОиР, ранжирования объектов по прогнозируемому риску и построения маршрутов обслуживания с учётом территориальной доступности. Реализованы программные решения для расчёта и геоинформационного отображения текущего и прогнозного состояния объектов ОММ, формирования карт риска, приоритетов контроля и контроллинговых предписаний, а также выполнена расчётная апробация разработанного модельно-методического аппарата и сравнительная оценка эффективности предиктивного и ситуационно-предиктивного подходов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы. Диссертационная работа содержит 169 страниц машинописного текста, 80 рисунков, 23 таблицы. Список литературы включает 151 наименование.

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОХРАННОГО ГЕОСЕНСОРНОГО МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ ОПЕРАЦИОННО–ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Региональная сеть логистических центров представляет собой территориально распределенную инфраструктуру хранения, перераспределения, транспортного взаимодействия и объектового контроля.

Охранный мониторинг РСЛЦ реализуется на множестве разнесенных площадок и опирается на геосенсорную техническую подсистему. ТРГП ОММ РСЛЦ функционирует в неоднородных природно-климатических, инфраструктурных, эксплуатационных и антропогенных условиях. Однотипные средства ИТСО на разных ЛЦ работают при различной нагрузке, доступности обслуживания, плотности событий, воздействии геосреды и действиях внешних или внутренних нарушителей.

В разделе проанализированы структура РСЛЦ, состав и особенности ОММ РСЛЦ, территориальность размещения ЛЦ, условия эксплуатации ИТСО, деструктивные природные, техногенные и антропогенные воздействия, ограничения регламентного ТОиР и противоречия существующих подходов к контролю технического состояния. По результатам анализа выполнена постановка задач исследования.

1.1. Региональная сеть операционно-логистических центров

Современная региональная сеть операционно–логистических центров представляет собой не совокупность изолированных складов и терминалов, а пространственно распределенную инфраструктуру, в которой процессы хранения, перераспределения, транспортного взаимодействия и охранного контроля реализуются на множестве территориально разнесенных площадок. Для таких систем критичны непрерывность наблюдения, устойчивость функционирования инженерно–технических средств охраны и возможность оперативного реагирования на события в условиях неоднородной геосреды [31, 33, 40-42].

Объекты РСЛЦ различаются размещением относительно транспортных связей, пунктов управления и баз ТОиР, а также площадью, функциональным профилем, интенсивностью грузопотока, конфигурацией периметров, насыщенностью ИТСО и доступностью обслуживания. Поэтому одинаковые по типу средства охранного мониторинга имеют разные эксплуатационные режимы: различную частоту срабатываний, нагрузку на каналы связи и электропитание, интервалы фактического контроля, время восстановления и условия выезда бригад ТОиР. При такой неоднородности регламентный подход, основанный на единых интервалах обслуживания и изолированном учете отказов, не обеспечивает территориальной интерпретации состояния ИТСО [20, 28, 40-42, 65].

РСЛЦ территориальна, что подразумевает устойчивую взаимосвязь логистических центров с геосредой региона и зависимость их функционирования от места размещения. Каждый ЛЦ не только занимает определенный участок территории, но и включает его в систему транспортных, инженерных, эксплуатационных и охранных процессов. Геосреда задает доступность объекта, условия работы инфраструктуры, нагрузку на ИТСО и сложность проведения ТОиР. Обратное влияние РСЛЦ проявляется в формировании участков повышенной шумовой, световой, пылевой, вибрационной и электромагнитной нагрузки. Крупный ЛЦ также становится заметным территориальным объектом для возможных нарушителей: увеличивается вероятность внешнего наблюдения, попыток несанкционированного доступа, хищений, перебросов, применения БПЛА, умышленного повреждения имущества. Поэтому РСЛЦ рассматривается как активная территориально-содержательная система, в которой состояние охранного мониторинга определяется взаимным влиянием геосреды, объекта, эксплуатации и событий безопасности [31, 32, 33, 92].

Пример сети операционно-логистических центров представлен на рис. 1.1.

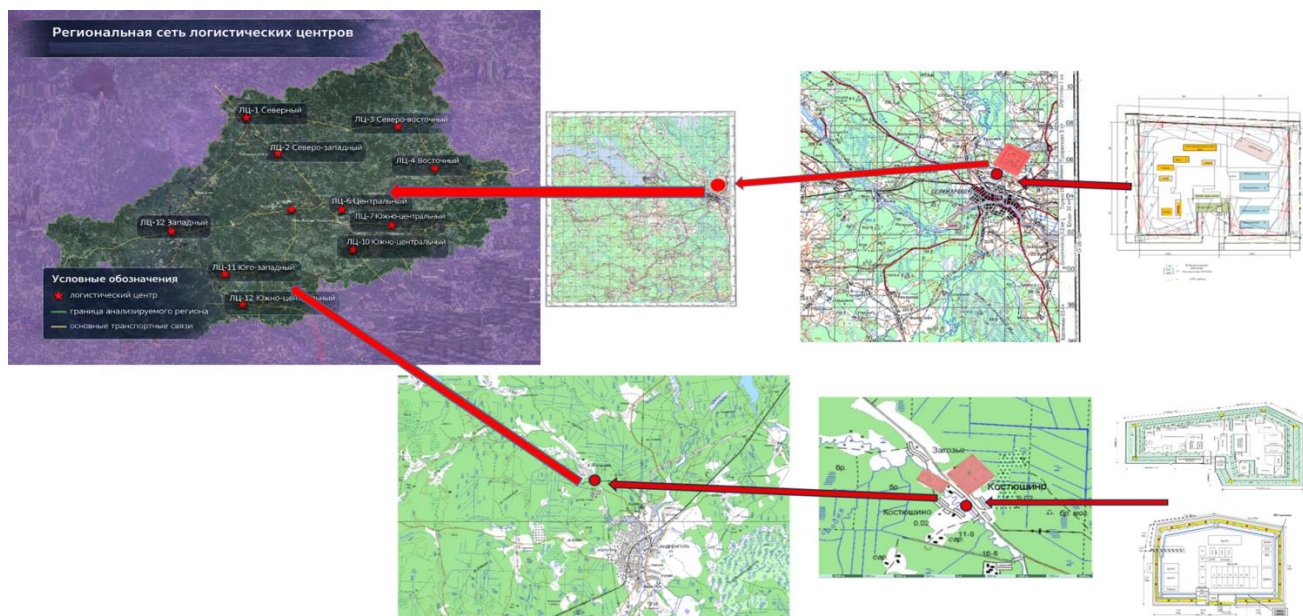


Рисунок 1.1 – Территориально-масштабная структура сети операционно–логистических центров и пространственное размещение объектов охранного мониторинга

Каждый операционно–логистический центр (ЛЦ) из состава РСЛЦ является пространственно локализованным объектом логистической инфраструктуры, включающей складские, терминальные, распределительные зоны, на которых выполняются операции приема, хранения, перемещения потоков материальных товаров. В геоинформационной постановке ЛЦ рассматривается как территориальный объект с заданными границами, внутренним зонированием, инженерной инфраструктурой и набором наблюдаемых состояний. Пример логистического центра представлен на рисунке 1.2 [31, 33, 73, 92].

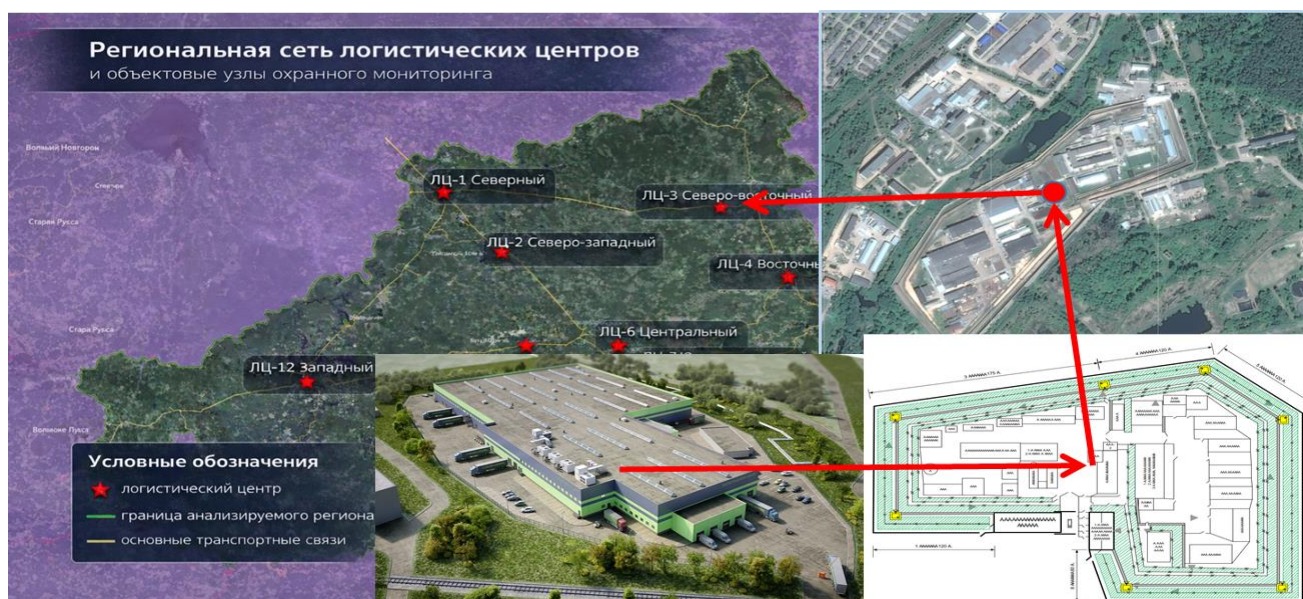


Рисунок 1.2 – Пример ЛЦ в составе региональной сети: геоизображение и схема

Сеть региональных операционно-логистических центров представляется как иерархически организованная пространственно–функциональная система. Верхний уровень образует региональный центр управления, обеспечивающий координацию распределенных объектов сети. Объектовый уровень составляют отдельные логистические центры различного типа: распределительные центры, складские комплексы, терминалы и транспортно-перегрузочные узлы. Внутри каждого ЛЦ выделяются функциональные зоны, различающиеся по режиму эксплуатации и требованиям к охранному мониторингу: периметр, КПП, зоны хранения, погрузочно-разгрузочные участки, технологические зоны, узлы связи и электропитания. Нижний уровень образует техническая подсистема охранного мониторинга, включающая инженерно–технические средства охраны (ИТСО), видеонаблюдение, системы контроля и управления доступом, связь, питание и контроллеры. Такая схема фиксирует переход от территориальной структуры сети к составу и локализации средств наблюдения, контроля и управления. На рисунке 1.3 представлена пространственно–функциональная структура РСЛЦ [9, 33, 73, 92].

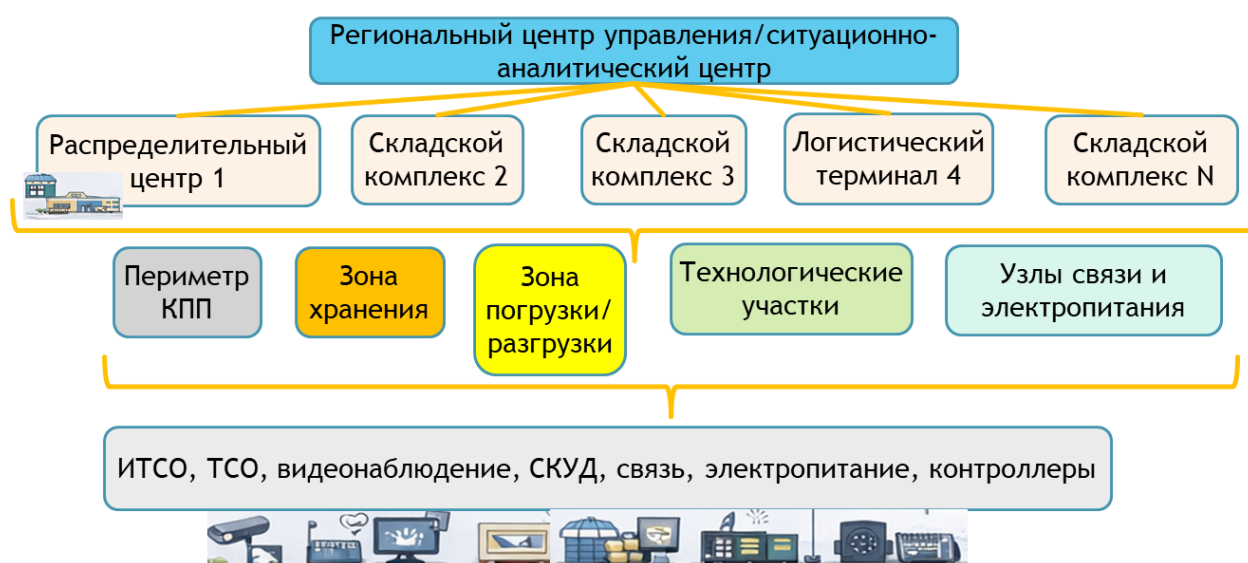


Рисунок 1.3 – Иерархическая пространственно–функциональная структура сети региональных операционно–логистических центров и технической подсистемы охранного мониторинга

РСЛЦ обладает ярко выраженной территориальностью, функционирует, испытывает влияние и сама оказывает воздействия на окружающую среду [33, 40-43, 92,136]. Логистические центры размещаются на значительной территории региона и функционируют в неодинаковых природных, инфраструктурных и социальных

условиях. РСЛЦ присуща пространственная неоднородность условий эксплуатации: различия в рельефе, климате, доступности транспортной и энергетической инфраструктуры, плотности застройки и интенсивности внешних воздействий непосредственно влияют на архитектуру и надежность технической подсистемы.

Такая декомпозиция задает региональный, кластерный и локальный уровни анализа (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Территориально-масштабные уровни сети РСЛЦ

На ЛЦ постоянно воздействуют природные, техногенные и антропогенные факторы, изменяющиеся по территории, сезонам и интенсивности проявления [15, 16, 28]. Природные воздействия связаны с осадками, температурными перепадами, обледенением, ветровой нагрузкой, подтоплением, растительностью и ухудшением видимости. Техногенные воздействия формируются транспортной нагрузкой, вибрациями, электромагнитными помехами, отказами электропитания, авариями инженерных сетей и интенсивной эксплуатацией складской инфраструктуры [28, 82, 83].

Антропогенные воздействия включают внешние и внутренние угрозы: несанкционированный доступ, хищения, умышленную порчу ИТСО и имущества, повреждение ограждений, линий связи и питания, перебросы через периметр, применение БПЛА, а также ошибочные или недобросовестные действия персонала и подрядных организаций [9, 57, 62, 67, 85, 88]. Такие воздействия имеют пространственно-временную локализацию и должны учитываться при моделировании как факторные и событийные признаки, привязанные к зонам ЛЦ, ячейкам покрытия, элементам ИТСО и моментам времени.

1.2. Охранный мониторинг местности региональной сети операционно–логистических центров как сложный территориальный организационно–технический объект

В силу территориальной распределенности РСЛЦ, неоднородности условий эксплуатации и необходимости непрерывного контроля обстановки наиболее действенным средством обеспечения ее целостности являются охранные мониторинги местности (ОММ). В ОММ средства обнаружения, наблюдения, связи, питания, локальной обработки и управления образуют киберфизический контур [15, 16, 31].

ОММ охватывает не только средства наблюдения, но и контур приема, интеграции, интерпретации, оценки и прогноза данных, поступающих с технической подсистемы РСЛЦ. В составе ОММ выделяется так называемая геосенсорная территориально распределенная платформа (ГТРП) как его информационная, сенсорно–коммуникационная и первично–обрабатывающая основа, тогда как функции геоинформационной интерпретации, ситуационной оценки, прогноза и выработки рекомендаций реализуются на уровне самого ОММ [40, 41].

Геосенсорная территориально распределенная платформа – это совокупность геосенсоров, обеспечивающих передачу данных наблюдений по проводным или радиолиниям, связного оборудования для внешней и внутренней передачи данных, стационарный или мобильный носитель оборудования, связанная с помощью прибора управления и обработки данных наблюдения в единую систему наблюдения,

измерения физических полей Земли (ФПЗ) и их аномалий, параметров окружающей среды (ОС), объектов и процессов обстановки (рис. 1.5) [4, 15, 31].



Рисунок 1.5 – Состав и структура геосенсорной территориально распределенной платформы

ГТРП играет центральную роль в системе охранного мониторинга местности, выступает в качестве источника информации об оперативной ситуации (ОС) и геоситуации, реализует связь с инженерно-техническими средствами охраны ОММ. ГТРП следует рассматривать не как совокупность разрозненных устройств, а как пространственно организованную сеть геообъектов, для которых одновременно заданы координатное положение, зона действия, состав технических и эксплуатационных признаков, связи с инфраструктурой и временная динамика состояний.

Центральным элементом ГТРП является связанное множество геосенсоров [1, 15, 36, 99]. Геосенсор – это пространственно локализованный прибор наблюдения, для которого известны координаты, зона действия или геометрия покрытия и который регистрирует значения физических полей Земли, параметров окружающей среды либо локальные возмущения этих полей и параметров в определенном секторе или зоне (рис. 1.6).

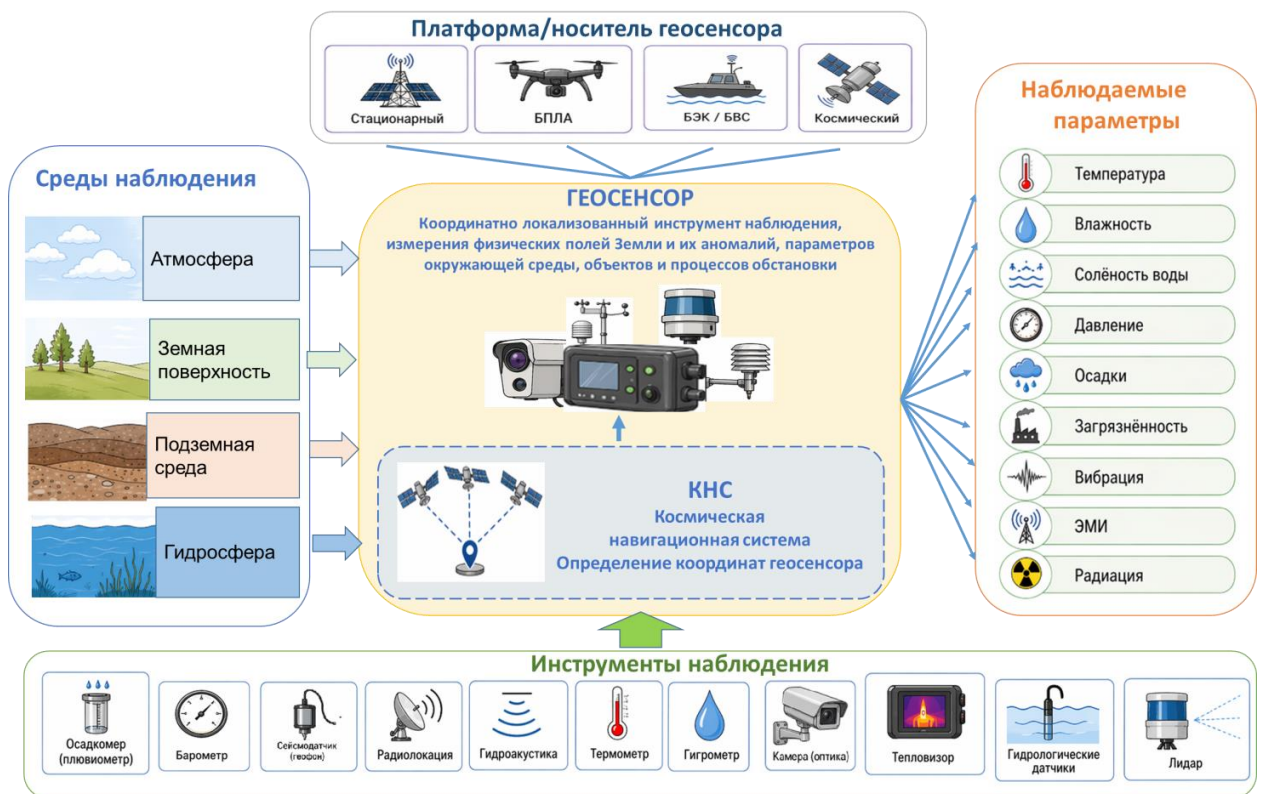


Рисунок 1.6 – Структурная схема геосенсора как средства измерения параметров геосреды

Геосенсор также обеспечивает передачу данных наблюдений по проводному или радиоканалу. В прикладной постановке работы геосенсор фиксирует не только «естественный фон», но и его отклонения, связанные с метеорологическими, техногенными или антропогенными воздействиями [5].

Функции ГТРП как территориально распределенной системы наблюдения за ФПЗ и геоситуацией включают: наблюдение за геоситуацией, измерение параметров ФПЗ и обстановки; сбор, синхронизация и предобработка данных геосенсорных наблюдений и измерений; передача данных наблюдательной, событийной и диагностической информации в аналитико–управляющий контур ОММ.

Пространственно–структурная целостность – сохранение функционально достаточной пространственной конфигурации геосенсорной платформы на всей рассматриваемой территории. Это свойство означает отсутствие критических разрывов наблюдения, слепых зон, потери связности между узлами, недопустимого снижения плотности покрытия и разрушения опорной пространственной структуры сети.

1.3. Анализ физико–географических и оперативно–географических условий функционирования ОММ РСЛЦ

Для целей исследования условия функционирования и эксплуатации ОММ РСЛЦ целесообразно разделить на шесть взаимосвязанных групп (рис. 1.7): природно–климатические, техногенные, социально–организационные, географо–территориальные, эксплуатационно–технические и информационно–диагностические [15, 16, 28, 64, 75, 141].



Рисунок 1.7 – Группы условий и факторов геосреды, влияющих на состояние ГТРП

Природно–климатические условия отражают воздействие температуры, влажности, осадков, ветровой нагрузки, запыленности, обледенения, тумана и сезонных изменений на элементы ГТРП. Техногенные условия характеризуют влияние застройки, транспорта, промышленной активности, электромагнитных помех, вибрации и иных факторов антропогенно преобразованной среды [28, 64]. Социально–организационные условия определяют режим эксплуатации объекта, доступ персонала, распределение ответственности, наличие эксплуатационных окон и организационные ограничения выполнения работ.

Для иллюстрации территориальной неоднородности условий функционирования ОММ рассмотрены шесть обезличенных объектов логистическо–складской сети, различающихся по типу размещения и окружению. В выборку включены городская площадка с плотной застройкой, удаленный лесистый объект, открытая равнинная территория, прибрежная зона, пригородный смешанный участок и промышленная окраина. Такое сопоставление показывает, что условия эксплуатации ГТРП формируются не только составом технических средств, но и положением объекта в территории, доступностью маршрутов ТОиР, характером застройки, наличием природных барьеров, водных объектов, транспортной и инженерной инфраструктуры. Примеры таких условий представлены на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Примеры территориального размещения узлов операционно-логистической сети

1.3.1. Анализ природно–климатических особенностей функционирования ОММ РСЛЦ

Природно–климатические факторы постоянно воздействуют на ОММ РСЛЦ. На рисунке 1.9 представлены основные проявления таких воздействий на примере охраняемого логистического объекта.



Рисунок 1.9 – Примеры воздействия природно–климатических факторов геосреды на технические средства ОММ РСЛЦ

Температурные воздействия. Эксплуатация ТСО в условиях экстремально низких или высоких температур может привести к изменению физических свойств материалов, использованных в оборудовании, что может вызвать сбои в работе или выход из строя отдельных компонентов. Например, при низких температурах возможно снижение емкости аккумуляторных батарей и увеличение хрупкости пластиковых деталей, тогда как высокие температуры могут привести к перегреву электронных компонентов и ускоренному старению изоляционных материалов. Согласно ГОСТ 15150–69 [63], изделия должны сохранять свои параметры в пределах норм, установленных техническими заданиями, после и (или) в процессе воздействия климатических факторов, значения которых нормированы для различных исполнений и условий размещения [64].

Влажность и осадки. Высокая влажность, дождь, снег и конденсат могут вызывать коррозию металлических частей ТСО, снижение изоляционных свойств материалов и короткие замыкания в электрических цепях. Особенно опасно воздействие влаги при наличии механических повреждений или недостаточной герметич-

ности корпусов оборудования. ГОСТ 15150-69 устанавливает категории размещения изделий, учитывающие воздействие атмосферных осадков и влажности, в том числе для открытой и защищенной среды [63].

Ветровые нагрузки. Сильные порывы ветра создают значительные механические нагрузки на конструктивные элементы ТСО – мачты, антенны и другие выступающие части, что может привести к их деформации или разрушению. Для районов с высокой ветровой нагрузкой ГОСТом предусмотрено усиленное исполнение конструкций [64].

Обледенение и снеговые нагрузки. Накопление снега и образование льда увеличивает массу конструкций, создает дополнительную нагрузку, нарушает функционирование сенсорных элементов. В районах с частыми отложениями льда и снега применяются конструктивные решения с подогревом или антиобледенительными покрытиями [63, 75, 125].

Пылевые и песчаные бури. В районах с засушливым климатом пыль и песок могут проникать внутрь оборудования, вызывая абразивный износ, засорение оптических компонентов, ухудшение теплоотвода. ГОСТ 15150–69 включает климатическое исполнение для районов с высокой пылеватостью и предусматривает степень защиты корпусов [63].

Солнечная радиация и ультрафиолетовое излучение. Воздействие УФ–излучения приводит к старению пластмасс, выцветанию и разрушению конструктивных элементов. Для защиты применяются УФ-стойкие полимеры и окраска специальными составами [63, 75].

Грозовые разряды и ЭМИ. Молнии и вторичные электромагнитные импульсы вызывают перенапряжения, выход из строя оборудования. Используются средства грозозащиты, заземление и экранирование. Эти требования регламентируются нормативами по молниезащите и электромагнитной совместимости [63].

1.3.2. Анализ техногенных особенностей функционирования ОММ РСЛЦ

Значительное влияние оказывает нахождение ЛЦ вблизи промышленных объектов, железнодорожных путей, автомагистралей, объектов энергетической инфраструктуры (рис. 1.10) [28, 32, 48, 64].

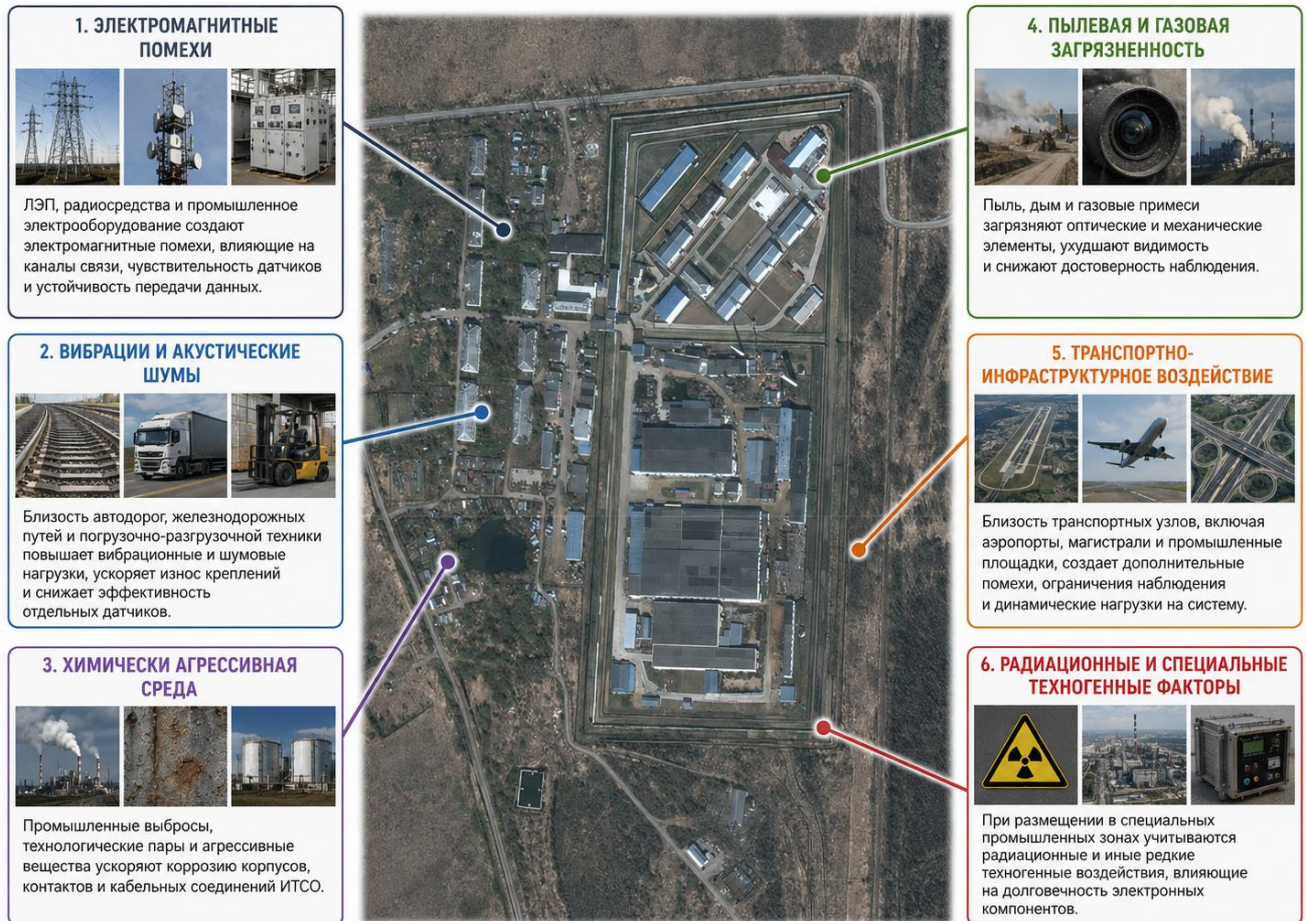


Рисунок 1.10 – Примеры воздействия техногенных факторов геосреды на технические средства ОММ РСЛЦ

Электромагнитные помехи. Наличие поблизости от ТСО источников электромагнитного излучения, таких как линии электропередачи, радиостанции, промышленные установки, может вызывать электромагнитные помехи. Эти помехи способны приводить к сбоям в работе электронных компонентов, снижению чувствительности датчиков [9,64, 75].

Вибрации и акустические шумы. ТСО, установленные вблизи промышленных предприятий, транспортных магистралей или железнодорожных путей, подвергаются постоянным вибрационным и шумовым нагрузкам. Длительное воздей-

ствие вибрации может привести к механическому износу и разрушению компонентов оборудования, а высокий уровень шума – к снижению эффективности акустических датчиков. Применение демпфирующих материалов и виброизоляторов способствует снижению негативного влияния этих факторов [6, 7, 9, 78].

Агрессивные химические среды. В районах с повышенным содержанием в атмосфере агрессивных химических веществ, ТСО могут подвергаться коррозии и разрушению материалов. Использование антикоррозийных покрытий, герметизация корпусов и выбор материалов, устойчивых к химическим воздействиям, помогают продлить срок службы [7, 9].

Пылевая и газовая загрязненность. ТСО, эксплуатируемые в зонах с высокой запыленностью или газовым загрязнением, сталкиваются с риском загрязнения оптических и механических компонентов, что может привести к снижению чувствительности датчиков и ухудшению передачи сигналов [9].

Радиационное воздействие. Вблизи объектов с повышенным радиационным фоном ТСО могут подвергаться ионизирующему излучению, что негативно сказывается на электронных компонентах и может приводить к их деградации. Применение радиационно-стойких материалов и дополнительной защиты помогает снизить влияние этого фактора [7, 9].

1.3.3. Анализ социально-организационных особенностей функционирования ОММ РСЛЦ

Объекты ОММ РСЛЦ подвергаются воздействию антропогенных факторов извне и изнутри [9]. Функционирование технической подсистемы ОММ зависит от действий личного состава, что повышает важность уровня подготовки персонала, составление регламентов проведения работ и накладывает ограничения на контроль действий персонала [49, 51, 57, 61]. С другой стороны, основным деструктивным фактором являются действия потенциальных нарушителей, которыми, однако, могут являться и сами сотрудники. На рисунке 1.11 представлены основные антропогенные особенности функционирования ОММ РСЛЦ [77].



Рисунок 1.11 – Примеры воздействия антропогенных факторов геосреды на технические средства ОММ РСЛЦ

Уровень подготовки и квалификация персонала. Эффективность эксплуатации ТСО напрямую зависит от уровня подготовки и квалификации обслуживающего персонала. Недостаточная компетентность может привести к ошибкам в управлении системой и несвоевременному реагированию на инциденты [77, 115].

Организация взаимодействия между подразделениями. Координация действий между различными подразделениями, ответственными за безопасность, влияет на оперативность и точность реагирования на угрозы [6, 47, 108].

Режим доступа и контроль. Ограничение и контроль доступа к ТСО предотвращают несанкционированное вмешательство и возможные акты вандализма. Использование систем контроля доступа и журналирование операций с оборудованием повышают уровень защиты системы.

Социальная среда. Особенности социальной среды в районе эксплуатации ТСО влияют на вероятность попыток саботажа или повреждения оборудования. Усиленные меры защиты, такие как установка антивандальных корпусов и размещение камер в недоступных местах, помогают минимизировать эти угрозы. В работах [57, 85, 88] отмечается высокий риск преднамеренного повреждения ИТСО нарушителями (вандализм, залив водой и т.д.), что требует установки резервных каналов контроля и датчиков вскрытия/саботажа.

Финансирование и ресурсное обеспечение. Достаточное финансирование обеспечивает своевременное обслуживание, обновление и модернизацию ТСО. Ограниченные ресурсы могут привести к использованию устаревшего оборудования и снижению эффективности системы мониторинга [20, 65, 115].

1.3.4. Анализ географических особенностей функционирования ОММ РСЛЦ

Географические факторы оказывают значительное влияние на проектирование, установку и эксплуатацию технических средств охранного мониторинга местности (ТСО) (рис. 1.12) [45, 46, 75, 73, 91, 92]. Учет факторов необходим для обеспечения надежности и эффективности функционирования систем безопасности.

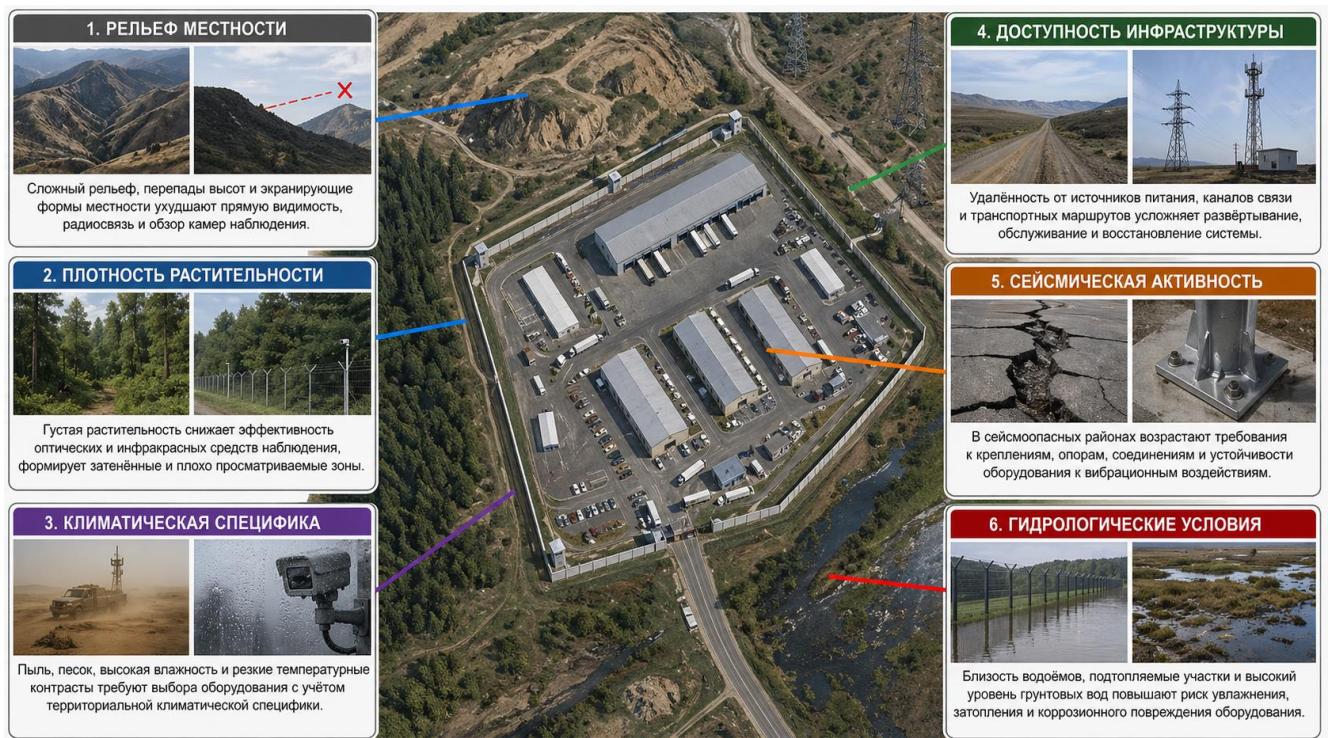


Рисунок 1.12 – Примеры воздействия географо-территориальных факторов геосреды на технические средства ОММ РСЛЦ

Рельеф местности. Горные районы, холмистые территории и плотная городская застройка могут создавать препятствия для прямой видимости между элементами ТСО, что особенно критично для систем видеонаблюдения и радиосвязи [45, 46, 73, 101]. В таких условиях требуется тщательное планирование размещения оборудования и применение соответствующих технологий.

Плотность растительности. Лесистые и густо заросшие участки могут затруднять работу оптических и инфракрасных датчиков, а также снижать эффективность видеонаблюдения. Для таких условий рекомендуется использование датчиков с другими принципами действия, например, радиолокационных или акустических, а также установка оборудования на возвышенностях или мачтах для обеспечения лучшего обзора.

Климатические условия. Различные климатические зоны предъявляют специфические требования к ТСО. В районах с высокой влажностью необходимо использовать оборудование с повышенной защитой от коррозии, в засушливых регионах – учитывать воздействие пыли и песка, а в условиях низких температур – обеспечивать подогрев критически важных компонентов.

Доступность инфраструктуры. Удаленные и труднодоступные районы часто характеризуются отсутствием стабильных источников электропитания и коммуникационных сетей. В таких случаях целесообразно применение автономных источников энергии (солнечные панели, ветрогенераторы) и спутниковых каналов связи для обеспечения бесперебойной работы ТСО.

Сейсмическая активность. В регионах с повышенной сейсмической активностью необходимо учитывать возможность землетрясений при проектировании и установке ТСО. Это включает использование антисейсмических креплений, гибких соединений и оборудования, способного выдерживать вибрационные нагрузки.

Гидрологические условия. Близость водоемов, болотистые местности или районы с высоким уровнем грунтовых вод требуют защиты оборудования от затопления и повышенной влажности. Использование герметичных корпусов, поднятие оборудования на возвышенности или специальные платформы помогают минимизировать риски, связанные с воздействием воды.

1.3.5. Анализ информационно–диагностических особенностей функционирования ОММ РСЛЦ

Современные технические средства охранного мониторинга местности (ТСО) опираются на комплексные механизмы сбора, передачи, обработки и хранения данных [17, 18, 23, 25, 74]. На рисунке 1.13 продемонстрированы основные информационно-диагностические аспекты функционирования ОММ.

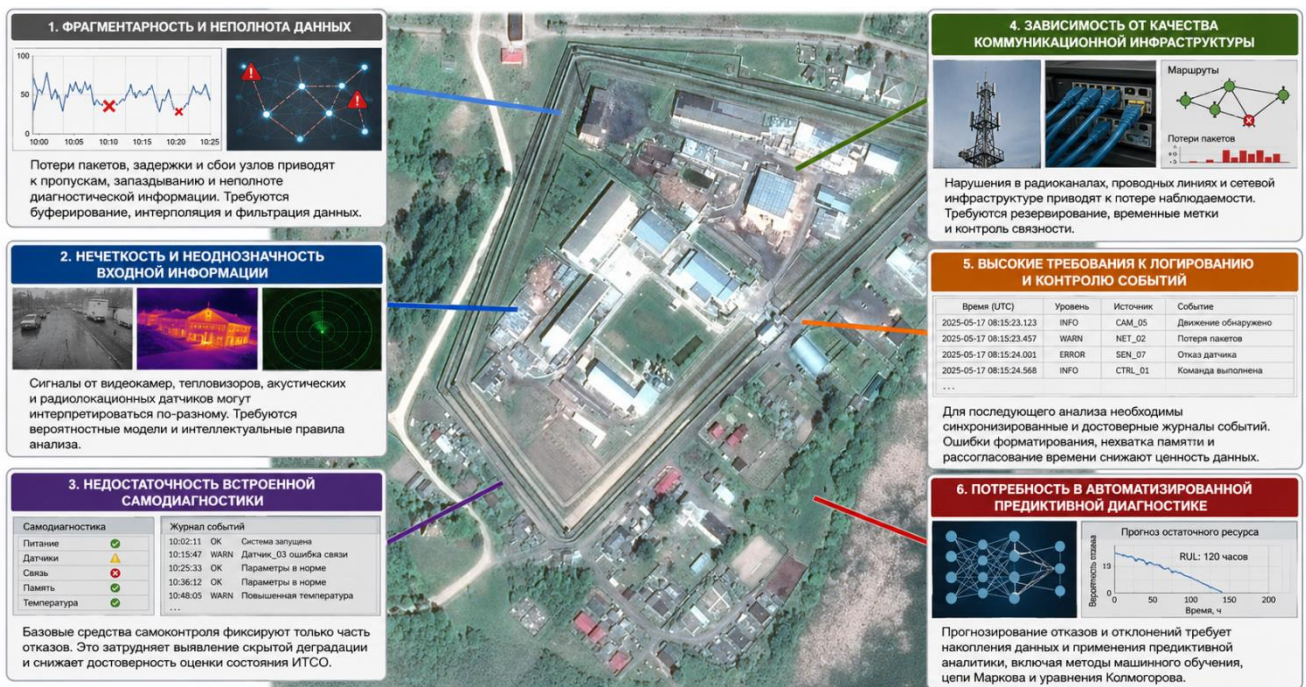


Рисунок 1.13 – Примеры воздействия информационно-диагностических факторов геосреды на технические средства ОММ РСЛЦ

Фрагментарность и неполнота данных. Информация, поступающая от датчиков, часто бывает неполной, с запаздыванием или содержит ошибки. Это связано с нестабильностью каналов связи, сбоем отдельных узлов и условиями окружающей среды (например, ухудшением видимости, зашумлением радиоканала) [15]. Возникает необходимость реализации алгоритмов интерполяции, фильтрации и временного буферирования данных [16].

Нечеткость и неоднозначность входной информации. ТСО получают сигналы от разнородных источников: видеокamer, акустических и радиолокационных датчиков, тепловизоров и др. Часто возникает ситуация, когда один и тот же объект

интерпретируется системами по-разному. Это требует использования моделей распознавания, основанных на вероятностной логике, машинном обучении и интеллектуальных правилах принятия решений [16], [17].

Недостаточность возможностей встроенной самодиагностики. Большинство ТСО оснащаются только базовыми средствами самотестирования (индикация питания, уровня сигнала и т.п.), что не позволяет своевременно выявлять деградацию оборудования. Отсутствие развернутой диагностики повышает риск скрытых отказов и снижает эффективность системы в целом [5].

Зависимость от качества коммуникационной инфраструктуры. Передача данных между элементами системы может осуществляться по радиоканалу, оптоволокну, проводным линиям или мобильным сетям. Отказ одного из звеньев приводит к частичной потере наблюдаемости. Для обеспечения устойчивости необходима реализация избыточности и протоколирования с временной меткой (англ. time-stamping) [15], [16].

Высокие требования к логированию и контролю событий. Для последующего анализа ситуаций (например, при нарушении режима охраны) необходимы достоверные логи событий. Недостаток памяти, отсутствие синхронизации времени, ошибки форматирования данных могут снижать доказательную ценность информации [17].

Потребность в автоматизированной предиктивной диагностике. Современные подходы предполагают прогнозирование отказов оборудования и отклонений в поведении объектов охраны на основе накопленных данных. Реализация таких функций требует внедрения алгоритмов предиктивной аналитики, включая методы машинного обучения, цепи Маркова и уравнения Колмогорова [22, 23, 28, 56, 57, 60, 63, 97].

1.4. Проблемные вопросы обеспечения эффективного функционирования ОММ РСЛЦ в условиях деструктивных факторов геосреды

Несмотря на значительное развитие как аппаратных, так и программных компонентов охранных систем, подходы по поддержанию функциональной и пространственно-структурной целостности ОММ остаются уязвимыми и содержат целый ряд нерешенных проблемных вопросов [20, 28, 65, 77, 127].

Они обусловлены как внутренними ограничениями архитектуры систем, так и внешними факторами – территориальной распределенностью объектов, воздействием геосреды, слабой адаптацией к новым методам анализа и планирования.

1.4.1. Противоречия существующего модельного аппарата в контроле и регулировании технических систем специального охранного мониторинга местности

Сопоставление существующих подходов показывает, что в них представлены отдельные необходимые компоненты модельного аппарата: нормативное описание технических состояний, показатели надежности, процедуры диагностики, модели деградации и прогнозирования, а также модели структуры системы. Однако при их совместном использовании сохраняется ограничение: объект охранного мониторинга, как правило, рассматривается либо как техническое средство, либо как элемент сети, либо как объект обслуживания. Для ОММ РСЛЦ этого недостаточно. Требуется модель, в которой ИТСО задается как геообъект, связанный с зоной ЛЦ, ячейкой покрытия, рубежом контроля, условиями эксплуатации и последствиями отказа для сохранения функции наблюдения.

Нормативно-диагностический подход, отраженный в ГОСТ 27.002–2015 [69], формирует исходный аппарат описания технических состояний, отказов и диагностических признаков [66, 67, 70, 73-77]. Проведенный анализ позволил установить, что данный подход ориентирован на описание объекта как технического средства и не учитывает его пространственную локализацию в структуре ОММ РСЛЦ.

Подходы к техническому обслуживанию и ремонту, представленные в ГОСТ Р 54101–2010 [111], регламентируют эксплуатационный цикл объекта, виды обслуживания и требования к контролю технического состояния [20, 64, 76]. Сделан вывод, что данный подход ориентирован на организацию эксплуатации, но не задает модель, связывающую состояние средства охраны с его размещением в структуре ЛЦ, маршрутом ТОиР, уровнем резервирования и влиянием отказа на покрытие территории.

Отраслевые стандарты по охранной сигнализации, видеонаблюдению и СКУД, представленные в ГОСТ Р 52435–2015, ГОСТ Р 51558–2014 [68, 69], задают состав, классификацию и функциональные характеристики средств охраны [9, 61, 99]. Из этого следует, что регламенты описывают структуру и назначение элементов системы, но не формируют модель деградации и переходов состояний, не задают пространственно-временную оценку потери наблюдения и не связывает отказ устройства с нарушением функциональной или пространственно-структурной целостности ОММ РСЛЦ.

Подходы condition-based maintenance и predictive maintenance, а также марковские и скрыто-марковские модели формируют более развитый аппарат оценки и прогноза технического состояния [22, 23, 56, 96, 122]. Это позволяет описывать деградацию и переходы между состояниями, однако применение таких моделей обычно ограничено уровнем отдельного устройства, агрегата или подсистемы и не доводится до пространственной оценки покрытия, доступности восстановления и последствий отказа для ОММ РСЛЦ.

Исследования надежности сенсорных сетей, представленные в работах [14, 15, 56, 38], ориентированы на анализ покрытия, размещения узлов, устойчивости сети и надежности передачи данных. Пространственный фактор учитывается полнее, чем в классических моделях ТОиР, однако эксплуатационные признаки охранного мониторинга, включая ложные срабатывания, скрытые отказы, историю ТОиР и влияние геосреды, обычно не включаются в алгоритмы оценки и расчетов.

Геоинформационные и подходы по созданию цифровых двойников, представленные в работах [31, 33, 40, 138], показывают возможность пространственно

привязанной поддержки эксплуатации на основе данных о размещении объектов, логистике, погодных условиях и состоянии инфраструктуры. Модельный аппарат, основанный на теории пространственного анализа, учитывает геопространственный контекст, однако, как правило, не содержит специализированной модели охранного мониторинга, в которой зона обнаружения, сектор обзора, потеря канала связи, нарушение резервирования и образование слепой зоны рассматриваются как самостоятельные элементы расчетной схемы.

Проанализирован существующий модельный аппарат, применяемый при анализе технического состояния и поддержании функциональной готовности систем охранного мониторинга. Результаты анализа представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты анализа существующего модельного аппарата оценки и прогнозирования состояния ОММ РСЛЦ

Направление	Применяемые механизмы	Ограничения
Нормативно-диагностические подходы	нормативные модели технического состояния, диагностические признаки, логические правила контроля состояния	Формируют язык описания исправности, неисправности, отказа и контроля состояния, но рассматривают объект преимущественно как техническую единицу без пространственной локализации в структуре ЛЦ
Надежностные и регрессионные модели	показатели надежности и готовности, интенсивности отказов и восстановлений, MTBF, MTTR, ресурсные и регрессионные зависимости	Позволяют оценивать состояние усредненно, но не дают явного описания переходов между конкретными техническими состояниями и не связывают результат с ячейками покрытия и зонами наблюдения
Марковские и скрыто-марковские модели	непрерывные цепи Маркова, уравнения Колмогорова, скрытые состояния, вероятностный прогноз деградации и отказов	Позволяют описывать переходы между состояниями и прогнозировать ухудшение, но в базовом виде относятся к объекту или подсистеме и требуют дополнительной геоинформационной привязки для перехода к оценке территории
Сетевые и имитационные модели	сети Петри, имитационное моделирование, Монте-Карло, событийные модели	Обладают высокой гибкостью при описании сложной динамики, но трудны для построения и обновления в территориально распределенной системе, особенно при необходимости многократного пересчета по зонам и временным срезам

Существующие подходы дают отдельные необходимые компоненты модельного аппарата: нормативное описание состояний и отказов, регламентные проце-

дуры ТОиР, вероятностные модели деградации, модели скрытых состояний, модели сенсорных сетей и геоинформационную поддержку обслуживания. Однако эти компоненты применяются раздельно.

В результате состояние ИТСО обычно рассматривается локально, без перехода к оценке территориальных последствий отказа для зоны ЛЦ, рубежа контроля или ячейки покрытия. Прогноз ухудшения состояния, как правило, не связывается с изменением наблюдаемости, резервирования и доступности восстановления на территории.

Для ОММ РСЛЦ требуется геомодель, в которой элементы системы задаются как геообъекты с координатами, зонами действия, атрибутивными признаками, событиями, связями и условиями эксплуатации, а оценка технического состояния переводится в пространственно-содержательные рекомендации [82, 67].

1.4.2. Противоречия существующего методического аппарата контроля и регулирования технических систем специального охранного мониторинга местности

Методическая основа эксплуатации инженерно–технических средств охраны в территориально распределенных системах охранного мониторинга формируется на стыке требований к самим техническим средствам, условиям их эксплуатации и базовым понятиям надежности [63, 64, 67]. При этом сложившаяся практика технического сопровождения по–прежнему в основном ориентирована на регламентные процедуры и локальный учет состояния оборудования, что в условиях территориальной распределенности объектов и неоднородности геосреды порождает ряд устойчивых методических противоречий [64, 76, 144]. Проанализированы основные направления существующего методического аппарата поддержания технической готовности и предиктивной диагностики технических объектов. Результаты анализа приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты анализа существующих методов поддержания технической готовности ОММ РСЛЦ

Подход	Описание	Методы	Ограничения
Периодический контроль и диагностирование	Состояние оценивается по результатам регулярных измерений, осмотров и диагностических признаков.	Пороговые правила, статистический анализ, диагностические признаки, экспертные процедуры.	Дает оценку текущего состояния, но ограниченно использует прогноз и обычно не связывается с пространственной структурой наблюдения.
Обслуживание по состоянию (CBM)	Решение о вмешательстве принимается по наблюдаемым признакам ухудшения состояния и данным мониторинга.	Показатели надежности, регрессионные оценки, марковские модели, HMM, condition monitoring.	Учитывает текущее состояние лучше регламентного подхода, но чаще всего применяется на уровне отдельного объекта и слабо учитывает территориальные последствия отказа.
Предиктивная диагностика / predictive maintenance	Состояние объекта прогнозируется на горизонт вперед, после чего формируется решение по контролю и ТОиР.	Модели деградации, марковские и скрыто-марковские модели, ML/DL, анализ временных рядов, оценка RUL.	Позволяет прогнозировать ухудшение состояния, но обычно не переводит прогноз в пространственно-содержательную оценку зон наблюдения, покрытия и доступности восстановления.
Интеллектуальная поддержка решений по ТОиР	После оценки и прогноза выбираются приоритеты вмешательства, сроки и состав мероприятий.	Многокритериальный анализ, оптимизационные процедуры, эволюционные алгоритмы, гибридные подходы.	Позволяет выбирать варианты действий, но без геоинформационной основы не учитывает полноценно различия зон ЛЦ, ячеек покрытия и пространственные последствия отказов.
Регламентное обслуживание	Работы выполняются по заранее установленным срокам и нормативам, независимо от фактического состояния объекта.	Планово-предупредительные схемы, календарные графики, регламентные проверки.	Не учитываются в должной мере реальное состояние ИТСО, различия условий эксплуатации и территориальная неоднородность ЛЦ.

Анализ подходов к поддержанию функциональной целостности позволил установить, что существующий методический аппарат охватывает основные режимы поддержания технической готовности: регламентное обслуживание, периодический контроль, обслуживание по состоянию, предиктивную диагностику и поддержку решений по ТОиР [56, 64, 74, 122, 148]. Ограничение состоит в том, что в большинстве методик технический объект рассматривается без явной геоинформационной привязки к зоне ЛЦ, ячейке покрытия, рубежу контроля и факторным условиям территории. Для ОММ РСЛЦ требуется методика, в которой сбор данных, оценка состояния, прогноз ухудшения и выработка управляющих решений

непосредственно связываются с пространственной структурой системы и последствиями отказа для наблюдения территории [71, 112, 139].

1.4.3. Противоречия существующего программно–алгоритмического аппарата в контроле и регулировании технических систем специального охранного мониторинга местности

Существующие программные решения в рассматриваемой предметной области можно разделить на три основные группы: геоинформационные системы, SCADA/АСУТП и телеметрические платформы, а также инструменты предиктивной аналитики. Их функциональные возможности частично пересекаются, однако каждая группа ориентирована на свой класс задач [33, 35, 122]. На рисунке 1.14 показаны основные направления программной поддержки охранного мониторинга и их функциональная разобщенность.

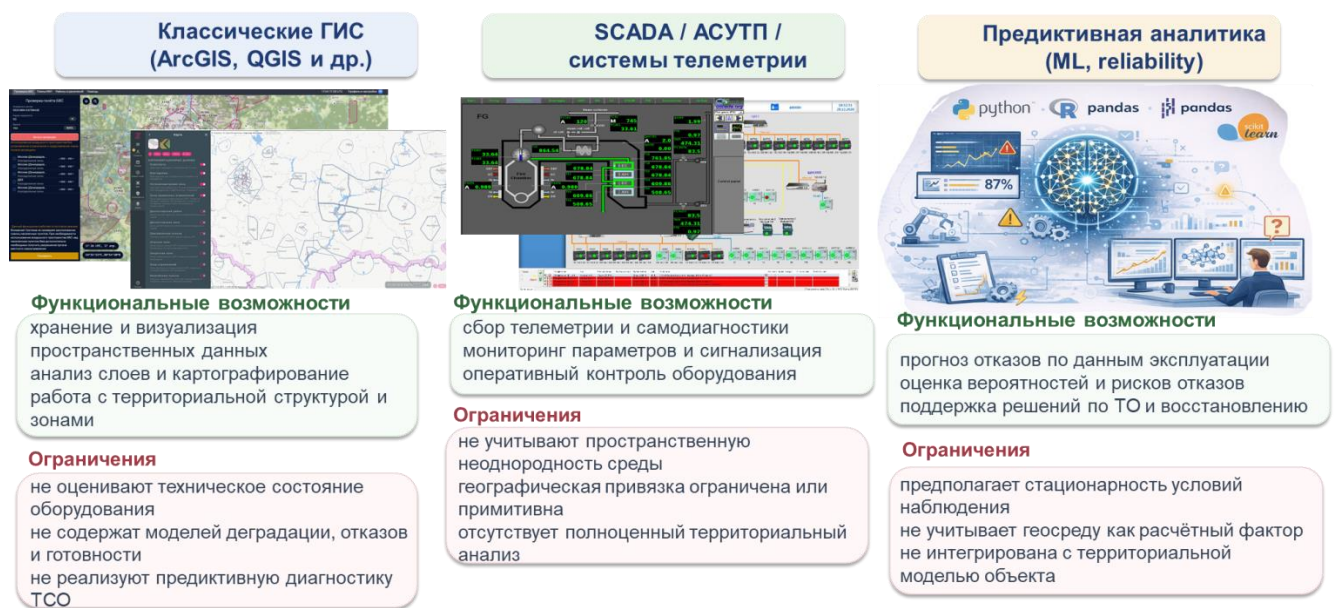


Рисунок 1.14 – Результаты анализа существующего программно-аналитического аппарата поддержки охранного мониторинга

Геоинформационные системы (QGIS, ArcGIS Pro и др.) обеспечивают хранение, визуализацию и пространственный анализ данных, работу со слоями, картографирование объектов и зон, а также пространственную аналитику в 2D и 3D [33, 34, 77, 100, 118]. Их сильной стороной является представление территориальной структуры объекта и результатов анализа на геоизображении. Ограничение состоит

в том, что такие системы сами по себе не предназначены для расчета технического состояния ИТСО, прогноза деградации и выработки решений по данным диагностики.

SCADA/АСУТП и телеметрические платформы ориентированы на сбор параметров, диспетчеризацию, сигнализацию и оперативный контроль оборудования в реальном времени [6, 7, 35]. Они позволяют отображать технологические состояния, тревоги и диагностические сообщения, а также поддерживают анализ потоковых данных. Однако пространственный контекст обычно представлен слабо, а территориальный анализ, картографическая агрегация и оценка состояния по зонам ЛЦ не входят в перечень функциональных возможностей таких решений.

Инструменты предиктивной аналитики применяются для оценки состояния активов, прогноза отказов, выявления тенденций ухудшения и поддержки решений по техническому обслуживанию [56, 62, 118, 122]. В эту группу входят как специализированные платформы управления активами, так и аналитические среды, в которых реализуются модели прогноза и оценки надежности. Позволяют работать с накопленными данными эксплуатации и поддерживают прогнозные расчеты. Ограничение состоит в том, что без геоинформационной основы такие решения рассматривают объект преимущественно как актив или источник данных, а не как геообъект, связанный с зоной ЛЦ, ячейкой покрытия и территориальными последствиями отказа.

Проведенный анализ показывает, что существующие программные решения решают отдельные частные задачи: ГИС описывают пространство, SCADA и телеметрия обеспечивают оперативный контроль, а аналитические платформы поддерживают прогноз состояния. Их ограничение для ОММ РСЛЦ состоит в функциональной разобщенности. Это обосновывает необходимость единой геоинформационно-алгоритмической платформы, объединяющей пространственные данные, диагностику, прогноз и выработку пространственно привязанных решений по контролю и ТОиР [31, 88, 114, 118].

1.5. Постановка задач исследования

Область функционирования ОММ РСЛЦ включает наблюдение за периметрами, зонами хранения, погрузочно–разгрузочными участками, КПП, маршрутами обслуживания, узлами связи, электропитания и прилегающими территориями. Выполнение этих функций обеспечивается ОММ, в состав которого входит ГТРП как сенсорно–коммуникационная и первично–обрабатывающая основа. Состояние ОММ РСЛЦ определяется не только исправностью отдельных геосенсоров и элементов ИТСО, но и пространственной конфигурацией объектов, условиями гео-среды, доступностью ТОиР, устойчивостью каналов связи и полнотой диагностических данных.

Анализ предметной области показал:

- значительная часть информации, связанной с функционированием и эксплуатацией ОММ РСЛЦ, имеет геопространственную составляющую: координаты объектов, зоны покрытия, маршруты обслуживания, рубежи контроля, функциональные зоны ЛЦ, каналы связи, узлы электропитания и факторные слои территории;
- техническая готовность ОММ РСЛЦ формируется в условиях территориальной неоднородности: однотипные геосенсоры и элементы ИТСО работают при разных природно–климатических, техногенных, социально–организационных, географо–территориальных, эксплуатационно–технических и информационно–диагностических условиях;
- действующие регламентные процедуры ТОиР слабо учитывают пространственную вариативность условий эксплуатации, различия в доступности объектов, неодинаковую значимость функциональных зон и влияние отказов отдельных элементов на наблюдательное покрытие;

Выявлено общее противоречие (ОП) между потребностью в совместном территориальном и предиктивном анализе состояния ОММ РСЛЦ и отсутствием геоинформационного модельно–методического аппарата, который объединяет пространственное размещение объектов, техническое состояние ГТРП, факторные слои территории, выработку пространственно–содержательных рекомендаций по

поддержанию технической готовности.

Выявлены частные противоречия (ЧП):

– (ЧП.1) между потребностью в пространственно–содержательном представлении связанной с обеспечением требуемой технической готовности ТПС ОММ РСЛЦ геоситуации и отсутствием геомодельного аппарата, адекватно отображающего функционирование геосенсорных и др. технических средств охранного мониторинга в условиях воздействия внешних и внутренних факторов природной, техногенной и социальной окружающей среды;

– (ЧП.2) между потребностью в специальном, учитывающем воздействие окружающей среды на средства охраны, методическом аппарате анализа, оценки и прогнозирования технического состояния ТПС ОММ РСЛЦ для снятия функциональных ограничений существующих приемов и процедур предиктивной аналитики;

– (ЧП.3) между потребностью реализации территориально ориентированной логистики технического обслуживания и ремонта ТПС ОММ РСЛЦ и системными ограничениями классического регламентного подхода;

– (ЧП.4) между потребностью оперативной обработки, преобразования и отображения больших массивов динамической разнородной геопространственной и содержательной информации об окружающей среде, физических полях Земли, геоситуации и техническом состоянии средств охраны ОММ РСЛЦ и отсутствием таких специальных программно-процессных средств применительно к территориально-распределенным геосенсорным платформам.

Для разрешения указанных противоречий требуется построить геоинформационный аппарат, обеспечивающий последовательный переход от предметной области ОММ РСЛЦ к геомодели обстановки, далее – к ситуационно–предиктивной оценке состояния ГТРП, затем – к множеству пространственно–содержательных рекомендаций по контролю, ТОиР и восстановлению покрытия.

Формальная постановка задачи исследования (ПЗИ) задается последовательностью отображений, представленных на рисунке 1.15.

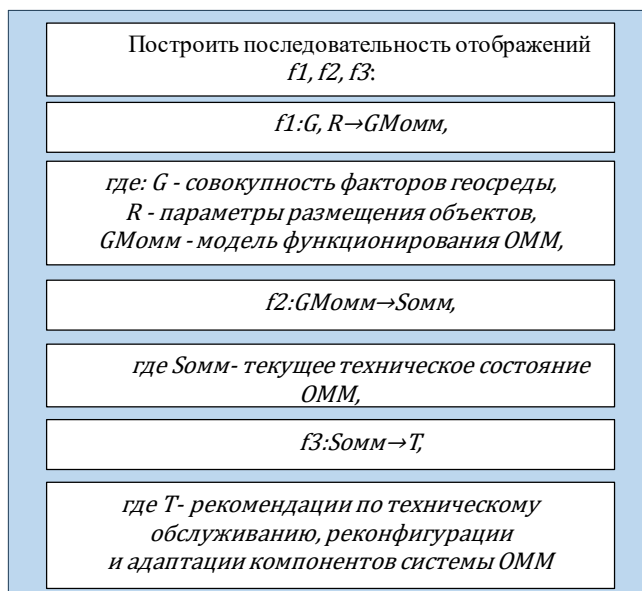


Рисунок 1.15 – Формальная постановка задач исследования: f_1 - отображение факторов гео-среды G, R в модель обстановки GM_{OMM} ; f_2 - отображение GM_{OMM} в оценку состояния S_{OMM} ; f_3 - отображение S_{OMM} в предписания T

Графическая иллюстрация ПЗИ представлена на схеме рис. 1.16.

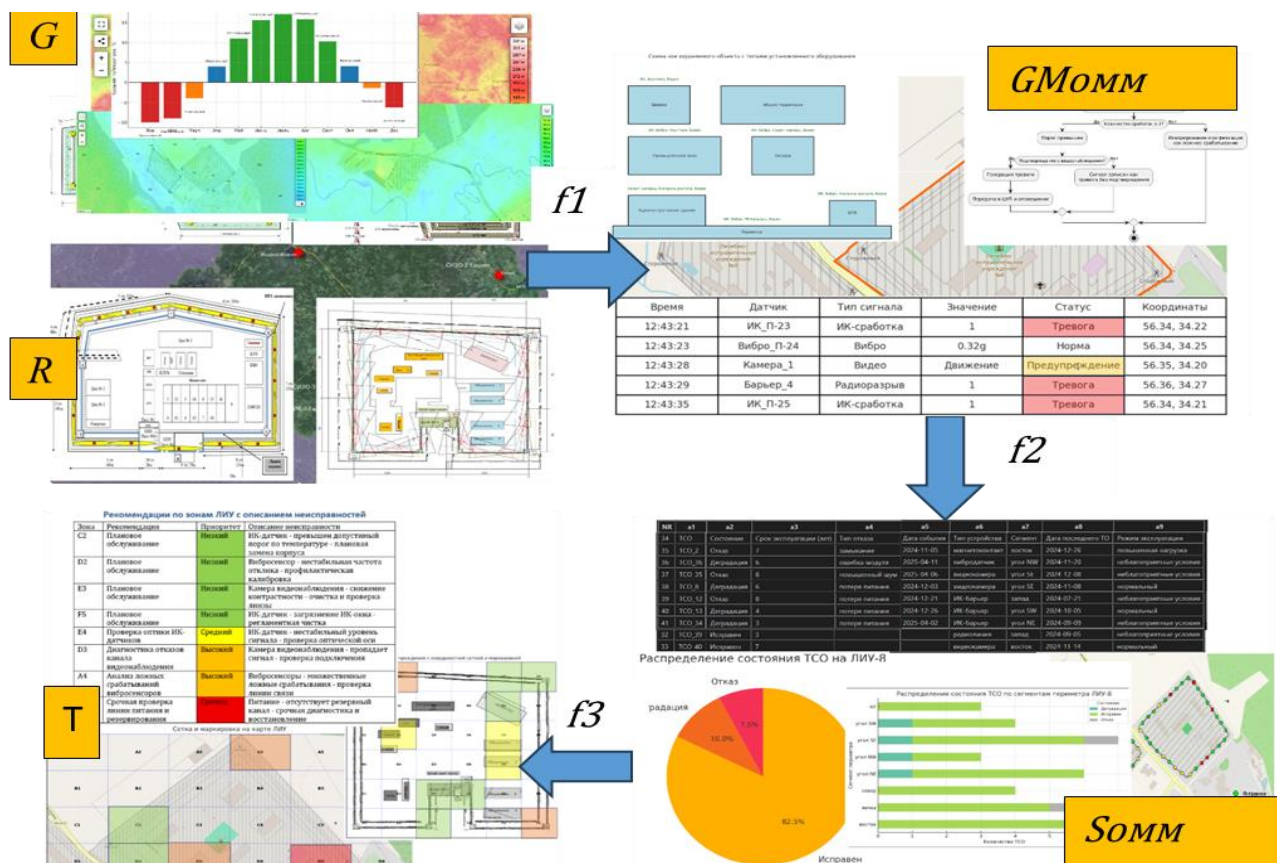


Рисунок 1.16 – Графическая иллюстрация постановки задач исследования

Такой подход задает основу для автоматизированного анализа и пространственно-привязанных рекомендаций. На рисунке 1.16 показано, как

формализованные этапы реализации отображений f_1, f_2, f_3 находят свое отражение в структуре системы. Исходные входные данные: климатические и картографические характеристики (G), технические планы размещения оборудования (R). С использованием средств мониторинга и визуализации, формируется модель обстановки $GM_{ОММ}$. В результате анализа состояния системы на основе диагностических признаков (S) создаются пространственно-содержательные рекомендации (T).

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

$$G, R \xrightarrow{f_1} GM_{ОММ} \xrightarrow{f_2} S_{ОММ} \xrightarrow{f_3} T \quad (1.1)$$

где: G, R - оперативные данные об обстановке; $GM_{ОММ}$ - динамическая адаптивная территориальная модель обстановки; $S_{ОММ}$ - оценка обстановки; T - рекомендации в систему управления или поддержки принятия решения.

Отображения f_1, f_2, f_3 строятся как комбинации соответствующих моделей представления и методик обработки исходных данных обстановки в ОММ РСЛЦ (выражение 1.2).

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

где: PR - множество процедур (алгоритмов) решения задач ОММ РСЛЦ; PR - последовательности методов и методик (MT) обработки ситуационной информации, формализованной с помощью моделей (MD) предметной области,

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

MD - множество моделей представления ситуации предметной области,

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

MT - множество методов и методик обработки данных предметной области,

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

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

Реализация формальной постановки (1.1) – (1.6) предполагает разрешение модельно-методических и программно-алгоритмических противоречий (ОП), (ЧП.1) – (ЧП.4) предметной области геоинформационной поддержки технической готовности ОММ РСЛЦ.

Выводы по разделу 1

1. РСЛЦ имеет значительное географическое расположение, ее отдельные локации испытывают различное влияние природных, техногенных и социальных факторов.
2. Территориальность РСЛЦ определяется ее собственным пространством, масштабными уровнями, взаимным влиянием на окружающую среду.
3. ГТРП является центральным элементом ОММ. Она обеспечивает определение параметров ФПЗ, а также выполняет функции выявления действий нарушителей и опасных факторов.
4. Модельно-методический аппарат предиктивной аналитики исчерпал свои функциональные возможности и требует применения новых методов.
5. Перспективным моментом преодоления установленных ограничений является интеграция геоинформационных методов пространственного анализа в предиктивный аппарат.
6. Для преодоления выявленных противоречий в предметной области ОММ РСЛЦ предложена постановка задач исследования, направленная на разработку специальных геоинформационных моделей и методик, расширяющих прогностические и эксплуатационные возможности территориальных ОММ РСЛЦ.

РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА ГЕОМОДЕЛИ ОБСТАНОВКИ В ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОХРАННЫХ ГЕОСЕНСОРНЫХ МОНИТОРИНГОВ МЕСТНОСТИ

В системе геоинформационной поддержки регулирования работы ОММ РСЛЦ обстановка занимает центральное место. К ней периодически обращаются все этапы и процедуры территориального регулирования ОММ [31, 33, 91]

При построении геомодели обстановки разрабатываются: общие положения по моделированию в системе геоконтроллинга ОММ, структура, состав и содержание модели обстановки в ОММ, а также параметрическое описание связей элементов модели и аналитические зависимости технико-эксплуатационных компонентов и процессов в системе ОММ.

2.1. МЕСТО ГЕОМОДЕЛИ ОБСТАНОВКИ В СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОММ

Понятие «обстановка» используется для описания состояния территориальной системы в конкретный момент или интервал времени [31, 33, 87, 88, 89, 93, 111]. Применительно к ОММ РСЛЦ обстановка понимается как пространственно-временное состояние региональной сети логистических центров, ее технической подсистемы ИТСО, геосреды, инфраструктуры, эксплуатационных процессов и событий, влияющих на техническую готовность охранного мониторинга.

Для анализа геоситуации требуется не табличный учет объектов и отказов, а геоинформационное представление, связывающее объект, место, состояние, событие и время [33, 44]. В этой постановке каждый элемент ОММ РСЛЦ рассматривается как геообъект, имеющий пространственную компоненту, атрибутивные признаки, связи с другими объектами и принадлежность к зоне ЛЦ.

Геомодель обстановки является центральным элементом геоинформационного регулирования ГТРП ОММ РСЛЦ. Она задает единый способ описания РСЛЦ как совокупности ЛЦ, ИТСО, зон, событий, факторных слоев и отношений между ними. На ее основе выполняются оценка состояния ИТСО, прогноз ухудшения состояния, локализация неблагоприятных зон, формирование рекомендаций по кон-

тролю и ТОиР, планирование выездных мероприятий и контроль исполнения решений. В условиях территориальной рассредоточенности ЛЦ, неоднородности гео-среды и неполноты диагностических данных геомодель служит основой гео-контроллинга ОММ РСЛЦ [15, 31, 33].

Регулирование системы ОММ РСЛЦ и состояния ее технической подсистемы, как и управление другими территориально распределенными объектами, включает следующие основные этапы (рис. 2.1): уяснение задачи: выявление рас-согласования между требуемым и фактическим состоянием наблюдательного по-крытия, фиксация нештатной ситуации или наступление очередного этапа ТО; оценка обстановки; выработка вариантов воздействия; планирование контроля, ТОиР или резервирования; организация выполнения принятого решения [46].

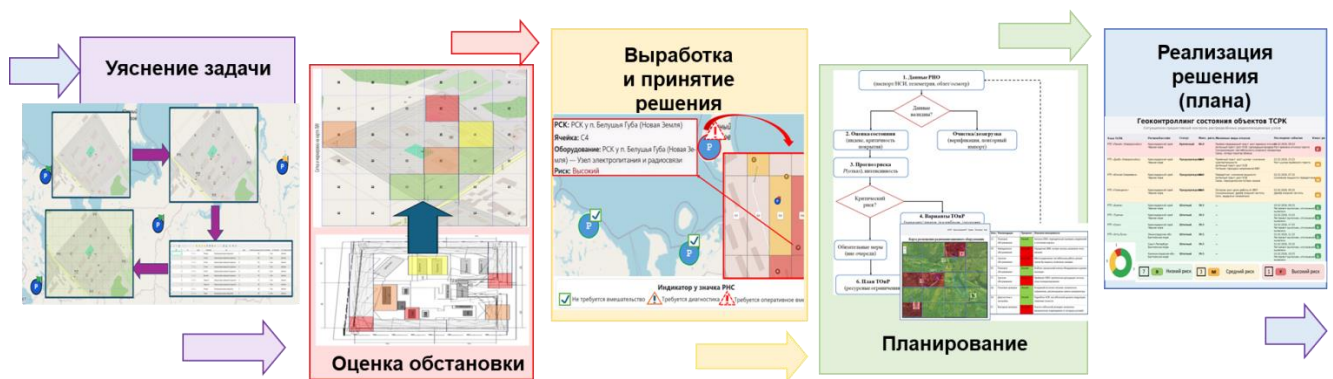


Рисунок 2.1 – Основные этапы регулирования РСЛЦ, как территориальной системы

Такой контур закладывается в основу геоинформационно–аналитического и ситуационно–предиктивного сопровождения функционирования ГТРП охранного мониторинга региональной сети логистических центров. В цикле регулирования ГТРП ОММ РСЛЦ этапу оценки обстановки предшествует ее формирование и ведение: сбор, обработка и отображение актуальных данных, наполнение геомодели сведениями о состоянии геообъектов, событиях эксплуатации, факторах среды и параметрах покрытия [31].

Обстановка выступает базовой категорией геоинформационного регулирования технической подсистемы ОММ РСЛЦ (рис. 2.2). К ней осуществляется циклическое обращение на всех этапах: от уяснения задачи и оценки состояния до планирования контроля, ТОиР, резервирования и проверки исполнения решений.



Рисунок 2.2 – Структура геоконтроллинга территориальными объектами и системами, в т. ч. поддержанием технической готовности ОММ РСЛЦ: ЛПР (Руководитель) – лицо, принимающее решения; КИ – командная информация (информация прямой связи); ИС – информация состояния (информация обратной связи); ГИ – геоинформация; ОО - оценка обстановки; S_{fact} – текущая обстановка (геоситуация); План – командная информация; Факт – информация состояния; \ - операция вычитания множеств

В отличие от разовых процедур планирования и выдачи предписаний, оценка обстановки в ОММ РСЛЦ имеет итерационный характер. Она связана со всеми этапами регулирования: от выявления отклонений в состоянии технической подсистемы до контроля выполнения мероприятий по ТОиР.

Обстановка включает состояние геообъектов ТПС, параметры наблюдательного покрытия, события эксплуатации, данные диагностики и факторные слои территории. Плановая обстановка задает требуемое состояние функциональной и пространственно-структурной целостности. Сравнение этих представлений позволяет выявить невязку между требуемым и фактическим состоянием ГТРП [33].

При формировании модели геоситуации объекты ОММ РСЛЦ структурируются в геоинформационном пространстве. Выделяются геообъекты технической подсистемы, функциональные зоны логистических центров, ячейки

покрытия, элементы связи, электропитания, маршруты обслуживания и параметры внешней среды. Формируются информационные слои с пространственными, атрибутивными, событийными и прогнозными данными [15, 44, 45, 46].

2.2. Структура геомодели обстановки

Структура геомодели обстановки ОММ РСЛЦ определяется как упорядоченное множество геообъектов (ГО) $Gobj_i$ и отношений Rel , формализующих пространственно-содержательное представление функционирования системы [15, 43, 44, 45, 54, 57, 73]. Структура представима в виде:

$$GM_{\text{ОММ}} = (S_{Gobj}, S_{Rel}), S_{Gobj} \subset (R^m, S^n), \quad (2.1)$$

где: $GM_{\text{ОММ}}$ – геоинформационная модель ОММ РСЛЦ; S_{Gobj} – множество геообъектов; S_{Rel} – множество отношений между геообъектами; R^m – физическое пространство размещения объектов (обычно $m = 2$ или $m = 3$); S^n – пространство содержательных признаков объектов.

В состав модели входят ИТСО, геосенсоры, контроллеры, узлы связи и электропитания, маршруты обслуживания, ячейки покрытия, территориальные зоны и факторные слои среды, привязанные к координатно–картографической основе на единой географической подложке R^m и в пространстве признаков S^n , где $n > m$. Пространственные отношения R_{spat} , содержательные связи RS_c и субъективные оценки E_{subj} обеспечивают топологическую и функциональную структуризацию обстановки. Модель служит основой для реализации геоконтроллинга – территориально-привязанной поддержки управленческих решений, включая оценку обстановки, планирование технического обслуживания и выработку предиктивных сценариев. Формализованная структура геомодели служит основой геоконтроллинга [31] ГТРП ОММ РСЛЦ: оценки обстановки, прогноза неблагоприятных технических состояний, планирования ТОиР и выработки пространственно–содержательных рекомендаций в условиях территориальной неоднородности и неполноты диагностических данных [16, 31, 71, 81, 91].

2.2.1 Геообъекты ОММ РСЛЦ

Разработка гео модели обстановки ГТРП ОММ РСЛЦ базируется на формализации геообъектов, их пространственного положения, зон действия, связей и атрибутивных характеристик. Особенность таких геообъектов состоит в том, что они описывают не только физически размещенные элементы ЛЦ и ИТСО, но и наблюдаемые зоны, ячейки покрытия, события, каналы передачи данных, участки обслуживания и источники геосенсорной информации. Основные геообъекты представлены на рисунке 2.3 [34, 50, 44, 45, 89, 91, 92].



Рисунок 2.3 – Виды, группы и отдельные геообъекты ОММ РСЛЦ

К числу геообъектов относятся ЛЦ, периметры, КПП, складские и погрузочно-разгрузочные зоны, инженерные рубежи, камеры, датчики, контроллеры, узлы связи и электропитания, кабельные трассы, маршруты ТОиР, зоны обзора, сектора обнаружения и ячейки покрытия.

Отдельное место занимают геосенсоры. Они рассматриваются как пространственно локализованные источники данных, регистрирующие параметры земной поверхности и возмущения физических полей на контролируемой территории: оптического, теплового, акустического, вибрационного, сейсмического, электромагнитного и иных проявлений обстановки. Через геосенсоры события на территории ЛЦ переводятся в координатно привязанные признаки гео модели [1, 14, 15].

Каждый отдельный геообъект G_{obj} из множества S_{Gobj} описывается в виде:

$$S_{Gobj} = \{Gobj_i = (o_i, Att_i)\}, Gobj_i: S_{Gobj} \rightarrow R^m, Att_i: S_{Gobj} \rightarrow S^n, \quad (2.2)$$

где: $Gobj_i$ – отдельный геообъект модели (ГО); o_i – пространственная компонента геообъекта (ПКГО), отражающая координаты, зону, геометрию, динамику; Att_i – атрибутивно–содержательная компонента геообъекта (АСКГО), отражающая технические параметры, характеристики, ресурс, состояние.

Структура геообъектов ОММ РСЛЦ представлена на рисунке 2.4:

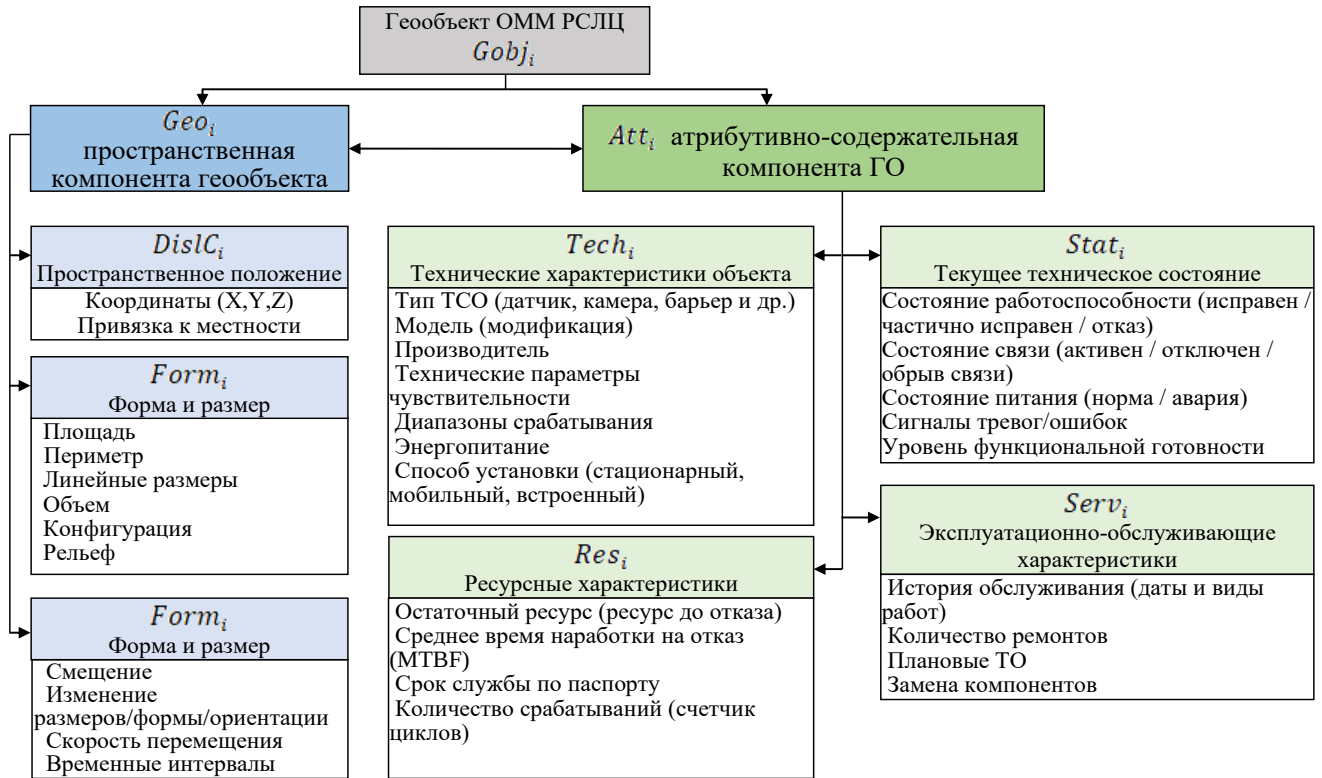


Рисунок 2.4 – Структура геообъекта РСЛЦ

Пространственная компонента геообъекта o_i задается выражением:

$$o_i = (Loc_i, Geom_i, Trj_i), \quad (2.3)$$

где: Loc_i – координаты центра определяют положение геообъекта $Gobj_i$ в системе модели. Представляют собой центроид (для площадных и линейных объектов) или точку размещения (для точечных); $Geom_i$ – отражает метрические и конфигурационные характеристики геообъекта $Gobj_i$, определяя размеры и форму его пространственного охвата. Включает площадь зоны покрытия, длину периметра, тип геометрической формы (круг, полигон, сектор), пространственную ориентацию (ази-

мутальный угол), а также полный контур границы охвата; Trj_i – отражает изменение положения, формы и размеров геообъекта $Gobj_i$ во времени, включая перемещения, деформации и скорости. Включает параметры перемещения координат центра $Loc_i(t)$, вариации геометрических характеристик охвата $Geom_i(t)$, а также скорости изменения пространственных параметров.

Пространственная компонента определяет положение, протяженность, пространственную ориентацию и динамическое изменение размещения геообъекта в пределах контрольной территории.

Att_i – атрибутивно–содержательная компонента геообъекта [128]:

$$Att_i = (Tech_i, Rs_i, Stat_i, Serv_i), \quad (2.4)$$

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 обслуживаний, ремонтов, замен).

Отражает технические, ресурсные и эксплуатационные параметры геообъекта, необходимые для моделирования его функционирования, надежности и прогнозирования деградации [54, 64, 71, 74].

2.2.2 Отношения на множестве геообъектов

Отношения между геообъектами включают не только пространственные и функциональные связи, но и оценочные отношения. Пространственные отношения фиксируют соседство, включение, пересечение зон действия, расстояния, видимость, доступность и принадлежность к ячейкам покрытия. Функциональные отношения отражают связи «датчик – контроллер – канал связи – пункт обработки», зависимость ИТСО от питания, принадлежность к рубежу охраны, маршруту ТОиР или зоне ответственности. Оценочные отношения используются для характеристики состояния и целостности ОММ: полноты покрытия, актуальности данных,

исправности ИТСО, наличия резервирования, сохранности каналов связи и возможности непрерывного наблюдения в заданной зоне [16, 43, 44, 73, 100].

Структура геомодели ГТРП ОММ РСЛЦ включает описание отношений между геообъектами $Gobj_i$, определяющих пространственно–содержательную организацию обстановки. Эти отношения связывают элементы технической подсистемы, функциональные зоны логистических центров, ячейки покрытия, инфраструктуру, эксплуатационные события и факторные слои среды в единую модель оценки и прогноза.

Обобщенно множество отношений задается как:

$$S_{Rel} = \{R_{spat}, R_{sem}, E_{subj}\}, \quad (2.5)$$

где: R_{spat} – (spatial Relations) отношения пространственной упорядоченности; R_{Sc} – (semantic Relations) отношения семантической, содержательной упорядоченности; E_{subj} – (subjective evaluations) оценочные отношения [5, 33].

Отношения пространственной упорядоченности R_{spat} . Пространственные отношения определяют топологическое размещение объектов в физическом пространстве R^m и включают: изолированность (нет пересечений), соседство (общая граница), контакт (пересечение по поверхности, линии или точке), включение (объект внутри другого), совместимость (частичное перекрытие).

Особый подкласс составляют пространственно–временные отношения, отражающие динамику объектов: перемещение зон риска под влиянием среды; сезонные изменения условий; рост деградации ТСО; смещения зон контроля. Они позволяют прогнозировать развитие обстановки и формировать предиктивные сценарии функционирования РСЛЦ.

Отношения содержательной упорядоченности R_{sem} описывают организационно–функциональные, причинно–следственные и логистические связи между элементами РСЛЦ, формализуя структуру взаимодействий внутри системы.

Эти отношения формируют логическую и эксплуатационную основу РСЛЦ, обеспечивая координацию распределенных компонентов.

Отношения оценочного характера E_{subj} отражают агрегированные количественные и качественные характеристики состояния объектов и зон ответственности в системе охранного мониторинга местности. Они представляют собой обобщенные индикаторы текущей и прогнозной надежности функционирования РСЛЦ, учитывая, как внутренние эксплуатационные характеристики, так и факторы окружающей геосреды.

Оценочные отношения E_{subj} используются для перехода от описания отдельных ИТСО к оценке целостности ОММ РСЛЦ: сохранения наблюдаемости контролируемых зон, работоспособности геосенсоров и ИТСО, связности сенсорно-коммуникационного контура, актуальности данных и возможности передачи событий в процедуры обработки [16, 71-74]. В таблице 2.1. представлен перечень отношений, определенный для ОММ РСЛЦ.

Таблица 2.1. – Примеры отношений над множеством геообъектов ОММ РСЛЦ

Объективные отношения					Оценочные отношения		
Пространственная упорядоченность RSp		Содержательная упорядоченность RSc			Оценка пространства	Оценка содержания	Оценка целостности ОММ
Базовые	Производные	Таксономическое	Организационные	Функциональные			
местоположение ЛЦ, зоны, ИТСО, геосенсора	доступность ЛЦ для ТОиР	класс объекта: ЛЦ, зона, ИТСО, геосенсор, канал связи	подчинение: ЛЦ – зона – рубеж – ИТСО	наблюдение зоны геосенсоров	достаточность пространственного покрытия	техническая готовность ИТСО	сохранение наблюдаемости зоны
удаленность от базы ТОиР	время подъезда бригады	тип ИТСО: камера, датчик, контроллер, узел связи	связь: датчик – контроллер – пункт обработки	регистрация события	плотность размещения ИТСО	исправность, деградация, отказ	связность сенсорно-коммуникационного контура
включение в зону ЛЦ	принадлежность ячейке покрытия	тип зоны: периметр, КПП, склад,	принадлежность ИТСО рубежу охраны	передача телеметрии	наличие разрывов покрытия	актуальность диагностических данных	возможность передачи события в контур обработки

		ПРР-зона					
соседство зон и объектов	пересечение с сектором обзора	тип события: тревога, отказ, потеря связи, ТОиР	зона ответственности службы или бригады	подтверждение события несколькими средствами	перекрывание зон обзора и обнаружения	остаточный ресурс и наработка	сохранение функции охранного мониторинга
пересечение зон действия	буферная зона вокруг объекта	тип связи: питание, данные, управление	резервирование канала, питания, узла	электропитание ИТСО	доступность участка для контроля	качество связи и питания	устойчивость ОММ к отказу отдельного элемента
контакт с периметром, КПП, дорогой	маршрут обхода или ремонта	тип антропогенного воздействия	регламент ТОиР и порядок реагирования	обслуживание, диагностика, восстановление	достижимость объекта	статус события и обработки	полнота данных для оценки обстановки

Структурные элементы геомодели позволяют перейти к формальному представлению элементов модели обстановки, т.е. к описанию ее состава.

2.3. Состав геомодели обстановки РСЛЦ

На основе структурного представления геообъектов пространства оперативно-логистической активности и отношений над ними становится возможным единообразное описание составных элементов модели обстановки РСЛЦ [86, 91, 93, 95]. Состав модели обстановки в системе охранного мониторинга местности (РСЛЦ) формируется на основе анализа территориально–пространственных и содержательных факторов, оказывающих непосредственное влияние на функционирование системы. В отличие от унифицированных инженерных решений, геоинформационное представление РСЛЦ–обстановки требует учета конкретных географических, инфраструктурных, климатических и эксплуатационных условий региона размещения [79, 82, 89] (рис. 2.5).

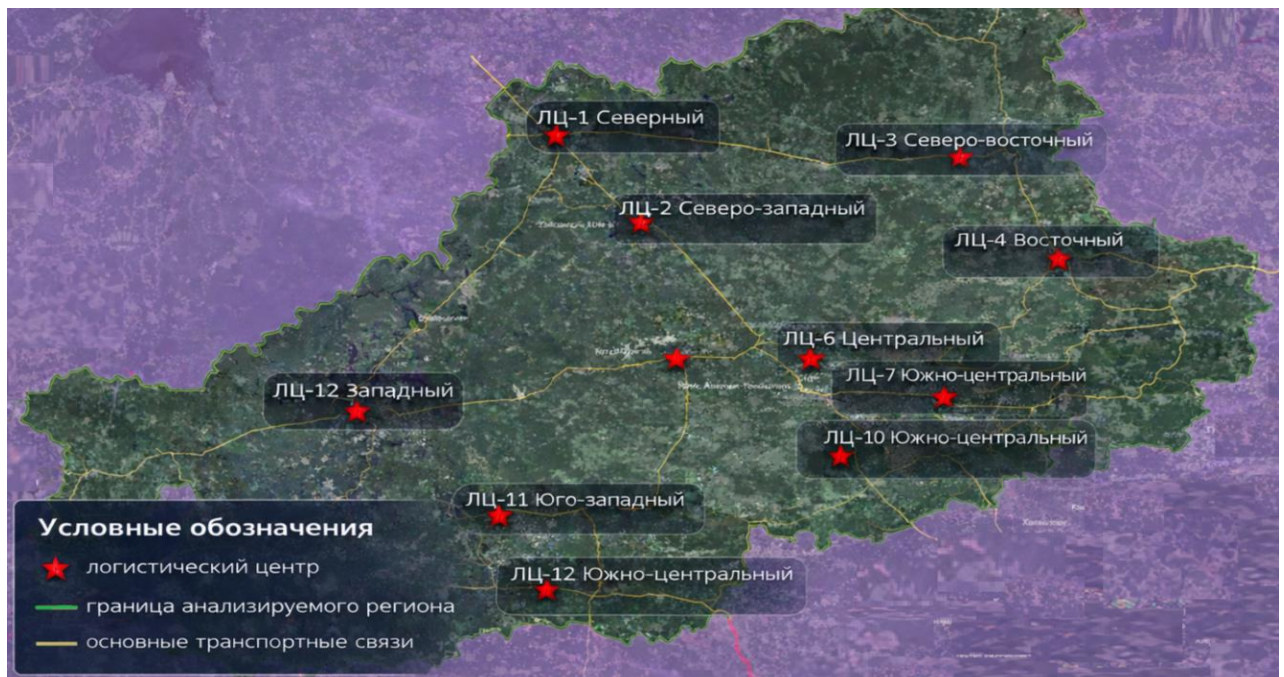


Рисунок 2.5 – Геоизображение региональной сети логистических центров

В модели отражаются как объекты внешней среды, так и элементы технической структуры самой системы, параметры их взаимодействия и состояния.

Состав модели обстановки РСЛЦ (таблица 2.2) определяется совокупностью параметров, характеризующих состояние системы в пространственно–временном и эксплуатационном аспектах [15, 80, 82, 95, 97].

Таблица 2.2 – Составные элементы геомодели обстановки

Обозначение	Название компонента	Содержание параметров
$\vec{F}$	параметры территориально-сетевой организации РСЛЦ	размещение ЛЦ на контролируемой территории, административная принадлежность, зоны ответственности, транспортная связность, расстояния, время подъезда, пункты управления и базы ТОиР
$\vec{L}$	локально-объектовый компонент размещения ИТСО	размещение и характеристики ИТСО в пределах ЛЦ: охранные рубежи, точки установки датчиков и камер, зоны действия, сектора обзора, кабельные трассы, контроллеры, узлы связи и питания; тип, назначение, основные технические характеристики, режим работы, параметры подключения, резервирование, ресурс и принадлежность к функциональной зоне или ячейке покрытия.
$\vec{S}$	ситуационно-тактические параметры обстановки ОММ	описывает изменяющиеся ситуации на территории логистического центра и в прилегающем пространстве, которые влияют на работу охранного мониторинга технического состояния ИТСО
$\vec{G}$	параметры окружающей среды	пространственное распределение факторов геосреды, воздействующих на работоспособность охранной системы: температура, осадки, запыленность, уровень ЭМ–

		воздействий, видимость, сезонные и локальные климатические аномалии.
$\vec{A}$	параметры внешних и внутренних антропогенных воздействий	вычисленные или обученные прогнозные оценки параметров надежности и рисков: вероятности отказов, остаточного ресурса, времени до деградации, а также рекомендации по оптимизации технического обслуживания и превентивных мероприятий.
$\vec{E}$	параметры операционно-событийного компонента обстановки ОММ РСЛЦ	данные о событиях в системе: тревожные сигналы, технические инциденты, акты вмешательства, сбои синхронизации, а также параметры временной корреляции событий с состоянием ТСО и внешними воздействиями.
$\vec{K}$	параметры киберфизической геосенсорной платформы ОММ РСЛЦ	состав геосенсорной платформы ОММ РСЛЦ: ИТСО, камеры, контроллеры, связь, питание и диагностика; их размещение, зоны действия, режим работы, подключение, резервирование и актуальное цифровое состояние.
$\vec{T}$	Параметры тактической (контроллинговой) обстановки	задачи охранного мониторинга, режимы функционирования ЛЦ, приоритеты контроля, ограничения доступа, ресурсы ТОиР, допустимые действия, статусы выполнения рекомендаций и показатели неблагоприятности обстановки.

2.3.1. Параметры территориально-сетевого состава РСЛЦ

Компонент $\vec{F}$ содержит параметры РСЛЦ как сети территориально разнесенных логистических центров. Он фиксирует размещения ЛЦ, зон ответственности, пунктов управления, баз обслуживания и маршрутов выездных мероприятий [6, 7, 44, 45, 83, 84]. Пространственный компонент задается в виде:

$$\vec{F} = (LC, B, Z, Att^F(t)). \quad (2.6)$$

Здесь LC – логистических центры РСЛЦ; B – пункты управления, базы обслуживания и мест размещения ремонтных бригад; Z – зоны ответственности; $Att^F(t)$ – совокупность атрибутивных параметров пространственной организации на момент времени t .

В пространственные отношения входит расстояние между ЛЦ, время подъезда, соседство, включение в административную зону, принадлежность к зоне ответственности, связность транспортными маршрутами и наличие сезонных ограничений доступа. Содержательные отношения фиксируют подчиненность пункту управления, очередность обслуживания [20, 25, 83].

Параметры пространственного компонента $\vec{F}$ задают структуру данных для последующего описания окружающей среды, инфраструктуры, ИТСО, эксплуатационно-событийных данных и контроллинговой обстановки. Итогом использования компонента $\vec{F}$ являются картографический слой размещения ЛЦ, слой зон ответственности, транспортно-сервисный слой доступности и таблица маршрутизации ТООР [15] (рис. 2.6).

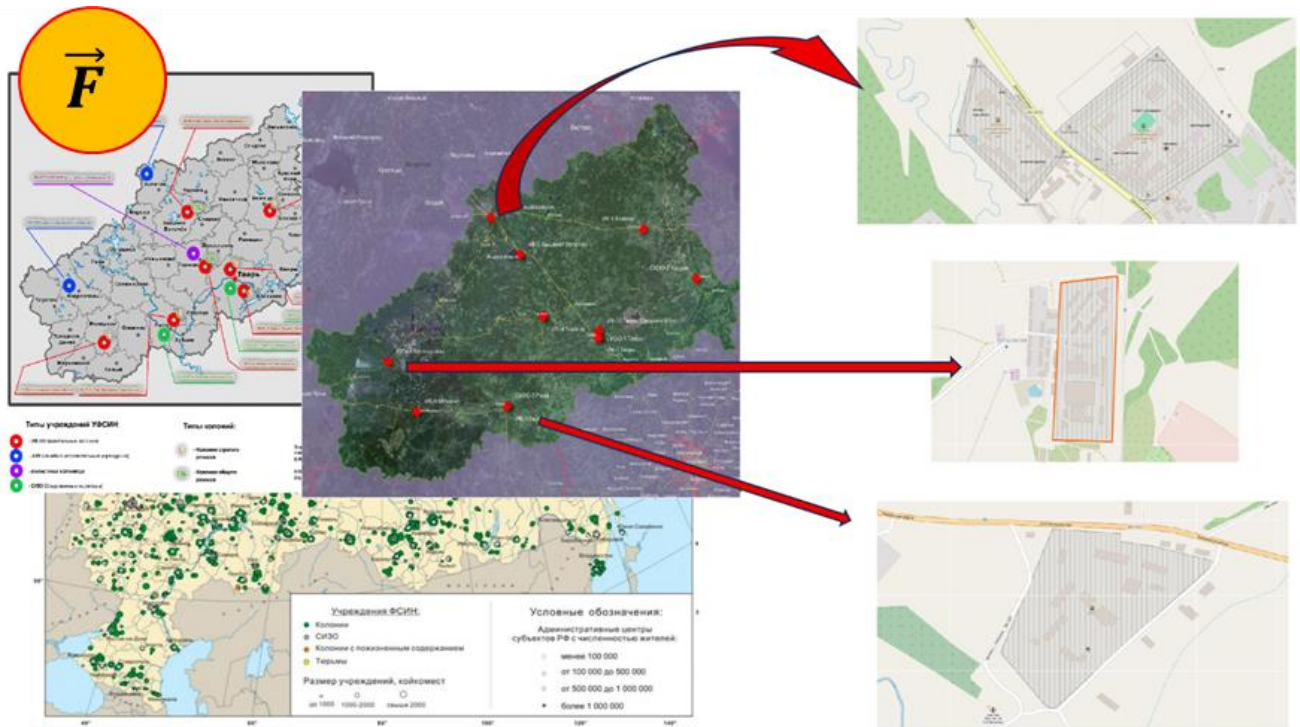


Рисунок 2.6 – Параметры территориального распределения логистических центров $\vec{F}$

2.3.2 Параметры киберфизической геосенсорной платформы

Киберфизическая геосенсорная платформа ОММ РСЛЦ рассматривается как компонент геомодели, объединяющий физические средства наблюдения и охраны, каналы передачи данных, локальные контроллеры, средства электропитания, программно-диагностические средства и интерфейсы управления [6, 9, 38, 65]. В составе геомодели данный компонент обозначается как $\vec{K}$ и задает техническую основу получения, передачи, обработки и актуализации пространственно привязанных данных обстановки (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Параметры киберфизической геосенсорной платформы $\vec{K}$

Компонент $\vec{K}$ связывает физическое размещение ИТСО с их цифровым представлением в геодемии. Параметры киберфизической геосенсорной платформы ОММ РСЛЦ задаются следующим выражением:

$$\vec{K} = (K^{sens}, K^{video}, K^{ctrl}, K^{comm}, K^{power}, K^{diag}), \quad (2.7)$$

где: K^{sens} – описывает датчики и средства обнаружения; K^{video} – камеры и видеорегистраторы; K^{ctrl} – контроллеры и локальные узлы; K^{comm} – волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), радиоканалы, кабельные линии; K^{power} – основное и резервное питание; K^{diag} – журналы, API, самодиагностика.

Выделенные для дальнейшего анализа параметры киберфизической геосенсорной платформы ОММ РСЛЦ в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры киберфизической геосенсорной платформы ОММ РСЛЦ

Группа элементов платформы	Слой геодемии L_k^K	Пространственная компонента o_i^K	Атрибутивная компонента Att_i^K	Использование в геодемии
Сенсорные средства обнаружения	датчики периметра, объемные и линейные сенсоры	точка установки, рубеж, зона действия, ячейка покрытия	тип датчика, чувствительность, режим, состояние, ложные срабатывания	формирование слоя обнаружения и контроля зон ЛЦ

Средства видеонаблюдения	камеры, видеорегистраторы, обзорные устройства	координаты, сектор обзора, зона видимости	разрешение, режим записи, состояние, доступность видеопотока	построение зон визуального контроля и перекрытий
Контроллеры и локальные узлы	шкафы автоматики, контроллеры, блоки сбора сигналов	точка размещения, зона ответственности	число подключенных устройств, режим, ошибки, перезагрузки	связывание датчиков, тревог и диагностических событий
Коммуникационные средства	ВОЛС, кабельные трассы, радиоканалы, ретрансляторы	линия связи, узел коммутации, трасса кабеля	пропускная способность, резерв, потери связи, задержки	оценка устойчивости передачи тревог и телеметрии
Средства электропитания	ЛЭП, ИБП, аккумуляторы, генераторы, шкафы питания	узел питания, зона подключения, трасса питания	напряжение, резерв, автономность, сбой питания	учет непрерывности и работы ИТСО
Программно-диагностические средства	журналы, API, серверы мониторинга, базы данных	пункт управления, серверный узел, зона ответственности	события, ошибки, диагностические коды, временные метки	наполнение атрибутивной части геомодели

Параметры киберфизической геосенсорной платформы формируют техническую основу компонента Att_i в описании геообъекта. Через o_i фиксируется локализация элемента ИТСО в пределах ЛЦ, а через Att_i – его технические, диагностические и эксплуатационные признаки. Это обеспечивает переход от перечня оборудования к пространственно привязанной модели состояния ИТСО, пригодной для оценки текущей готовности, прогноза ухудшения состояния и формирования приоритетов контроля и ТОиР [4, 71, 83, 86, 87].

2.3.3 Параметры окружающей среды

Окружающая среда – ключевой компонент геомодели, определяющий условия размещения, функционирования и обслуживания ИТСО, а также уровни эксплуатационных рисков [1, 86, 89, 95, 93, 100].

Выделяют три основные составляющие: географическая; гидрографическая; инфраструктурная. Факторы геосреды $\vec{G}$ (рис. 2.8) в геомодели ОММ РСЛЦ задаются как набор пространственно–временных слоев, привязанных к координатной основе, ячейкам покрытия и геообъектам ГТРП:

$$\vec{G} = (G^{geo}, G^{hyd}, G^{clim}, G^{bio}, G^{vis}), \quad (2.8)$$

где: G^{geo} – описывает рельеф, уклоны, грунты, геоморфологию; G^{hyd} – водоемы, подтопления, заболачивание; G^{clim} – температура, осадки, ветер, сезонность; G^{bio} – растительность, сезонные изменения; G^{vis} – видимость, туман, запыленность, освещенность.

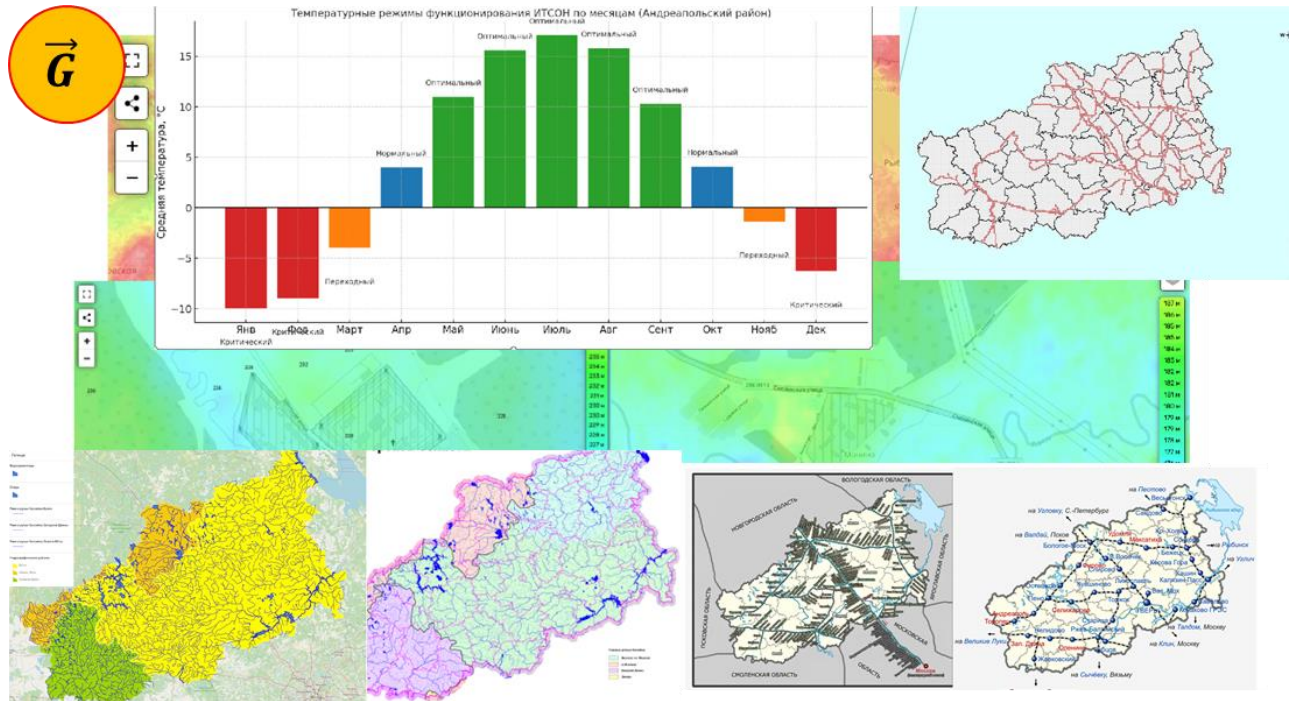


Рисунок 2.8 – Параметры окружающей среды $\vec{G}$

Географические характеристики (параметры). Географическая составляющая среды формирует территориальную основу размещения объектов РСЛЦ и оказывает прямое влияние на инженерное проектирование системы. Особенности рельефа, геоморфологии и грунтовых условий определяют допустимые конфигурации охранных рубежей, выбор типов ИТСО, а также параметры зон охвата сенсорных систем.

На рисунке 2.9 изображено картографическое представление факторов рельефа и геоморфологии, что отражает параметры высотной структуры и инженерно-геологических условий, определяющих территориальные риски и ограничения при проектировании РСЛЦ [9, 57, 75, 86].

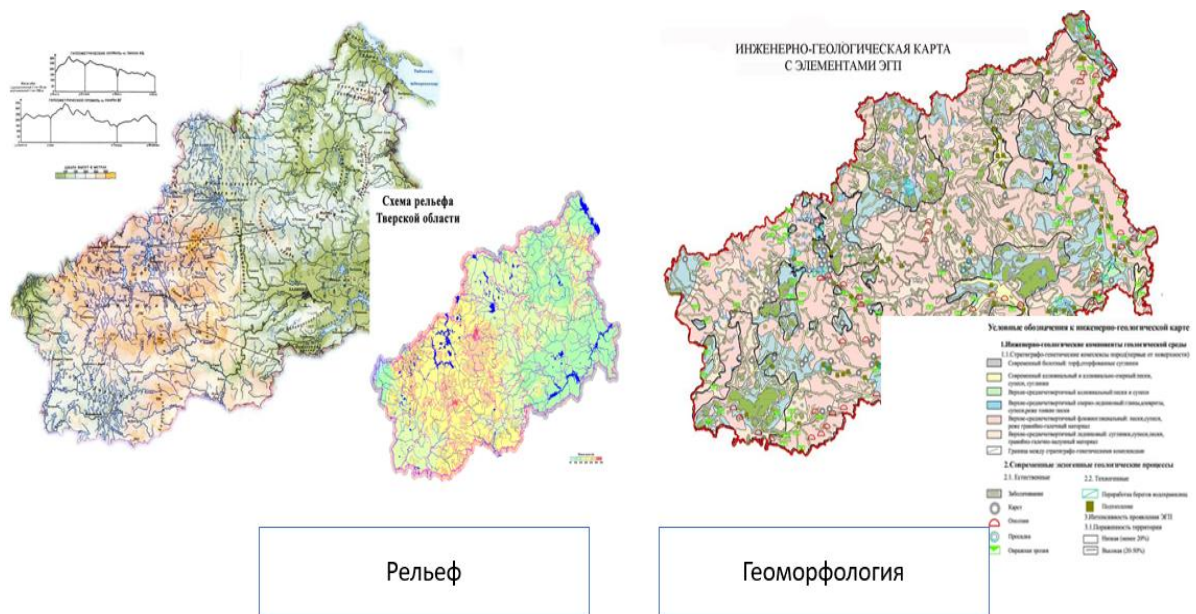


Рисунок 2.9 – Географические параметры эксплуатации ОММ РСЛЦ

К географическим характеристикам относятся: рельеф: высоты, уклоны, экспозиция склонов. Влияют на затенение зон охвата сенсоров; организацию линий передачи данных и электроснабжение; формирование зон скрытого движения нарушителя; орография: возвышенности, овраги, долины; зональные климатические особенности – принадлежность территории к определенным климатическим поясам и зонам (континентальный, морской, муссонный, субарктический и др.), что определяет диапазоны температурных нагрузок на ТСО; режимы сезонных изменений влажности, осадков, снежного покрова; частоту экстремальных природных явлений [9, 89, 91, 116].

Интеграция географических характеристик в модель позволяет формировать точную пространственную основу расчетов зон размещения оборудования, планирования логистики обслуживания и оценки потенциальных территориальных рисков для функционирования РСЛЦ.

Гидрографические характеристики (параметры). Гидрографическая составляющая среды оказывает непосредственное воздействие на выбор размещения инженерно-технических средств охраны, проектирование конструктивных решений и прогноз надежности функционирования РСЛЦ. Геоизображения на рисунке

2.10 отражают комплекс природных водных и болотных образований, оказывающих влияние на конфигурацию охранных маршрутов, размещение сенсорных узлов и надежность инфраструктуры РСЛЦ.

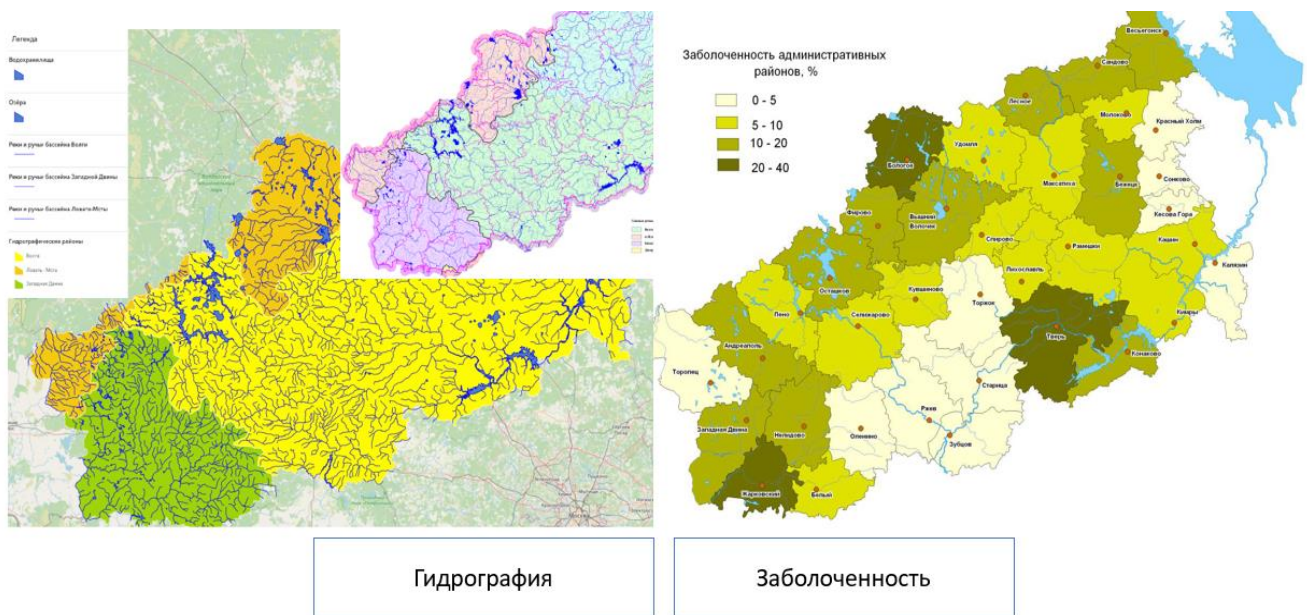


Рисунок 2.10 – Гидрологические параметры воздействия на ОММ РСЛЦ

К основным гидрографическим характеристикам относятся: постоянные водоемы ограничивают прокладку охранных рубежей и линий связи, формируют зоны локальной влажности, туманности и обледенения оборудования; сезонные водные процессы (половодья, паводки, подтопления) вызывают периодическую недоступность для ТО, риски повреждения инженерных узлов; требуют адаптации регламентов в паводковый сезон; зоны заболачивания на низинах с замедленным стоком способствуют коррозии, осложняют эксплуатацию подземных трасс и заглубленных геосенсоров [1, 80, 89]. Интеграция гидрографических характеристик в геоинформационную модель позволяет учитывать пространственно–временную динамику водных процессов в планировании размещения объектов охраны, определении зон риска и разработке прогнозных сценариев технической надежности системы.

Техногенные характеристики (параметры). Техногенная составляющая среды определяет инженерно–эксплуатационные условия функционирования си-

Компонент среды	Параметр / слой L_k^G	Область значений D_k	Пространственная привязка	Учитываемое воздействие на ИТСО
Географический	Тип грунтов	песчаные, глинистые, торфяные, насыпные и др.	площадка ИТСО; трасса кабеля	Влияет на устойчивость опор, фундаментов и подземных коммуникаций.
Географический	Климатическая зона	класс по климатическому районированию	территория ЛЦ; регион	Задаёт диапазон температурных и сезонных нагрузок.
Гидрографический	Близость водоемов	м	ячейка c_j ; зона ЛЦ	Влияет на влажность, туман, коррозию и обледенение.
Гидрографический	Зона подтопления	бинарный / балльный показатель	зона ЛЦ; кабельные трассы; узлы питания	Повышает вероятность повреждения кабелей, фундаментов и шкафов ИТСО.
Гидрографический	Заболачивание	класс / балл	низинные участки; периметр; маршруты ТО	Снижает доступность обслуживания, повышает коррозионное воздействие.
Гидрографический	Уровень грунтовых вод	м / класс глубины	площадка размещения ИТСО	Влияет на устойчивость заглубленных элементов и кабельных трасс.
Гидрографический	Сезонная водная динамика	паводок, половодье, застой воды	ячейка c_j ; маршрут ТО	Определяет временные ограничения доступа и обслуживания.
Инфраструктурный	Близость автодорог	м / время доступа	ЛЦ; зона ИТСО; маршруты ТО	Определяет логистическую доступность технических бригад.
Инфраструктурный	Близость ЖД-линий	м	зона ЛЦ; внешний контур территории	Влияет на вибрации, шум и антропогенную активность.
Инфраструктурный	Электроснабжение	наличие / класс надежности / резерв	узел питания; зона ЛЦ	Определяет устойчивость работы камер, датчиков и контроллеров.
Инфраструктурный	Каналы связи	тип, пропускная способность, резервирование	контроллер; пост охраны; серверный узел	Влияет на передачу тревог, видео и диагностических данных.
Инфраструктурный	Инженерные коммуникации	наличие / тип / пересечения	трасса кабеля; зона монтажа	Задают ограничения прокладки и вероятность повреждений.

Для каждого геообъекта G_{obj_i} значения факторов рассчитываются по пространственной компоненте o_i и включаются в атрибутивную компоненту Att_i как признаки условий функционирования [77]. В дальнейшем, полученные значения применяются при расчете интегрального воздействия геосреды $g_i^{G(t)}$, построении активных геоизображений территориально-эксплуатационного воздействия и ранжировании зон РСЛЦ по приоритету контроля и ТОиР.

2.3.4. Параметры средств ОММ РСЛЦ и их локального пространственного размещения

Параметры $\vec{L}$ определяются паспортами технических изделий охраны и эксплуатационной документацией [38, 63-67, 73, 74, 77, 61, 102]. Эти параметры используются при построении объектового плана ЛЦ, активных геоизображений технического состояния, маршрутов осмотра и реестров приоритетного обслуживания (рис. 2.12).

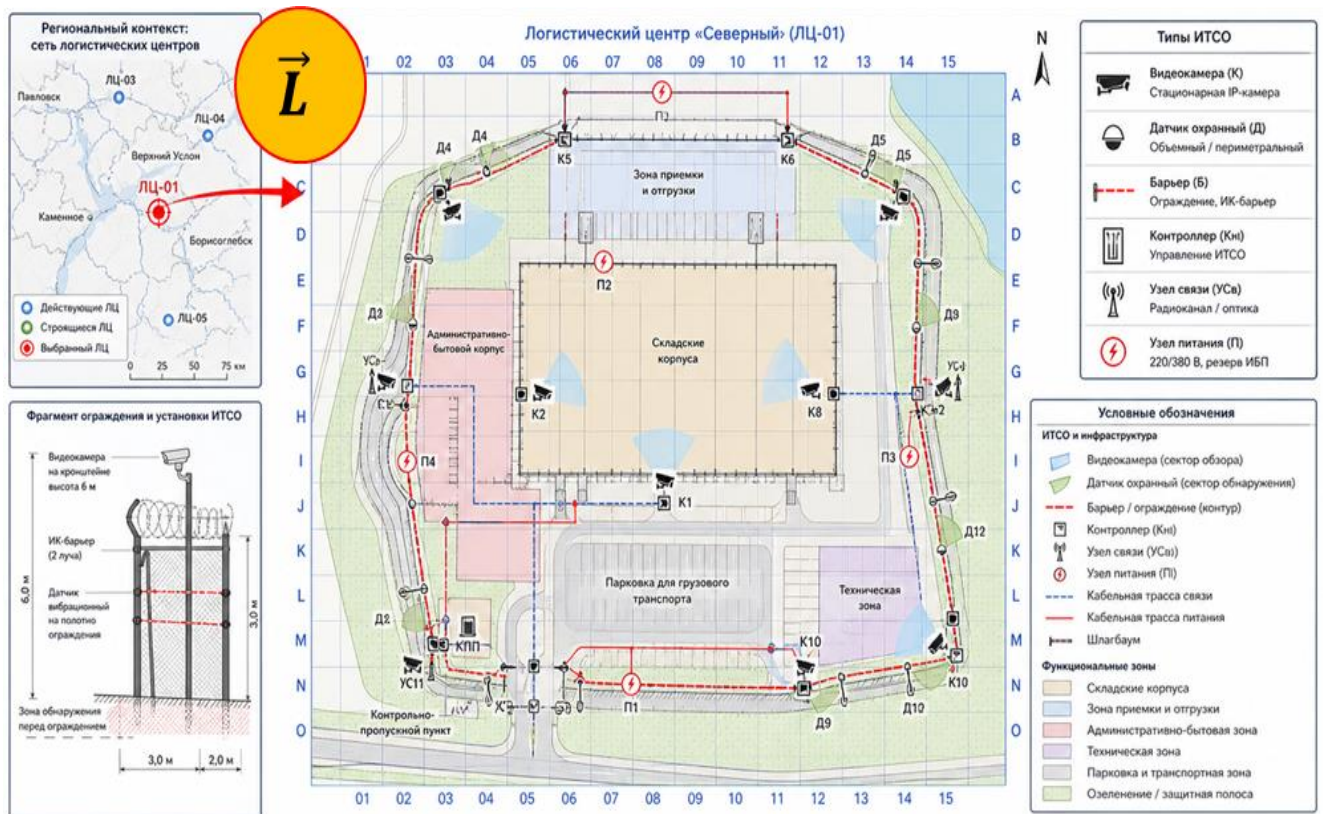


Рисунок 2.12 – Параметры локального пространственного размещения средств ОММ РСЛЦ $\vec{L}$

Эти данные используются в последующих компонентах геомодели для оценки технического состояния, анализа событий, уточнения условий обслуживания и формирования пространственно-содержательных рекомендаций.

2.3.5. Эксплуатационно-событийные параметры системы ОММ РСЛЦ

Эксплуатационно-событийный компонент $\vec{E}$ (рис. 2.13) отражает изменения состояния объекта во времени, параметры определяются [37, 58, 99, 102, 144, 151].

Структура состояний ИТСО



Эксплуатационно-событийный компонент ОММ РСЛЦ позволяет учитывать каждое техническое отклонение, событие обслуживания или внешнее воздействие как атрибутивно и территориально локализованный признак.

Антропогенный компонент геомодели описывает воздействия, возникающие вследствие действий людей и организационных процессов на территории логистических центров и прилегающих зон. В отличие от параметров окружающей среды и инфраструктуры, данный компонент фиксирует не природные или инженерные условия, а поведенческие, режимные и эксплуатационно-организационные события, способные изменить состояние ИТСО, полноту наблюдения, достоверность диагностических данных и приоритет обслуживания [40, 45, 148, 151] (рис. 2.14).

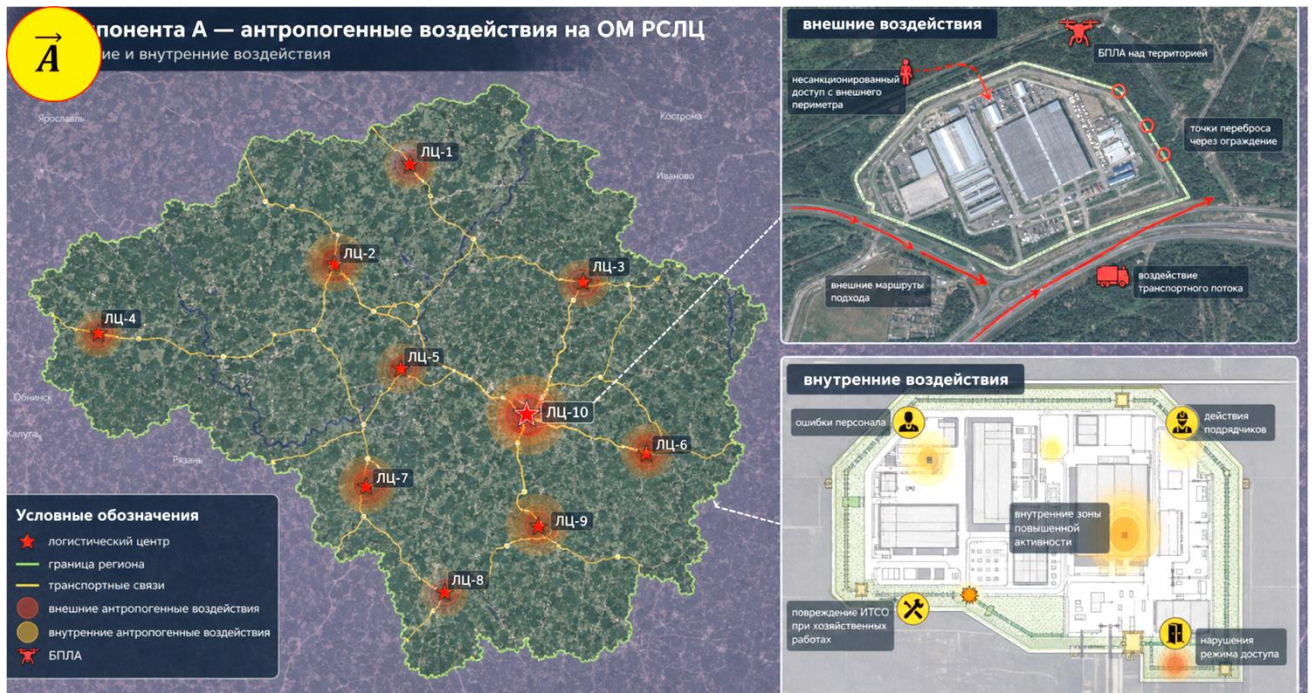


Рисунок 2.14 – Параметры антропогенных факторов влияния на ОММ РСЛЦ $\vec{A}$

Для РСЛЦ антропогенные воздействия имеют двойственный характер. Первая группа формируется извне: действия возможных нарушителей, посетителей, водителей, подрядных организаций, а также влияние транспортных и складских потоков на периметр и зоны контроля. Вторая группа формируется внутри ЛЦ: ошибочные, недобросовестные или умышленные действия персонала, операторов, ремонтных бригад и лиц, имеющих легальный доступ к оборудованию, помещениям, кабельным трассам и информационным узлам [9, 148].

В составе геомодели антропогенный компонент обозначается как $\vec{A}$ и связывается с эксплуатационно-событийным компонентом $\vec{E}$. Антропогенные факторы задаются не как общий фон, а как пространственно-временные признаки, привязанные к функциональным зонам ЛЦ, ячейкам покрытия c_j , участкам периметра, объектам ИТСО, маршрутам доступа и моментам регистрации событий [37, 40, 147].

$$\vec{A} = (A^{ext}(t), A^{int}(t), S^A(t), Ev^A(t)). \quad (2.9)$$

Здесь $\vec{A}$ – антропогенный компонент геомодели; $A^{ext}(t)$ – множество внешних антропогенных воздействий; $A^{int}(t)$ – множество внутренних антропогенных

воздействий; $S^A(t)$ – зарегистрированные антропогенные события; $Ev^A(t)$ – показатель неблагоприятности антропогенной обстановки, используемый для упорядочения объектов контроля и мероприятий ТОиР.

Состав и типовые проявления внутренних и внешних антропогенных воздействий, влияющих на состояние ИТСО ОММ РСЛЦ, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры антропогенных воздействий на ИТСО ОММ РСЛЦ

Контур воздействия	Группа факторов	Типовые проявления	Пространственная привязка	Учитываемое влияние на ИТСО
Внешний	Несанкционированный доступ	попытка прохода через КПП, преодоление периметра, проход через технологические зоны	КПП, периметр, складская зона, ячейка c_j	повышение приоритета контроля зоны, проверка сенсоров и видеопокрывтия
Внешний	Умышленное повреждение имущества и ИТСО	порча камер, датчиков, шкафов, кабелей, ограждений, источников питания	точка события P_i , участок периметра, объект	фиксация события повреждения, назначение внепланового осмотра или восстановления
Внешний	Хищения и попытки доступа к материальным ценностям	несанкционированное изъятие груза, вскрытие зоны хранения, воздействие на складскую инфраструктуру	склад, терминал, зона погрузки, маршрут движения	уточнение зон наблюдения, проверка целостности рубежей и записей событий
Внешний	Перебросы через периметр	перенос или заброс предметов через ограждение, использование смежных территорий	участок периметра, внешняя прилегающая зона	проверка перекрытия периметра, видеонаблюдения и датчиков обнаружения
Внешний	Применение БПЛА	наблюдение, доставка малогабаритных предметов, обход наземных рубежей контроля	воздушная зона ЛЦ, периметр, складская зона	дополнение слоя событий, уточнение зон визуального контроля и реагирования
Внешний	Воздействие транспортно го потока	интенсивное движение, случайные повреждения, вибрация, перекрытие обзора	подъезды, погрузочные участки, технологические маршруты	учет эксплуатационной нагрузки на камеры, датчики и кабельные трассы
Внутренний	Ошибки эксплуатации	неверная настройка, отключение оборудования, несоблюдение регламентов	объект ИТСО, пост охраны, пункт управления	снижение достоверности данных, необходимость проверки параметров и журналов
Внутренний	Ошибки ТОиР	несвоевременная замена, неполная проверка, нарушение порядка восстановления	объект ИТСО, маршрут ТОиР, зона обслуживания	уточнение истории обслуживания, корректировка очередности повторного контроля
Внутренний	Повреждения при хозяйственных работах	повреждение кабеля техникой, закрытие обзора, демонтаж элементов без согласования	складская зона, погрузочный участок, трасса коммуникаций	регистрация события и привязка к функциональной зоне ЛЦ

Контур воздействия	Группа факторов	Типовые проявления	Пространственная привязка	Учитываемое влияние на ИТСО
Внутренний	Недобросовестные действия персонала или подрядчиков	умышленная порча ИТСО, доступ к шкафам, обход процедур допуска	помещение, шкаф ИТСО, КПП, зона доступа	учет уровня доступа и уточнение контроллингового приоритета объекта
Внутренний	Недостоверность учетных данных	неполные журналы, ошибочные отметки ТОиР, несинхронные временные метки	пункт управления, база данных, объект	снижение качества диагностики, необходимость верификации записей

Для унифицированного описания антропогенных событий используется запись, содержащая тип воздействия, источник, время, место, связанный геообъект и канал регистрации.

$$s_l^A = (type_l, src_l, t_l, P_l, G_{obj_l}, channel_l, desc_l). \quad (2.10)$$

Здесь s_l^A – l -е антропогенное событие; $type_l$ – тип события; src_l – источник или категория воздействия; t_l – время регистрации; P_l – место события или зона его проявления; G_{obj_l} – связанный геообъект ОММ, зоны или инфраструктурного узла; $channel_l$ – канал поступления данных; $desc_l$ – краткое описание события.

Показатель $Ev^A(t)$ задает степень неблагоприятности антропогенной обстановки в пределах объекта, зоны или ячейки покрытия. Позволяет упорядочить объекты ИТСО и зоны ЛЦ по срочности проверки, уточнения наблюдения, диагностики, восстановления или изменения режима контроля [20, 123, 148]. Интервалы значений и описание приведено в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Оценочные параметры антропогенной обстановки

Интервал $Ev^A(t)$	Характеристика обстановки	Контроллинговое действие
[0; 0,2)	штатная	плановое наблюдение и регламентное ТОиР
[0,2; 0,4)	локально осложненная	уточнение журналов, проверка диагностических признаков
[0,4; 0,6)	осложненная	внеплановая проверка объекта ИТСО или зоны ЛЦ
[0,6; 0,8)	неблагоприятная	приоритетная диагностика, проверка связи, питания и сенсорного покрытия
[0,8; 1]	критически неблагоприятная	немедленное реагирование, восстановление, резервирование или замена

В геомодель это включается как слой антропогенных событий, перечень объектов ИТСО с повторяющимися внешними или внутренними воздействиями,

геовизуализация приоритетов проверки и реестр пространственно-содержательных рекомендаций по контролю и ТОиР [39].

2.3.7. Параметры контроллинговой обстановки - описание задач, решаемых ОММ РСЛЦ

Контроллинговая обстановка ОММ РСЛЦ описывает управленческие условия, в которых выполняются оценка состояния ИТСО, выбор приоритетов контроля и формирование рекомендаций [31, 33]. В составе геомодели включен как компонент $\vec{T}$. Задаёт связь между текущей обстановкой, задачами охранного мониторинга, доступными ресурсами и допустимыми действиями (рис. 2.15).



Рисунок 2.15 – Контроллинговые параметры ОММ РСЛЦ (решаемые задачи), $\vec{T}$

В отличие от компонентов $\vec{F}$, $\vec{L}$, $\vec{C}$, $\vec{G}$, которые описывают параметры окружающей среды, инфраструктуры, размещения геообъектов и их состояние, компонент $\vec{T}$ отвечает за базис для принятия решений. Он участвует в определении, какие зоны, объекты и события должны получить повышенный приоритет при оценке обстановки и планировании [71, 118]. Контроллинговая обстановка задается в виде:

$$\vec{T} = (Z^T(t), U^T(t), B^T(t), W^T(t), Ev^T(t)), \quad (2.11)$$

где $Z^T(t)$ – множество контролируемых зон, объектов и задач охранного мониторинга; $U^T(t)$, – множество допустимых управленческих действий; $B^T(t)$ – множество ресурсных, временных, территориальных и регламентных ограничений;

$W^T(t)$ – веса или приоритеты критериев оценки; $Ev^T(t)$ – оценка неблагоприятности контроллинговой обстановки.

Компонент $\vec{T}$ позволяет строить геоизображения приоритетов контроля, реестры объектов первоочередного обслуживания и участвует в формировании пространственно-содержательных рекомендаций с привязкой к ЛЦ, и элементам ИТСО.

2.3.8. Ситуационно-тактические параметры обстановки

Ситуационно-тактический компонент обстановки ОММ РСЛЦ описывает изменяющиеся ситуации на территории логистического центра и в прилегающем пространстве, которые влияют на работу охранного мониторинга. В данной работе термин «тактический» используется как обозначение текущих локальных условий, требующих учета при оценке состояния ИТСО, интерпретации событий и планировании контроля или ТОиР [37, 71, 91].

Компонент отображается в виде временных слоев (рис. 2.16): зон работ, маршрутов движения, буферов влияния, участков ограниченного доступа, зон массовой активности, локальных событий криминогенной обстановки. Эти слои связывают текущую ситуацию вокруг ЛЦ с состоянием ОММ РСЛЦ.



Рисунок 2.16 - Ситуационно-тактические параметры обстановки $\vec{S}$ (геоизображение)

Ситуационно-тактические параметры важны для геомодели, поскольку внешне незначимые события рядом с ЛЦ могут менять условия наблюдения.

В геомодели такие ситуации задаются как временные точки, линии, полигоны, маршруты или буферные зоны. Они связываются с периметром, КПП, складскими зонами, подъездными путями, зонами действия камер и датчиков, а также с маршрутами выездных бригад. Основные ситуационно-тактические параметры обстановки ОММ РСЛЦ представлены в таблице 2.7 [33, 34].

Таблица 2.7 – Ситуационно-тактические параметры обстановки ОММ РСЛЦ

Группа параметров	Пространственная форма	Содержание параметров	Влияние на ОММ РСЛЦ
Временные техногенные работы	участок, линия, буферная зона	строительство, земляные работы, ремонт дорог, прокладка коммуникаций, работа спецтехники	вибрации, шум, пыль, перекрытие маршрутов, ложные срабатывания, затруднение ТОиР
Воздушная активность	маршрут, сектор, зона наблюдения	полеты БПЛА, малой авиации, аэросъемка, авиашоу, воздушные объекты рядом с ЛЦ	помехи видеонаблюдению, необходимость контроля воздушной зоны
Массовые и социальные события	площадка, временная зона, маршрут движения	концерты, ярмарки, спортивные события, временные лагеря, скопления людей	рост плотности перемещений, нагрузка на КПП, увеличение числа событий, усложнение интерпретации тревог
Транспортная обстановка	дорога, подъезд, стоянка, маршрут	пробки, перекрытия, объезды, временные стоянки, нештатное движение грузового транспорта	снижение доступности ЛЦ, задержка выезда бригад, изменение маршрутов патрулирования и ТОиР
Временные ограничения доступа	закрытая зона, полигон, граница, коридор	аварийные работы, карантинные зоны, временно закрытые участки, зоны ЧС	ограничение доступа, изменение схем обслуживания, необходимость перенастройки зон контроля
Криминогенная обстановка	точка, зона, маршрут, сектор наблюдения	подозрительная активность, наблюдение за объектом, попытки доступа, хищения, повреждения имущества	повышение приоритета контроля, проверка событий, усиление наблюдения по зонам ЛЦ
Внутренние организационные события	зона ЛЦ, объект, маршрут персонала	работы подрядчиков, нарушение регламентов, внеплановые перемещения, ошибки эксплуатации	дополнительные события доступа, снижение достоверности наблюдения,

Обобщенно ситуационно-режимный компонент может быть представлен вектором:

$$\vec{S} = (s_i^{tech}(t), s_i^{air}(t), s_i^{soc}(t), s_i^{tr}(t), s_i^{lim}(t), s_i^{crim}(t), s_i^{org}(t)), \quad (2.12)$$

где $\vec{S}$ – вектор ситуационно-тактических параметров для i -го ЛЦ, зоны или ячейки покрытия; $s_i^{tech}(t)$ – временные техногенные работы; $s_i^{air}(t)$ – воздушная активность; $s_i^{soc}(t)$ – массовые и социальные события; $s_i^{tr}(t)$ – транспортная обстановка; $s_i^{lim}(t)$ – временные ограничения доступа; $s_i^{crim}(t)$ – криминогенная обстановка; $s_i^{org}(t)$ – внутренние организационные события.

Ситуационно-тактические параметры используются как входные признаки при актуализации геомодели обстановки, интерпретации событий, выделении зон повышенного внимания, корректировке маршрутов ТОиР и настройке режимов контроля. Здесь фиксируется факт, место и характер ситуации, способной изменить условия функционирования ОММ РСЛЦ.

2.4. Содержание модели обстановки ОММ РСЛЦ

Содержание геомодели на формальном уровне детально описывает структурные и содержательные элементы геоситуации в ОММ РСЛЦ [33, 86, 93]. Содержание геомодели обстановки отражаются в:

- параметрическом описании связей компонентов модели, отражающих количественные показатели факторов геосреды, влияющих на ОММ РСЛЦ;
- аналитических зависимостях расчета параметров компонентов модели, которые позволяют формализовать процесс оценки состояния системы ОММ РСЛЦ на основе данных из параметров геомодели.

2.4.1. Параметрическое описание связей компонентов модели

Базовым элементом геомодели обстановки в ОММ РСЛЦ является территория региональной сети логистических центров, представленная как геоинформационная пространственная структура. Эта структура включает графическое представление, содержательное представление и отношения [33, 34, 38, 86]. В геомодели обстановки в РСЛЦ GM_{OMM} выделены следующие компоненты (рис. 2.17):



Рисунок 2.17 – Параметрическое содержание геомодели GM_{OMM} обстановки в ОММ

В рамках данной структуры формируется многокомпонентная геомодель GM_{OMM} обстановки ОММ РСЛЦ, предназначенная для оценки текущего и прогнозного состояния ТСО, анализа рисков факторов среды, регистрации событий и поддержки решений по обслуживанию системы.

Состав геомодели обстановки представляется следующим кортежем множеств векторов параметров составных элементов геоситуации в ОММ РСЛЦ:

где каждая компонента представляет собой вектор пространственно–временных параметров, характеризующих соответствующее измерение охранной обстановки.

В этой записи компоненты не являются изолированными блоками. Они образуют систему прямых и обратных связей. Территориально-сетевая организация РСЛЦ $\vec{F}$ задает размещение ЛЦ, транспортную доступность, зоны ответственности и логистику ТООИР. Параметры окружающей среды G воздействуют на работоспособность геосенсоров и ИТСО через температуру, осадки, видимость, подтопление, запыленность, растительность, рельеф и инфраструктурные ограничения. Локальное размещение ИТСО $\vec{L}$ определяет, какие зоны и ячейки покрытия наблюдаются,

какие участки имеют пересечение зон действия, где возникают разрывы наблюдаемости и какие элементы требуют приоритетного контроля.

Технико-эксплуатационная составляющая геомодели формируется компонентами $\vec{K}$, $\vec{L}$ и $\vec{E}$. Она включает геосенсоры, камеры, контроллеры, каналы связи, электропитание, диагностические признаки, события отказов, потери связи, ложные срабатывания, результаты ТОиР и восстановительные воздействия. Эта составляющая связана с параметрами окружающей среды $\vec{G}$, антропогенными воздействиями $\vec{A}$ и ситуационно-тактическими параметрами $\vec{T}$, поскольку однотипные ИТСО в разных территориальных условиях имеют различную вероятность ухудшения состояния, разную доступность для обслуживания и разную значимость для сохранения функции охранного мониторинга [28].

Антропогенные воздействия $\vec{A}$ и ситуационно-тактические параметры $\vec{T}$ описывают пространственно локализованные изменения обстановки. К ним относятся активность у периметра, повреждение элементов ИТСО, транспортная нагрузка, БПЛА, перебросы, дорожные и строительные работы, массовая активность, временные ограничения доступа, ошибки персонала, нарушения регламентов и действия подрядчиков.

Содержательная часть геомодели завершается аналитическими зависимостями расчета технико-эксплуатационных процессов ОММ РСЛЦ. Эти зависимости связывают нормированные признаки $z_{ik}(t)$, веса w_k , показатель условий функционирования $g_i(t)$, интенсивность отказов $\lambda_i(t)$, интенсивность восстановления $\mu_i(t)$, коэффициент готовности K_r , показатели $MTBF$, $MTTR$ и вектор вероятностей технических состояний $p_i(t)$ [28, 67, 92, 99]. За счет этого геомодель переходит от картографического описания размещения ИТСО к расчетной оценке текущего состояния, прогнозу неблагоприятных состояний и формированию пространственно-содержательных рекомендаций по контролю и ТОиР.

2.4.2 Аналитические зависимости оценки технико-эксплуатационных параметров функционирования ГТРП ОММ РСЛЦ

Параметрическое описание связей компонентов геомодели определяет общую схему входных данных, необходимых для оценки состояния ОММ РСЛЦ. Однако само наличие значений параметров компонентов геомодели не обеспечивает диагностирование текущего и прогнозного состояния ТПС ОММ. Для перехода от описания общей обстановки в ОММ к оценке состояния ТПС вводится совокупность математических зависимостей, связанных с оценкой и прогнозированием состояния этих технических подсистем [103, 107]. Аналитические зависимости составляют суть подмоделей оценки состояния ТПС. Связи подмоделей показаны на рисунке 2.18.

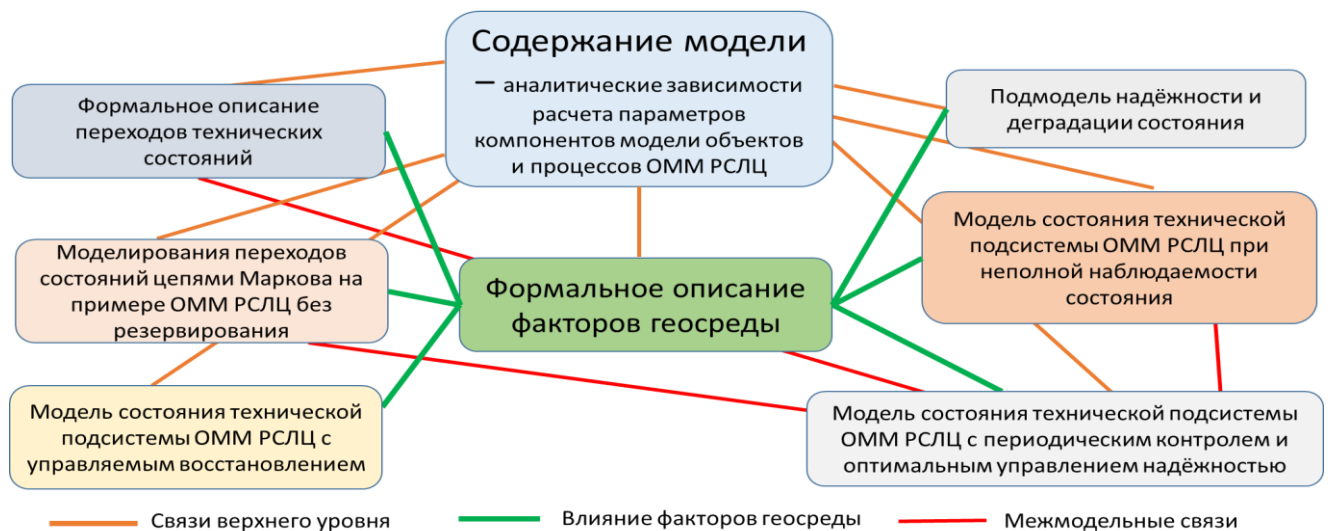


Рисунок 2.18 – Связи в системе формального (аналитического) представления и описания объектов и процессов ОММ РСЛЦ

Блок формального описания факторов геосреды задает пространственно локализованные внешние воздействия на ИТСО. Геоинформационное описание обстановки и интеграция геофакторов с эксплуатационными данными рассмотрены в работах [15, 16, 28, 71].

Подмодель надежности и деградации состояния предназначена для расчета показатели МТBF (среднее время между отказами), МТTR (среднее время между ТОиР), готовности технической подсистемы [67, 134, 135, 144].

Блок формального описания переходов технических состояний фиксирует состав состояний и допустимых переходов между ними, задает исходную схему стохастического описания динамики состояния.

Модель переходов состояний цепями Маркова на примере ОММ РСЛЦ без резервирования используется как базовая расчетная схема. Исследована в работах [13, 18], описывает динамику технического состояния без введения резервирования и без управляющего воздействия на восстановление.

Модель состояния технической подсистемы ОММ РСЛЦ с управляемым восстановлением учитывает возможность изменения параметров восстановления за счет эксплуатационных воздействий. Связывает интенсивность восстановления с режимом обслуживания, доступностью ресурсов и территориальными ограничениями, рассмотрена в работах [20, 28].

Модель состояния технической подсистемы ОММ РСЛЦ с периодическим контролем и оптимальным управлением надежностью задает зависимость вероятностно-временных характеристик системы от геодезической интенсивности отказов, определяемой пространственно локализованными факторами геосреды и условиями эксплуатации; управляющие воздействия на параметры контроля и восстановления рассматриваются при заданных ресурсных, временных и организационно-территориальных ограничениях [22, 28].

Модель состояния технической подсистемы ОММ РСЛЦ при неполной наблюдаемости состояния учитывает расхождение между фактическим и наблюдаемым состоянием объекта, наличие скрытых отказов и задержку их выявления по данным контроля, самодиагностики и эксплуатации [20].

2.4.2.1 Формальное описание переходов технических состояний в условиях воздействий внешней среды

Функционирование компонентов РСЛЦ моделируется как стохастический процесс с дискретными переходами между техническими состояниями [2, 3], обусловленными деградацией, воздействием геосреды, эксплуатационными нагруз-

ками и регламентным обслуживанием. Для описания динамики технического состояния объектов РСЛЦ использован формализм непрерывных цепей Маркова с конечным числом состояний [59, 77, 79, 80, 96, 119].

Для пространственной формализации территория охраны Ω дискретизируется на ячейки ω_i , каждая из которых представляет элемент технической инфраструктуры (сенсор, видеокамера, участок ограждения и др.). Модель переходов применяется к каждой ячейке независимо, обеспечивая пространственную декомпозицию РСЛЦ.

Техническое состояние каждого инженерно-технического средства охраны описывается дискретным множеством состояний:

$$S = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}, \quad (2.14)$$

где: S_0 – исправное рабочее состояние; $S_1, \dots, S_{n-1}$ – состояния частичной деградации различной степени тяжести; S_n – полное отказовое состояние.

Аппарат цепей Маркова предпочтителен для моделирования эксплуатации РСЛЦ, поскольку динамика технического состояния оборудования обладает свойствами марковского процесса: конечное число четко определенных дискретных состояний; случайный характер переходов между состояниями с интенсивностями, зависящими от факторов среды и режима эксплуатации; отсутствие зависимости от истории процесса (вероятность перехода определяется текущим состоянием).

Переходы между этими состояниями моделируются с помощью матрицы интенсивностей переходов, где элемент определяет интенсивность перехода из состояния в состояние на единицу времени. Состояние системы во времени описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = P(t) \cdot Q(x), \quad (2.15)$$

где $P(t)$ – вектор вероятностей нахождения системы в одном из состояний, $Q(x)$ – матрица интенсивностей, параметризуемая территориальными признаками. При наличии накопленных данных о функционировании ТСО в различных геоло-

кациях матрица $Q(x)$ может быть построена на основе [54, 118, 122]: регрессионного анализа; вероятностных моделей отказов; методов машинного обучения (градиентный бустинг, нейросети) [56, 62].

Для построения модели переходов между техническими состояниями принимаются следующие допущения:

- экспоненциальное распределение времени пребывания в состоянии: длительность пребывания объекта в каждом состоянии предполагается экспоненциально распределенной, что соответствует формализму непрерывных цепей Маркова;
- стационарность параметров на прогнозном горизонте: интенсивности переходов считаются постоянными в пределах выбранного краткосрочного интервала анализа и уточняются при следующем цикле расчета с учетом новых данных о состоянии среды и эксплуатации;
- оценивание параметров по данным эксплуатации: интенсивности переходов определяются по накопленным данным диагностики, отказов, восстановлений и регламентных проверок; при необходимости для учета влияния факторов среды используются статистические методы [85, 125] и методы машинного обучения [19, 23, 145, 151].

2.4.2.2 Подмодель состояния технической подсистемы ОММ РСЛЦ с периодическим контролем и оптимальным управлением надежностью

Для формализации данного аспекта в исследовании применяется обобщенная модель, охватывающая: неявные (скрытые) отказы, не фиксируемые системой до наступления ТО; влияние периодичности технического обслуживания на вероятность выявления отказа; возможность оптимального управления параметром обслуживания с целью минимизации времени неработоспособности; адаптация управляющего воздействия на основе интеллектуальных методов, включая элементы нейросетевого подхода [3, 22, 23, 28].

Рассмотрим модель непрерывно контролируемой в процессе эксплуатации охранной системы с периодическим техническим обслуживанием. Введем обозначения: 1 – работоспособное состояние, 2 – техническое обслуживание, 3 – скрытый отказ (рис. 2.19).

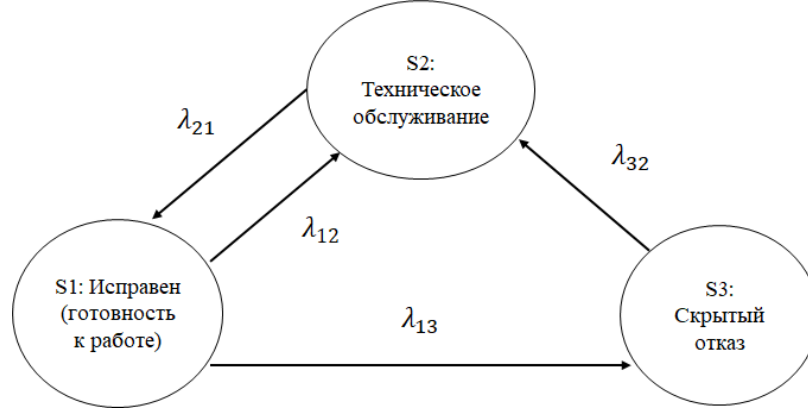


Рисунок 2.19 – Графовое представление переходов между состояниями ТПС ОММ РСЛЦ:

S_1 – работоспособное состояние; S_2 – выявленный отказ, обслуживание; S_3 – скрытый отказ; λ_{13} – геозависимая интенсивность отказов; $\lambda_{12}, \lambda_{32}$ – интенсивность диагностирования; λ_{21} – интенсивность восстановления.

Единственное работоспособное состояние технического объекта – состояние готовности к работе 1, в связи с чем основной показатель надежности – вероятность данного состояния P_1 . При анализе технического риска основной параметр – вероятность отказа $Q = P_3$. Параметры t_{TO} , λ , τ_{TO} , λ_{12} , λ_{13} , λ_{21} могут быть определены по результатам испытаний либо задаваться регламентом технического обслуживания. Переход $3 \rightarrow 2$ отражает обнаружение скрытого отказа при очередном ТО; поэтому в базовой постановке λ_{32} принимается равной интенсивности начала ТО λ_{12} . Динамика вероятностей нахождения системы в одном из состояний описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\left(\lambda_i(t) + \frac{1}{t_{TO}}\right)P_1(t) + \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{1}{t_{TO}}P_1(t) - \frac{1}{\tau_{TO}}P_2(t) + \frac{1+\lambda_i(t)t_{TO}}{\lambda_i(t)t_{TO}^2}P_3(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_i(t)P_1(t) - \frac{1+\lambda_i(t)t_{TO}}{\lambda_i(t)t_{TO}^2}P_3(t). \end{cases} \quad (2.16)$$

В силу линейной зависимости системы (2.16) используем нормирующее условие $P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1$ и дополняем систему начальными условиями:

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = 0. \quad (2.17)$$

С учетом наличия экстремума при некоторых значениях λ и τ_{TO} существует периодичность технического обслуживания, которая является оптимальной, а также может быть найдено предельное максимальное значение вероятности состояния готовности объекта [22, 28]. Для установившегося режима эксплуатации охранной системы становится возможным решение задачи оптимизации надежности [2, 3, 11, 12, 79]. Полагая, что при построении оптимальной стратегии управления надежностью охранной системы периодичность технического обслуживания τ_{TO} , выбранная в качестве управляющего параметра, может изменяться во времени, вводим следующие обозначения:

$$x_1(t) = P_1(t), x_2(t) = P_2(t), x_3(t) = 1 - x_1(t) - x_2(t), \quad (2.18)$$

$$u(t) = \frac{1}{\tau_{TO}}, \mu = \frac{1}{\tau_{TO}}, t \in [0, T]. \quad (2.19)$$

С учетом введенных обозначений приходим к задаче оптимального управления, где целью решения задачи является минимизация вероятности нахождения охранной системы в неработоспособном состоянии в промежутке от 0 до T.

Требуется минимизировать функционал $I(u)$:

$$I(u) = \int_0^T e^{-\delta t} [M_1(1 - x_1(t) - x_2(t)) + M_2 u^2(t)] dt \rightarrow \min, \quad (2.20)$$

при динамических ограничениях:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -(\lambda_i(t) + u(t))x_1(t) + \mu x_2(t), t \in [0, T], \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{1}{\lambda_i(t)} u^2(t) x_1(t) - \left(\mu + u(t) + \frac{u^2(t)}{\lambda_i(t)} \right) x_2(t) + \\ &\quad + \left(\frac{u(t)}{\lambda_i(t)} + 1 \right) u(t), t \in [0, T], \end{aligned} \quad (2.21)$$

с начальными условиями:

$$x_1(0) = X_1^0, x_2(0) = X_2^0, u(0) = Y^0, \quad (2.22)$$

при ограничении на управление:

$$Y_{min} \leq u(t) \leq Y_{max}, t \in [0, T]. \quad (2.23)$$

В рамках модели состояния технической системы РСЛЦ управление надежностью задается непрерывной функцией $u(t)$ (интенсивность ТО/контроля), которая влияет на вероятности состояний системы через систему дифференциальных

уравнений. Критерий качества отражает требование минимизировать долю/вероятность пребывания системы в неработоспособном состоянии при заданных ресурсных ограничениях на управление. Возникает нелинейная задача оптимального управления с фазовыми ограничениями, для которой требуется получить необходимые условия оптимальности и правило выбора $u(t)$.

Для решения этой задачи применяется принцип максимума Понтрягина [2, 3, 8, 105, 106, 138, 148], позволяющий заменить прямую минимизацию функционала на множестве допустимых процессов эквивалентной краевой задачей: совместной системой уравнений для фазовых переменных $x(t)$ и сопряженных переменных $\psi(t)$, дополненной условием максимума функции Понтрягина по управлению и условиями трансверсальности на правом конце интервала. Практическая ценность такого перехода состоит в том, что:

1. управление $u(t)$ определяется локально из условия максимума;
2. задача синтеза $u(t)$ сводится к решению краевой задачи, для которой применимы стандартные численные методы [2, 3, 8, 78].

Итоговая краевая задача принципа максимума Понтрягина имеет вид:

$$\dot{x}_1(t) = -(\lambda_i(t) + u(t))x_1(t) + \mu x_2(t), t \in [0, T], \quad 2.24$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{1}{\lambda_i(t)}u^2(t)x_1(t) - \left(\mu + u(t) + \frac{u^2(t)}{\lambda_i(t)}\right)x_2(t) + \left(\frac{u(t)}{\lambda_i(t)} + 1\right)u(t),$$

$$\dot{\psi}_1(t) = -\frac{\partial H(t, x, \psi, u)}{\partial x_1} = -e^{-\delta t} + (\lambda_i(t) + u(t))\psi_1(t) + \frac{u^2(t)}{\lambda_i(t)}\psi_2(t), \quad 2.25$$

$$\dot{\psi}_2(t) = -\frac{\partial H(t, x, \psi, u)}{\partial x_2} = -e^{\delta t} - \mu\psi_1(t) + \left(\mu + u(t) + \frac{u^2(t)}{\lambda_i(t)}\right)\psi_2(t),$$

$$u^*(t) = \begin{cases} Y_{min}, & \text{при } \hat{u}(t) < Y_{min}, \\ \hat{u}(t), & Y_{min} \leq \hat{u}(t) \leq Y_{max}, \\ Y_{max}, & \text{при } \hat{u}(t) > Y_{max}, \end{cases} \quad 2.26$$

с граничными условиями:

$$x_1(0) = X_1, x_2(0) = X_2, \psi_1(T) = \psi_2(T) = 0, \quad 2.27$$

$$t \in [0, T], i = \overline{1, n}.$$

Сложность анализа и расчета показателей надежности охранных систем обусловлена стохастическим характером факторов, отраженных в геомодели, влияющих на работоспособность. Для учета этих неопределенностей искусственная нейронная сеть [85] используется не как дополнительное управляющее воздействие в правой части динамических уравнений, а как метод получения значений геоэависимой интенсивности отказов $\lambda_i(t)$, определяющей переход из работоспособного состояния в состояние отказа в ячейке ω_i [23, 28, 84, 85, 96].

Пусть два агрегированных нормированных признака формируются по совокупности факторов $G_i(t)$:

$$x_j^{(G)}(t) = \phi_j(G_i(t)), j = 1, 2, i = \overline{1, n}. \quad (2.28)$$

где ϕ_j – функция нормализации/агрегации. Тогда нейросетевая аппроксимация $\lambda_i(t)$ задается выражениями:

$$g_1(t) = G_1\left(\sum_{j=1}^2 \omega_{1j}(t)x_j^{(G)}(t) - \psi_1\right), g_2(t) = G_2\left(\sum_{j=1}^2 \omega_{2j}(t)x_j^{(G)}(t) - \psi_2\right), \quad (2.29)$$

$$\lambda_i(t) = G_0(\omega_{01}(t)g_1(t) + \omega_{02}(t)g_2(t) - \psi_0), \lambda_i(t) \geq 0, \quad (2.30)$$

где $\omega_{kj}(t)$ – весовые коэффициенты ИНС, ψ_0, ψ_1, ψ_2 – параметры сдвига, $t \in [0, T]$, функция G_0 выбирается так, чтобы обеспечить неотрицательность интенсивности. Обобщенный вид функции записывается как:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i^0 G_0\left[b_0 + \sum_{k=1}^H v_k G_k\left(b_k + \sum_{j=1}^m w_{kj} z_{ij}(t)\right)\right], \lambda_i(t) \geq 0, \quad (2.31)$$

где $\lambda_i(t)$, ч^{-1} , – адаптивная геоэависимая интенсивность перехода состояния i -го геообъекта; λ_i^0 , ч^{-1} , – базовая интенсивность; $z_{ij}(t)$ – j -й нормированный признак, сформированный из параметров геомодели; m – число входных признаков; H – число нейронов скрытого слоя; w_{kj} и v_k – веса связей; b_k и b_0 – смещения. В качестве G_k могут применяться гладкие нелинейные функции $\tanh()$ или $\text{sigmoid}()$; для нормированных непрерывных признаков предпочтителен $\tanh()$, поскольку он симметричен относительно нуля и обеспечивает гладкую нелинейную аппроксимацию [115]. Функция G_0 должна обеспечивать $\lambda_i(t) \geq 0$ и в качестве неё может использоваться экспоненциальная функция. В данной постановке используется полносвязная ИНС с одним скрытым слоем. Обучению подлежат веса и смещения, которые определяются по обучающей выборке минимизацией функции ошибки. После

обучения параметры сети фиксируются, а изменение $\lambda_i(t)$ определяется текущими значениями входных признаков геомодели

Прогноз на горизонт Δt строится последовательным переносом вектора вероятностей текущего состояния $\vec{p}(t_0)$ по матрице переходов состояний, параметризованной и пересчитываемой на каждой итерации с помощью ИНС и с учетом параметров геомодели. Что позволяет получить прогнозное распределение вероятностей состояний объекта в момент $t_0 + \Delta t$. Оценка $\lambda_i(t)$, полученная по приведенной нейросетевой схеме, используется в системе (2.24) и в динамических ограничениях задачи оптимального управления. Иллюстрация схемы формирования гео-зависимой функции отказов представлена на рисунке 2.20.



Рисунок 2.20 – Последовательность формирования гео-зависимой интенсивности отказов для матрицы переходов состояний

Для решения данной задачи может применяться ее дискретная аппроксимация с использованием явных разностных схем, введены сопряженные переменные p и построены приближенные траектории [14]. В результате дискретной аппроксимации из условий стационарности функции Лагранжа в дискретной задаче оптимального управления, с применением метода проекции градиента строится приближенное решение задачи поддержания работоспособности ГТРП ОММ.

2.4.2.3 Подмодель состояния технической подсистемы ОММ РСЛЦ при неполной наблюдаемости состояния

В традиционных Марковских моделях технического состояния вероятности нахождения объекта в состояниях готовности, отказа и обслуживания определяются заданной структурой переходов [19]. Такая постановка применима, когда состояние объекта известно либо однозначно восстанавливается по эксплуатационным данным. Для геосенсорной территориально распределенной платформы ОММ РСЛЦ это условие выполняется не всегда [20, 21, 23].

Геообъект ГТРП может сохранять связь с системой и формально считаться работоспособным при деградации чувствительности, нестабильном электропитании, ухудшении качества видеопотока, росте ложных срабатываний или неполной передаче телеметрии. Возможна и обратная ситуация: разовое превышение порога, кратковременный сбой связи или внешняя помеха формируют признак неблагоприятного состояния при отсутствии фактического отказа.

Для описания таких случаев используется скрытая марковская модель (СММ), в которой состояние геообъекта рассматривается как скрытая переменная, а наблюдаемыми являются последовательности диагностических, событийных, инфраструктурных и пространственно-эксплуатационных признаков. Для каждого геообъекта ГТРП формируется вектор наблюдаемых признаков.

Скрытые состояния геообъекта ГТРП. В базовой постановке скрытая Марковская модель эксплуатации технической подсистемы ОММ РСЛЦ включает три скрытых состояния геообъекта ГТРП:

S_0 – работоспособное состояние. Геообъект выполняет требуемую функцию наблюдения, обнаружения, передачи или первичной обработки данных.

S_1 – деградация. Функция объекта еще сохраняется, но фиксируются устойчивые признаки ухудшения: рост ложных срабатываний, нестабильная связь, просадки питания, рост задержек.

S_2 – скрытый отказ. Геообъект не обеспечивает требуемую функцию или обеспечивает ее недостоверно, однако отказ еще не подтвержден прямым осмотром, актом ремонта или однозначным диагностическим сообщением.

Наблюдаемые признаки для скрытой Марковской модели. Наблюдение в СММ задается как совокупность признаков, зарегистрированных для –го геообъекта ГТРП на момент контроля или на интервале наблюдения. В таблице 2.8 приведен перечень признаков, которые могут использоваться для формирования входной последовательности НММ.

Таблица 2.8 – Переменные аналитических зависимостей, характеризующие значения наблюдений, для диагностики состояния системы

Группа наблюдений	Наблюдение и измеряемая величина	Единица / шкала	Интерпретация для НММ
Диагностические	Наличие связи с геообъектом; доля времени доступности канала	0/1; % за интервал	Потеря или нестабильность связи повышает вероятность деградации или скрытого отказа
Диагностические	Пропуски телеметрии; доля потерянных сообщений	шт./интервал; %	Повторяющиеся пропуски формируют признак неполной наблюдаемости
Диагностические	Уровень сигнала или качество радиоканала	dBm; dB; %	Снижение уровня сигнала повышает вероятность деградации связи
Диагностические	Температура внутри корпуса или шкафа автоматики	°C	Выход за допустимый диапазон повышает вероятность деградации электроники
Диагностические	Состояние аккумулятора, ИБП или резервного питания	В; % заряда; мин резерва	Снижение резерва питания связано с угрозой скрытого отказа узла
Событийные	Частота ложных срабатываний	шт./сутки; 1/сутки	Рост ложных тревог отражает ухудшение достоверности наблюдения
Событийные	Повторяющиеся тревоги одного типа	шт./интервал	Серийность однотипных событий указывает на устойчивую аномалию
Качество наблюдения	Качество видеопотока или изображения	индекс 0–1; бит/с; кадр/с	Снижение качества видео может предшествовать потере функции наблюдения
Качество наблюдения	Контрастность, освещенность и различимость сцены	индекс 0–1; лк	Недостаточная различимость снижает достоверность обнаружения событий
Качество наблюдения	Влияние осадков, тумана, снега, обледенения	м видимости; мм/ч; индекс 0–1	Средовые помехи учитываются как фактор наблюдаемого ухудшения функции
Качество наблюдения	Отклонение чувствительности датчика от калибровочного уровня	%; условные единицы	Устойчивое отклонение указывает на деградацию сенсорной части
Инфраструктурные	Отклонение напряжения питания	В; % от номинала	Просадки и перенапряжения повышают вероятность деградации и отказа
Инфраструктурные	Количество просадок питания и их длительность	шт./интервал; с	Повторяющиеся просадки формируют признак нестабильности узла
Инфраструктурные	Загрузка канала передачи данных	%; Мбит/с	Перегрузка канала влияет на задержки, пропуски и неполноту данных
Инфраструктурные	Состояние кабельной линии или интерфейса	Ом; 0/1; код ошибки	Повреждение линии может проявляться как скрытая потеря функции передачи

Группа наблюдений	Наблюдение и измеряемая величина	Единица / шкала	Интерпретация для НММ
Пространственно–эксплуатационные	Тип функциональной зоны ЛЦ	категория	Зона определяет значимость наблюдения и допустимый уровень неопределенности
Пространственно–эксплуатационные	Удаленность от эксплуатационной базы или склада ЗИП	км; ч в пути	Удаленность повышает критичность раннего выявления деградации
Пространственно–эксплуатационные	Доступность маршрута обслуживания	0/1; индекс 0–1; ч	Ограниченная доступность повышает приоритет упреждающего контроля
Пространственно–эксплуатационные	Близость источников вибрации, пыли, ЭМ–помех или влаги	м; индекс воздействия 0–1	Территориальное воздействие используется для геодезической оценки переходов
Пространственно–эксплуатационные	Сезонные ограничения эксплуатации и ТОиР	дни; категория сезона	Сезонность влияет на наблюдаемость, доступность и вероятность ухудшения
Пространственно–эксплуатационные	История отказов, ремонтов и ложных тревог	шт./год; MTBF, ч; MTTR, ч	История событий уточняет вероятность деградации и скрытого отказа
Пространственно–эксплуатационные	Время после последнего ТО или диагностики	сутки; часы	Рост интервала без контроля повышает неопределенность состояния

Для практического применения указанные наблюдения могут быть нормированы и сведены к дискретным уровням. Например, для каждого признака задаются уровни «норма», «внимание», «ухудшение», «критическое отклонение». Последовательность таких уровней за интервал контроля используется как вход скрытой Марковской модели.

Классифицированные признаки переменных величин наблюдения, используемых для оценки скрытого состояния геообъекта ГТРП, представлены на рисунке 2.21.



Рисунок 2.21 – Переменные величины наблюдений состояния системы ОММ

Для каждого геообъекта ИТСО в составе геомодели $GM_{\text{РСЛЦ}} = (S_{Gobj}, S_{Rel})$ вводится скрытый процесс технического состояния. Геообъект $Gobj_i = (o_i, Att_i)$ сохраняет пространственную компоненту o_i и атрибутивно–содержательную компоненту Att_i . Скрытая Марковская модель добавляет к ним вероятностный слой, связывающий наблюдаемые признаки с ненаблюдаемым состоянием оборудования и задается.

$$X_i(t) \in E = \{S_0, S_1, S_2\}, \quad (2.32)$$

$$Y_i(t) = (O_{i1}(t), O_{i2}(t), \dots, O_{im}(t)), \quad (2.33)$$

$$Z_i(t) = [A_i(t), G_i^{env}(t), RSp_i, RSc_i]. \quad (2.34)$$

Здесь $X_i(t)$ – скрытое техническое состояние i -го геообъекта в момент времени t ; E – конечное множество скрытых состояний; $Y_i(t)$ – вектор наблюдений, поступающих от диагностики, журналов событий, эксплуатации и геоинформационных слоев; $O_{ik}(t)$ – k -й наблюдаемый признак; $Z_i(t)$ – вектор условий, влияющих на переходы между состояниями. Скрытая Марковская модель задается набором параметров:

$$\theta_i = \{\pi_i, A_i(t), B_i(t), F_i^{adapt}\}, \quad (2.35)$$

где π_i – начальное распределение вероятностей скрытых состояний; $A_i(t)$ – матрица переходов между скрытыми состояниями; $B_i(t)$ – значения наблюдений (матрица эмиссий); F_i^{adapt} – геоинформационная адаптивная функция параметризации переходов и/или вероятностей отказов по параметрам геомодели. Переходы между скрытыми состояниями задаются матрицей $A_i(t)$. Элемент $a_{jk}^i(t)$ показывает вероятность того, что i -й геообъект перейдет из состояния S_j в состояние S_k за расчетный интервал Δt при текущих условиях эксплуатации и размещения:

$$a_{jk}^i(t) = P[X_i(t + \Delta t) = S_k | X_i(t) = S_j, Z_i(t)], \quad j, k \in \{0, 1, 2\}.$$

$$A_i(t) = \begin{pmatrix} a_{00}^i & a_{01}^i & a_{02}^i \\ a_{10}^i & a_{11}^i & a_{12}^i \\ a_{20}^i & a_{21}^i & a_{22}^i \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

$$\sum_k a_{jk}^i(t) = 1.$$

Описание элементов матрицы представлено в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Элементы матрицы переходов состояний

Элемент	Описание значения для эксплуатации ИТСО – интенсивности переходов
a_{00}^i	сохранение работоспособного состояния S_0 на интервале Δt
a_{01}^i	переход из S_0 в деградацию S_1 под действием износа, нагрузки, геофакторов и событийной истории
a_{02}^i	переход из S_0 в скрытый отказ S_2 , например при резком внешнем воздействии, обрыве питания, повреждении линии или критическом сбое
a_{10}^i	возврат из деградации S_1 в S_0 без явного ТО;
a_{11}^i	сохранение деградационного состояния S_1 ; объект еще функционирует, но признаки ухудшения сохраняются;
a_{12}^i	переход из деградации S_1 в скрытый отказ S_2 ; основной параметр прогнозирования неблагоприятного события
a_{20}^i	переход из скрытого отказа S_2 в S_0 ; в базовой модели равен 0, поскольку восстановление требует управляемого действия
a_{21}^i	переход из скрытого отказа S_2 в деградацию S_1
a_{22}^i	сохранение скрытого отказа S_2 до момента обнаружения и восстановления

Для естественной динамики эксплуатации, когда самовосстановление оборудования не допускается, используется направленная структура переходов:

$$A_i(t) = \begin{pmatrix} a_{00}^i & a_{01}^i & a_{02}^i \\ 0 & a_{11}^i & a_{12}^i \\ 0 & 0 & a_{22}^i \end{pmatrix}. \quad (2.37)$$

Здесь $a_{00}^i + a_{01}^i + a_{02}^i = 1$, $a_{11}^i + a_{12}^i + a_{22}^i = 1$ до момента управляющего воздействия. После выезда бригады или подтвержденного ТО применяется не скрытый переход, а внешнее действие $u_i(t)$, которое изменяет начальное распределение модели. Если наблюдения предварительно дискретизированы в классы $O_1, O_2, \dots, O_m$, то используется матрица эмиссий:

$$B_i(t) = [b_{jk}^i(t)], \quad b_{jk}^i(t) = P[O_k | S_j], \quad \sum_k b_{jk}^i(t) = 1. \quad (2.38)$$

Граф состояний и переходов скрытой Марковской модели эксплуатации геообъекта ГТРП представлен на рисунке 2.22.

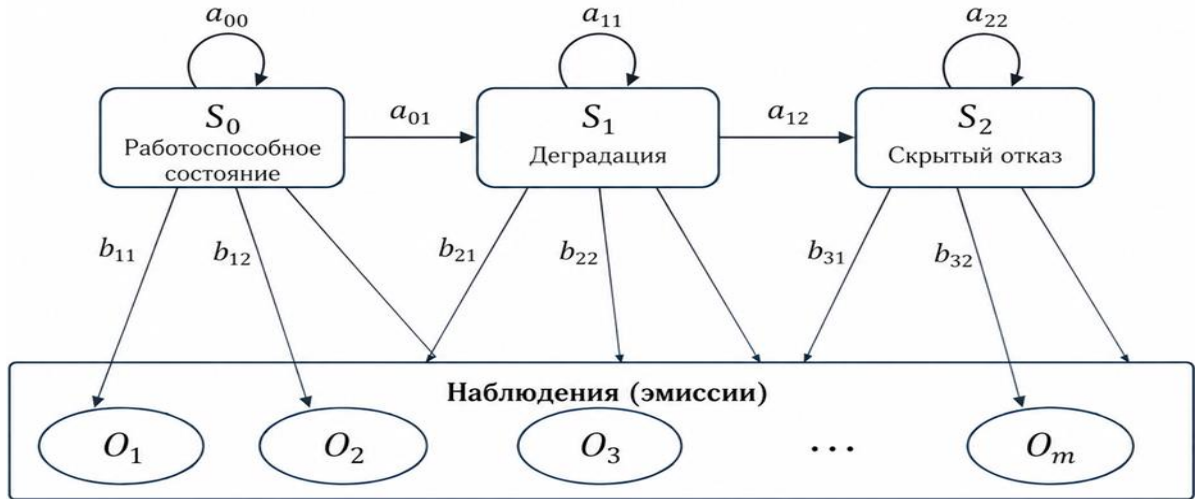


Рисунок 2.22 – Графовое представление скрытых технических состояний геообъектов ОММ:

S_0 – работоспособное состояние; S_1 – деградация; S_2 – скрытый отказ; a_{ij} – интенсивности переходов; b – интенсивности наблюдения; O_k – наблюдаемые признаки для оценки состояния ОММ РСЛЦ

Для i -го геообъекта ГТРП на каждом интервале контроля формируется последовательность наблюдений:

$$Y_i(1:T) = \{Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(T)\}, \quad (2.39)$$

где $Y_i(t)$ – вектор наблюдаемых признаков на момент t : параметры связи, телеметрия, качество видеопотока (битрейт), ложные срабатывания, пропуски событий, самодиагностика, состояние питания, геофакторы и эксплуатационная история.

Истинная последовательность состояний

$$X_i(1:T) = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(T)\} \quad (2.40)$$

не наблюдается напрямую. Она оценивается вероятностно по данным $Y_i(1:T)$.

Результатом расчета является апостериорное распределение вероятностей скрытых состояний:

$$\alpha_i(t) = [P(S_0 | Y_i(1:t)), P(S_1 | Y_i(1:t)), P(S_2 | Y_i(1:t))]. \quad (2.41)$$

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.

Для оценки параметров скрытой марковской сети применяется алгоритм Expectation–Maximization (ЕМ, ожидание–максимизация), в котором по наблюдаемым данным последовательно уточняются оценки скрытых состояний и парамет-

ров модели. Для марковских моделей эта процедура реализуется алгоритмом Баума-Велша, используемым для оценки вероятностей переходов и параметров наблюдаемого процесса [96, 116].

Апостериорные вероятности используются как расчетная основа для картографического слоя состояния ИТСО. Для каждого геообъекта формируются три показателя:

$$P_i^0(t) = P(S^0|Y_{1:t}), P_i^1(t) = P(S_1|Y_{1:t}), P_i^2(t) = P(S_2|Y_{1:t}). \quad (2.42)$$

На их основе рассчитываются показатели готовности, вероятности ухудшения ТС ОММ и скрытого отказа:

$$K_i^{HMM}(t) = P_i^0(t) + \gamma P_i^1(t), 0 \leq \gamma \leq 1, \quad (2.43)$$

$$R_i^{deg}(t) = P_i^1(t), R_i^{fail}(t) = P_i^2(t). \quad (2.44)$$

Здесь $K_i^{HMM}(t)$ – вероятностная оценка технической готовности с учетом скрытого состояния; γ – коэффициент частичной работоспособности в состоянии отличном, от исправного; $R_i^{deg}(t)$ задает вероятность нахождения в состоянии близком к неработоспособности; R_i^{fail} – вероятность скрытого отказа. Для прогноза на горизонт H используется произведение переходных матриц или последовательный пересчет через матрицы $A_i(t)$, если геофакторы меняются по времени:

$$\alpha_i(t + H | t) = \alpha_i(t) A_i(t) A_i(t + \Delta t) \dots A_i(t + H - \Delta t). \quad (2.45)$$

Далее объектные оценки агрегируются по ячейкам покрытия, зонам ЛЦ или маршрутам технического обслуживания:

$$Dang_c(t) = \sum_{i \in c} w_{ic} [\eta_1 P_i^1(t) + \eta_2 P_i^2(t)], \quad (2.46)$$

где $Dang_c(t)$ – оценка уровня угрозы c -й территориальной ячейки; w_{ic} – вес вклада i -го геообъекта в ячейку покрытия; η_1 и η_2 – веса деградации и скрытого отказа. Выходом являются слой вероятности деградации, слой вероятности скрытого отказа, геоизображение риска по ячейкам и ранжированный реестр объектов для контроля и ТОиР [28, 31, 85].

Выводы по разделу 2

1. Уточнено и контроллингово интерпретировано содержание понятия «обстановка» применительно к ОММ РСЛЦ. Определено, что обстановка выступает как пространственно-временное выражение состояния сети ЛЦ, технической подсистемы ИТСО, геосреды, инфраструктуры, событий и процессов эксплуатации, влияющих на техническую готовность охранного мониторинга.

2. Определено место геомодели обстановки в контуре геоинформационного регулирования ГТРП ОММ РСЛЦ. Указано, что геомодель связывает сбор данных, оценку состояния, прогноз ухудшения состояния, планирование контроля и ТОиР, а также контроль исполнения решений по поддержанию технической готовности.

3. Формализована структура геомодели обстановки через множество геообъектов ОММ и отношений над ними. Определено, что геообъект ОММ РСЛЦ выступает как сочетание пространственной компоненты и атрибутивно-содержательных признаков: координат, геометрии, зоны действия, типа ИТСО, технического состояния, ресурса, событий эксплуатации и параметров обслуживания.

4. Описан состав геомодели, включающий компоненты природной среды, техногенной составляющей и социальных факторов.

5. Показана ведущая роль подмодели ГТРП в составе геомодели ОММ РСЛЦ.

6. Содержание геомодели обстановки ОММ РСЛЦ представлено на параметрическом и аналитическом уровнях. Описаны переходы технических состояний ИТСО на основе геозависимой функции отказов, построены марковские подмодели переходов технических состояний с учетом периодического контроля, управляемого восстановления и неполной наблюдаемости.

Разработка модели геоситуации в РСЛЦ позволяет перейти к исследованию методического геоинформационного аппарата анализа и регулирования процессов функционирования ОММ РСЛЦ.

РАЗДЕЛ 3. Разработка геоинформационной ситуационно-предиктивной методики оперативной оценки и прогнозирования обстановки в системе охранных мониторингов региональной логистической сети

Разработанная геомодель обстановки в ОММ РСЛЦ служит основой для построения геоинформационной ситуационно-предиктивной методики оценки и прогнозирования обстановки в ОММ РСЛЦ [33, 44, 91, 112]. Геомодель задает состав геообъектов, компонентные параметры, тематические слои, ячейки покрытия и отношения между элементами ОММ. Данные положения служат исходными данными в последовательности процедур, обеспечивающих переход от геомодели к оценке текущего состояния, прогнозу ухудшения состояния ТПС ОММ РСЛЦ и выбору управляющих воздействий [31, 37, 39].

При разработке методики исследуются: структура методики; порядок сбора, подготовки и загрузки пространственных, атрибутивных и эксплуатационно-событийных данных; отбор значимых параметров геомодели; оценка состояния ИТСО и ячеек покрытия; построение прогноза технических состояний; иерархический выбор управляющих воздействий; подготовка пространственно-содержательных рекомендаций для контроля и ТОиР.

3.1. Обобщенная структура геоинформационной методики предиктивно-ситуационной оценки состояния ОММ РСЛЦ

Для перехода от геомодели ОММ РСЛЦ к оценке обстановки и выработке пространственно-содержательных рекомендаций требуется задать состав и структуру методики [82], последовательность ее процедур и связи между ними. Ситуационно-предиктивная методика рассматривается как набор взаимосвязанных блоков, обеспечивающих обработку пространственных, атрибутивных и эксплуатационно-событийных данных, оценку текущего состояния ИТСО, прогноз ухудшения состояния ТПС ОММ РСЛЦ и подготовку данных для выбора управляющих воздействий [33, 37, 46, 91, 112].

При представлении и использовании геоинформации для управления территориальными системами методика геоинформационной поддержки рассматривается как совокупность этапов, категорий и системы моделей и методов [37, 139]:

$$MC_{\text{ОММ}} = (St, Ct, SGM), \quad (3.1)$$

где $MC_{\text{ОММ}}$ – методика управления ОММ; St – этапы (стадии); Ct – категории; SGM – система моделей и методов.

Состав обобщенной методики отражен на рисунке 3.1. Входом служат пространственные данные, атрибутивные параметры технических средств, результаты самодиагностики и эксплуатационно-событийные данные. На этой основе формируется последовательность процедур, обеспечивающих переход от гео модели ОММ РСЛЦ к оценке состояния, прогнозу неблагоприятных изменений и подготовке пространственно-содержательных рекомендаций для контроля и ТОиР.

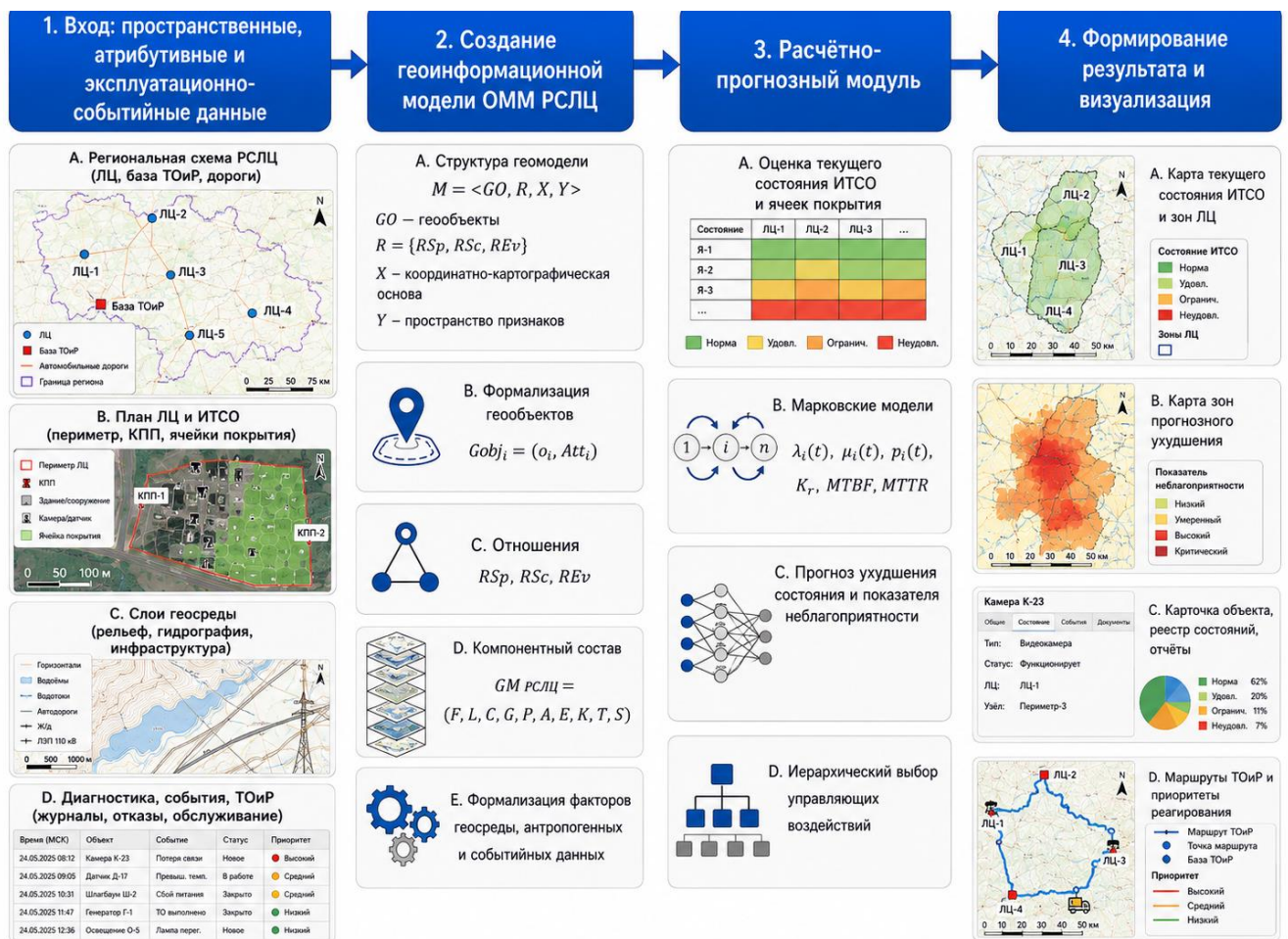


Рисунок 3.1 – Состав обобщенной геоинформационной методики оценки обстановки в ОММ РСЛЦ

Взаимосвязь модулей обработки входных геоданных отражает этапы геоинформационной поддержки, представленные на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Общая последовательность этапов предобработки данных

Результатом выполнения процедур методики являются: реестры объектов и их состояний; визуализация ЛЦ, включающая термокартографическую окраску зон; оценки текущего состояния ТПС ОММ РСЛЦ и прогноз отказов; пространственно-содержательные рекомендации оператору по реагированию и техническому обслуживанию.

Методика реализуется в виде алгоритмически организованной последовательности операций, структура которой представлена на рисунке 3.3



Рисунок 3.3 – Структура обобщенной методики оценки обстановки в ОММ РСЛЦ

Методика строится в виде иерархически структурированной многомодульной системы, включающей:

1. Блок пространственного представления (геослой). Осуществляет интеграцию цифровых геоизображений, планов охраняемых объектов, цифровых моделей рельефа, кадастровых и технико–географических данных. Используются стандартные ГИС–форматы (GeoJSON, SHP, TIF), обеспечивающие визуализацию и пространственную привязку всех объектов ОММ [34, 44, 45, 53, 93, 97].

Для РСЛЦ данный блок начинается с подготовки картографической подложки в QGIS. На региональном уровне формируются границы сети, слои данных ЛЦ, пунктов управления и баз ТОиР. Используются цифровые модели рельефа (ЦМР), кадастровые и топографические данные, а также схемы охраняемых объектов. Все элементы пространственной информации приводятся к единой системе координат (WGS 84) и привязываются к сетке ячеек контроля.

Обмен с программным комплексом выполняется через векторные слои GeoJSON/SHP и таблицы атрибутов, где фиксируются идентификатор, тип объекта, координаты, зона, технические параметры, состояние и принадлежность к ячейке покрытия. Последовательность действий отражена на рисунке 3.4.

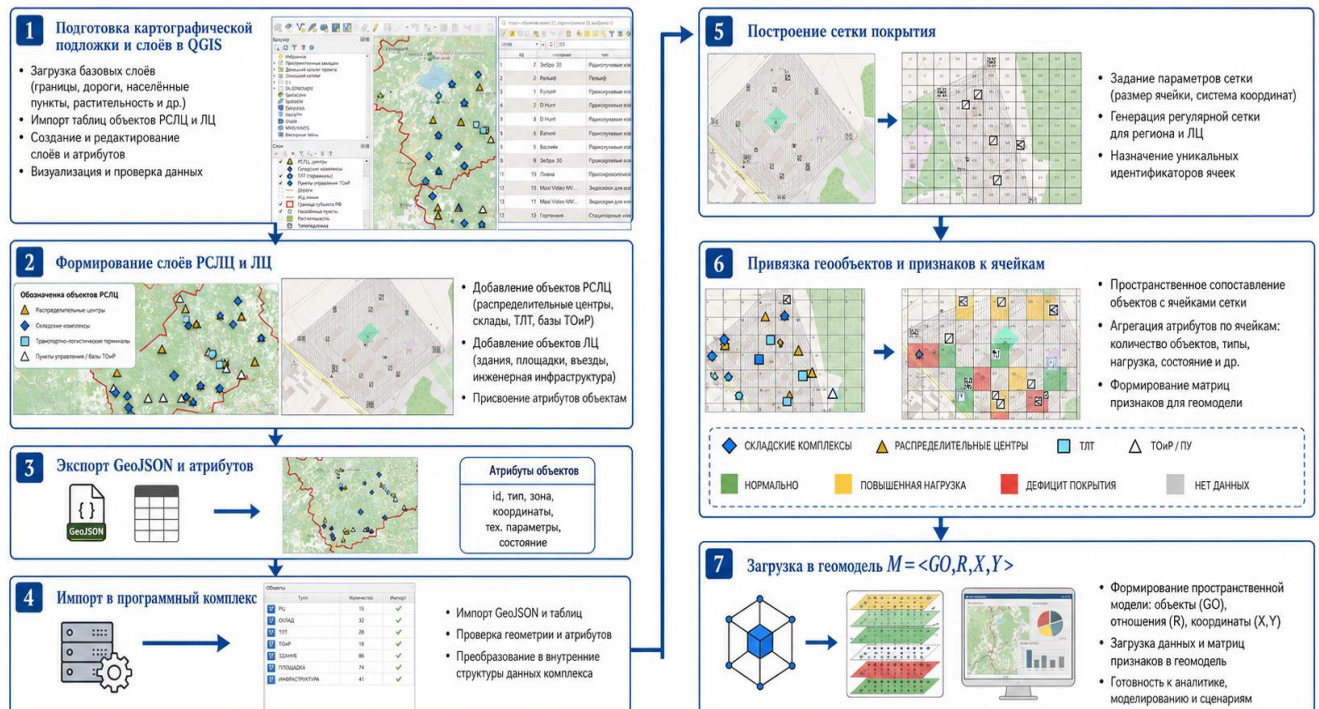


Рисунок 3.4 – Алгоритм блока «Сбор данных и наполнение геомодели»

Единая сетка покрытия используется как связующее звено между региональным уровнем РСЛЦ, локальными планами ЛЦ и последующими расчетами состоя-

ния ИТСО. Преобразование базовой геоподложки, слоя объектов ТПС ОММ с таблицей атрибутов в картографическое представление геообъектов ОММ представлено на рисунке 3.5. Такое представление связывает локальный план ЛЦ, реестр ИТСО и их расчетные признаки в единой гео модели [44, 104, 120, 139].



Рисунок 3.5 – Подготовка пространственной подложки, слоя геообъектов и атрибутивных данных для блоков пространственного представления и параметризации состояния

Пространственная основа дополняется таблицей атрибутов (рис. 3.6), в которой для каждого геообъекта фиксируются идентификатор, тип, зона размещения, диагностические параметры и принадлежность к ячейке покрытия.

	fid	id	code	название	тип	зона	отметка рельефа	высота установки	тип питания	тип подключения
1	0	0	NULL	Рельеф	Проводноволновые извещатели	F	99	1 line		ethernet
2	1	1	NULL	D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	A	100	2 line		ethernet
3	2	2	NULL	D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	B	103	2 line		ethernet
4	3	3	NULL	D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	C	98	2 line		ethernet
5	4	4	NULL	D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	D	99	2 line		ethernet
5	5	5	NULL	Василёк	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	D	99	2 line		ethernet
7	6	6	NULL	Зебра 30	Радиолучевые извещатели (однопол.)	A	97	1 line		ethernet
3	7	7	NULL	Зебра 30	Радиолучевые извещатели (однопол.)	B	98	1 line		ethernet
9	8	8	NULL	Рельеф	Проводноволновые извещатели	C	98	1 line		ethernet
10	9	9	NULL	Лиана	Проводноволновые извещатели	E	98	1,5 line		ethernet

Рисунок 3.6 – Таблица значений атрибутов геообъектов ТПС ОММ РСЛЦ

Такое заполнение атрибутивных данных завершает блок параметризации состояния и обеспечивает переход к расчетам текущей оценки, прогнозированию

ухудшения состояния и пространственной локализации неблагоприятных участков.

В состав блока входят: подмодуль импорта картографической информации (GeoTIFF, SHP, DXF); генератор сетки пространственного покрытия (границы участков, буферные зоны, охраняемые периметры); интерфейс навигации и управления слоями визуализации.

Информация из этого блока служит основой для пространственной привязки объектов системы ОММ (СОММ), локализации геофакторов и ситуаций, генерации тепловых риск геоизображений [45, 118].

2. Блок параметризации состояния (технический слой). Представляет инженерно–технические средства охраны как формализованные объекты с вектором параметров состояния, формируемым на основе данных самодиагностики (напряжение, чувствительность, режим работы); истории отказов и ремонтов; параметров подключения, времени реакции, логов; технических паспортов и планов ТО.

Блок параметризации поддерживает автоматическое обновление признаков, хранение истории изменения векторов признаков состояния, интерфейсы для подключения к внешним ИС [9, 23, 54, 92, 134].

3. Блок оценки геофакторов. Отвечает за интеграцию климатических, геоморфологических, антропогенных и инфраструктурных факторов, влияющих на функционирование ТСО. Вектор факторов среды включает: температуру, осадки, рельеф, застройку, тип покрытия, доступность.

Реализует сбор и обработку информации о среде, воздействующей на ТСО. Факторы классифицируются как природные (осадки, температура, ветер, влажность, геология), техногенные (вибрации, шум, застройка, транспортные нагрузки), антропогенные (зоны доступа, зоны повышенного риска, временные объекты) [1, 57, 75, 89, 116, 137].

Источники данных включают метеостанции, спутниковые наблюдения (в том числе NDVI, Sentinel, MODIS), БПЛА, локальные сенсоры, информационные системы ведомств.

Факторы среды используются как входные переменные геодеpendимой функции отказа $\lambda_i(t)$. На рисунке 3.7 продемонстрировано, что факторы геосреды имеют пространственные границы, временную актуальность и различное влияние на состояние ИТСО. Такое отображение позволяет использовать факторы не только при прогнозе отказов, но и при построении безопасных и выполнимых маршрутов ТОиР [15, 16, 28].

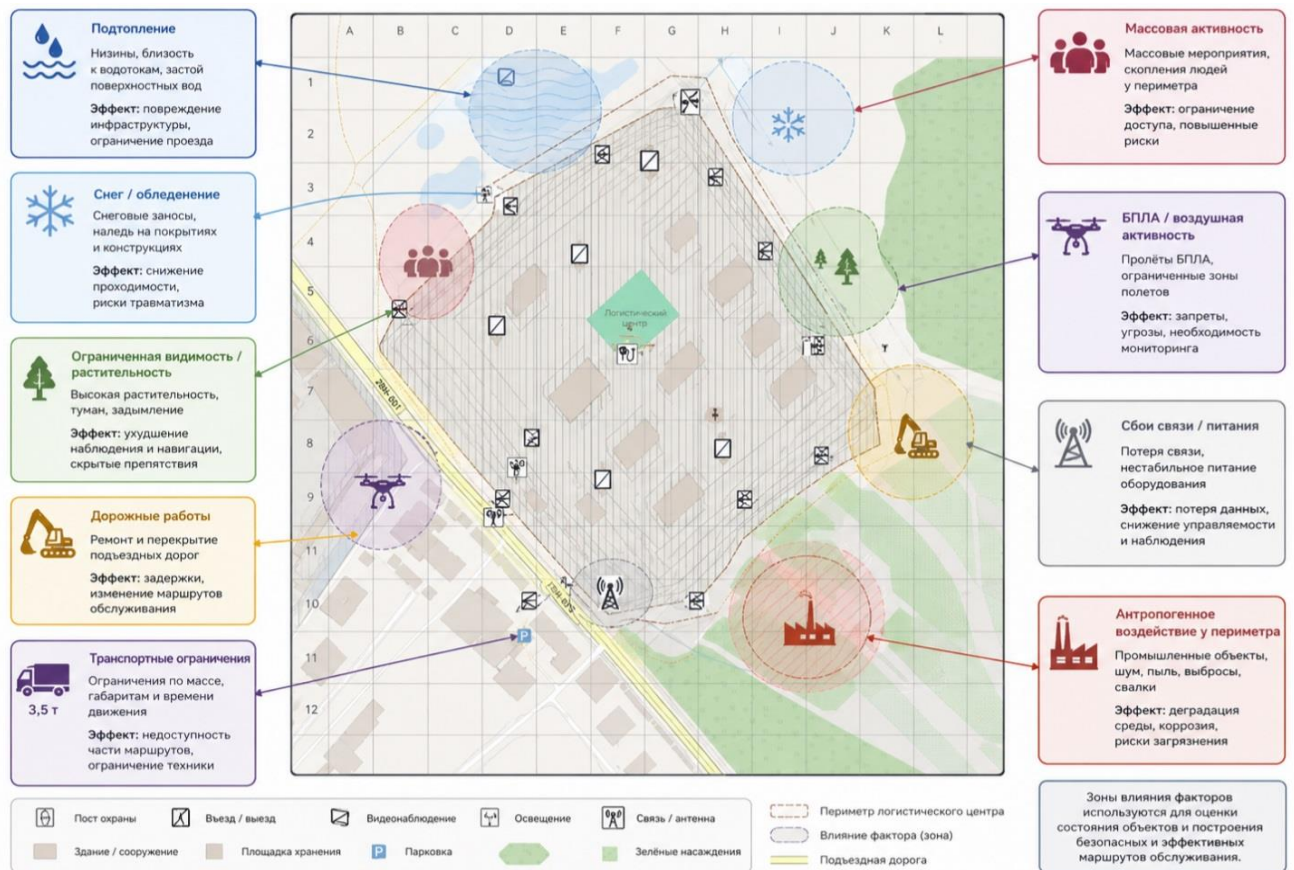


Рисунок 3.7 – Геоизображение факторов геосреды и ситуационно-тактической обстановки ЛЦ

4. Блок прогнозирования и анализа вероятностей ухудшения технического состояния и отказов. Осуществляет вычисление прогнозной интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ и прогноз вероятности перехода ТСО в отказное состояние. Используются модели на основе цепей Маркова и машинное обучение [142, 146, 52, 62, 117].

Пример пространственного представления местности ЛЦ с размеченными геообъектами ИТСО представлен на рисунке 3.8.

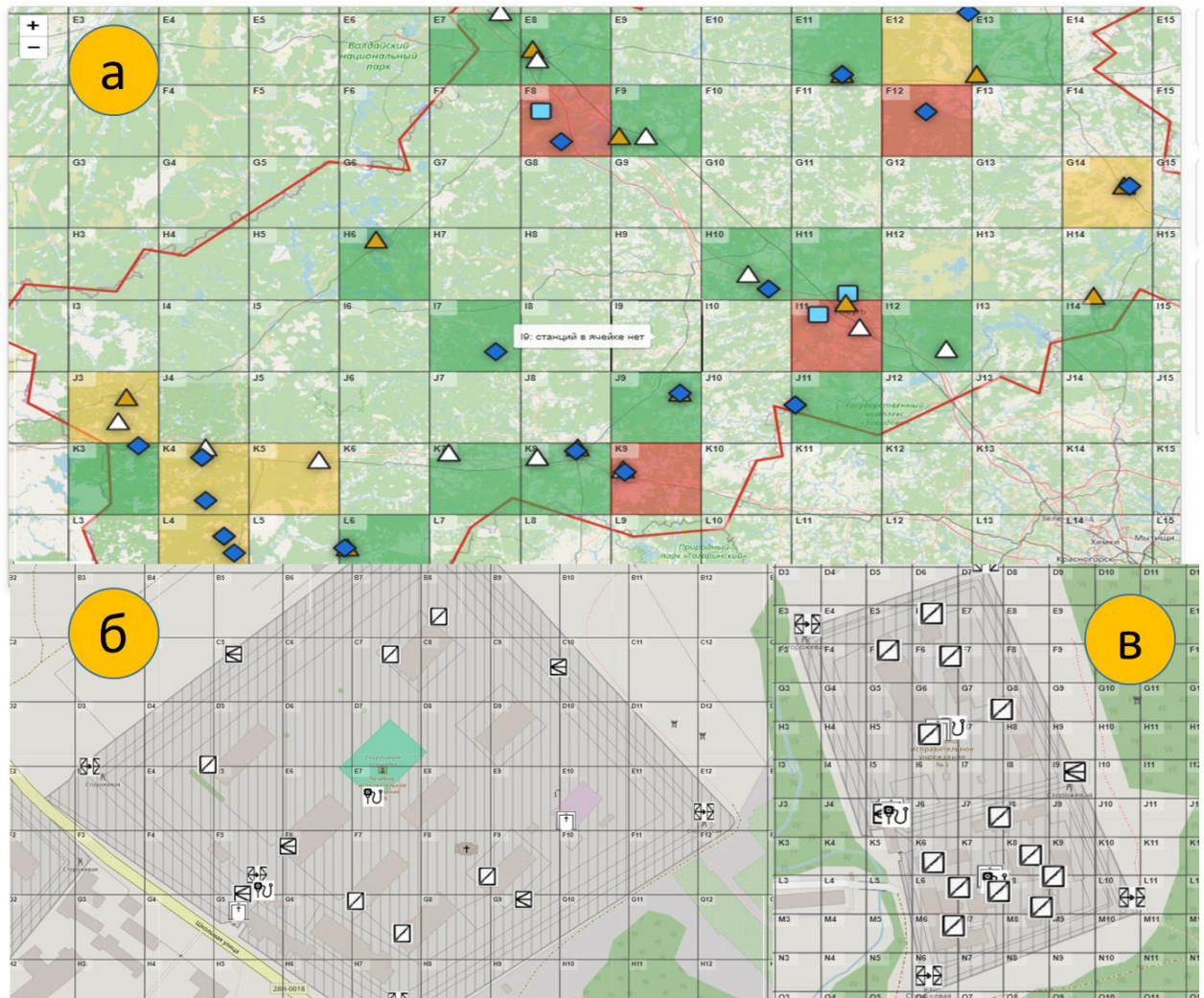


Рисунок 3.8 – Визуализация (геоизображение) результатов работы блока пространственного представления: а – региональная сеть логистических центров; б, в – отдельные логистические центры с сеткой разбиения и нанесенными геообъектами ИТСО

Результаты прогнозирования используются как вход в систему поддержки принятия решений, основа для управления техническим обслуживанием (адаптивное ТО), источник формализованных диагностических отчетов [150, 23, 55, 122].

5. Блок ситуационно–предиктивной диагностики. Реализует совмещение фактического и прогнозного состояния системы, идентификацию территориально значимых рисков, построение тепловых геоизображений угроз, формирование рейтингов уязвимых участков.

Данный раздел методики сочетает текущее состояние объектов, прогноз отказов, обстановку на смежных участках, факторы среды. Позволяет получить индекс уязвимости ячейки, вероятность критической деградации системы, рекомендации по перенастройке режимов или маршрутов патрулирования [31, 112, 118].

На локальном уровне ЛЦ расчет выполняется по цепочке: базовая подложка → сетка покрытия → текущая оценка ячеек → прогноз на горизонт $t + \Delta t$. Геообъекты ИТСО и инфраструктуры сохраняют собственные координаты и атрибуты, но расчетный результат агрегируется по ячейкам, что позволяет показать зоны нормального состояния, потенциальной проблемы и оперативного вмешательства (рис. 3.9).

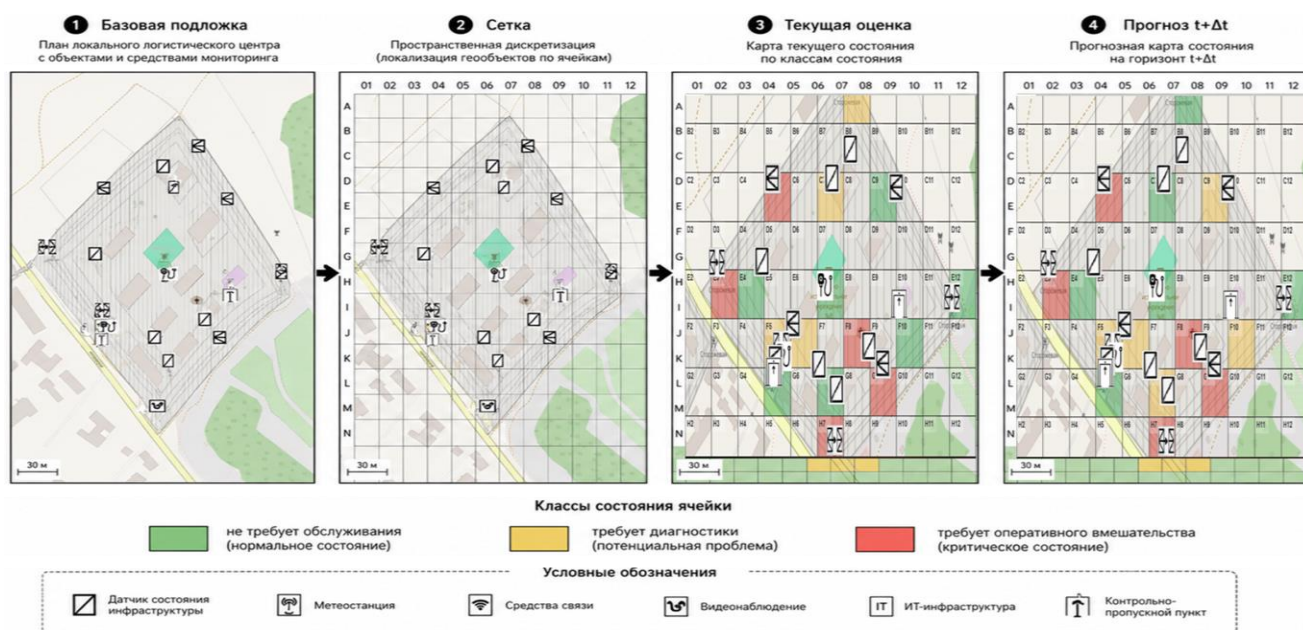


Рисунок 3.9 – Визуализация (геоизображение) оценки текущего и прогнозного состояния ЛЦ локального уровня: 1 - Базовая подложка; 2 – сетка разбиения; 3 – текущая оценка; 4 – прогнозная оценка

Локальная геовизуализация ЛЦ содержит не только состояние отдельных ИТСО, но и отражает динамику ухудшения по ячейкам покрытия. Данные этого уровня далее передаются на региональное активное геоизображение РСЛЦ для ранжирования ЛЦ и формирования пространственно-содержательных рекомендаций.

Результаты локальных расчетов по отдельным ЛЦ агрегируются на региональный уровень РСЛЦ: для каждого ЛЦ формируется сводная оценка состояния, перечень проблемных ячеек, уровень срочности контроля, состав требуемых мероприятий и ограничения доступности. После агрегации региональное геоизображение используется как вход для выбора управляющих воздействий, планирования ТОиР и маршрутизации бригад (рис. 3.10) [83, 112, 133].

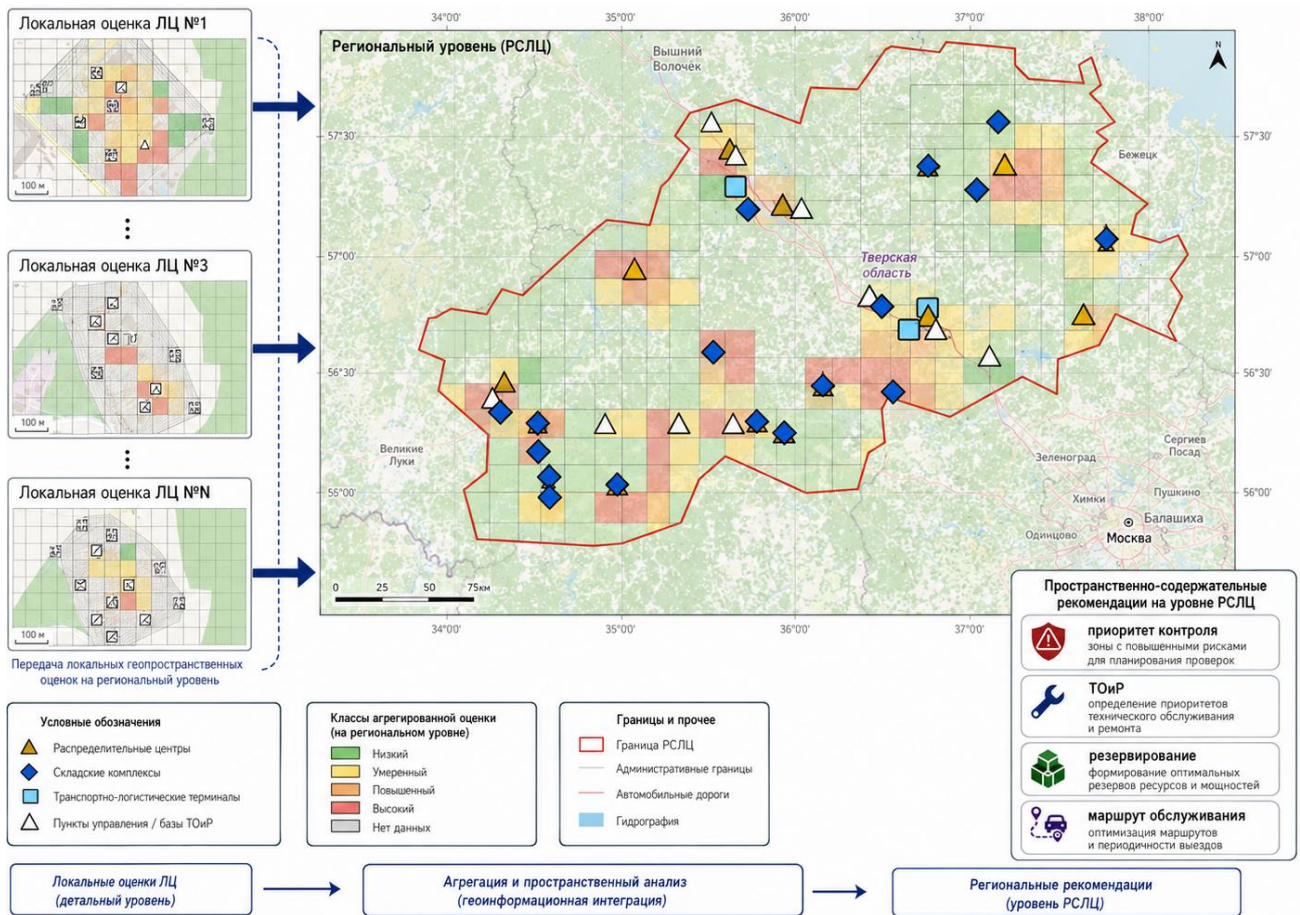


Рисунок 3.10 – Результат агрегирования локальных оценок ЛЦ и формирование пространственно-содержательных рекомендаций на уровне РСЛЦ

Схема подготовки геоданных для формирования пространственно-содержательных рекомендаций на рисунке 3.10 фиксирует связь локального и регионального уровней методики. Локальные геоизображения ЛЦ дают детальное состояние ИТСО и ячеек, а региональное для РСЛЦ формирует приоритеты контроля, ТОиР, резервирования и маршрута обслуживания.

6. Блок обратной связи и обновления модели. Предназначен для регулярной актуализации векторов признаков по мере поступления данных самодиагностики, внешней информации (метео, операторский ввод) и ретроспективной статистики.

Обеспечивает автоматическую подстройку моделей по мере поступления новых данных, повторное обучение ML-моделей, обновление весов признаков в зависимости от статистики последних периодов [142, 146, 23, 62].

Каждый блок взаимодействует с другими через стандартизированные форматы представления данных и общую систему координат, что обеспечивает комплексное использование пространственно–временной модели состояния СОММ.

3.2. Процедура сбора данных и наполнения геомодели

Процедура переводит разнородные данные об ОММ РСЛЦ в согласованное пространственно-атрибутивное представление. На вход поступают цифровые активные геоизображения, объектовые планы ЛЦ, сведения об ИТСО, журналы эксплуатации, события, данные геосенсоров, телеметрия связи и питания, материалы БПЛА и внешние тематические слои.

Блок включает получение данных, приведение к единой системе координат, нормализацию и контроль качества, импутацию пропусков, загрузку в ГИС/ИС и связывание с геообъектами. Последовательность соответствует ETL-контуре: *Extract* – извлечение данных; *Transform* – топологизация/детопологизация, очистка, нормирование, импутация; *Load* – запись в БД, ГИС-слои и реестры геообъектов [44, 93, 118].

3.2.1. Источники геоданных об обстановке

В методике источники структурируются по четырем группам факторов: природно–климатические, гидрогеологические, техногенные, криминогенно–организационные. Для каждой группы задаются: перечень первичных каналов, пространственно-временные характеристики, параметры контроля качества, правила загрузки в вектор среды и роль БПЛА как источника высокой детализации [1, 57, 75, 116, 137].

Источники представлены в таблице 3.1. В ней объединены как общие группы данных для наполнения геомодели, так и более конкретные источники, используемые при описании факторов геосреды.

Таблица 3.1 – Характеристики источников данных для наполнения геомодели ОММ РСЛЦ

Группа источников	Примеры данных	Пространственно-временная привязка	Роль в геомодели
Картографические и объектовые данные	топографическая подложка, план ЛЦ, границы, КПП, дороги, функциональные зоны, ведомственные схемы	регион, ЛЦ, зона, ячейка; обновление по мере изменения планировочной структуры	формирование координатно-картографической основы и пространственной структуры геомодели
Данные ИТСО и ГТРП	реестр датчиков, камер, контроллеров, связи, питания, секторы обзора, рубежи контроля	точка установки, сектор, рубеж, узел; обновление при изменении состава и конфигурации	параметризация технической подсистемы и привязка геообъектов к слоям наблюдения
Эксплуатационно-событийные данные	отказы, ложные срабатывания, ТОиР, потери связи, события доступа, телеметрия, журналы эксплуатации	объект ИТСО, зона ЛЦ, ячейка, маршрут; шаг от минутного до суточного	обновление текущего состояния, истории эксплуатации и расчет производных признаков
Природно-климатические источники	государственные и ведомственные метеосети, локальные метеостанции, погодные API, спутниковые продукты Sentinel, MODIS	ячейка, зона, буфер; временной шаг 10–60 мин и 1 сутки, пространственное разрешение после приведения к рабочей сетке	описание погодных и сезонных условий эксплуатации, формирование температурных, осадочных и ветровых признаков
Гидрогеологические источники	DEM/DSM, гидромоделей подтопления, карты почв и заболоченности, полевые замеры, данные БПЛА и лидара	ячейка, водосбор, зона ЛЦ; обновление статическое, сезонное или событийное	оценка влияния рельефа, поверхностных вод, подтопляемости и свойств поверхности на состояние ИТСО
Техногенные источники	кадастровые и ведомственные планы застройки, OpenStreetMap, SCADA, ЕМ-логгеры, акустико-вибрационные датчики	ячейка, буфер, линия, объект инфраструктуры; обновление по мере изменения обстановки	описание застройки, транспортной и инженерной инфраструктуры, помех, вибраций и ограничений видимости
Социально-режимные источники	журналы СКУД, тревоги, маршруты патрулирования, показатели среднего времени реакции, просрочки и простои	участок, зона, ячейка; шаг 15–60 мин, сутки, неделя	учет антропогенных воздействий, режимных особенностей и эксплуатационных ограничений
Аэромобильные данные	ортомозаики, фото- и видеосъемка БПЛА, тепловизионные снимки, облака точек, карты изменений	периметр, зона ЛЦ, проблемная ячейка; получение по событию или в плановом режиме	донаблюдение, уточнение картографических слоев и закрытие пространственно-временных лакун

После загрузки и пространственно-временного согласования данных каждый признак геомодели формируется из соответствующего тематического слоя, атрибутивной записи или эксплуатационного журнала. В общем виде процедура извлечения признака для i -го геообъекта может быть записана следующим образом:

$$z_{ij}(t) = \varphi_j(o_i, Att_i, L_j, t). \quad (3.2)$$

Здесь $z_{ij}(t)$ – j -й признак i -го геообъекта; φ_j – операция извлечения и агрегации признака; o_i и Att_i – пространственная и атрибутивная компоненты; L_j – тематический слой; t – момент или интервал времени. Выражение (3.2) используется для определения общего правила перехода от исходных слоев и записей к унифицированному набору признаков, далее применяемому в расчетах [104, 120, 139].

Если в исходных данных имеются пропуски, выполняется их восстановление с обязательной фиксацией способа импутации и флага качества. Для временных рядов применяются скользящее среднее, интерполяция и авторегрессионное восстановление; для пространственных слоев – ближайшие соседи, IDW, кригинг или агрегирование по зоне [142, 146]. Последовательность получения, проверки и подготовки данных для включения в геомодель приведена на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Этапы получения данных о факторах геосреды и о состоянии ТПС ОММ РСЛЦ

Она охватывает прием потоков из внешних источников, геопривязку, гармонизацию времени, контроль качества, формирование производных признаков и запись результатов в хранилище признаков с метаданными.

Представленный состав источников и операций подготовки данных обеспечивает согласованное наполнение гео модели ОММ РСЛЦ пространственными, атрибутивными и эксплуатационно-событийными признаками и создает основу для последующей оценки состояния, прогноза и картографического отображения результатов [33, 91, 112].

3.2.2. Аэромобильный мониторинг местности как перспективный источник ДЗЗ

Для охранного мониторинга местности региональной сети логистических центров стационарная геосенсорная территориально распределенная платформа не во всех ситуациях обеспечивает требуемую полноту пространственного наблюдения. Ограничения возникают при появлении временных складских площадок, локальных нарушениях покрытия, а также при необходимости внеочередной проверки участков с повышенной вероятностью неблагоприятного состояния. В этих условиях целесообразно использовать аэромобильное донаблюдение как внешний источник оперативных пространственно привязанных данных [147, 1, 98].

В составе ОММ РСЛЦ аэромобильное средство рассматривается как мобильный геосенсорный контур, временно дополняющий ГТРП на отдельных участках территории. Его функция состоит в получении актуальных данных о состоянии территории с последующей загрузкой результатов в гео модель обстановки.

Эффективным представляется совместное применение аэромобильного и наземного мониторингов для компенсации недостатков используемых по отдельности мобильных и стационарных систем (ограниченность и статичность рабочей зоны,

сложность наращивания линейки сенсоров у наземных систем; ограниченность времени работы отдельного БПЛА, метеограничения, ограничения по дальности и скорости передачи данных – у аэромобильных систем).

Типовой состав (рис. 3.12) аэромобильного мониторинга местности (АММ) содержит следующие компоненты.

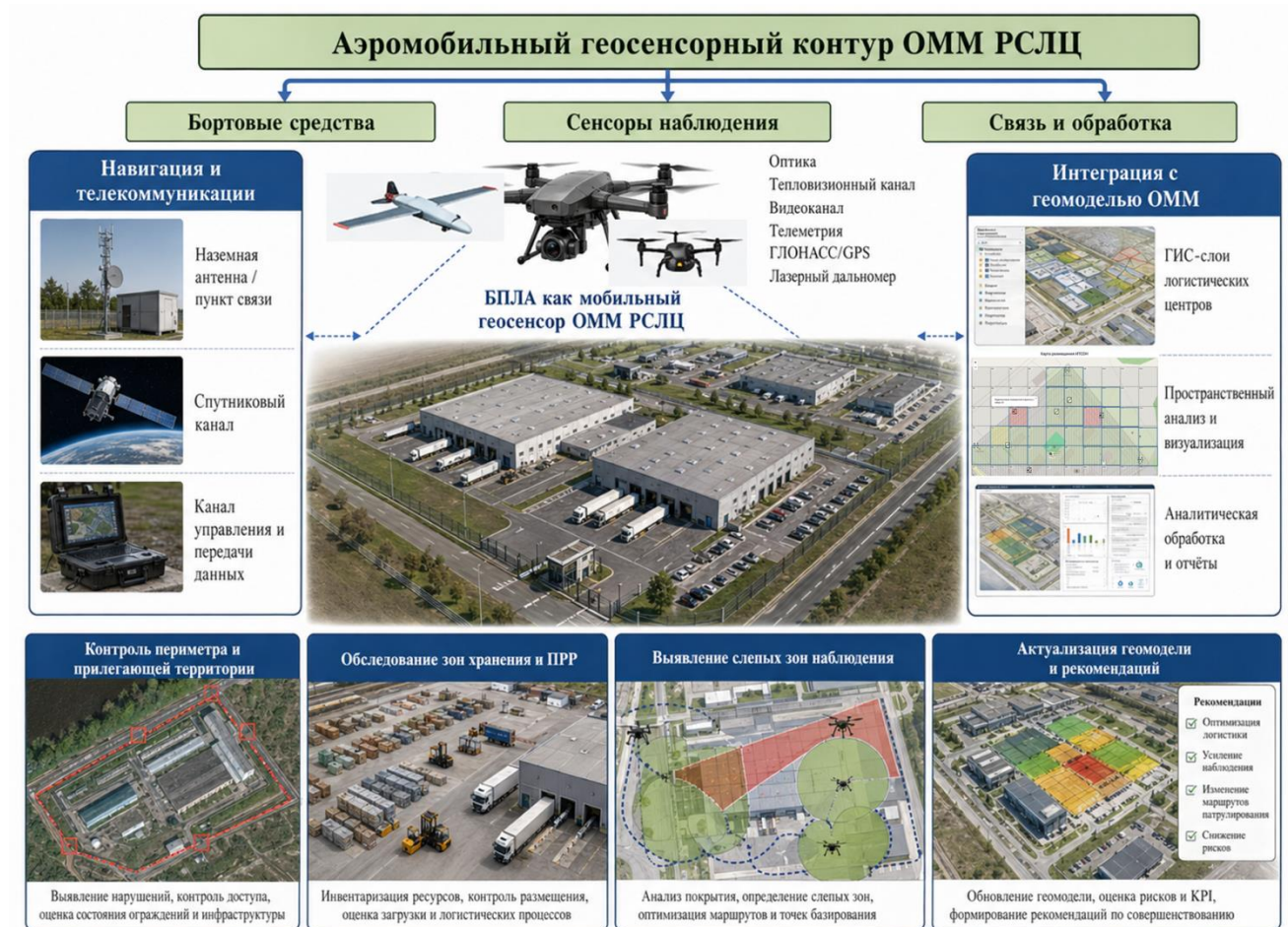


Рисунок 3.12. – Состав, структура и базовые задачи АММ

При формировании задания на аэромобильное донаблюдение в геодезию ОММ РСЛЦ включаются физико–географические условия территории ФГУ и оперативно–географические условия функционирования ОГУ: рельеф, застройка, растительность, гидрологические элементы, транспортная доступность, конфигурация периметра, режимные зоны, маршруты обслуживания и локальные ограничения применения БПЛА [10, 75, 89].

На рисунке 3.13 показано место аэромобильного контура в общей логике методики: данные БПЛА поступают не напрямую в контур рекомендаций, а через процедуры геопривязки, обновления геодезии и расчета оценочных слоев. Для

аэромобильного мониторинга местности объектов РСЛЦ целесообразно применять легкие БПЛА промышленного класса [147].



Рисунок 3.13. – Структура информационно–программного комплекса АММ

В таблице 3.2 приведены типовые характеристики летательных аппаратов, способных обеспечить необходимые функциональные возможности для наблюдения.

Таблица 3.2 – Пример параметров БПЛА, пригодного для задач ОММ РСЛЦ

Параметр	Иллюстративное значение
Платформа	много–роторный БПЛА промышленного класса
Максимальное время полета	до 55 мин
Полезная нагрузка	до 2,7 кг
Степень защиты	IP55
Рабочая температура	от –20 до +40 °С
Позиционирование	GNSS + RTK
Целевой состав нагрузки	оптическая камера, тепловизор, лазерный дальномер
Назначение в методике	донаблюдение периметра, верификация событий, уточнение слоев риска

После привязки данных к зонам и ячейкам покрытия результаты донаблюдения используются для уточнения текущего состояния геообъектов ГТРП, коррекции оценок покрытия и связности, повышения достоверности классификации состояния в проблемных зонах, актуализации факторных и событийных признаков, применяемых в прогнозной модели, и формирования пространственно-содержательных рекомендаций по контролю, ТОиР, резервированию и изменению периодичности наблюдения [15].

Применение аэромобильного донаблюдения имеет ограничения. К ним относятся зависимость от метеоусловий, ограниченная длительность вылета, необходимость регламента безопасного применения, а также эпизодический характер сбора данных по сравнению с постоянным стационарным наблюдением. Поэтому аэромобильный контур не заменяет ГТРП, а используется как средство оперативного пространственного уточнения геомодели в наиболее значимых зонах РСЛЦ.

3.3. Процедура отбора наиболее значимых параметров геомодели обстановки в ОММ РСЛЦ

Полный состав геомодели ОММ РСЛЦ включает большое число параметрических признаков, относящихся к разным компонентам: параметрам территориально-сетевой организации $\vec{F}$, киберфизической геосенсорной платформы $\vec{K}$, окружающей среды $\vec{G}$, локального размещения ИТСО $\vec{L}$, технического состояния $\vec{C}$, антропогенных воздействий $\vec{A}$, эксплуатационно-событийной истории $\vec{E}$ и ситуационно-тактической обстановки $\vec{T}$ [33, 91, 139].

Для конкретной системы ОММ РСЛЦ полный набор признаков может оказаться избыточным и повлиять на быстродействие системы при построении программной реализации. Часть параметров может быть постоянной для рассматриваемой территории, слабо связанной с техническим состоянием ИТСО, взаимно дублирующей другие признаки. При этом общая структура значимых факторов сохраняется, но их вклад для разных ЛЦ, типов ИТСО, зон размещения и условий эксплуатации может различаться [140, 142, 146]. Перед построением оценки состояния

и прогноза требуется выполнить дополнительный анализ и выделить те параметры компонентных векторов, которые имеют наибольшую связь с ухудшением состояния, отказами, потерями связи, ложными срабатываниями, временем восстановления и приоритетом ТОиР.

Результатом процедуры является согласованный набор входных признаков $Z_i(t)$, используемый в расчетах текущего состояния, геодезической интенсивности отказов, прогноза и последующего ранжирования объектов контроля и ТОиР:

$$Z_i(t) = [z_i^F(t), z_i^K(t), z_i^G(t), z_i^L(t), z_i^C(t), z_i^A(t), z_i^E(t), z_i^T(t), z_i^S(t)] \quad (3.3)$$

В выражении (3.3) $z_i^F(t)$ задает признаки территориально-сетевой организации РСЛЦ; $z_i^K(t)$ – признаки киберфизической геосенсорной платформы; $z_i^G(t)$ – признаки геосреды; $z_i^L(t)$ – параметры локального размещения ИТСО; $z_i^C(t)$ – показатели текущего технического состояния; $z_i^A(t)$ – антропогенные воздействия; $z_i^E(t)$ – эксплуатационно-событийные признаки; $z_i^T(t)$ – параметры контроллинговой обстановки; $z_i^S(t)$ – параметры ситуационно-тактической обстановки. Таким образом, вектор $Z_i(t)$ представляет не отдельный показатель, а согласованное объединение признаков из разных компонент геодезической модели, приведенных к единой пространственно-временной привязке для конкретного геообъекта i [15, 41].

Отбор признаков для формирования вектора $Z_i(t)$ выполняется по совокупности критериев, обеспечивающих одновременно статистическую значимость, территориальную интерпретируемость и управленческую применимость параметров. Основные критерии отбора приведены в таблице 3.3 [146, 147, 108, 110].

Таблица 3.3 – Характеристики критериев отбора наиболее значимых параметров геодезической модели

Критерий	Содержание	Применение	Результат
Связь с целевым показателем	статистическая связь с отказами, деградацией, ложными срабатываниями, MTTR, готовностью	геосреда, состояние ИТСО, события	сохранение признаков с выраженной связью
Пространственная выраженность	наличие устойчивой территориальной структуры распределения, например по индексу Морана	геосреда, доступность, антропогенные и ситуационные слои	исключение признаков без территориальной интерпретации
Недублирование	проверка мультиколлинеарности и удаление взаимозаменяемых признаков	все компонентные векторы	сокращение размерности

Критерий	Содержание	Применение	Результат
Инженерная интерпретируемость	понятный механизм влияния на ИТСО, связь, питание, доступность или события	все признаки	сохранение объяснимых параметров
Доступность и качество данных	полнота, частота обновления, достоверность источника, возможность импутации	поточковые и архивные данные	признак используется с коэффициентом доверия или исключается
Управленческая применимость	возможность связать признак с действием: контроль, ТОиР, резервирование, маршрут	состояние, события, доступность, тактические слои	признак влияет на активное геоизображение, реестр или рекомендацию

3.3.1. Процедура отбора наиболее значимых параметров компонентов геомодели

Первичной процедурой является отбор наиболее значимых геофакторов по их связи с целевыми показателями функционирования системы: интенсивностью отказов, частотой ложных срабатываний, коэффициентом готовности, временем восстановления и влиянием на продолжительность технического обслуживания [23, 39, 56].

Количественный отбор выполняется по совокупности следующих критериев:

1. Оценка связи каждого фактора g_k с целевым показателем состояния y по коэффициенту корреляции [52, 54, 59]:

$$r_k = \text{corr}(g_k, y). \quad (3.4)$$

2. Проверка пространственной выраженности фактора с использованием индекса пространственной автокорреляции Морана, показывающего наличие устойчивой территориальной структуры распределения значений [108, 110]:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.5)$$

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 [142, 146]:

$$VIF_k = \frac{1}{1 - R_k^2}, \quad (3.6)$$

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

После отбора значимых факторов выполняется процедура их подготовки к использованию в расчетах. Определяется шаг Δt , который выбирается исходя из динамики наиболее изменчивых факторов и частоты поступления телеметрии ИТСО. Значения нормируются по единой шкале, неполнота данных компенсируется методами импутации, по каждому объекту или ячейке формируется итоговый вектор факторов геосреды и загружаются в общую БД [44]. Значения используются при расчете интегральной оценки влияния геосреды для отдельной ячейки ω_i :

$$G_{\omega_i}(t) = \sum_{k=1}^m w_k g_{ki}(t), \quad (3.7)$$

где $g_{ki}(t)$ – нормированное значение k – го фактора, w_k – вес его вклада.

Последовательность отбора наиболее значимых факторов продемонстрирована на рисунке 3.14



Рисунок 3.14 – Структура процедуры определения наиболее значимых факторов геосреды, используемых в методике оценки состояния COMM

Разработанная процедура реализует системный подход к оценке факторов геосреды, позволяющий количественно учитывать и прогнозировать их воздействие на элементы охранной инфраструктуры [1, 57, 75].

3.4. Процедура оценки текущего состояния и построения прогноза

Процедура оценки текущего состояния и построения прогноза связывает гео-модель ОММ РСЛЩ с последующим выбором управляющих воздействий [31, 112]. Расчет выполняется для геообъектов ГТРП, функциональных зон логистических центров и ячеек покрытия. Выходом процедуры являются текущая оценка состояния, прогноз ухудшения на заданный горизонт, геоизображения пространственной локализации неблагоприятных участков и перечень объектов приоритетного контроля.

Исходными данными служат пространственное положение объектов, параметры размещения ИТСО, диагностические и эксплуатационно-событийные данные, сведения о геосреде, антропогенных воздействиях, связности и доступности, а также признаки текущей ситуационно-тактической обстановки. После согласования по времени и пространству эти данные используются для расчета текущего состояния и прогноза по каждому объекту и по каждой ячейке покрытия [15, 23, 43].

3.4.1. Подготовка признаков и уточнение параметров прогноза

После формирования гео модели для каждого геообъекта, зоны ЛЩ или ячейки покрытия подготавливается согласованный набор признаков. Он извлекается из компонент гео модели и включает территориально-сетевую организацию РСЛЩ, локальное размещение ИТСО, текущее техническое состояние, характеристики геосреды, расчетно-прогностические параметры, антропогенные воздействия, эксплуатационно-событийные данные, признаки связности и обеспечивающей инфраструктуры, ситуационно-тактическую обстановку и контроллинговые признаки [33, 84, 91].

Пространственные параметры связываются с ячейкой покрытия и зоной ЛЩ, временные параметры синхронизируются по выбранному шагу, а диагностические и событийные данные проходят контроль полноты и сопоставимости [99, 100].

Для уточнения параметров прогноза могут использоваться три группы методов. Первая группа включает пороговые и статистические процедуры, применяемые при небольшом объеме архивов и при необходимости сохранить простую ин-

терпретацию результата [52, 54, 92, 134]. Вторая группа включает марковские модели, позволяющие учитывать переходы между техническими состояниями и различать деградационные и восстановительные процессы [47, 54, 117]. Третья группа включает методы машинного обучения, которые используются не вместо геомодели, а для уточнения прогнозных параметров по накопленным данным эксплуатации и факторным признакам территории [141, 142, 146].

Выбор конкретного метода определяется полнотой архивов отказов, длительностью временного ряда, наблюдаемостью состояния и требуемой интерпретируемостью результата. Переход от параметров геомодели к оценке состояния и прогнозу по ячейке покрытия показан на рисунке 3.15.

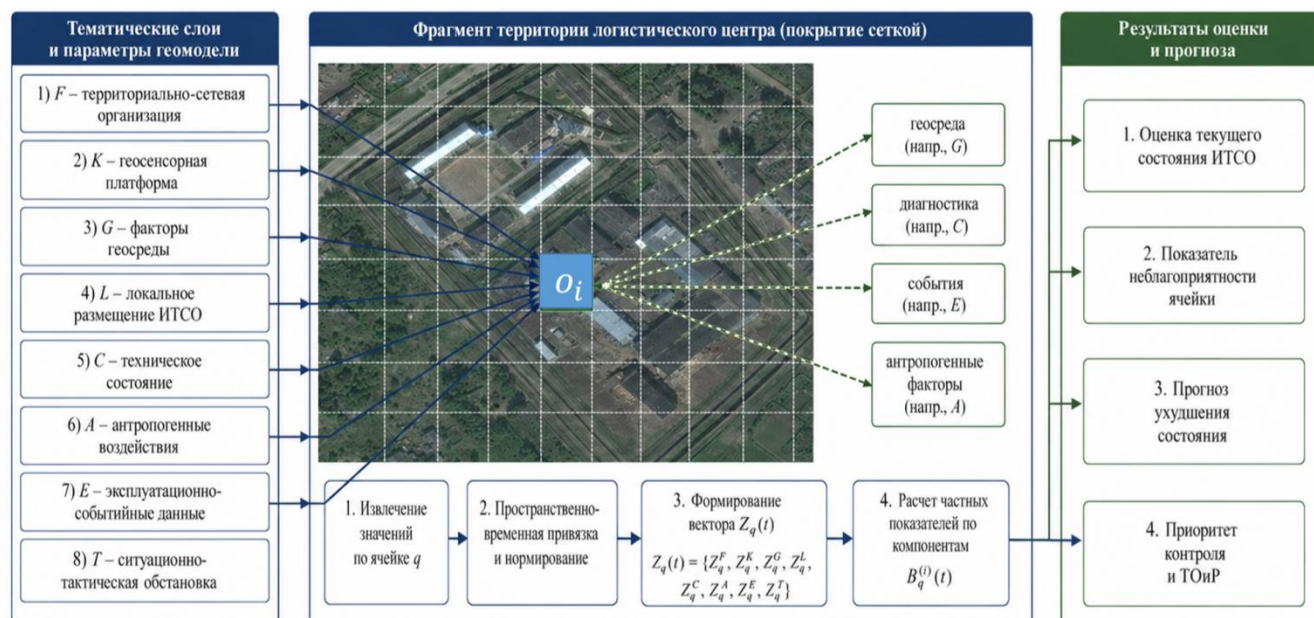


Рисунок 3.15 – Этапы перехода от параметров геомодели к оценке состояния и прогнозу по ячейке покрытия

На схеме показано, что для выбранной ячейки покрытия одновременно учитываются технические, эксплуатационно-событийные, территориальные и ситуационные признаки. После пространственной привязки и предварительной обработки они используются для выбора модели оценки, расчета текущего состояния, прогноза ухудшения и подготовки данных для картографического отображения и последующего геоконтроллинга [31, 41, 110].

3.4.2. Прогнозирование технических состояний геообъектов ГТРП ОММ РСЛЦ с выбором модели состояния

Прогнозирование состояния выполняется после расчета текущей оценки и подготовки признаков описания объектов. На этом этапе ключевой задачей является не выбор абстрактного алгоритма, а выбор модели состояния, которая соответствует фактической наблюдаемости объекта, полноте данных, режиму обслуживания и характеру управляющего воздействия.

Сводные условия выбора модели приведены в таблице 3.4. Таблица используется как прикладное правило выбора состояния для конкретного типа ЛЦ, конфигурации ИТСО и режима эксплуатации без повторного вывода математических зависимостей раздела 2 [92, 117].

Таблица 3.4 – Правила выбора модели прогнозирования состояния геообъекта ГТРП

Правила применения	Модель состояния	Основной параметр прогноза	Выход для ГИС-слоя
Минимум данных; объект без резервирования; восстановление учитывается после отказа	Непрерывная цепь Маркова без резервирования	$\lambda_i(t), \mu_1, \mu_2$	нижняя граница готовности, опорная вероятность отказа и готовности
Состояние наблюдаемо; восстановление можно задавать управлением	Модель с управляемым восстановлением	$u_i(t), a_{12}, a_{21}(t)$	эффект восстановления и приоритет ТОиР
Есть периодический контроль, данные ТОиР и геофакторы	Модель с периодическим контролем и оптимальным управлением надежностью	$\lambda_i(t), t_{TO}, \tau_{TO}, u_i(t)$	слой прогнозного ухудшения и оптимальные интервалы контроля
Состояние не наблюдается напрямую; признаки неполные или противоречивые	Скрытая Марковская модель	$P(S^0 Y), P(S^1 Y), P(S_2 Y), A_i, B_i$	слои вероятной деградации и скрытого отказа

Если состояние геообъекта наблюдаемо, а восстановление может задаваться управляемой интенсивностью $u_i(t)$, применяется модель с управляемым восстановлением. В ней переход в отказ определяется интенсивностью $\lambda_i(t)$, а возврат в работоспособное состояние зависит от управляющего воздействия: частоты ТОиР, доступности ремонтных ресурсов, приоритета участка, маршрутов обслуживания и ограничений эксплуатации [3, 8, 105, 106].

Если для объекта задан периодический контроль, имеются данные о ТОиР, геофакторах и эксплуатационной истории, используется модель с периодическим контролем и оптимальным управлением надежностью. Она учитывает влияние интервала технического обслуживания, адаптацию управляющего воздействия с применением интеллектуальных методов. В этой модели геоинтенсивность $\lambda_i(t)$ становится основным связующим параметром между геомоделью, факторными слоями территории и прогнозом технического состояния.

Если фактическое состояние геообъекта не наблюдается напрямую, диагностические признаки противоречивы или имеются признаки скрытой деградации, используется скрытая Марковская модель. В ней истинное состояние $X_i(t)$ рассматривается как скрытая переменная, а доступными являются наблюдения $Y_i(t)$. Выходом является апостериорное распределение вероятностей.

Это распределение используется как вероятностная оценка фактического состояния геообъекта и как вход для прогнозирования риска деградации или скрытого отказа [142, 23]. Параметры скрытой Марковской модели уточняются по накопленным журналам эксплуатации, самодиагностики и событий. При отсутствии полной разметки фактических состояний применяется алгоритм Баума-Велша: оцениваются вероятности скрытых состояний и переходов, пересчитываются параметры переходов и эмиссий. Полученные параметры используются для построения слоев вероятной деградации, скрытых отказов и приоритетного контроля. Для марковских моделей вычисляются вероятности состояний:

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) \exp(Q_i(t) \Delta t), \quad (3.8)$$

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; Δt – горизонт прогноза. Для скрытой Марковской модели прогноз строится от апостериорного распределения $\alpha_i(t)$:

$$\alpha_i(t + h) = \alpha_i(t) A_i^h, \quad (3.9)$$

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

На рисунке 3.16 представлена процедура прогнозирования технических состояний геообъектов ОММ РСЛЦ, включающая выбор модели состояния, расчет прогноза на горизонт Δt и пространственную агрегацию результатов.

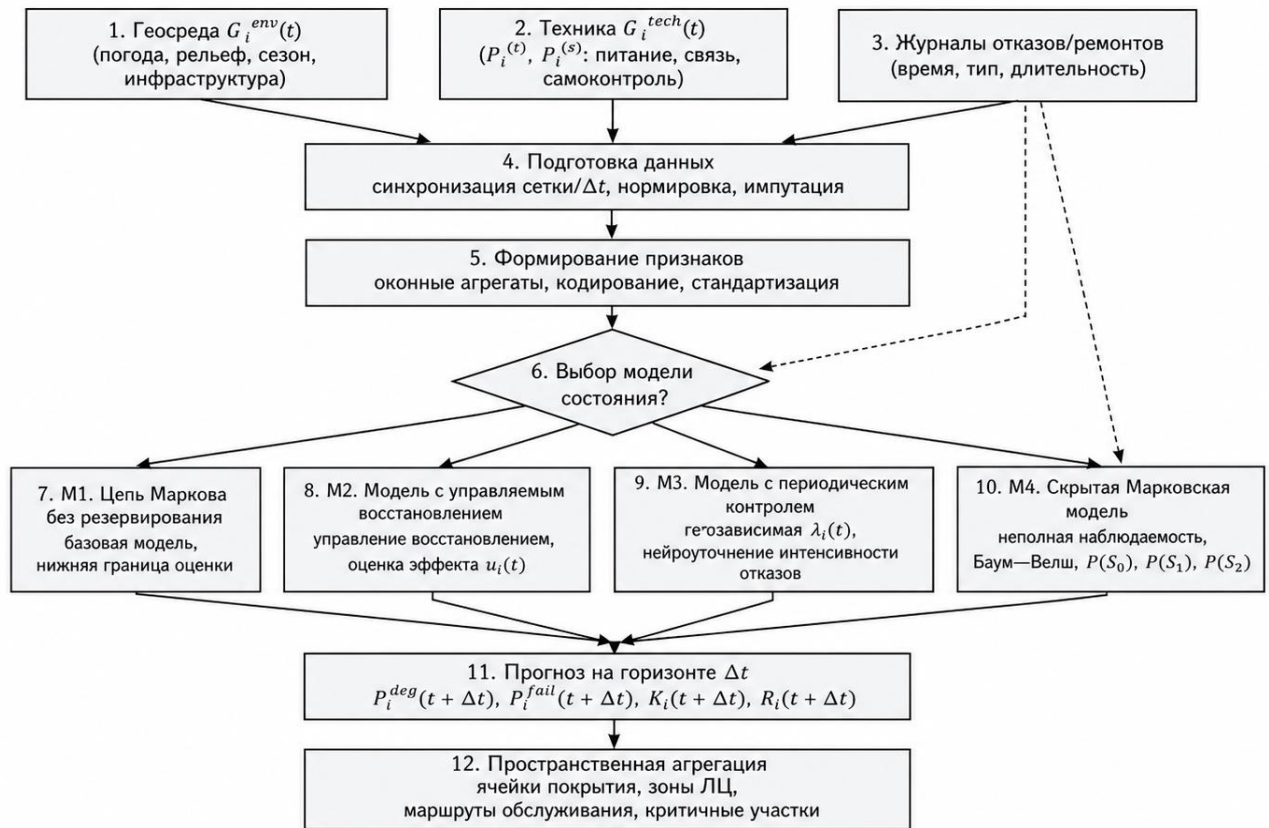


Рисунок 3.16 – Структура алгоритма выбора модели прогнозирования технического состояния геообъектов ГТРП ОММ РСЛЦ

Выбор модели состояния определяет в том числе состав выходных данных для геоинформационного слоя. Базовая модель формирует опорную вероятность отказа и готовности. Модель с управляемым восстановлением показывает ожидаемый эффект оперативного вмешательства. Модель с периодическим контролем позволяет корректировать интервалы контроля и обслуживания. Скрытая Марковская модель используется для выделения геообъектов, по которым вероятна неявная деградация и требуется дополнительная диагностика [40].

Методы машинного обучения в данной процедуре используются как вспомогательный инструмент. Они позволяют уточнять вероятности неблагоприятных состояний, вес отдельных признаков или класс текущего состояния, но не подменяют модель состояния и не заменяют пространственно-содержательное представление геообъекта, заданное геомоделью.

Выходами процедуры являются: прогнозная вероятность деградации или отказа по каждому геообъекту, оценка готовности, слой прогнозного ухудшения, геоизображение риска по ячейкам покрытия, перечень приоритетных геообъектов и входные данные для формирования пространственно–содержательных рекомендаций по контролю, ТОиР, восстановлению, резервированию наблюдения и корректировке маршрутов обслуживания.

После расчета объектных оценок результаты агрегируются по ячейкам покрытия. Такой переход необходим, поскольку решение о контроле и ТОиР принимается не только по отдельному устройству, но и по пространственному участку, на котором одновременно действуют несколько ИТСО, факторные ограничения геосреды, особенности доступа и функциональная значимость зоны ЛЦ [33, 90].

Результатом процедуры являются геоизображения текущего состояния по ячейкам покрытия, прогнозного ухудшения на горизонт Δt , ранжированный перечень проблемных ячеек и объектов, а также исходные данные для последующей выработки пространственно-содержательных рекомендаций. Если данные по ячейке неполны или противоречивы, оценка не улучшается автоматически: для нее сохраняется консервативный класс, требующий дополнительной проверки.

3.4.3. Категоризация состояния на геоизображении

Данный этап позволяет построить представление поклеточной оценки $S_i(t)$ и прогнозных характеристик отказов на подложке охраняемой территории в виде геоизображения риска, пригодной для оперативного использования и отчетности [44, 57, 109]. Базовое правило присвоения категории угрозы задается двумя порогами $\tau_1 < \tau_2$, согласованными с режимом эксплуатации (сезон/зона). Для ячейки o_i определяется класс:

$$c_i(t) = \begin{cases} \text{низкая вероятность, } S_i(t) \leq \tau_1, \\ \text{средняя вероятность, } \tau_1 < S_i(t) \leq \tau_2, \\ \text{высокая вероятность, } S_i(t) > \tau_2, \end{cases} \quad (3.10)$$

который отображается в стандартной легенде «зеленый/желтый/красный». При необходимости используется уточняющее правило с учетом вероятности отказа

$p_i(t; \Delta t)$: при $S_i(t)$ в окрестности порога класс повышается, если $p_i(t; \Delta t)$ превышает пороговое значение.

Пороговые значения могут задаваться двумя способами: фиксированно или адаптивно. В фиксированном варианте значения τ_1 и τ_2 устанавливаются заранее для выбранного режима эксплуатации. Такой способ удобен при устойчивых условиях наблюдения и при необходимости сопоставления результатов за разные периоды. В адаптивном варианте пороги определяются отдельно для зоны контроля z и сезона s по распределению показателя S :

$$\tau_1(z, s) = Q_{q_1}(S | z, s), \tau_2(z, s) = Q_{q_2}(S | z, s), \quad (3.11)$$

где Q_{q_1}, Q_{q_2} – выбранные квантили, причем $0 < q_1 < q_2 < 1$.

Для практического применения целесообразно использовать комбинированный вариант. Исходные пороги задаются экспертно, после чего уточняются по архиву событий и при необходимости корректируются. На рисунке 3.17 представлен порядок категоризации ячеек покрытия: от исходных поклеточных оценок и задания порогов до формирования геоизображения категорий угрозы и выделения приоритетных участков.

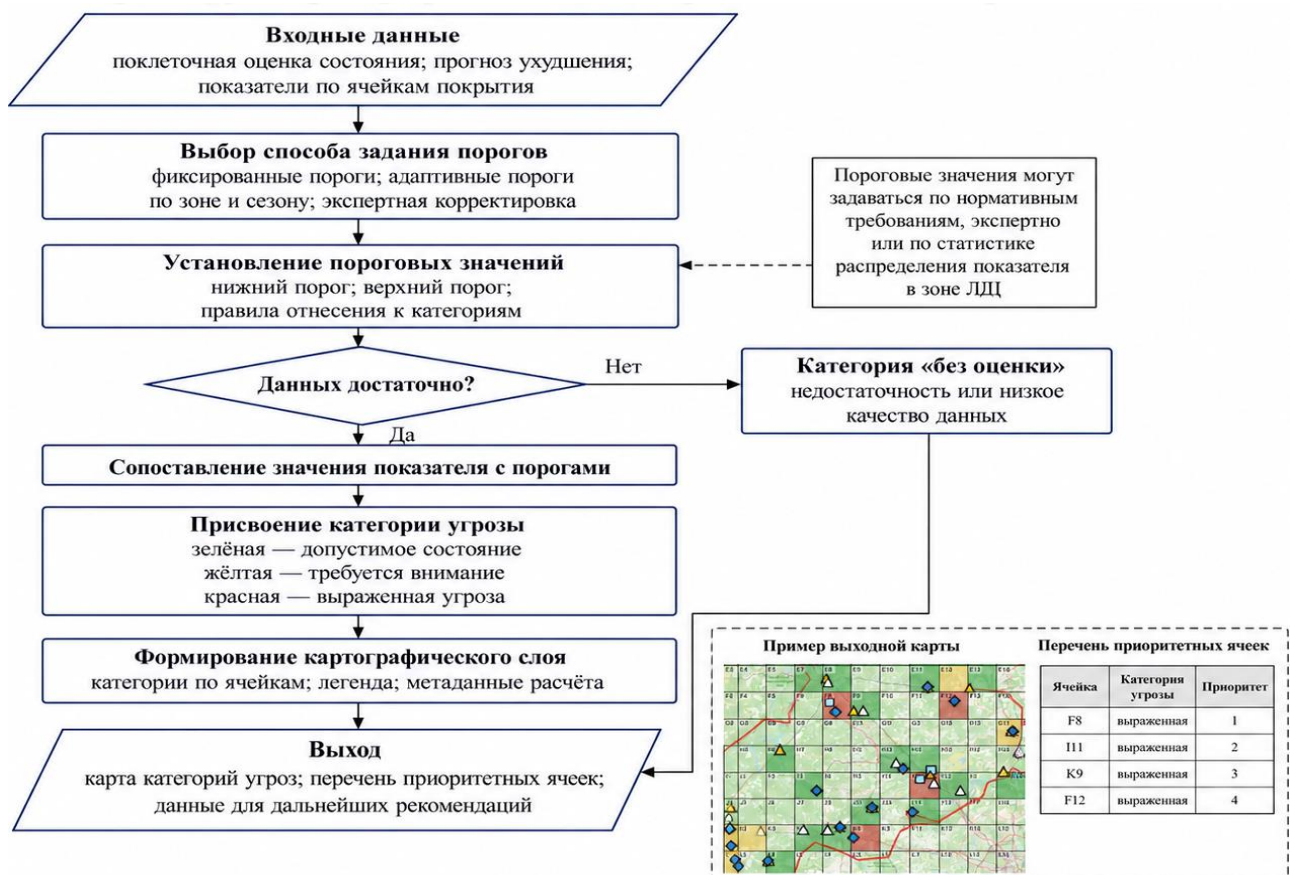


Рисунок 3.17 – Структура алгоритма категоризации ячеек

Качество входных данных учитывается через коэффициент доверия $\tau_i(t)$. Для $\tau_i(t) < \tau_{\min}$ ячейке присваивается специальная категория «без оценки» (нейтральная заливка); такие ячейки исключаются из агрегирования по зонам и не используются при подсчете долей классов.

Результатом является набор картографических слоев: категориальный слой $C(t) = \{c_i(t)\}$ с легендой и указанием τ_1, τ_2 ; слой прогнозной вероятности $p_i(t; \Delta t)$. Метаданные включают дату/интервал расчета, сезон/зону, схему задания порогов (фиксированная/квантильная). Такое представление завершает процедуру обобщенной поклеточной оценки: факторы геосреды и технической подсистемы сведены в единый индикатор и отображены в картографической форме.

3.5. Процедура иерархической выработки управляющих воздействий

Процедура предназначена для выбора допустимого управляющего воздействия по результатам оценки и прогноза. Объектом выбора является действие, назначаемое для геообъекта ГТРП, функциональной зоны ЛЦ или ячейки покрытия: диагностика, профилактическое ТО, ремонт, замена, резервирование или воздействие на подсистемы связи и питания [148, 20, 121].

Для осуществления выбора управленческого воздействия в контуре геоинформационной поддержки ОММ РСЛЦ используется иерархический подход [119, 120, 125, 129, 130]. Он задает цель выбора, систему критериев и множество допустимых альтернатив, связывая результаты ситуационно–предиктивной оценки состояния ГТРП с решением по диагностике, ТОиР, резервированию или восстановлению наблюдательного покрытия. Объектом выбора является управленческое воздействие, назначаемое для конкретного геообъекта ГТРП, функциональной зоны или ячейки покрытия.

Верхний уровень иерархии соответствует выбору предпочтительного воздействия для геообъекта управления в составе ГТРП. Под таким геообъектом понимается геосенсор, контроллер, канал связи, узел электропитания, КПП, участок периметра либо локальная группа объектов, состояние которых влияет на полноту

наблюдения, связность сенсорной сети и функциональную целостность ОММ РСЛЦ.

Для геообъекта G_{obj_i} по результатам территориально-предиктивной оценки формируется множество допустимых воздействий A_i . Состав множества A_i зависит от вида оборудования, текущего технического состояния, режима эксплуатации и допустимых регламентных действий. Для типовой постановки задачи территориального управления технической готовностью технической подсистемы ОММ РСЛЦ целесообразно рассматривать следующий базовый набор альтернатив (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Перечень регулирующих процедур поддержания технической готовности

Обозначение	Процедура	Содержание действия
A_1	Усиленный мониторинг	Сохранение объекта в текущем режиме эксплуатации с повышением частоты наблюдения, диагностического контроля.
A_2	Внеочередная диагностика	Назначение локальной или удаленной диагностики для уточнения причины ухудшения состояния и структуры отказа.
A_3	Профилактическое ТО	Проведение профилактического обслуживания.
A_4	Выездной ремонт	Организация восстановительных работ с выездом бригады в логистический центр.
A_5	Замена критического модуля	Целенаправленная замена наиболее уязвимого или деградировавшего элемента оборудования.
A_6	Резервирование и перераспределение функций	Временное перераспределение нагрузки или перевод наблюдения на соседние узлы технической подсистемы ОММ при наличии резервной конфигурации.
A_7	Первоочередное обслуживание подсистем обеспечения	Воздействие на связь, синхронизацию, электропитание или иные сопряженные средства, если именно они формируют основной риск ухудшения готовности узла.

Второй уровень иерархии образует система критериев, по которым сопоставляются управляющие воздействия (альтернативы). Система критериев должна отражать не только техническое состояние объекта, но и его территориальное положение, доступность обслуживания и ограничения по ресурсам [123, 147]. Для ГТРП ОММ выделены пять укрупненных групп критериев (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Характеристики групп критериев для сопоставления управляющих воздействий

Обозначение	Наименование группы критериев	Состав и интерпретация
K_1	Техническая критичность	Прогнозная вероятность перехода в неблагоприятное состояние, ожидаемое снижение готовности, наличие признаков отказа.
K_2	Пространственно-функциональная значимость	Роль геообъекта в наблюдении периметра, КПП, зоны хранения, участка погрузки–разгрузки или прилегающей территории; вклад в покрытие; наличие резервирования соседними геосенсорами; влияние на функциональную и пространственно–структурную целостность ОММ РСЛЦ.

K_3	Территориальная сложность обслуживания	Удаленность, транспортная доступность, маршрутная сложность, влияние погодных и прибрежных условий на возможность выполнения выездных работ.
K_4	Инфраструктурная уязвимость	Состояние связи, электропитания, зависимость объекта от внешней инфраструктуры, чувствительность к геофакторам.
K_5	Ресурсно-организационная целесообразность	Трудоемкость, стоимость, потребность в инструментах, запасных частях и специалистах, допустимость вмешательства в текущем эксплуатационном окне, наличие бригад и транспортных средств.

Указанные группы критериев могут детализироваться на подкритерии третьего уровня иерархии. Критичность раскрывается через прогнозную вероятность отказа, коэффициент готовности, ожидаемое время восстановления. Пространственно-функциональная значимость – через вклад геообъекта в пространственно-структурную целостность периметра, КПП, зоны хранения, наличие резервирования соседними геосенсорами и влияние на непрерывность наблюдения. Территориальная сложность обслуживания – через расстояние до эксплуатационной базы, доступность, сезонные ограничения [31]. Иерархический подход к выбору управленческого воздействия для геообъекта G_{obj_i} включает три основных уровня [148, 120, 124]:

- уровень цели: выбор предпочтительного воздействия $a_i^*, i = \overline{1, n}$ для объекта территориального управления G_{obj_i} ;
- уровень критериев и подкритериев: $K = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$;
- уровень альтернатив: $A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im}\}, i = \overline{1, n}, m$ – количество альтернатив для i -го геообъекта.

В общем виде иерархический подход к выбору управляющего воздействия может быть представлен в виде древовидной структуры, где верхний уровень соответствует цели выбора, промежуточный уровень образуют критерии оценки, нижний уровень составляют варианты воздействия (рис. 3.18).

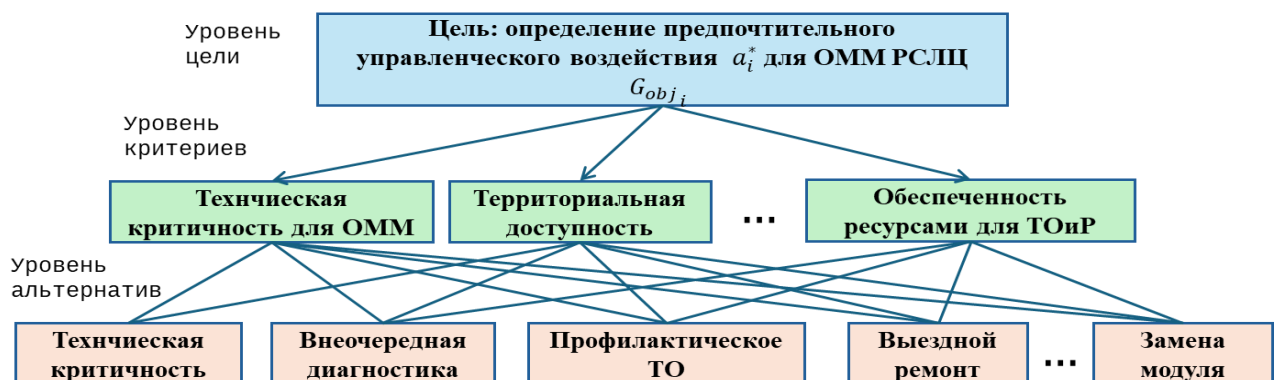


Рисунок 3.18 – Схема иерархического упорядочения анализа управляющих воздействий

Связи между уровнями отражают отношения предпочтения и сравнительной значимости, определяемые либо непосредственно экспертами, либо на основе преобразования количественных показателей в отношения парных сравнений. Вектор весов критериев имеет вид:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_k), \sum_{j=1}^k w_j = 1, k = 5. \quad (3.12)$$

Для каждого критерия K_j формируется локальный вектор приоритетов:

$$p^j = (p_1^j, p_2^j, \dots, p_m^j), \sum_{r=1}^m p_r^j = 1, j = \overline{1, 5}. \quad (3.13)$$

Тогда суммарный приоритет альтернативы A_{ir} определяется выражением:

$$P(A_{ir}) = \sum_{j=1}^5 w_j p_r^j, r = \overline{1, m}, i = \overline{1, n} \quad (3.14)$$

Предпочтительным считается то воздействие, для которого достигается максимум приоритета:

$$a_i^* = \operatorname{argmax}_{\{A_{ir} \in A_i\}} P(A_{ir}), i = \overline{1, n}. \quad (3.15)$$

Такое представление содержательно адаптировано к задаче территориального управления ОММ РСЛЦ, где итоговый выбор интерпретируется как пространственно-привязанное решение по поддержанию функциональной и пространственно-структурной целостности узла или сопряженной подсистемы. На рис. 3.19 представлен интерфейс разработанного программного средства [13], реализующего методику выбора управленческих воздействий на основе МАИ.

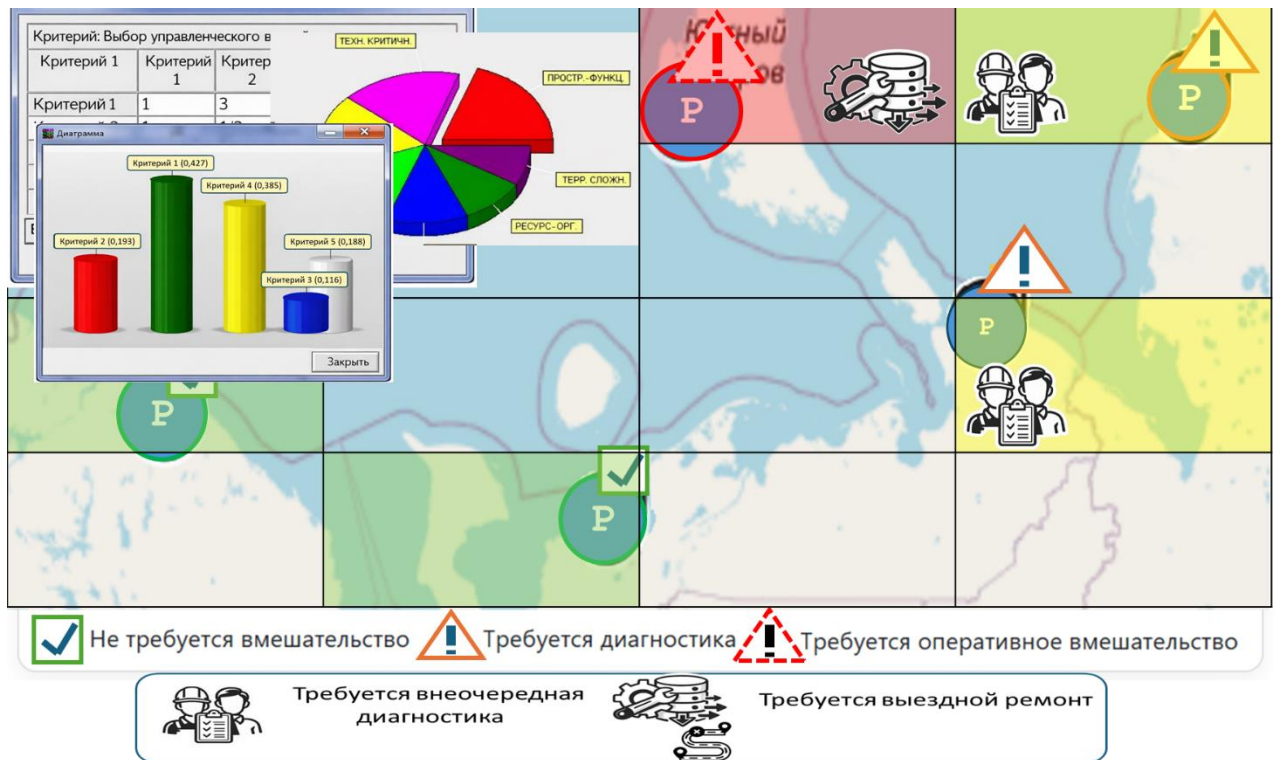


Рисунок 3.19 – Пример визуализации работы методики многокритериального выбора управленческих воздействий ГТРП ОММ на основе МАИ

В результате формируется обоснованный выбор воздействия для конкретного ЛЦ, подсистемы обеспечения или территориального сегмента покрытия, а результаты расчета могут быть непосредственно интерпретированы в картографической форме. Разработанная методика получила программную реализацию в средствах «Бастион» [26, 27, 132] и программном модуле интеллектуального анализа данных [29, 131]. В «Бастионе» реализованы процедуры загрузки и ведения геодезии, пространственной привязки объектов и картографической визуализации результатов. В программном модуле интеллектуального анализа данных реализованы процедуры отбора значимых параметров, прогнозирования технических состояний и расчета приоритетов управляющих воздействий.

Выводы по разделу 3

1. Сформирована структура обобщенной методики оценки обстановки в ОММ РСЛЦ как последовательность процедур, связывающих наполнение геодезии, отбор значимых параметров, оценку текущего состояния ИТСО, прогноз ухудшения состояния, картографическое отображение результатов и выбор управляющих воздействий.

2. Разработана процедура сбора данных и наполнения геомодели ОММ РСЛЦ. Выявлено, что последовательность этапов включает получение пространственных, атрибутивных, эксплуатационно-событийных, факторных и ситуационных данных, их подготовку в ГИС и ИС, контроль качества, импутацию пропусков, ETL-загрузку и привязку к геообъектам, функциональным зонам ЛЦ и ячейкам покрытия.

3. Разработана процедура отбора значимых параметров геомодели. Отбор распространяется на параметры компонентных векторов из состава геоинформационной модели и позволяет исключить постоянные, слабо влияющие и дублирующие признаки с учетом конкретной системы ОММ РСЛЦ, типа ИТСО, зоны размещения и доступности данных.

4. Определен порядок прогнозирования технических состояний ГТРП ОММ РСЛЦ. Установлено, что выбор марковской модели необходимо выполнять по условиям наблюдаемости состояния, полноты данных, наличия управляемого восстановления. Показано, что выходом процедуры являются вероятности неблагоприятных состояний и показатели готовности на заданный горизонт прогноза.

5. Разработан контур картографического представления результатов оценки и прогноза. Объектные оценки агрегируются по ячейкам покрытия и функциональным зонам ЛЦ с формированием слоев ухудшения состояния, зон приоритетного контроля и картографических оснований для планирования ТОиР.

6. Разработана процедура иерархического выбора управляющих воздействий. Метод анализа иерархий используется для сопоставления альтернатив: усиленного мониторинга, диагностики, профилактического ТО, ремонта, замены, резервирования и обслуживания подсистем связи, питания и передачи данных.

Полученный методический аппарат позволяет перейти к разработке программной реализации методики для верификации работы и выработки рекомендаций по применению разработанной методики.

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОГРАММНОЙ МЕТОДИКИ ВЫРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО–СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОММ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Разработанные модели, процедуры, алгоритмы позволили перейти к разработке программной методики для определения работоспособности, эффективности и выработки пространственно-содержательных рекомендаций по применению методического аппарата.

Разработанная программная методика базируется на семантическом описании предметной области «РСЛЦ – ОММ – ГТРП» и включает: алгоритмы выработки пространственно-содержательных рекомендаций; алгоритмы адаптивного управления техническим обслуживанием; описание структуры, функциональных возможностей программного решения; процедуру верификации работы модулей программного решения на примере РСЛЦ.

4.1. Обобщенная структура геоинформационной программной методики

Программная подсистема поддержки оценки и выработки пространственно-содержательных рекомендаций реализует этапы и процедуры ситуационно-предиктивной методики и преобразует актуализированную геоинформационную модель обстановки, включающей геообъекты ИТСО и факторные слои территории, в формализованный набор эксплуатационных действий [112, 118]. На вход подаются пространственные, атрибутивные и событийные данные; на выходе формируются оценки состояния, прогнозные показатели, ранжированные перечни геообъектов, геовизуализация вероятностей угроз отказов оборудования ГТРП и рекомендации. Структура программной геоинформационной методики, включающая этапы сбора и обработки геоданных, формирование оценки и выработки рекомендаций, представлена на рисунке 4.1.

На рис. 4.1. представлены следующие этапы программной методики (Э1 – Э6):

– Э1. Сбор и верификация исходных данных. На данном этапе осуществляется автоматизированное получение, проверка и нормализация пространственных, атрибутивных и эксплуатационных данных: координаты, параметры и текущее состояние технических средств; данные журналов эксплуатации, телеметрии и внешних факторных слоев (климат, доступность, инфраструктура); регламентные и нормативные ограничения, определяющие допустимые действия [64, 67].

– Э2. Прогнозирование динамики состояния объектов и территорий. Используются математические и/или машинные модели для: оценки вероятности отказов и деградации состояния в заданном временном горизонте; выявления зон с наибольшим риском и прогнозируемых «узких мест» системы; формулировки пространственно–временных сценариев развития обстановки [101].

– Э3. Генерация множества кандидатных рекомендаций. На основе алгоритма выработки и выдачи пространственно–содержательных рекомендаций и предписаний: определяются объекты и территории, требующие вмешательства; для каждого случая подбираются подходящие типы мероприятий (профилактика, ремонт, перенастройка и т.д.); учитываются производственные регламенты и ограничения доступных ресурсов [64, 122].

– Э4. Оценка и ранжирование альтернативных действий.

Все кандидатные рекомендации анализируются с точки зрения эффективности, приоритета и допустимости: рассчитывается ожидаемый эффект (повышение готовности, сокращение продолжительности выездного обслуживания, оптимизация маршрутов ТОиР); определяется приоритет выполнения с учетом критичности объектов и ресурсов; проводится оптимизация по заданным критериям (например, методом ранца, динамического программирования или поиска маршрутов для бригад) [8, 60, 122].

– Э5. Формирование итогового набора рекомендаций.

Из общего множества на основе алгоритма адаптивного управления техническим обслуживанием отбираются те действия, которые обеспечивают максимальную эффективность при заданных ограничениях: оформляется перечень мероприятий с привязкой к зонам и временным окнам; каждому действию приписывается приоритет, ожидаемый эффект и обоснование выбора [123].

– Э6. Публикация, визуализация и аудит рекомендаций.

Итоговые рекомендации отображаются в интерфейсе пользователя, формируются отчеты для операторов и инженерно–технических служб: реализуется геовизуализация, табличное и графическое представление; сохраняется история рекомендаций и параметров принятия решений для последующего аудита [44, 113].

4.2 Алгоритм выработки и выдачи пространственно-содержательных рекомендаций

В системах охранного мониторинга местности процесс выработки рекомендаций и предписаний должен быть не только основан на анализе текущего и прогнозируемого состояния технических средств, но и обеспечивать их пространственную и содержательную привязку к конкретным объектам, зонам и ситуациям [97, 112]. Для перехода от оценочно-прогностических показателей состояния СОММ к конкретным управленческим действиям вводится функциональный компонент – диспетчер правил (ДП). ДП реализует нормативно–обоснованный вывод рекомендаций на основе Базы знаний (БЗ): по каждому объекту/ячейке территориального

покрытия формируется контекст $(s_i, R_{Sp,i}, f_i(t), t)$, после чего из БЗ извлекаются применимые правила и соответствующие им типовые мероприятия [118]. Диспетчер правил выполняет следующие функции:

1. подбор правил и мероприятий по контексту объекта $(s_i, R_{Sp,i}, f_i(t), t)$ с учетом типа узла ИТСО и сезонности;
2. нормативная фильтрация кандидатов: обязательные требования (периодичности, запреты, требования безопасности);
3. оценка выполнимости и ранжирование: к кандидатам прикладываются трудоемкость, окна выполнения, логистическая доступность, а также ожидаемый эффект $(\Delta G, \Delta R)$ и срочность по прогнозным индикаторам;
4. формирование карточек рекомендаций (кандидатных мероприятий) с полным обоснованием: идентификатор правила, ссылки на нормативно-правовые акты/инструкции и индикаторы/модели [64, 117].

Последовательность формирования рекомендаций с использованием ДП продемонстрирована на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Этапы наполнения данными и формирования рекомендаций диспетчером правил

Результатом работы ДП является упорядоченный набор мероприятий для каждого ЛЦ, который далее используется оптимизационным блоком для выбора выполненного плана и модулем формирования документов для трансляции выбранных мероприятий в плановые и учетные формы.

Обобщенная схема алгоритма, в которой БЗ и ДП реализуют блок формирования рекомендаций по правилам, изображена на рисунке 4.3. Последующие процедуры обеспечивают нормативную фильтрацию, оценку предпочтительности и итоговый перечень рекомендаций с картографической визуализацией.



Рисунок 4.3 – Обобщенная структурная схема алгоритма выработки и выдачи пространственно-содержательных рекомендаций и предписаний COMM

Представленная схема фиксирует состав и последовательность процедур алгоритма и задает единый формат выхода (карточки рекомендаций с обоснованием и геопривязкой), достаточный для реализации программного прототипа и последующей интеграции с картографическим интерфейсом.

Этапы формирования пространственно-содержательных рекомендаций:

1. Пространственная локализация объектов. Определяются геообъекты и территориальные ячейки, для которых по результатам диагностики и предиктивной оценки выявлены риски/отклонения.

2. Формирование перечня возможных мероприятий. На основе базы знаний (нормативы/регламенты, каталог мероприятий, правила/пороги) для каждого объекта диспетчер правил применяет формализованные правила вида: $IF(s_i, f_i(t), R_{Sp,i}, t) \Rightarrow THEN(a)$.

3. Фильтрация и оценка предпочтительности рекомендаций. Проверка соответствия обязательным требованиям регламентов (периодичности, запреты, требования безопасности) и исключение несовместимых мероприятий.

4. Публикация результатов. Рекомендации визуализируются на геоизображении (слои приоритетов/угроз) и представляются в табличной форме [118, 139].

4.3 Алгоритм адаптивного управления техническим обслуживанием

Алгоритм адаптивного управления техническим обслуживанием объектов COMM и ИТСО (рис. 4.4) является ядром программной методики территориального анализа и поддержки решений [20, 56].

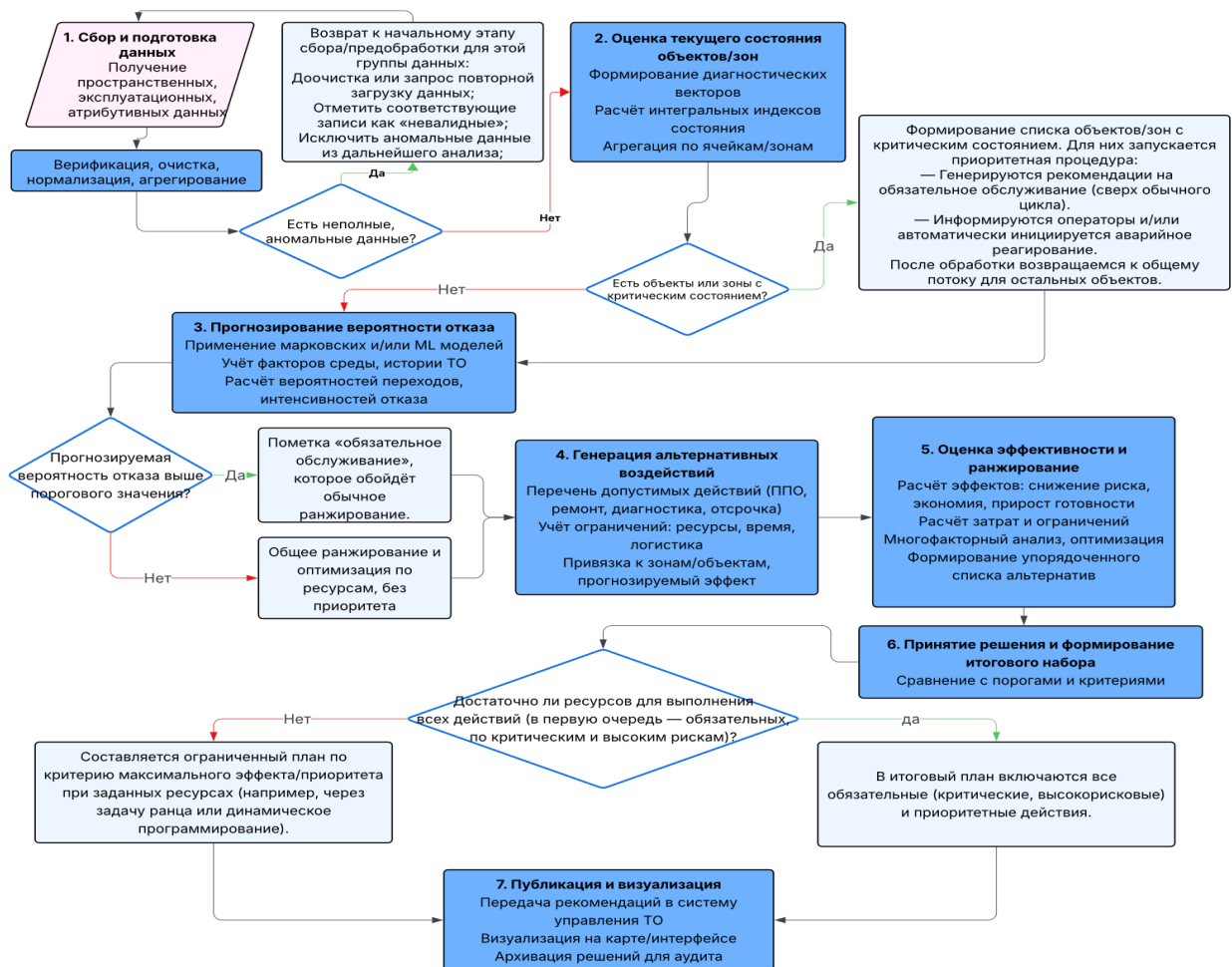


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритма адаптивного управления техническим обслуживанием COMM и ИТСО

Алгоритм включает следующие блоки (Б1 – Б7):

Б1. Сбор, интеграция и предобработка исходных данных. На первом этапе осуществляется интеграция пространственных, эксплуатационных и атрибутивных данных из внутренних и внешних источников. Особое внимание уделяется унификации форматов, верификации полноты, агрегированию параметров по территориальным ячейкам и привязке к объектам ИТСО. Для повышения

надежности используются процедуры фильтрации и нормализации данных, а также методы восстановления пропусков на основе исторических выборок [64, 67].

Б2. Оценка текущего состояния объектов и зон. Для каждого объекта и ячейки территории формируется интегральная диагностическая оценка состояния. Используются агрегированные параметры диагностики, результаты мониторинга, журналы обслуживания и инцидентов. Верификация результатов дополняется экспертными правилами и автоматическими процедурами выявления аномалий [23, 134].

Б3. Прогнозирование динамики и вероятности отказа. В качестве прогностических моделей применяются как марковские процессы, позволяющие описывать вероятности переходов между состояниями с учетом индивидуальных и факторных параметров, так и гибридные алгоритмы машинного обучения, уточняющие прогнозы для сложных и редких событий. Для каждого объекта на прогнозируемом горизонте рассчитывается вероятность перехода в критическое или отказовое состояние [117].

Б4. Генерация альтернативных вариантов воздействия. На основе результатов оценки и прогнозирования формируется набор возможных воздействий (профилактика, ремонт, коррекция, отсрочка), привязанных к объекту, зоне, ресурсу и временному окну исполнения. Для каждого варианта рассчитываются ожидаемый эффект, затраты и ресурсные ограничения.

Б5. Оценка эффективности и оптимизационный отбор. Вся совокупность альтернатив проходит процедуру ранжирования на основании критериев эффективности: снижение риска отказа, прирост технической готовности, минимизация затрат, логистическая выполнимость. Применяется либо пороговая стратегия (действия обязательны при превышении риска), либо задача оптимизации (максимизация эффекта при ограниченных ресурсах) [8].

Б6-Б7. Формирование и передача итоговых решений. Оптимизированный набор мероприятий передается в подсистему пространственно-содержательных рекомендаций для дальнейшей детализации, визуализа-

ции и интеграции с операционным управлением. Вся информация о принятых решениях и исходных данных сохраняется в журнале аудита для последующего анализа и адаптации параметров моделей.

4.4. Программная реализация: структура и интерфейс программного комплекса

Программная реализация методики построена как система из трех сервисов: сервиса представления, сервиса прикладной логики и сервиса хранения данных. Серверная часть реализована на ASP.NET Core MVC на языке C#, пользовательский интерфейс – на Razor Pages. Такая организация отделяет интерфейс от вычислительного контура и БД, упрощает масштабирование и поддерживает последовательность «данные → оценка → прогноз → рекомендации → контроль исполнения» [112, 117, 122]. Картографическая визуализация выполнена на OpenStreetMap и Leaflet: в интерфейсе отображаются геообъекты, план-схема ЛЦ и сетка ячеек с тематической окраской по состоянию или вероятности угроз.

Пространственная подготовка данных выполняется в QGIS; после разметки слои экспортируются в GeoJSON и загружаются через встроенный модуль импорта. Хранение данных реализовано на PostgreSQL с расширением PostGIS, в тестовой конфигурации допускается SQLite. Учетные записи и роли ведутся средствами ASP.NET Identity. Порядок взаимодействия с программной методикой отражен на рисунке 4.5.

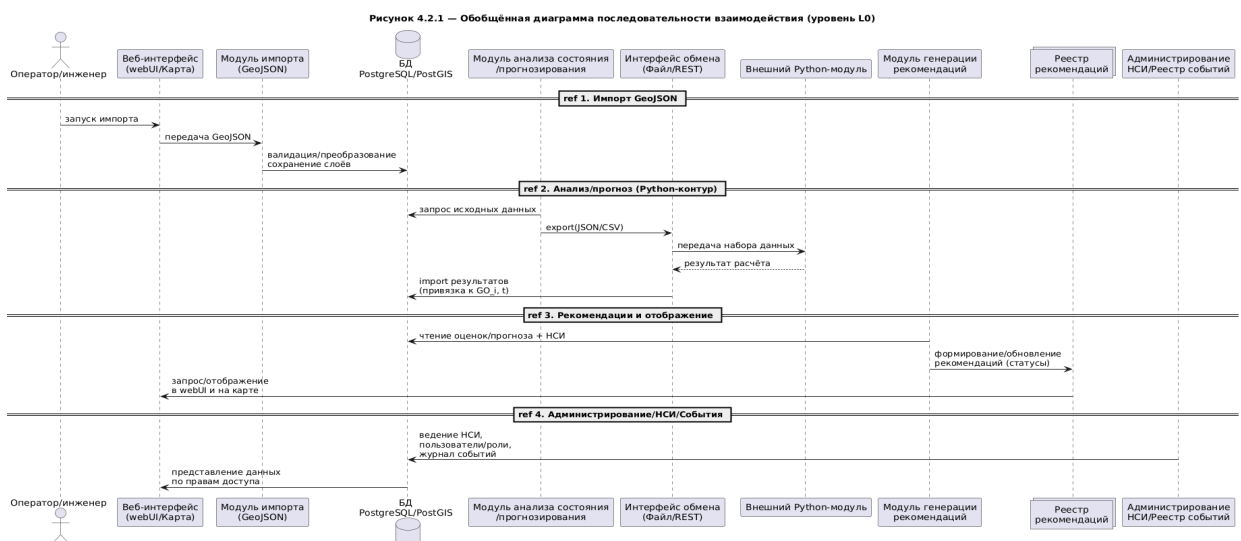


Рисунок 4.5 – Порядок взаимодействия пользователя с программной методикой.

Прогнозный сервис вынесен во внешний Python-контур. Обмен с основным приложением организован через JSON/CSV; допускается REST-взаимодействие для автоматического запуска расчетов и возврата результатов [13, 135].

4.5. Программная реализация процедуры построения оптимального маршрута ТОиР РСЛЦ

Процедура построения оптимального маршрута ТОиР является составной частью геоинформационной ситуационно-предиктивной методики. После оценки состояния ИТСО, построения текущих и прогнозных слоев неблагоприятности и иерархического выбора управляющих воздействий формируется перечень объектов и зон, требующих обслуживания. Этот перечень еще не является планом выполнения работ: для перехода к геоконтроллингу требуется определить исходную ремонтную базу, допустимые пути перемещения, последовательность посещения ЛЦ, временные окна, ресурс бригад и территориальные ограничения [95].

Общий порядок реализации процедуры показан на рисунке 4.6. Он включает подготовку геоданных в QGIS, импорт слоев в программный комплекс, построение региональной и локальной сетки, расчет локальных оценок состояния, возврат результатов на региональный уровень, выбор ремонтной базы, формирование ориентированного графа, учет факторов геосреды и ограничений, построение оптимального маршрута ТОиР, оптимизация последовательности посещения ЛЦ; исключение неблагоприятных участков

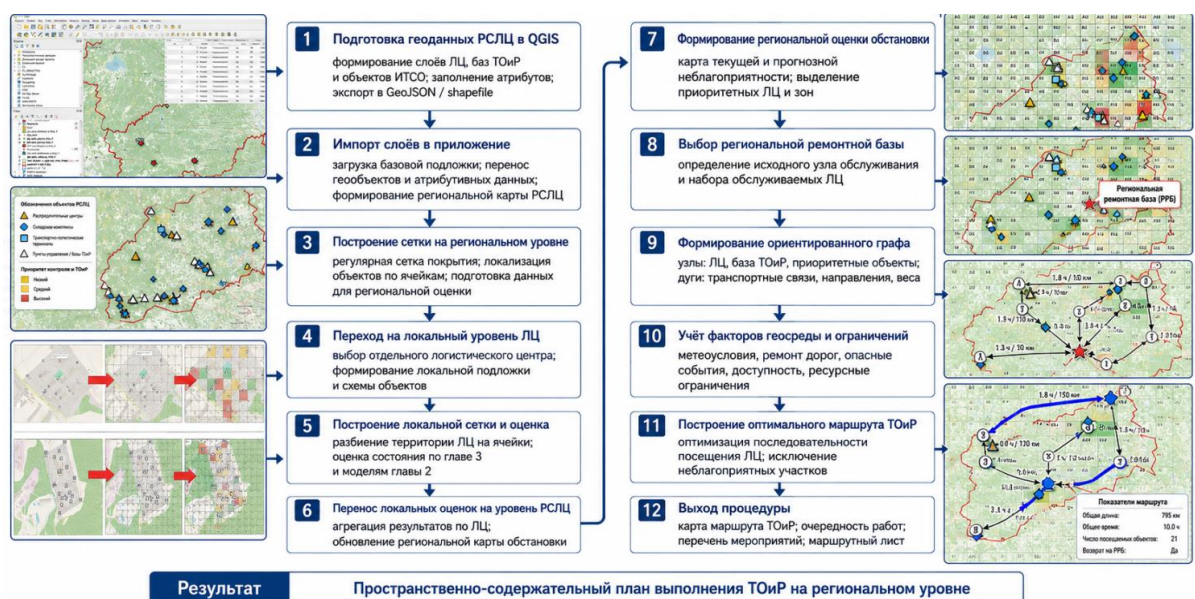


Рисунок 4.6 – Программные модули построения оптимального маршрута ТОиР РСЛЦ

Перед подготовкой пространственных и атрибутивных наборов данных выполняется семантическое описание предметной области программного комплекса. Его назначение состоит в формировании строгого машинно-интерпретируемого представления объектов РСЛЦ, ОММ и ГТРП, их свойств и отношений [128]. Семантический уровень связывает разработанную геомодель обстановки с объектной моделью программного комплекса, логической структурой базы данных и процедурами обработки геоинформации. Такое описание обеспечивает единообразие используемых понятий, переносимость структуры данных между программными средствами и возможность последующего расширения состава геообъектов и их атрибутов без изменения базовых принципов модели.

Предметная область представляется системой трёх взаимосвязанных онтологий (рис. 4.7).

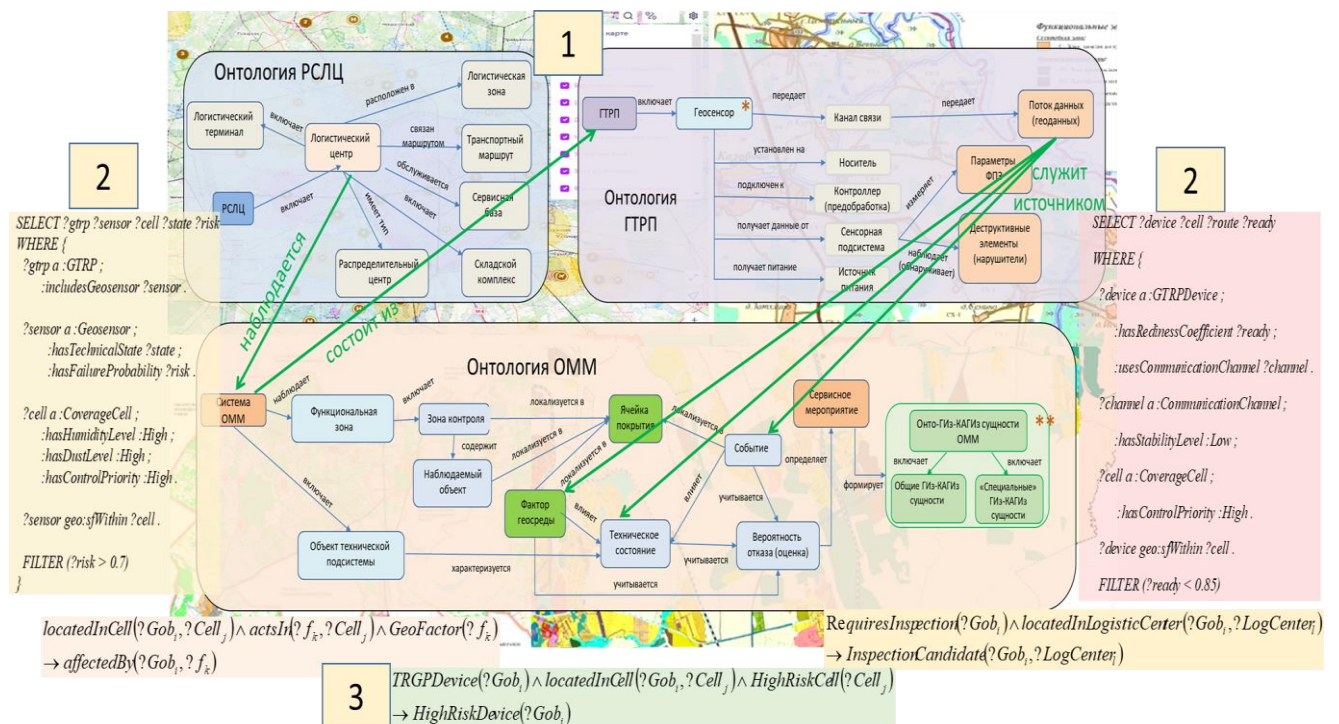


Рисунок 4.7 – Обобщенное семантическое описание территориальной системы «РСЛЦ – ОММ – ГТРП» (1); 2 – пространственные запросы GeoSPARQL отбора геосенсоров подлежащих контролю; 3 – SWRL правила формально логического вывода для генерации пространственно-содержательных рекомендаций; ГИЗ – геоизображение; КАГИЗ – контроллинг-активное ГИЗ

Онтология РСЛЦ описывает логистические центры, их функциональные зоны, инфраструктуру и локализованные факторы геосреды; онтология ОММ –

зоны наблюдения, задачи мониторинга, события, угрозы, оценки и рекомендации; онтология ГТПП – ИТСО, геосенсоры, камеры, контроллеры, средства связи и электропитания, их технические состояния, отказы и мероприятия ТОиР.

Формирование и ведение семантической модели выполняется средствами редактора Protégé. Классы, экземпляры и их свойства формализуются средствами OWL, а отдельные утверждения о предметной области представляются в модели RDF. Производные зависимости задаются правилами логического вывода SWRL. В них формализованы сочетания территориальной принадлежности объекта, воздействующих геофакторов и прогнозируемого технического состояния как основания для повышения приоритета контроля или ТОиР.

Пространственные выборки выполняются GeoSPARQL -запросами, что обеспечивает обработку отношений принадлежности, пересечения, соседства. Сформированное семантическое описание далее используется при построении объектной модели программного комплекса и логической структуры БД. Последовательность программной реализации имеет вид: геомодель обстановки → семантическая модель РСЛЦ–ОММ–ГТПП → объектная модель и БД → SWRL/GeoSPARQL → расчётные процедуры.

Подготовка пространственной основы выполняется во внешней ГИС-среде QGIS. В ней формируются слои региональной границы РСЛЦ, точек ЛЦ, пунктов управления, региональной ремонтной базы, транспортных связей, объектов ИТСО, локальных планов ЛЦ, зон ответственности, ячеек покрытия и временных факторных слоев. Перечень технологий и состав данных для программной реализации представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технологии и данные, используемые в программном модуле маршрутизации

Подфункции (sub-features) программного модуля маршрутизации	Интерфейсные данные	Технологии	Результат работы программного модуля
Подготовка геоданных	границы, ЛЦ, ИТСО, зоны, дороги, планы ЛЦ	QGIS, GeoJSON, Shapefile	слои геомодели РСЛЦ
Импорт	Feature geometry/properties	ASP.NET Core MVC, C#, модуль импорта	объекты в БД PostGIS
Картографирование	подложка, точки, полигоны, сетка	OpenStreetMap, Leaflet, Razor Pages	Интерактивное Гиз РСЛЦ/ЛЦ

Оценка состояния	ИТСО, события, факторы, ячейки	Python-модули, JSON/CSV, модели разделов 2–3	слои текущего и прогнозного состояния
Маршрутизация	граф ЛЦ, приоритеты, ограничения	PostGIS, дополненный алг. Дейкстры, TSP/VRP-эвристика	Маршрут на Гиз, маршрутный лист

Этап формирования слоев геоизображений РСЛЦ и заполнение таблицы атрибутов в QGIS представлен на рисунке 4.8.

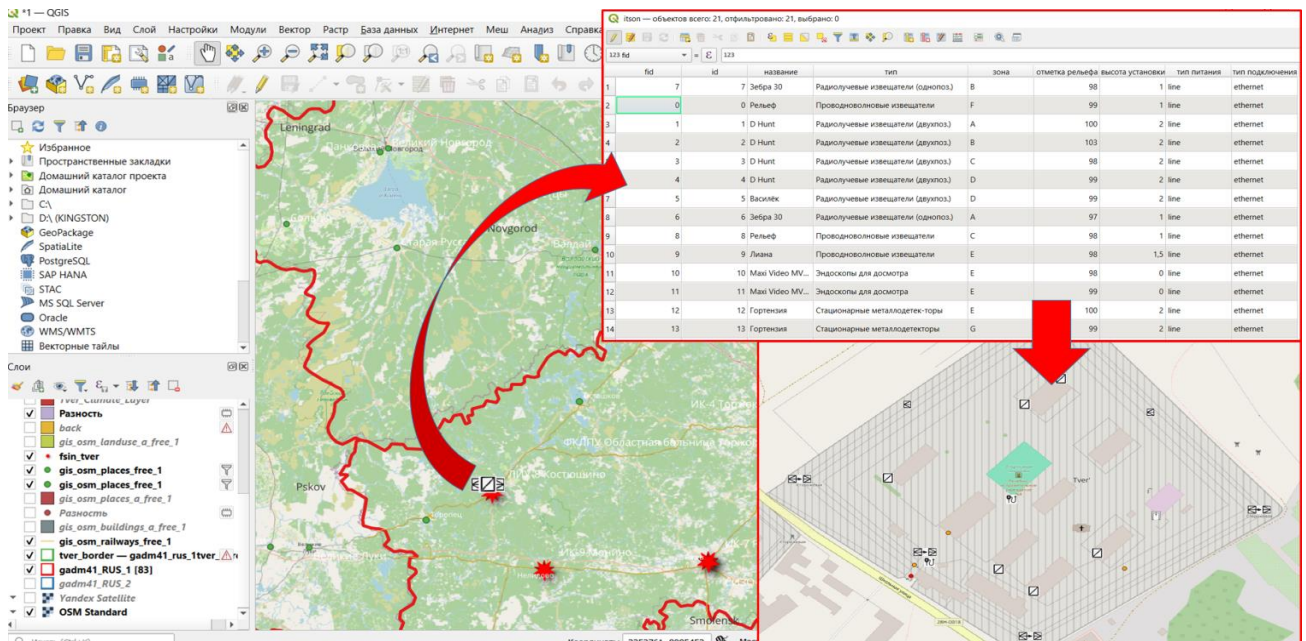


Рисунок 4.8 – Порядок построения региональной пространственной геоподложки РСЛЦ в QGIS

Для каждого точечного, линейного или полигонального объекта формируется атрибутивная таблица. Атрибуты (рис. 4.9) обеспечивают связку картографического объекта с паспортом ЛЦ, реестром ИТСО, эксплуатационными событиями и последующей оценкой состояния.

itson — объектов всего: 21, отфильтровано: 21, выбрано: 0

fid	id	название	тип	зона	отметка рельефа	высота установки	тип питания	тип подключения
1	7	7 Зебра 30	Радиолучевые извещатели (однопол.)	B	98	1	line	ethernet
2	0	0 Рельеф	Проводноволновые извещатели	F	99	1	line	ethernet
3	1	1 D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	A	100	2	line	ethernet
4	2	2 D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	B	103	2	line	ethernet
5	3	3 D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	C	98	2	line	ethernet
6	4	4 D Hunt	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	D	99	2	line	ethernet
7	5	5 Василёк	Радиолучевые извещатели (двухпол.)	D	99	2	line	ethernet
8	6	6 Зебра 30	Радиолучевые извещатели (однопол.)	A	97	1	line	ethernet
9	8	8 Рельеф	Проводноволновые извещатели	C	98	1	line	ethernet
10	9	9 Лиана	Проводноволновые извещатели	E	98	1,5	line	ethernet
11	10	10 Maxi Video MV...	Эндоскопы для досмотра	E	98	0	line	ethernet
12	11	11 Maxi Video MV...	Эндоскопы для досмотра	E	99	0	line	ethernet
13	12	12 Гортензия	Стационарные металлодетекторы	E	100	2	line	ethernet
14	13	13 Гортензия	Стационарные металлодетекторы	G	99	2	line	ethernet

Рисунок 4.9 – Пример атрибутивного описания объектов ИТСО перед экспортом в GeoJSON

В атрибутивной таблице фиксируются наименование, тип ИТСО, зона размещения, отметка рельефа, высота установки, тип питания, тип подключения и иные признаки, необходимые для расчета состояния и формирования маршрута обслуживания. После проверки полноты атрибутов слой экспортируется в GeoJSON и загружается через веб-интерфейс программного комплекса.

4.5.1. Импорт геоданных и формирование региональной операционной активной геоподложки

Импорт пространственных слоев выполняет модуль загрузки GeoJSON. На вход подаются файлы, подготовленные в QGIS: слой ЛЦ, слой пунктов управления и баз ТОиР, слой региональной границы, транспортный слой, слой ячеек покрытия и, при необходимости, факторные слои. Модуль выполняет парсинг геометрии, проверку обязательных атрибутов, контроль типа геометрии, проверку дублирования идентификаторов и запись объектов в БД [44, 118].

После импорта геоизображение РСЛЦ отображается в интерфейсе программного комплекса (рис. 4.10). Базовая подложка используется не как иллюстрация, а как основа геоинформационного управления: пользователь выбирает ЛЦ, просматривает атрибуты, открывает локальный уровень, включает сетку покрытия, просматривает слой текущей и прогнозной оценки, формирует перечень мероприятий и запускает расчет маршрута [112].

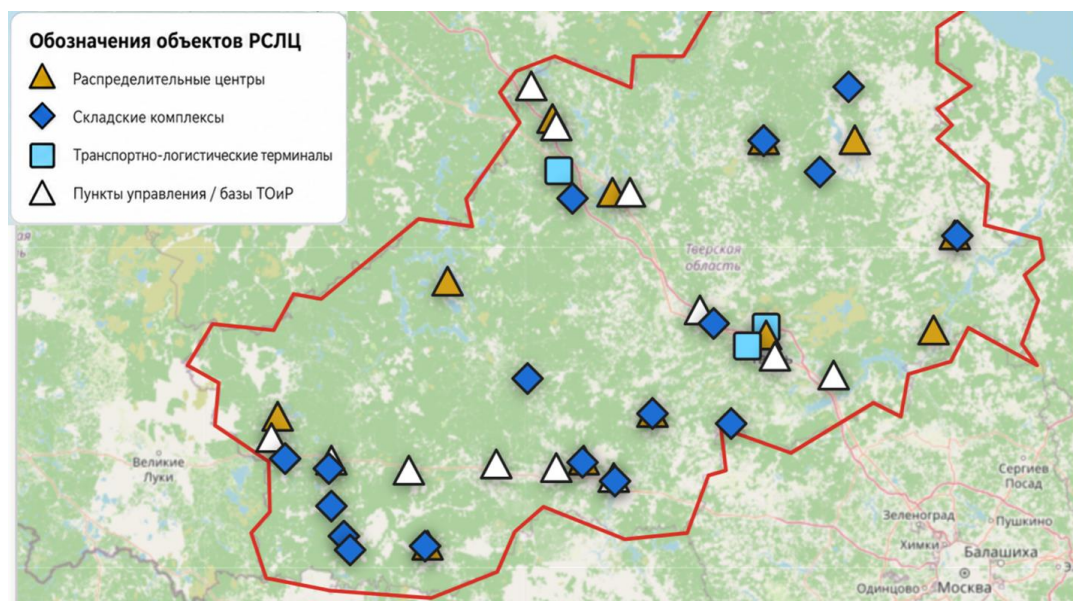


Рисунок 4.10 – Геоизображение РСЛЦ после импорта в программный комплекс

4.5.2. Разбиение и оценка ТГ территориальной системы ОММ РСЛЦ на региональном и локальном уровнях

Для перехода от объектного учета к территориально локализованной оценке в программном комплексе строится сетка разбиения. На региональном уровне ячейка фиксирует положение ЛЦ, факторные условия, прогнозную неблагоприятность и маршрутную доступность. На локальном уровне ячейка фиксирует положение ИТСО, его принадлежность зоне ЛЦ, наличие событий, пересечение с факторными слоями и результат оценки состояния [33, 35].

Принцип разбиения выбирается так, чтобы в ячейку попадал один основной геообъект или минимальная группа функционально связанных объектов (рис. 4.11). Если плотность ИТСО высока, допускается укрупнение по зонам, рубежам или функциональным участкам. Идентификатор ячейки используется как ключ связи между геовизуализацией, БД, расчетными модулями и реестром рекомендаций.

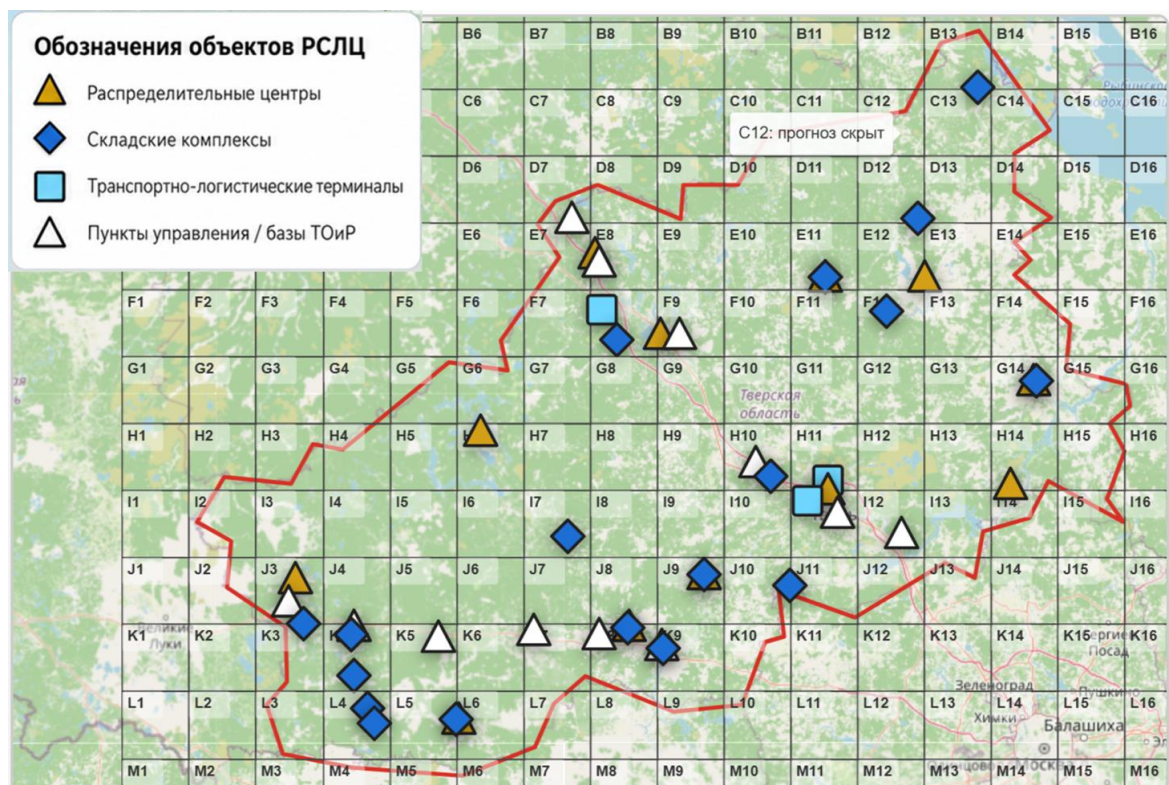


Рисунок 4.11 – Покрывение РСЛЦ ячейками с локализацией ЛЦ и пунктов управления ТГ

Аналогичная операция выполняется на уровне отдельного ЛЦ. В качестве подложки используется план логистического центра или схема территории. Примеры перехода от локальной подложки к локальной сетке и оценочному геоизображению приведены на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Последовательность перехода к локальному уровню на примере ЛЦ №1 и ЛЦ №2: f_1 – изображение базового представления обстановки в ОММ ЛЦ в систему дискретных ячеек; f_2 – отображение системы дискретных ячеек в оценку состояния ТПС ОММ РСЛЦ

Для локальной оценки по каждому геообъекту формируется признаковый вектор, рассчитывается показатель условий функционирования, уточняется вероятность неблагоприятного состояния, после чего ячейка получает уровень текущего и прогнозного приоритета контроля. Цветовая индикация используется для передачи результата на региональный уровень.

4.5.3. Построение обобщенной оценки состояния региональной ТПС ОММ РСЛЦ

После расчета состояния отдельных ЛЦ результаты агрегируются на региональном уровне. Для каждого ЛЦ формируется обобщенная запись: перечень проблемных ячеек, типы требуемых мероприятий, прогнозная вероятность ухудшения состояния, ожидаемое время восстановления, ограничение доступа, временное окно работ и приоритет обслуживания.

Региональное геоизображение РСЛЦ после переноса локальных оценок содержит не только местоположение ЛЦ, но и слой приоритетов контроля и ТОиР (рис. 4.13). В этом виде геоизображение становится опорой для маршрутизации:

маршрут строится не по абстрактному списку адресов, а по территориально оцененным объектам с разной технической готовностью, разной доступностью и разным вкладом в сохранение функции ОММ РСЛЦ.

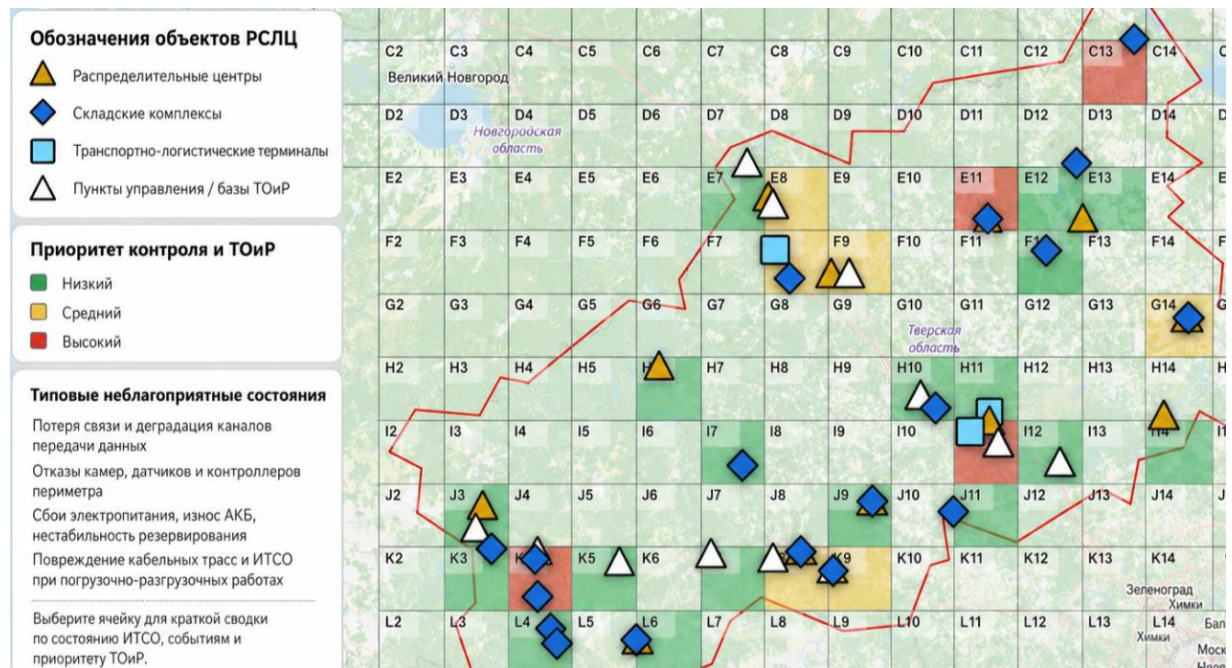


Рисунок 4.13 – Обобщенная оценка ТГ РСЛЦ на региональном уровне

Перед построением графа выбирается региональная ремонтная база, из которой направляются бригады ТОиР. В качестве такой базы может выступать пункт управления, база ТОиР или ЛЦ с ресурсом обслуживания. В программной реализации выбранная база фиксируется как специальный геообъект (рис. 4.14).

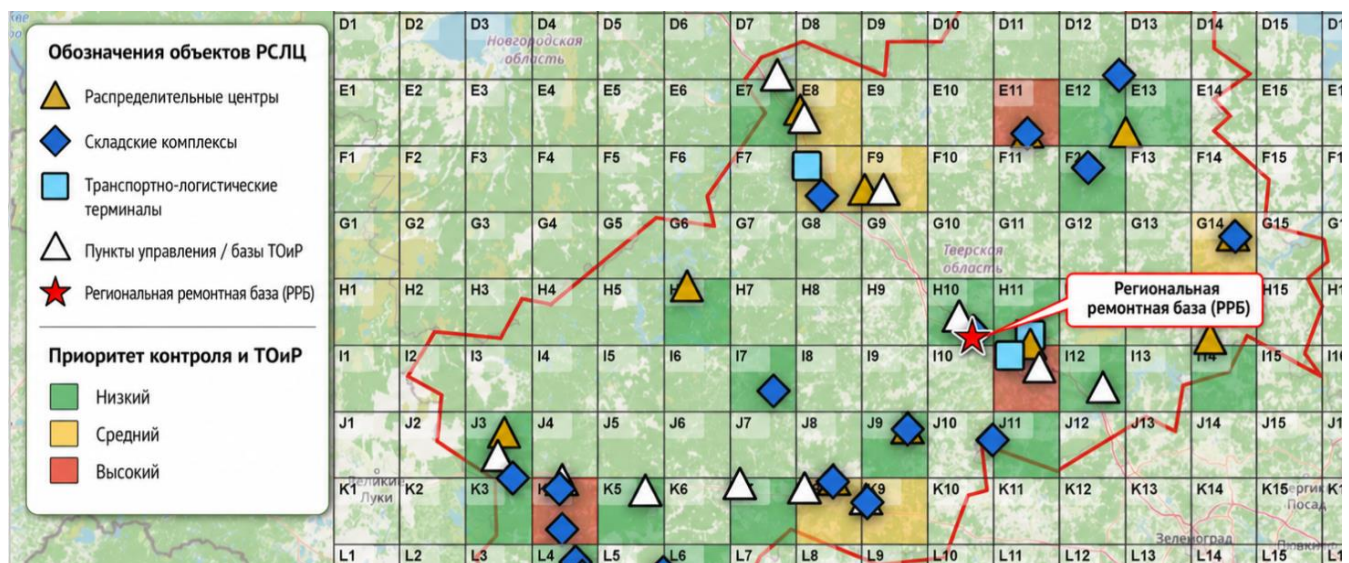


Рисунок 4.14 – Определение региональной ремонтной базы для планирования маршрута ТОиР РСЛЦ

Она получает роль начальной и конечной вершины маршрутного графа. Атрибуты базы содержат ресурс бригад, допустимое время выхода, лимит длительности маршрута, перечень доступных работ и ограничения по обслуживанию.

4.5.4. Формирование ориентированного графа объектов ТПС РСЛЦ

Для маршрутизации РСЛЦ представляется в виде ориентированного графа $G_{tr} = (V, E), V \in GO$. Вершины V соответствуют региональной ремонтной базе, ЛЦ, приоритетным объектам обслуживания, транспортным узлам и точкам входа в локальные территории. Дуги E соответствуют допустимым направлениям перемещения между вершинами.

Каждая дуга получает вес, который рассчитывается не только по расстоянию. В вес включаются время движения, состояние дороги, погодные и гидрологические ограничения, ремонт дорог, доступность КПП, временные запреты, загруженность транспортных подходов и ресурсные ограничения бригады. Графовое представление РСЛЦ изображено на рисунке 4.15.

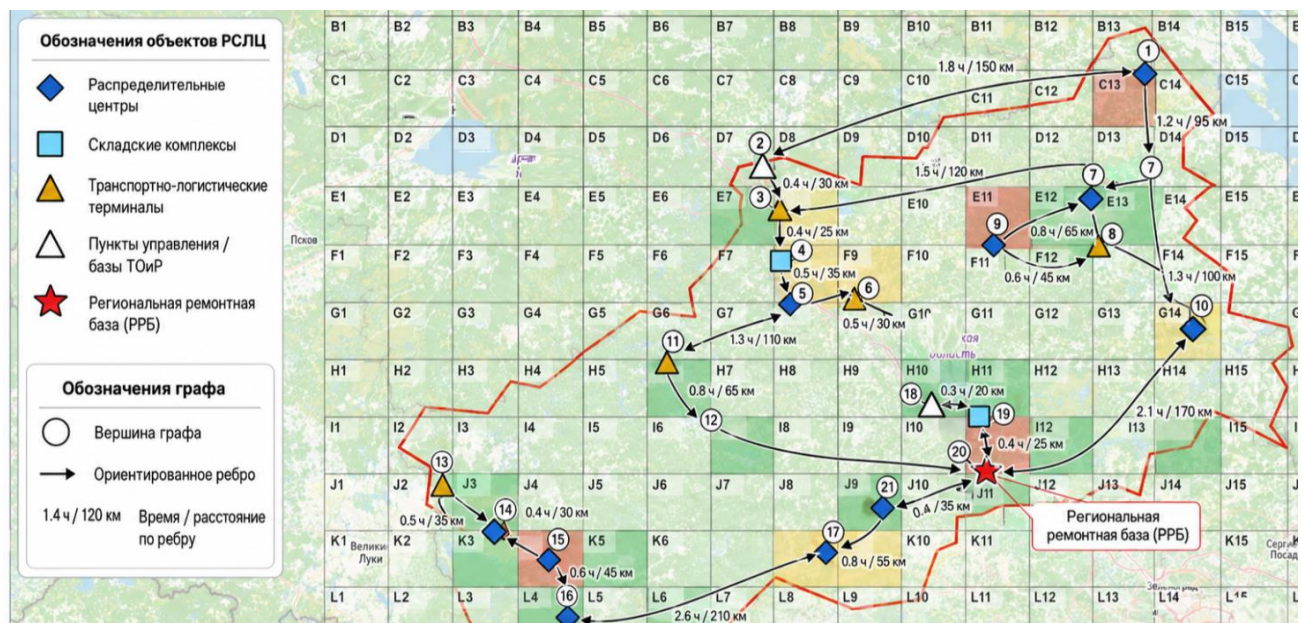


Рисунок 4.15 – Графовое представление РСЛЦ для построения маршрута ТОиР

Маршрут ТОиР строится с учетом факторных слоев геомодели. На региональном уровне учитываются метеоусловия, гидрологические ограничения, рельеф и растительность, транспортно-инфраструктурные ограничения, техногенные факторы, состояние связи и питания, антропогенная и ситуационно-тактическая обстановка (рис. 4.16) [57, 89, 126].

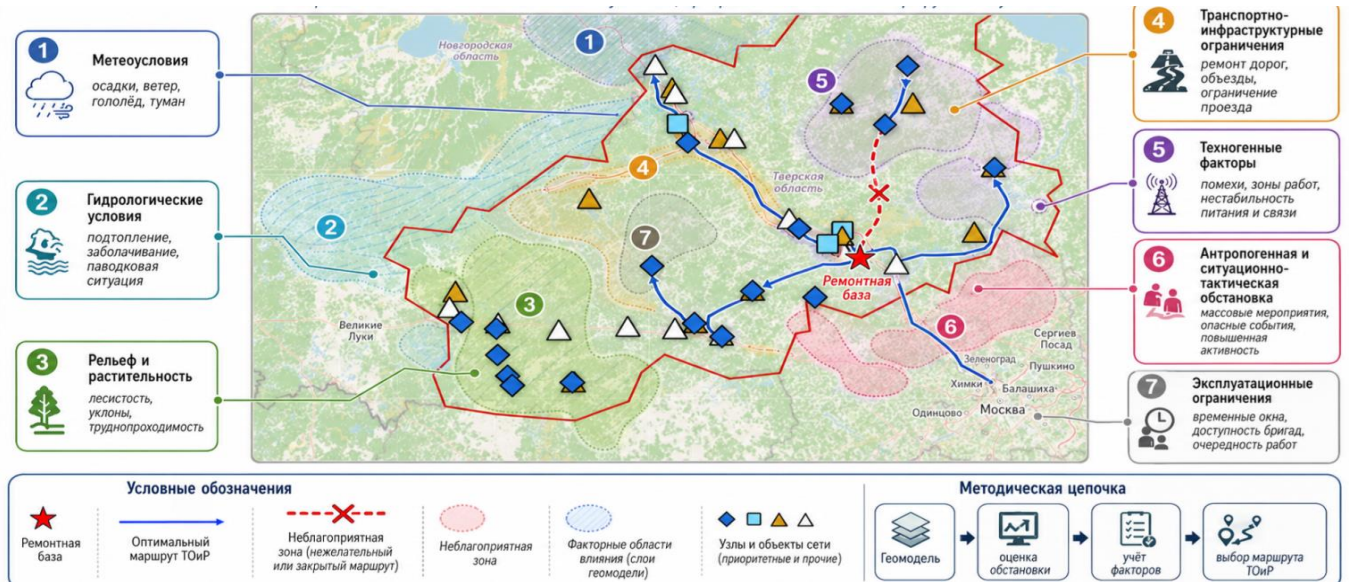


Рисунок 4.16 – Факторы геосреды и текущей обстановки, влияющие на формирование маршрута ТООР РСЛЦ на графе

Помимо оценки доступности на основании транспортной сети региона, в процедуре формирования допустимых, удовлетворяющих критериям оптимальности, маршрутов участвуют параметры обстановки из геомодели GM_{OMM} в виде пространственных слоев.

4.5.5. Алгоритм построения оптимального маршрута

В программной реализации используется дополненный алгоритм поиска оптимального маршрута ТООР [94, 133]. Его отличие от классического поиска кратчайшего пути состоит в том, что время перемещения рассчитывается с учетом влияния параметров геомодели, а порядок посещения ЛЦ зависит от прогноза вероятности отказов, приоритета мероприятий, временных окон и ресурсных ограничений [8, 60, 94]. На начальном этапе для каждой пары допустимых вершин графа рассчитывается допустимый маршрут с использованием алгоритма Дейкстры, либо нейросетевого алгоритмом [24, 30, 115]. Затем решается задача упорядочивания посещения выбранных ЛЦ. Вес ориентированной дуги графа задается выражением:

$$w_{uv}(t) = \frac{l_{uv}}{v_{uv}}(t) \cdot k_{geo,uv}(t) \cdot k_{inf,uv}(t) \cdot k_{sit,uv}(t) + \tau_{uv}(t), \quad (4.1)$$

где $w_{uv}(t)$ – стоимость прохождения дуги от вершины u к вершине v на момент t , ч; l_{uv} – длина участка, км; $v_{uv}(t)$ – допустимая скорость или расчетная скорость прохождения участка, км/ч; $k_{geo,uv}(t)$ – коэффициент влияния геосреды; $k_{inf,uv}(t)$

– коэффициент инфраструктурной доступности; $k_{sit,uv}(t)$ – коэффициент текущей ситуационно-тактической обстановки; $\tau_{uv}(t)$ – задержка, связанная с ограничениями, ожиданием, пропускным режимом или объездом, ч. Для всей последовательности посещения ЛЦ $V^* = (v_0, v_1, \dots, v_m, v_0)$, где v_0 – ремонтная база, целевая функция записывается как:

$$J(V^*) = \sum_{j=1}^n w_{v_j v_{j+1}}(t) + \sum_{j=1}^n d_{v_j} + \sum_{j=1}^n \rho_{v_j} - \kappa \sum_{j=1}^n Pr_{v_j}, \quad (4.2)$$

где $J(V^*)$ – оценочная стоимость маршрута; d_{v_j} – длительность работ в ЛЦ v_j , ч; ρ_{v_j} – штраф временного окна или превышение ресурса бригады; Pr_{v_j} – оценка приоритета обслуживания ЛЦ, рассчитанная по текущей и прогнозной оценке состояния; κ – коэффициент учета приоритета, n – количество геообъектов. Последовательность операций для реализации алгоритма представлена на рисунке 4.17.

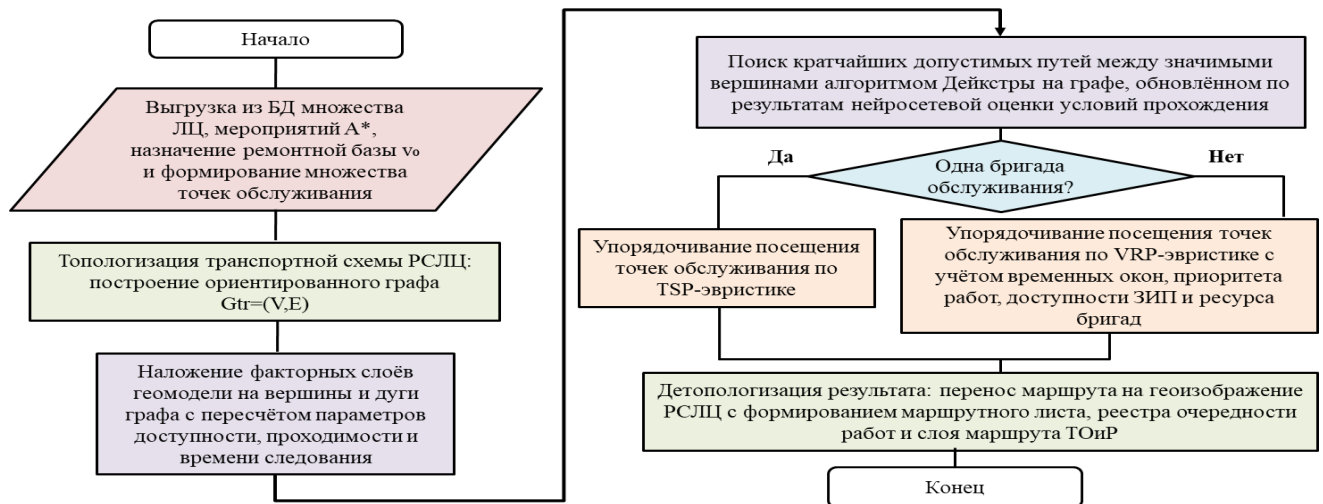


Рисунок 4.17 – Последовательность этапов построения оптимального маршрута ТОиР, где: A^* – множество выбранных мероприятий; v_0 – региональная ремонтная база; $G_{tr} = (V, E)$ – ориентированный граф транспортной доступности, где V – множество вершин, E – множество дуг; TSP (Travelling Salesman Problem) – задача коммивояжёра; VRP (Vehicle Routing Problem) – задача маршрутизации обслуживающих бригад

Минимизация $J(V^*)$ обеспечивает выбор маршрута, который сокращает время и расстояние перемещения, исключает неблагоприятные участки, сохраняет посещение с высоким приоритетом ТОиР [124, 132, 149].

На рисунке 4.18 представлено геоизображение итогового маршрута ТОиР, полученного с помощью алгоритма.

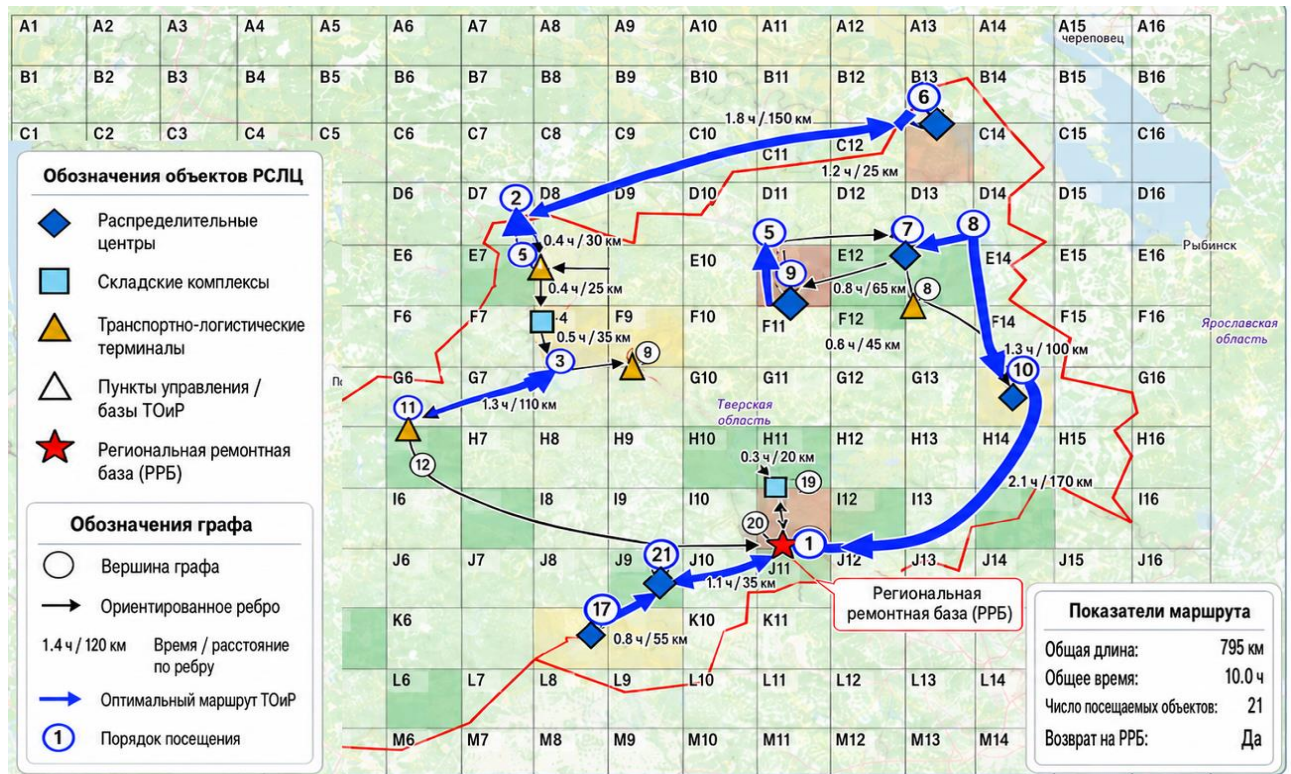


Рисунок 4.18 – Оптимальный маршрут ТОиР РСЛЦ, построенный на ориентированном графе с учетом факторов геомодели

В идеале, наряду с оптимальным экстремальным маршрутом, целесообразно генерировать множество «равнооптимальных» маршрутов для обеспечения территориальных альтернатив перемещения при осуществлении обслуживающей и ремонтной логистики.

4.5.6. Пространственно-содержательные результаты работы методики и связь с геоконтроллингом

Выходом процедуры является пространственно-содержательный план выполнения ТОиР на региональном уровне. Он включает маршрут на геоизображении, слой посещаемых ЛЦ, порядок обхода, перечень мероприятий, маршрутный лист, расчет длины и времени маршрута, список исключенных или нежелательных участков, а также журнал оснований: какие слои, прогнозы, приоритеты и ограничения использованы при расчете [112, 118, 119].

Результаты сохраняются в БД как версия маршрута, перечень представлен в таблице 4.2. Каждая версия связывается с моментом расчета, составом входных слоев, перечнем объектов, параметрами алгоритма и ответственным пользовате-

лем. После выполнения работ сведения о фактическом посещении, времени восстановления, заменах и выявленных дефектах возвращаются в эксплуатационно-событийный компонент геомодели. За счет этого реализуется обратная связь геоконтроллинга: маршрут не только строится по данным геомодели, но и обновляет ее после исполнения ТОиР.

Таблица 4.2 – Выходные результаты процедуры построения маршрута ТОиР

Результат	Форма представления	Назначение
Маршрут ТОиР	слой с линейными объектами на геоизображении РСЛЦ	пространственное отображение плана работ
Очередность посещения ЛЦ	таблица/маршрутный лист	планирование работы бригад
Перечень мероприятий	реестр рекомендаций	связь маршрута с выбранными воздействиями
Показатели маршрута	длина, время, число объектов, возврат на базу	контроль логистической выполнимости
Исключенные участки	слой ограничений/нежелательных дуг	обоснование обходов и корректировки пути
Журнал расчета	версия данных, параметры алгоритма, пользователь	воспроизводимость и аудит геоконтроллинга

Пространственно-содержательные рекомендации по ТОиР ТПС ОММ являются элементом геоконтроллинга территории [33, 139] как этапы оценки территориальной обстановки, так и выработки решения (плана).

4.6. Сравнительный анализ предиктивной и ситуационно-предиктивной методик. Рекомендации по применению

Для сопоставительной оценки качества прогнозирования неблагоприятных состояний используются критерии, приведенные в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Критерии оценки качества прогнозирования неблагоприятных состояний

Показатель	Обозначение и расчет	Содержательная интерпретация
Точность выявления нарушений	$\text{Точн_выяв} = \frac{TP}{TP + FP}$	Доля объектов, отнесенных методикой к проблемным, для которых на интервале $(t_0, t_0 + \Delta t]$ действительно зафиксировано неблагоприятное событие. Здесь TP – число истинно-положительных решений, FP – число ложноположительных решений.
Полнота выявления нарушений	$\text{Полнота_выяв} = \frac{TP}{TP + FN}$	Доля реально имевших место неблагоприятных событий на интервале $(t_0, t_0 + \Delta t]$, которые методика сумела выделить. Здесь FN – число ложноотрицательных.

Сводная мера	$F_1 = 2 \cdot \frac{\text{Точн_выяв} \cdot \text{Полнота_выяв}}{\text{Точн_выяв} + \text{Полнота_выяв}}$	Согласованная оценка качества прогнозирования, учитывающая одновременно точность и полноту выявления.
--------------	---	---

Они характеризуют корректность выделения проблемных объектов на прогнозном интервале $(t_0, t_0 + \Delta t]$ и позволяют сопоставить базовую предиктивную и предиктивно-геоинформационную методики [142, 143, 146]. Как следует из табл. 4.3, критерий Точн_выяв характеризует долю корректно выделенных проблемных объектов среди объектов, включенных методикой в прогнозный перечень, критерий Полнота_выяв – долю фактически реализовавшихся неблагоприятных событий, охваченных прогнозом, а показатель F_1 задает их согласованную интегральную оценку. Порядок расчета значений метрик приведен на рис. 4.19.



Рисунок 4.19 – Последовательность расчета значений метрик: t_0 – контрольный момент; Δt – горизонт прогноза; $s_i(t_0, \Delta t)$ – прогноз угрозы по объекту i ; $y_i(t_0, \Delta t)$ – фактическая метка (1 – неблагоприятное событие наступило, 0 – не наступило);

Выполнение последовательности расчета позволяет получить выполнить многокритериальное сравнение результатов работы программной методики.

4.6.1. Объекты верификации и их характеристики

Верификация предиктивной и предиктивно-геоинформационной методик выполнена на данных двух логистических центров, различающихся условиями эксплуатации и пространственной организацией территории. Первый объект использован как типовой вариант апробации: он характеризуется штатной конфигурацией размещения ИТСО и умеренной неоднородностью условий эксплуатации. Второй

объект выбран как объект с более сложными условиями эксплуатации: для него характерны более выраженная пространственная неоднородность территории и более сложная конфигурация зон контроля. Такая постановка позволяет оценить работу методик как в типовой, так и в усложненной эксплуатационной ситуации.

Основные характеристики объектов верификации приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Основные характеристики объектов верификации

Характеристика	ЛЦ №1	ЛЦ №2
Роль в апробации	типовой объект	объект с более сложными условиями эксплуатации
Пространственная организация территории	штатная	более сложная
Условия эксплуатации	умеренно неоднородные	выраженно неоднородные
Период исходных данных	3г	3г
Число геообъектов ИТСО, N_{obj}	27	40
Число событий эксплуатации, N_{ev}	21901	27376
Число контрольных моментов, N_{t0}	1081	1081
Горизонты прогноза, Δt , сут	7; 14	7; 14

В таблицу включены только параметры, непосредственно используемые при интерпретации результатов сопоставительной оценки: роль объекта в апробации, общий объем объектной и событийной базы, временной охват данных, число контрольных моментов и горизонты прогноза. Значения параметров используются для обеспечения сопоставимости расчетов по двум объектам (рис. 4.20).

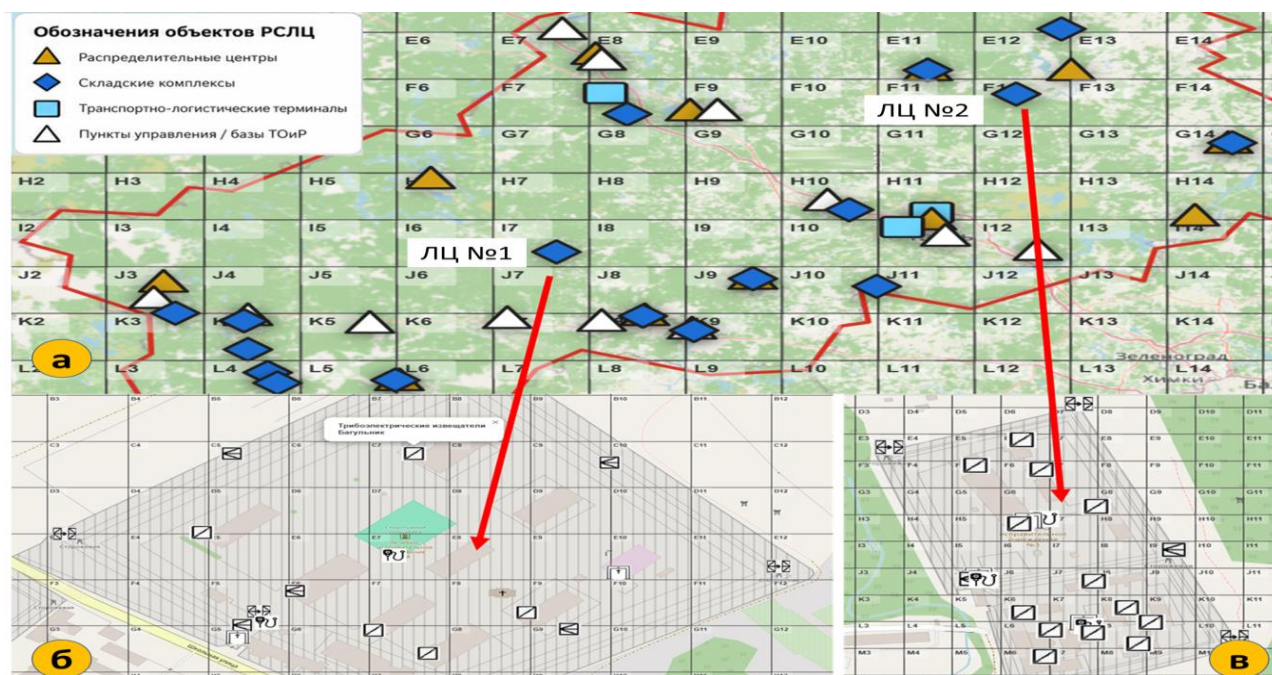


Рисунок 4.20 – РСЛЦ и выделенные для апробации отдельные логистические центры: а – геоизображение РСЛЦ; б – геоизображение ЛЦ № 1; геоизображение ЛЦ №2

Территориальные условия ЛЦ № 1 заключаются в равнинной местности, отсутствии участков подтопления, расположении в спокойной криминогенной, террористической обстановке, характеризуются низкой техногенной активностью.

4.6.2. Сравнительная оценка эффективности предиктивной и предиктивно-геоинформационной методик

Сопоставительная оценка выполнена на двух объектах верификации – ЛЦ №1 и ЛЦ №2, различающихся условиями эксплуатации и пространственной структурой размещения геообъектов. На выбранный контрольный момент t_0 формировался прогноз на горизонтах $\Delta t = 7$ и $\Delta t = 14$ суток.

Для каждого объекта на выбранный контрольный момент выполнен расчёт прогнозных оценок состояния геообъектов, после чего формировались два вида результатов: ранжированный перечень геообъектов по вероятности отказа и геовизуализация вероятностей угроз по ячейкам покрытия. Сопоставление качества прогнозирования выполнялось по критериям Точн_выяв, Полнота_выяв и F1 в одинаковых условиях по исходным данным, контрольным моментам и горизонтам прогноза. Результаты приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнение качества прогнозирования для базовой и предиктивно-геоинформационной методик

Объект	Горизонт прогноза, сут	Методика	Точн_выяв	Полнота_выяв	F1
ЛЦ №1	7	Базовая предиктивная	0,61	0,58	0,59
ЛЦ №1	7	Предиктивно-геоинформационная	0,72	0,61	0,66
ЛЦ №1	14	Базовая предиктивная	0,58	0,55	0,56
ЛЦ №1	14	Предиктивно-геоинформационная	0,68	0,56	0,62
ЛЦ №2	7	Базовая предиктивная	0,59	0,57	0,58
ЛЦ №2	7	Предиктивно-геоинформационная	0,71	0,60	0,65
ЛЦ №2	14	Базовая предиктивная	0,56	0,54	0,55
ЛЦ №2	14	Предиктивно-геоинформационная	0,66	0,56	0,60

Как следует из табл. 4.5, включение геоинформационной составляющей обеспечивает устойчивое повышение качества прогнозирования неблагоприятных состояний геообъектов для обоих объектов верификации. На горизонте 7 суток прирост сводной метрики F1 составляет 12%, на горизонте 14 суток – 10%. Различия между ЛЦ №1 и ЛЦ №2 не носят принципиального характера и определяются особенностями состава геообъектов и условий эксплуатации.

Для ЛЦ №1 и ЛЦ №2 базовая методика формирует ранжированный перечень геообъектов по вероятности отказа. Предиктивно-геоинформационная методика дополняет объектные оценки учётом геомодели, факторных признаков территории и ячеечной агрегацией результатов, что обеспечивает не только повышение качества выявления неблагоприятных состояний, но и их пространственную локализацию в виде геовизуализации вероятностей угроз. Результаты расчёта для ЛЦ №1 приведены на рис. 4.21. Слева дан ранжированный перечень геообъектов по вероятности отказа на горизонте прогноза. Справа приведена геовизуализация вероятностей угроз по ячейкам покрытия с наложением геообъектов ИТСО.

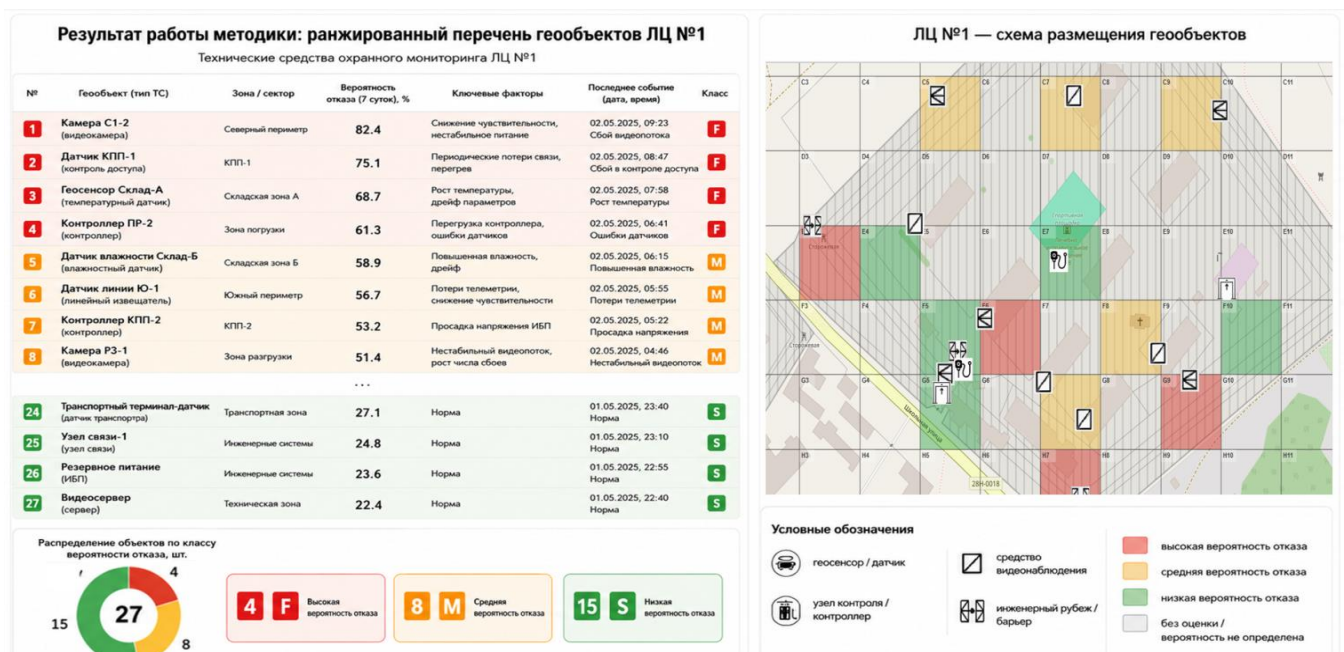


Рисунок 4.21 – Сводные результаты оценки эффективности, полученные с помощью программной методики для обстановки в ЛЦ №1

Для ЛЦ №1 в ранжированном перечне учтено 27 геообъектов. Из них 4 объекта отнесены к классу высокой вероятности отказа, 8 – к классу средней вероятности отказа, 15 – к классу низкой вероятности отказа. Неблагоприятные прогнозные

оценки распределены неравномерно и локализируются в ограниченном числе ячеек. Результаты расчёта для ЛЦ №2 представлены на рис. 4.22.

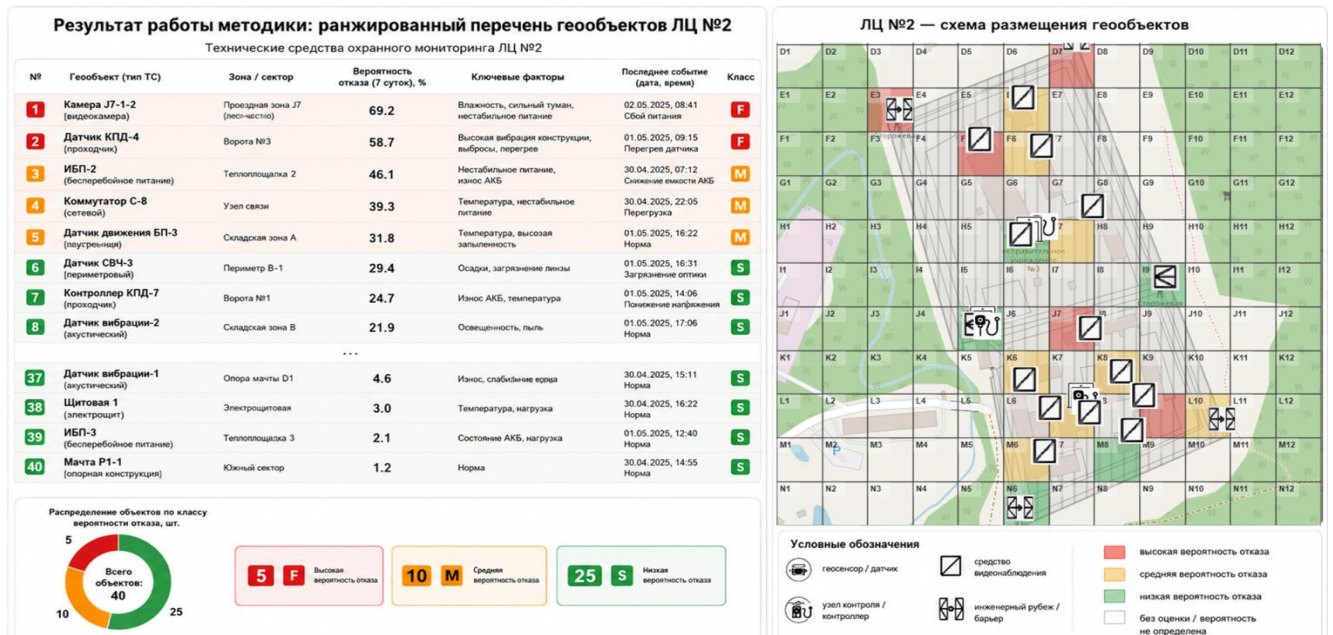


Рисунок 4.22 – Сводные результаты оценки эффективности, полученные с помощью программной методики для обстановки в ЛЦ №2

Для ЛЦ №2 в расчёт включено 40 геообъектов. Из них 5 объектов отнесены к классу высокой вероятности отказа, 10 – к классу средней вероятности отказа, 25 – к классу низкой вероятности отказа. По сравнению с ЛЦ №1 здесь наблюдается более протяжённое распределение неблагоприятных ячеек по территории. Как показано на рис. 4.23, предиктивно-геоинформационная методика для объектов верификации обеспечивает более высокие значения Точн_выяв и F_1 , чем базовая предиктивная схема.

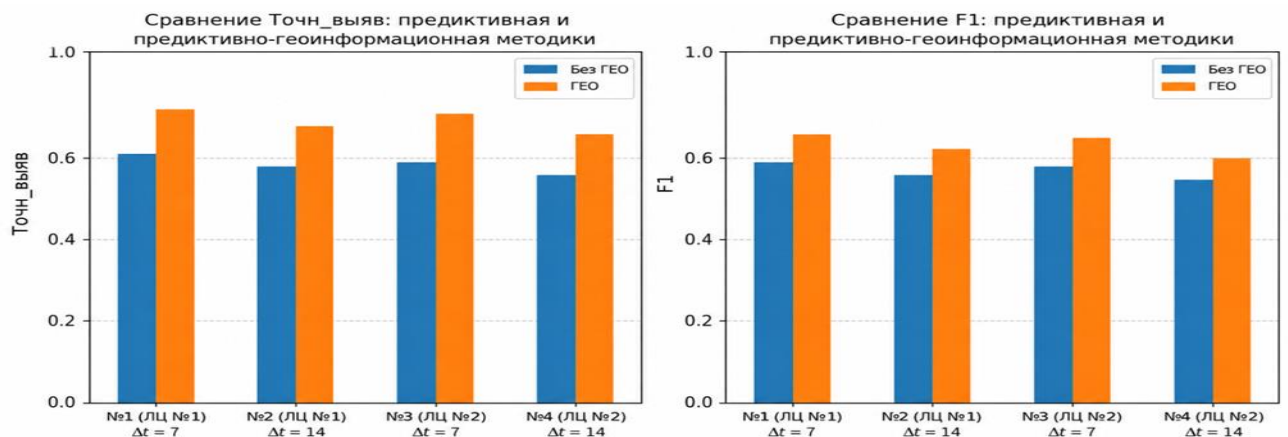


Рисунок 4.23 – Сравнение показателей эффективности работы методик по качеству прогноза: а – точности выявления отказов; б – F_1 (суммарная мера качества)

Для оценки эксплуатационного эффекта дополнительно выполнено сопоставление базовой предиктивной схемы и предиктивно-геоинформационной методики по показателям организации обслуживания [142, 145, 61, 84]. Оценивались: время выявления отказа; протяженность маршрута ТОиР.

Таблица 4.6. Сопоставление результатов работы базового регламентного подхода программной методики по качеству логистики ТОиР ОММ РСЛЦ

Показатель	Предиктивный подход	Предиктивно-геоинформационная методика	Относительное изменение
Среднее время выявления отказа, мин	150	138	8%
Средняя протяжённость маршрута ТОиР, км	72	64,6	10%

Сопоставление выполнено для предиктивного подхода, при котором очередность контроля и обслуживания задается без учета пространственной локализации угроз, доступности объектов и условий прохождения маршрутов, и для предиктивно-геоинформационной методики, в которой используются ранжированный перечень геообъектов, геовизуализация вероятностей угроз и маршрут ТОиР, построенный с учетом территориальных ограничений. По результатам расчета установлены сокращение среднего времени выявления отказа с 150 до 138 мин, сокращение средней протяженности маршрута ТОиР с 72 до 64,6 км. Это соответствует относительному улучшению на 8% и 10%.

Включение разработанной ситуационно-предиктивной методики в процесс эксплуатации ОММ РСЛЦ позволит повысить эффективность контроля и поддержания функциональной и пространственно-структурной целостности по сравнению с традиционными предиктивными и регламентными подходами.

Выводы по разделу 4

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

2. 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 доступность объектов и условий прохождения маршрутов.

3. Апробация геоинформационно-программной методики позволила сформировать рекомендации по применению разработанного в диссертации модельно-методического аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

2. Разработана геомодель обстановки, 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 условий природной 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 геоизображения 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.

5. Направления дальнейших исследований представляются на следующих направлениях: развития разработанного геоинформационного модельно-методического аппарата применительно к поддержанию технической готовности ГТРП, в том числе платформ дистанционного зондирования Земли и обеспечивающей их инфраструктуры; расширения геомодели за счёт представления ГТРП, а также мобильных платформ ДЗЗ как динамических геообъектов, пространственная

компонента которых учитывает их перемещения и обменные протоколы; расширения совместно учитываемых в оценочных отношениях пространственно-временных условий функционирования, характеристик геосреды, режимов съёмки и эксплуатационной нагрузки при формировании геодеградационных оценок деградации и отказов; развития гибридных прогностических моделей и интеллектуальных методов для ситуационно-предиктивной оценки состояния ГТП, в том числе платформ ДЗЗ, локализации зон и интервалов повышенного риска и формирования пространственно-содержательных рекомендаций по контролю, техническому обслуживанию, резервированию и восстановлению их функций; формирования динамических моделей активной контроллинговой геовизуализации, мультимедийных представлений прогнозного состояния платформ и зон наблюдения, ментальных геоизображений и онтологического описания отношений «платформа - аппаратура - зона съёмки - геосреда - техническое состояние - управляющее воздействие» как основы геоинформационной поддержки эксплуатации систем ДЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аликулов, А. Б., Эшмурадов, Д. Э. Анализ мониторинга состояния природной среды с применением ГИС-технологий // Теория и практика современной науки. – 2023. – № 1 (91). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-monitoringa-sostoyaniya-prirodnoy-sredy-s-primeneniem-gis-tehnologiy> (дата обращения: 20.05.2026).
2. Андреева, Е. А. Вариационное исчисление и методы оптимизации. [Текст]: учебн. пособие. / Андреева, Е. А., Цирулева, В. М. / – Тверь: Твер. гос. ун-т, -2001. – 576 с.
3. Андреева, Е. А. Оптимальное управление динамическими системами [Текст]: учеб. пособие: в 2 ч. – Тверь: Изд-во Тверского гос. ун-та, 2016. ч.2–188 с.
4. Андреева, О. А. Геоинформационное проектирование трехмерных объектов / О. А. Андреева, С. Г. Дышленко // ИТНОУ: Инновационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – № 1 (11). – С. 39–46.
5. Анохин, П. К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем / П. К. Анохин. – М.: Директ-Медиа, 2008. – 131 с.
6. Анфилатов, В. С., Авраменко, В. С., Пантюхин, О. И. Теоретические основы автоматизации управления войсками и связью. Часть 2. Основы построения и функционирования систем автоматизации управления войсками и связью: учебное пособие. СПб.: ВАС, 2015. 304 с.
7. Анфилатов, В. С., Авраменко, В. С., Пантюхин, О. И. Теоретические основы автоматизации управления войсками и связью: учебное пособие. СПб.: ВАС, 2015. 304 с.
8. Аргучинцев А. В., Дыхта В. А., Срочко В. А. Оптимальное управление: нелокальные условия, вычислительные методы и вариационный принцип максимума // Известия вузов. Математика. 2009. № 1. С. 3–43.
9. Бабкин, А. А. Инженерно-технические средства охраны и надзора: учебное пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2020. – 184 с.
10. Беленко В. В. Мониторинг объектов природно-экологического каркаса застраиваемых территорий по материалам космических съёмок // Теоретическая и прикладная экология. – 2019. – № 3. – С. 21–27.
11. Беляев А. К. Методы оценки эффективности ИТСО с применением современных информационных технологий / Д. Ю. Чураков, Е. Г. Царькова, А. К. Беляев // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сборник материалов Международной научно-практической конференции: в 2 т., Воронеж, 20–21 мая 2020 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2020. – С. 392–397.
12. Беляев А. К., Чураков Д. Ю., Царькова Е. Г. Перспективы применения методов искусственного интеллекта в системах охранного телевидения учреждений

УИС // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы. сборник материалов Международной научно-практической конференции: в 2 т. Воронеж, 2020. – С. 398–405.

13. Беляев, А. К. К вопросу реализации интеграционных механизмов при разработке информационных систем специального назначения // Безопасность. Управление. Искусственный интеллект. – 2022. – Т. 2. № 2 (2). С. 27–32.

14. Беляев, А. К. Применение генетического алгоритма для оптимального размещения технических средств обнаружения на объекте защиты // Информационные технологии в УИС. – 2019. – № 1. – С. 49–56.

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

16. Беляев, А. К., Миляков, Д. Ф., Биденко, С. И., Травин, С. В., Звездарев, Д. В., Храмов, И. С. Геоинформационный подход к реализации совместного территориально-предиктивного анализа состояния охранных мониторингов местности // Информация и космос. – 2025. – № 2. – С. 147–154.

17. Беляев, А. К., Мухин, Ю. К. Технические аспекты интеграции ведомственных информационных систем // V Международный пенитенциарный форум "Преступление, наказание, исправление" (приуроченный к проведению в 2021 году в Российской Федерации Года науки и технологий). Сборник тезисов выступлений и докладов участников. В 9-ти томах. Рязань, 2021. – С. 132–136.

18. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г. Алгоритмы логической обработки сигналов как инструмент повышения эффективности охранных систем в уголовно-исполнительной системе // IV Международный пенитенциарный форум "преступление, наказание, исправление". Материалы международных научно-практических конференций и круглых столов, к 140-летию уголовно-исполнительной системы России и 85-летию Академии ФСИН России. В 10 т. – 2019. – С. 263–270.

19. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г. Возможности применения методов искусственного интеллекта в формализации и обработке данных при оценке эффективности оборудования комплексами ИТСО охраняемых объектов УИС // информатизация и техническое обеспечение уголовно-исполнительной системы Российской Федерации: проблемы, решения и перспективы развития. Тверь, 2021. – С. 41–46.

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

21. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г. Перспективы применения логических витрин данных для организации модульной системы формирования слоя данных информационных систем УИС // Информационные технологии в УИС. – 2021. – № 1. – С. 75–82.

22. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г. Ставка на качество: прогнозирование надежности технических средств как инструмент подбора охранных систем // Информационные технологии в УИС. – 2020. – № 1. – С. 13–26.

23. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г. Техническая диагностика оборудования с применением технологий интеллектуального анализа данных // Информационные технологии в УИС. – 2021. – № 2. – С. 12–22.

24. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г., Чураков, Д. Ю. Методы оценки эффективности инженерно-технических средств охраны и надзора УИС с применением информационных технологий // Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний. Тверь, 2019.

25. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г., Чураков, Д. Ю. Модульная система формирования слоя данных как инструмент построения единого информационного пространства ФСИН России // Информационные технологии в УИС. – 2021. – № 1. – С. 6–13.

26. Беляев, А. К., Царькова, Е. Г., Чураков, Д. Ю., Зыбин, Д. Г. Программное средство учета номенклатуры инженерно-технических средств охраны для анализа эффективности комплексной системы безопасности объектов (ПС "БАСТИОН"): Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020619844, 25.08.2020. Заявка № 2020618931 от 11.08.2020.

27. Беляев, А. К., Чураков, Д. Ю., Царькова, Е. Г. Точный расчет: возможности автоматизации при проведении оценки эффективности системы безопасности охраняемых объектов УИС // Информационные технологии в УИС. – 2020. – № 2. – С. 10–21.

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

29. Беляев, А.К., Царькова, Е.Г., Царьков, В.В. Программное средство "DATA MINING STUDIO": Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2024663590, 07.06.2024. Заявка № 2024662215 от 29.05.2024.

30. Беляев, А.К., Царькова, Е.Г., Чураков, Д.Ю. Интеллектуализация принятия решений в системах физической защиты охраняемых объектов // Пенитенциарная безопасность: национальные традиции и зарубежный опыт. материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Самарский юридический институт ФСИН России. Самара, 2021. – С. 245–246.

31. Бенгерт, А. А., Биденко, С. И., Доценко, С. М., Звездарев, Д. В., Миляков, Д. Ф., Михеев, В. Л., Храмов, И. С. Геоконтроллинг и моделирование рисков территории / под ред. проф. С. И. Биденко: Монография – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – 263 с.
32. Берлянт А.М. Картография: учебник для вузов. – М.: Аспект Пресс, 2002. – 336 с. – ISBN 5-7567-0142-7.
33. Биденко, С. И., Самотонин, Д. Н., Яшин, А. И. Геоинформационные модели и методы поддержки управления: Монография. – СПб.: Изд-во ФВУ ПВО, 2003. – 224 с.
34. Блиновская, Я. Ю., Задоя, Д. С. Введение в геоинформационные системы: учебное пособие. – М.: Форум: НИЦ Инфра-М, 2013. – 112 с.
35. Богатырев, В. Е., Подмарькова, Е. М. Создание распределенной системы оперативного мониторинга объектов ЖКХ // НиКа. – 2011. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozдание-raspredelennoy-sistemy-operativnogo-monitoringa-obektov-zhkh> (дата обращения: 14.05.2026).
36. Болдырев, Б. Ю., Бухарицин, П. И. Использование современных ГИС-технологий в решении задач гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. – 2007. – № 2. – С. 48–56.
37. Борисов, Д. А. Методика определения пространственно-временного состояния техногенных объектов / Д. А. Борисов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – № 7. – С. 14–18.
38. Борисовская А. В. Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками // T-Comm. 2023. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-sensornyh-setey-s-zavisimymi-istochnikami> (дата обращения: 16.05.2026).
39. Бородин, Е. Л., Беляев, А. К., Биденко, С. И., Звездарев, Д. В., Михеев, В. Л. Подход к организации геоинформационной поддержки аппарата предиктивной аналитики технического состояния систем охранных мониторингов местности // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 2 (115). С. 24–31.
40. Бородин, Е. Л., Беляев, А. К., Биденко, С. И., Травин, С. В. Ситуационно-предиктивное моделирование обстановки в системе охранных мониторингов территориальных объектов в условиях воздействия внешних факторов // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 3 (116). С. 44–52.
41. Бородин, Е. Л., Беляев, А. К., Звездарев, Д. В., Биденко, С. И. Геоинформационная методика ситуационно-предиктивной оценки территориальных систем охраны в условиях деструктивных воздействий // Эксплуатация морского транспорта. – 2025. – № 4 (117). С. 46–50.

42. Братков В.В., Астанин Д.С., Бекмурзаева Л.Р. Картографирование современных климатических изменений Северного Кавказа на основе данных ДЗЗ низкого пространственного разрешения // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2022. Т. 66. № 6. С. 82–96.
43. Броневи́ч, А. Г. Принятие решений, основанное на неточных вероятностях, и агрегирование источников информации / А. Г. Броневи́ч, И. Н. Розенберг // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2023. – Т.18, № 1. – С. 5–27.
44. Булгаков, С. В. Геоинформационное моделирование: учебное пособие / С. В. Булгаков. – М.: МАКС Пресс, 2019. – 68 с.
45. Булгаков, С. В. Прикладная геоинформатика: учебное пособие / С. В. Булгаков. – М.: МАКС Пресс, 2019. – 71 с.
46. Бурков, В. Н. Введение в теорию управления организационными системами: учебник / В. Н. Бурков, Н. А. Коргин, Д. А. Новиков; под ред. Д. А. Новикова. – 2-е изд. – М.: URSS: Либроком, 2017. – 264 с.
47. Бурков, В. Н. Механизмы управления: учебное пособие / В. Н. Бурков, И. В. Буркова, М.В. Губко [и др.]; под ред. Д.А. Новикова.– М.: Ленанд, 2011. –192 с.
48. Бурлов, В. Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов (Модели. Технологии) / В. Г. Бурлов. – СПб.: Факультет комплексной безопасности СПбГПУ, 2007. – 270 с.
49. Бурлов, В. Г. Синтез модели и способов функционирования системы в условиях конфликта / В. Г. Бурлов, Е. А. Зенина, А. В. Матвеев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – № 3(150). – С. 72–79.
50. Бычков, А. Г. Использование геоинформационных систем для решения прикладных задач // Проблемы Науки. – 2017. – № 23 (105). – С. 24–27.
51. Васильев, Ю. С. Теории систем и системный анализ: истоки и перспективы / Ю.С. Васильев, В.Н. Волкова, В.Н. Козлов // SAEC. – 2021. – № 1.–С. 7–29.
52. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для втузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
53. Верещака Т. В., Иванова А. А., Степанченко А. Л. Специализированные топографические карты: становление, тенденции развития научного направления, технология создания // Геодезия и картография. – 2024. – № 7. – С. 12–24.
54. Викторова, В. С., Степанянц, А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. – М., 2013. – 219 с.
55. Вишневский, В. М., Горбунова, А. В. Применение методов машинного обучения к решению задач теории массового обслуживания. Информационные технологии и вычислительные системы, 2021, № 4, С. 70–82.

56. Власов, А. И., Григорьев, П. В., Кривошеин, А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2(22). С. 26–35. DOI 10.21685 / 2307–4205–2018–2-4.

57. Власова, Л. В. Геоинформационные аналитические модели комплексной оценки природных опасностей для Единой системы газоснабжения России / Л. В. Власова, Г. С. Ракитина, С. И. Долгов // Вести газовой науки. – 2017. – № 1 (29). – С. 57–70.

58. Волхонский, В. В. Основные положения концепции обеспечения безопасности объектов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.-2011.-№ 3(73).-С. 116–121.

59. Галажинская, О. Н. Теория случайных процессов: в 2 ч. Ч. 1 / О. Н. Галажинская, С. П. Моисеева. – Томск: ТГУ, 2015. – 128 с.

60. Гармаш, А. Н. Экономико-математические методы и прикладные модели: учебник / А. Н. Гармаш, И. В. Орлова, В. В. Федосеев; под. ред. В. В. Федосеева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 328 с.

61. Гарсия М. Проектирование и оценка систем физической защиты / М. Гарсия. М.: Мир, 2003. 386 с.

62. Горячев, А. С. Обзор алгоритмов машинного обучения в задачах предиктивного анализа работы технологического оборудования // Инновационная наука. – 2024. – № 10–1. – С. 14–19.

63. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

64. ГОСТ 18322–2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017.

65. ГОСТ 24.701–86 Надежность автоматизированных систем управления. Общие положения. М.: Изд-во стандартов, 1986. 17 с.

66. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартинформ, 2017.

67. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2021.

68. ГОСТ Р 51558–2014. Средства и системы охранные телевизионные. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 30 с.

69. ГОСТ Р 52435–2015. Технические средства охранной сигнализации. Классификация. Общие технические требования и методы испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 34 с.

70. ГОСТ Р 54101–2010. Средства автоматизации и системы управления. Средства и системы обеспечения безопасности. Техническое обслуживание и текущий ремонт. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 28 с.

71. Гришко, А. К. Геоинформационные системы управления многоуровневыми пространственно-распределенными объектами / А. К. Гришко, С. А. Бростилов, М. В. Бойцова [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2018. – Т. 2. – С. 312–315. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geoformatsionnye-sistemy-upravleniya-mnogourovnevnyimi-prostranstvenno-raspredelennymi-obektami> (дата обращения: 20.05.2026).

72. Гусейн-Заде С.М., Тикунов В.С. Создание анаморфированных изображений для географических исследований // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1992. № 4. С. 43–52.

73. Дали, Ф. А. Методологические аспекты обследования объектов защиты на соответствие требованиям пожарной безопасности в проблемно-ориентированных системах управления // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 7(79). – URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7114>.

74. Диагностика и надежность автоматизированных систем [Электронный ресурс]: электронный образоват. контент в системе дистанц. обучения Moodle / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. А. В. Алексеев. – Электрон. текстовые и граф. дан. – Самара, 2013.

75. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – СПб.: Росгидромет, 2017. – 106 с.

76. Дубровин, А. С., Анциперов, Д. Н. Практическое значение технического обслуживания ИТСО на объекте охраны УИС // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Т. 1. Иваново, 2022. – С. 205–207.

77. Душкин, А. В., Цветков, В. В. Вопросы моделирования состояний инженерно-технических средств охраны и надзора // Вестник Воронежского института ФСИН России, 2014, № 3, С. 28–31.

78. Евтушенко, Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации [Текст]: уч. пособ. – М.: Наука, 1982–432 с.

79. Заболотский, В.П. Математические модели в управлении: учебное пособие/ В.П. Заболотский, А.А. Оводенко, А. Г. Степанов.– СПб.: ГУАП, 2001.–196 с.

80. Звежинский, С. С., Иванов, В. А., Парфенцев, И. В. Моделирование функциональной эффективности системы охраны периметра территориально распре-

ленного объекта // Спецтехника и связь. – 2010. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-funktsionalnoy-effektivnosti-sistemy-ohrany-perimetra-territorialno-raspredelennogo-obekta> (дата обращения: 20.05.2026).

81. Звездарев, Д. В., Ефремов, Д. А., Биденко, С.И., Беляев, А. К. Геоинформационная модель состояния охранных мониторингов местности с учетом территориально-предиктивных и стохастических факторов в условиях пространственно-временной неопределенности // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Санкт-Петербург, 2025. – С. 42–45.

82. Звездарев, Д. В., Ефремов, Д. А., Биденко, С. И., Беляев, А. К. Геоинформационная методика ситуационно-предиктивной оценки состояния территориальных охранных систем деструктивного региона // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Санкт-Петербург, 2025. – С. 39–42.

83. Звездарев, Д. В., Ефремов, Д. А., Биденко, С. И., Беляев, А. К. Геоконтроллинг: подходы к реализации поддержки управления территориальной активностью // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2025). Материалы XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Санкт-Петербург, 2025. – С. 143–145.

84. Зенов, А. Ю. Комплексный подход к обнаружению, классификации и распознаванию нарушителя на охраняемой территории // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2012, № 2. – С. 23–32.

85. Зенов, А. Ю., Мясникова, Н. В. Применение нейросетевых алгоритмов в системах охраны периметра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2012, № 3. – С. 15–24.

86. Зотов, Р. В. Геоинформатика: учебное пособие / Р. В. Зотов. – Омск: Сибирский ГАДУ, 2020. – 153 с.

87. Иванов, И. В. Охрана периметров – 2. М.: Паритет Граф, 2000. 196 с.

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

89. Калинин, Н. А. Географические информационные системы в метеорологии: методическое пособие / Н. А. Калинин, А. А. Смирнова, А. Л. Ветров. – Пермь: Пермский гос. ун-т, 2007. – 367 с.

90. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др. Геоинформатика: учебник: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. В.С. Тикунова. 3-е изд. М.: Академия, 2010. 400 с.

91. Карпик, А. П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе: монография / А. П. Карпик, А. Г. Осипов, П. П. Мурзинцев. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 279 с.

92. Каштанов, В. А., Медведев, А. И. Теория надежности сложных систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Физматлит, 2010. – 608 с.
93. Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В. Аэрокосмические методы географических исследований. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2011. – 410 с.
94. Кудж, С. А. Геоинформатика: монография / С. А. Кудж, В. Я. Цветков. – М.: Макс Пресс, 2019. – 223 с.
95. Кужелев, Г.П. Геоинформационные технологии в управлении транспортом/Г.П. Кужелев//Перспективы науки и образования.–2014.–№ 4.–С. 157–161.
96. Лецкий, Э.К. Модели информационных процессов на основе дискретных процессов Маркова: уч. пособие / Э. К. Лецкий.– М.: МИИТ, 2014. – 25 с.
97. Лисицкий, Д.В. Трехмерная компьютерная картография: монография / Д.В. Лисицкий, П.Ю. Бугаков, А. Т. Нгуен.– Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – 178 с.
98. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2008. 423 с.
99. Магауенов, Р. Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: Учеб. пособие. М.: Горячая линия – Телеком. 2004.
100. Майоров, А. А. Геореференция как применение пространственных отношений в геоинформатике / А. А. Майоров, В. Я. Цветков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 3. – С. 87–89.
101. Майоров, А. А. Развитие информатики в научном направлении геоинформатика / А. А. Майоров // МГТУ МИРЭА. – 2014. – № 1(2). – С. 42–57.
102. Мальков, М. В. О надежности информационных систем: учебное пособие. – М.: Логос, 2013. – 152 с.
103. Матвеев, А. И. Математические методы системного анализа: учеб. пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2021. – 128 с.
104. Матерухин А. В. Теоретические основы и методология обработки потоков пространственно-временных данных : автореф. дис. д-ра техн. наук. – М., 2018. – 48 с.
105. Математическая теория оптимальных процессов [Текст]: монография / Понтрягин, Л. С. [и др.]. – М.: Физматгиз, 1961–392 с.
106. Милютин А. А., Дмитрук А. В., Осмоловский Н. П. Принцип максимума в оптимальном управлении. М.: Изд-во Мехмата МГУ, 2004.
107. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 468 с.
108. Окунев, И. Ю. Глобальная и локальная пространственная автокорреляция: методы расчета и картографирования // Псковский регионологический журнал. – 2024. – Т. 20. – № 2. – С. 170–191.

109. Орлов П. Ю., Журкин И. Г., Камынина Н. Р., Литвиненко М. В., Васютинский И. Ю., Непоклонов В. Б. Анализ опыта оценки природно-ресурсного потенциала и устойчивого развития территорий // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2023. – Т. 67, № 4. – С. 45–64.
110. Павлов, Ю. В., Королева, Е. Н. Пространственные взаимодействия: оценка на основе глобального и локального индексов Морана // Пространственная экономика. – 2014. – № 3. – С. 95–110.
111. Палюх Б.В., Мироненко А.С. Надёжность и эффективность экономических информационных систем. Тверь: Изд-во ТГТУ, 2003. 144 с.
112. Панамарев, Г. Е., Биденко, С. И. Геоинформационная поддержка управления сложными территориальными объектами и системами: Монография. – Новороссийск: Изд-во ГМА, 2011. – 202 с.
113. Перцик Е.Н. Геоурбанистика: учебник для вузов. 2-е изд., стер. М.: Юрайт, 2022. 481 с.
114. Попович В.В., Потапычев С.Н., Панькин А.В., Шайда С.С., Воронин М.Н. Интеллектуальная ГИС в системах мониторинга // Труды СПИИРАН. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 172–184.
115. Применение нейронных сетей для мониторинга безопасности информационных систем. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyronnyh-setey-dlya-monitoringa-bezopasnosti-informatsionnyh-sistem>, свободный – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.05.2026).
116. Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России <http://igras.ru/sites/default/files/>
117. Рабинер, Л. Р. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition / L. R. Rabiner // Proceedings of the IEEE. – 1989. – Vol. 77, no. 2. – P. 257–286. – DOI 10.1109/5.18626.
118. Розенберг, И. Н. Методы и алгоритмы создания интеллектуальных геоинформационных систем для управления транспортными процессами: монография / И. Н. Розенберг, С. Л. Беляков, А. В. Боженюк [и др.]; под редакцией И. Н. Розенберга. – М.: ВИНТИ РАН, 2019. – 289 с.
119. Рыков, В. В. Управляемые системы массового обслуживания // Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. – 1975. – Т. 12. – С. 43–153.
120. Рычаго, М. Е. Аналитические методы оценки эффективности оборудования комплексом ИТСО охраняемых объектов уголовно-исполнительной системы Российской Федерации / М. Е. Рычаго, А. В. Хорошева // Ведомости уголовно-исполнительной системы. – 2021. – № 11(234). С. 73–80.

121. Савиных В. П., Майоров А. А., Матерухин А. В. Построение пространственной модели загрязнения воздуха на основе использования потоков данных от сетей геосенсоров // Геодезия и картография. – 2017. – № 12. – С. 39-43.
122. Сай Ван Квонг, Щербаков, М. В. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – № 2. – С. 186–194.
123. Саламатин, А. А. Алгоритм поддержки принятия решений в задачах выбора элементов системы безопасности объектов недвижимости / А. А. Саламатин // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 5. – С. 275–286. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6999.
124. Соколова, О. А., Чураков, Д. Ю., Беляев, А. К., Калач, А. В., Татаркин, И. Н. Новые подходы к многокритериальному оцениванию альтернатив при принятии решений // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. сборник трудов Международной научной конференции. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». Воронеж, 2021. – С. 1774–1782.
125. Сугак, Е. В. Надежность технических систем / Е. В. Сугак, Н. В. Василенко, Г. Г. Назаров [и др.] – Красноярск: МГП «Раско». – 2001. – 608 с.
126. Тимофеев, В. И., Щеглов, Д. К. Комплексный анализ влияния погодноклиматических условий на эксплуатацию сложных военно-технических систем и объектов наземной инновационной инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации // Инновации. – 2019. – № 4 (246). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-analiz-vliyaniya-pogodno-klimaticheskikh-usloviy-na-ekspluatatsiyu-slozhnyh-voenno-tehnicheskikh-sistem-i-obektov> (дата обращения: 20.05.2026).
127. Управление контролем целостности эталонной автоматизированной информационной системы вневедомственной охраны / А. В. Душкин, М. А. Жукова, С. В. Родин, В. И. Сумин // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2013. – № 1 с. 51–55.
128. Учаев Д.В., Учаев Дм.В. Разработка онтологии семантического содержания мультимасштабных электронных топографических карт. Ч. 2. Технология реинжиниринга и правила именования понятий и атрибутов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 1. С. 70–80.
129. Царькова, Е. Г., Беляев, А. К. Методы подбора технических средств в системах охранного телевидения УИС, решающих задачи биометрической идентификации // Актуальные вопросы информатизации федеральной службы исполнения наказаний на современном этапе развития уголовно-исполнительной системы / сборник материалов круглого стола. Тверь, 2020. – С. 131–148.

130. Царькова, Е. Г., Беляев, А. К. Надежность как показатель эффективности системы безопасности охраняемого объекта УИС // Информационные технологии в УИС. – 2019. – № 3. – С. 11–29.
131. Царькова, Е. Г., Беляев, А. К. Применение методов обработки экспертной информации при определении программного продукта для имитационного моделирования охраняемых объектов УИС // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х томах. Ответственный за выпуск Д. Г. Зыбин. – 2020. – С. 384–390.
132. Царькова, Е. Г., Беляев, А. К., Попов, Н. Н. Программное средство «бастион» как инструмент поддержки принятия решений в работе сотрудников службы инженерно-технического обеспечения и вооружения УИС // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС. сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Воронеж, 2021. – С. 290–296.
133. Цветков, В. Я. Логистическая геоинформатика: монография / В. Я. Цветков, С. В. Булгаков. – М.: МАКС Пресс, 2023. – 189 с.
134. Ширшиков, А.С., Лянденбургский, В.В., Белоковылский, А.М. Оценка надежности технических систем: уч. пособие. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 240 с.
135. Шубинский, И. Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. – М.: Журнал «Надежность», 2012. – 216 с.
136. Экономическая география: история, теория, методы, практика. / Саушкин Ю.Г. // М.: Мысль, 1973. 557 с.
137. Юдина Т. Н., Богомоллова А. В., Петухова О. В., Вайншток А. П. ГИС-технологии для социально-экономических исследований // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 4.
138. Юсупова, Н. И. Модели, методы и инструменты при создании цифровых двойников. – М.: УГАТУ, 2022. – 123 с.
139. Якушев, Д. И., Биденко, С. И., Геоинформационные управляющие системы и технологии: Монография. – СПб.: Изд-во СПбУ МВД, 2014. – 248 с.
140. Янкелевич С.С., Кухаренко Е.Л. Методологическое обоснование содержания, структуры и программной реализации базы геопространственных знаний территориальных образований // *Геодезия и картография*. 2024. № 9. С. 33–45.
141. Ao S.-I., Gelman L., Karimi H. R., Tiboni M. Advances in Machine Learning for Sensing and Condition Monitoring // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 23. – P. 12392. – DOI: 10.3390 / app122312392.
142. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. – New York: Springer, 2006. – 738 p.

143. Boros M., Velas A., Soltes V., Dworzecki J. Influence of the environment on the reliability of security magnetic contacts // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 1. P. 1–16. DOI: 10.3390 / s22010016.
144. Breznická A., Kohutiar M., Krbat'a M., Eckert M., Mikuš P. Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties // *Systems*. – 2023. – Vol. 11, No. 12. – P. 556. – DOI: 10.3390 / systems11120556.
145. Fazzini P., Montuori M., Pasini A., Cuzzucoli A., Crotti I., Campana E., Petracchini F., Dobricic S. Forecasting PM10 Levels Using Machine Learning Models in the Arctic: A Comparative Study // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – DOI: 10.3390 / rs15133348.
146. Hastie, T. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*/T. Hastie, R. Tibshirani –2nd ed.–New York: Springer, 2009.– 745 p.
147. Parra L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – P. 8045. – DOI: 10.3390 / app12168045.
148. Shirali, G. A. A framework for quantitative assessment of socio-technical resilient systems using Multiple Criteria Decision Making (MCDM): a case study in an oil site / G. A. Shirali, Y. T. Birgani, D. Afshari, L. M. Salahi // *Iran Occupational Health*. – 2020. – Vol. 17, no. 1.
149. Tamaloussi N., Bouzaouit A. Study of Reliability in a Repairable System by Markov Chains // *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 12. – P. 66–76. – DOI: 10.2478 / auseme-2020–0005.
150. Tsarkova E., Belyaev A., Churakov D., Andreeva E. Reliability forecasting for optimal planning of measures for maintenance of security systems of transport infrastructure facilities // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – C. 012090.
151. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y., Andreeva E. Technical diagnostics of equipment using data mining technologies // *Safety in Aviation and Space Technologies. Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century"*. Cep. "Lecture Notes in Mechanical Engineering" Cham, 2022. – C. 345–356.